

AKTİF GÖRÜNÜM MODELİNE DAYALI GÜRBÜZ YÜZ HİZALAMA

**DOKTORA TEZİ
Fatih KAHRAMAN**

Ana Bilim Dalı : İleri Teknolojiler

Programı : Bilgisayar Bilimleri

KASIM 2009

AKTİF GÖRÜNÜM MODELİNE DAYALI GÜRBÜZ YÜZ HİZALAMA

DOKTORA TEZİ
Fatih KAHRAMAN
(704012001)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2008

Tezin Savunulduğu Tarih : 06 Kasım 2009

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Muhittin GÖKMEN
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Bilge GÜNSEL (İ.T.Ü.)
Prof. Dr. Fikret GÜRGEN (B.Ü.)
Doç. Dr. Zehra ÇATALTEPE (İ.T.Ü.)
Yrd. Doç. Dr. A. Şima ETANER-UYAR (İ.T.Ü.)

KASIM 2009

ÖNSÖZ

Doktora tez konumun seçilmesinden, sonlandırılmasına kadar geçen süre içerisinde benden her türlü destek, yardım ve ilgisini esirgemeyen Değerli Hocam Prof. Dr. Muhittin GÖKMEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın her aşamasında büyük özveri göstererek yardımcı olan Dr. Binnur KURT'a teşekkürü bir borç bilirim. Doktora tez izleme komitesinde görev alarak çalışmalarına katkı sağlayan Prof. Dr. Bilge GÜNSEL ve Yrd. Doç Dr. A. Şima ETANER-UYAR'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin Aktif Görünüm Modeli ile ilgili bölümlerinin hazırlanmasındaki katkılarından dolayı Dr. Mikkel B. STEGMANN'a, yine çalışmalarım sırasında bana yol gösteren Prof. Dr. Rasmus LARSEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin yedinci bölümüne katkılarından dolayı Dr. C. Deniz MENDİ'ye teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca beni her konuda destekleyen ve her zaman yanımda olan ailemin tüm bireylerine sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Şüphesiz çalışmanın içerdiği tüm eksikliklerden ve olası hatalardan sadece ben sorumluyum.

Kasım 2009

Fatih KAHRAMAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
SEMBOLLER	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Organizasyonu	3
1.2 Tezin Amacı	6
1.3 Tezin Katkısı	6
1.4 Yazılım ve Verilerin Paylaşımı	7
1.5 Literatür Özeti	7
2. ŞEKİL ve DOKU MODELLEME	29
2.1 Şekil Modelleme	29
2.1.1 Şekil hizalama	30
2.1.2 Şekil değişimlerinin modellenmesi	32
2.2 Doku Modelleme	39
2.2.1 Doku normalizasyonu	43
3. AKTİF GÖRÜNÜM MODELİ	45
3.1 Görünümün Tanımı	45
3.2 AGM En İyi İyileme Problemi	46
3.3 AGM Arama ve Model Uydurma	47
3.4 Görünüm Modelinin Oluşturulması	48
4. AYRIT TEMELLİ YENİ BİR YAKLAŞIM	51
4.1 Aktif Görünüm Modelinin İklendirilmesi ve Yüz Sezimi	52
4.2 Yüzün Önemli Noktalarının Bulunması	53
4.3 Aydınlanma Değişimlerine Karşı Ayrıt Temelli AGM	54
4.4 Deneysel Sonuçlar	57
5. ÇOK BANTLI MODELLEME ve YENİ BİR GÖSTERİM	59
5.1 Yüz Hizalama için Çok Bantlı Yeni Bir Gösterim (<i>HHG</i>)	59
5.1.1 Hue, Tepe (Hill) ve Gri seviye bantların elde edilmesi	61
5.1.2 Çok bantlı modelleme	62
5.1.3 Deneysel çalışmalar	62
5.2 Üç Aşamalı Yüz Hizalama Yöntemi	64

5.3	Birinci Aşama: Yüz Saptama	66
5.4	İkinci Aşama: <i>GAGM</i> Tabanlı Yüz Hizalama	67
5.5	Tepe Görüntüsü Temelli Global AGM	67
5.6	Üçüncü Aşama: Bileşen Temelli AGM (<i>BAGM</i>) ile Yüz Hizalama	69
5.7	DeneySEL Sonuçlar	71
5.8	Sonuç ve Tartışma	76
6.	AYDINLATMAYA KARŞI GÜRBÜZ YÜZ MODELLEME	77
6.1	Yüzdeki Işık Değişimleri için Özelleşmiş Normalizasyon Yöntemleri	77
6.1.1	Oransal görüntü aydınlatma normalizasyon yöntemi	77
6.1.2	Histogram temelli normalizasyon yöntemleri	82
6.1.3	Histogram uydurma normalizasyon yöntemi	82
6.1.4	Yüz için özelleştirilmiş histogram uydurma (<i>HU</i>) yöntemi	83
6.2	Aydınlatma Değişimlerine Karşı Gürbüz AGM	85
6.2.1	Önerilen modelin kurulması	88
6.2.2	Sonuçlar ve tartışma	98
6.3	Sonuçlar	100
7.	POZ DOĞRULTMA VE POZ SENTEZLEME	105
7.1	Çok Çerçevesel Hizalanmış Görüntülerde İyileştirme	118
7.1.1	Görüntü çerçevelerinin şekilden bağımsız hale getirilmesi	118
7.1.2	Çerçeve ortalamasına dayalı iyileştirme	121
7.1.3	Üç boyutlu anisotropik yayılım süzgeci	122
7.2	Ağaç Yapılı Üç Boyutlu Yayılım Süzgeci	124
7.2.1	Ortalama bant yığıt süzgeçleri	125
7.2.2	Ağaç yapılı yayılım süzgeci	126
7.3	DeneySEL Çalışmalar	128
7.3.1	Test kümeleri	129
7.3.2	Başarım ölçütleri	132
7.3.3	DeneySEL sonuçlar	132
7.4	Sonuçlar ve Tartışma	138
8.	AKTİF AYDINLATMA ve GÖRÜNÜM MODELİ	141
8.1	Aktif Aydınlatma ve Görünüm Modeli	142
8.2	Kimlik ve Aydınlatma Değişimi Modellerinin Kurulması	143
8.3	AAGM: Aydınlatma ve Yüz Modellerinin Birleştirilmesi	147
8.4	Ortogonal alt-uzay izdüşüm yöntemi ile birleşik modelin kurulması	151
8.5	AAGM Eniyileme Problemi	153
8.6	DeneySEL Çalışmalar	159
8.7	Model Karmaşıklığı	167
8.8	DeneySEL Sonuçlar ve Tartışma	168
8.9	Sonuç	170
9.	SONUÇ	173
	KAYNAKLAR	179
	EKLER	189
	ÖZGEÇMİŞ	196

KISALTMALAR

AGM	: Aktif Görünüm Modeli.
AŞM	: Aktif Şekil Modeli.
NDM	: Nokta Dağılım Modeli.
AAGM	: Aktif Aydınlatma ve Görünüm Modeli.
Pt. - Pt.	: Nokta-Nokta Hatası.
Pt. - Crv.	: Nokta-Eğri Hatası.
HE	: Histogram Eşitleme.
GHE	: Global Histogram Eşitleme.
RI	: Oransal Görüntü Aydınlatma Normalizasyonu.
HU	: Histogram Uydurma Aydınlatma Normalizasyonu.
2B	: İki Boyutlu Uzay.
3B	: Üç Boyutlu Uzay.
TBA	: Temel Bileşen Analizi.
2B-TBA	: İki Boyutlu Temel Bileşen Analizi.
ICIA	: Ters Bileşimsel Görüntü Hizalama.
3DMM	: Üç Boyutlu Morphable Model.
TFA	: Tied Faktör Analizi.
BRDF	: Çift Yönlü Yansıtırlık Dağılım Fonksiyonu.
2B+3B AGM	: 2B+3B Aktif Görünüm Modeli.
SVD	: Tekil Değer Ayrışımı.
GPA	: Genel Procrustes Analizi.
RGB	: Red, Green ve Blue renk uzayı.
HHG	: Hue, Tepe (Hill), Gray Çok Bantlı Gösterimi.
HPS	: Haar Peşpeşe Sınıflayıcı.
HSV	: Hue, Saturation ve Value Renk Uzayı.
GAGM	: Global Aktif Görünüm Modeli.
BAGM	: Bileşen Temelli Aktif Görünüm Modeli.
PB-AGM	: Pozdan Bağımsız Aktif Görünüm Modeli.
DAA	: Doğrusal Ayırtaç Analizi.
VHE	: Value, Hue, Edge Çok Bantlı Gösterimi.
TPS	: İnce Levha Eğri Modeli.
SNR	: İşaret Gürültü Oranı.
2B-ÇÖAA	: İki Boyutlu Çok Örnekli Ayırtaç Analizi.
FPS	: Saniyede Geçen Çerçeve.
ICA	: Bağımsız Bileşen Analizi.

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1 : AGM'nin üç ayrı gösterim için elde edilen yüz hizalama sonuçları.	64
Çizelge 5.2 : İkinci aşamada kullanılan GAGM'nin üç ayrı gösterim için <i>PIE</i> ve <i>IMM</i> yüz veri kümesinde elde edilen yüz hizalama sonuçları. .	75
Çizelge 5.3 : Üçüncü aşamada kullanılan BAGM'nin üç ayrı gösterim için <i>PIE</i> ve <i>IMM</i> yüz veri kümesinde elde edilen yüz hizalama sonuçları. .	75
Çizelge 6.1 : Klasik AGM hizalama başarımı.	96
Çizelge 6.2 : Önerilen AGM hizalama başarımı.	97
Çizelge 6.3 : DAA kullanılarak K_1 'deki yüz tanıma sonuçları.	101
Çizelge 6.4 : TBA kullanılarak K_1 'deki yüz tanıma sonuçları.	101
Çizelge 6.5 : DAA kullanılarak K_2 'deki yüz tanıma sonuçları.	101
Çizelge 6.6 : TBA kullanılarak K_2 'deki yüz tanıma sonuçları.	101
Çizelge 6.7 : DAA kullanılarak K_3 'teki yüz tanıma sonuçları.	101
Çizelge 6.8 : Temel Bileşen Analizi (TBA) kullanılarak K_3 'deki yüz tanıma sonuçları.	101
Çizelge 6.9 : DAA kullanılarak K_4 'teki yüz tanıma sonuçları.	102
Çizelge 6.10 :TBA kullanılarak K_4 'teki yüz tanıma sonuçları.	103
Çizelge 7.1 : Yüz hizalama sonuçları.	117
Çizelge 7.2 : Önerilen ağaç yapılı 3B difüzyon süzgeci ve diğer iyileştirme/onarma yöntemlerinin SNR olarak karşılaştırılması. Dama tahtası, Pointer veri kümesi ve yüz veri kümesi üzerinde tüm yöntemler karşılaştırılmıştır.	137
Çizelge 8.1 : Test görüntüleri için hesaplanan yüz hizalama hataları. (640×480).	170

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Şekil modellemede kullanılan araçlara ait veri kümesi.	34
Şekil 2.2 : Araç veri kümesinden 21 noktalı şekil bilgisinin çıkartılması. . .	34
Şekil 2.3 : Veri kümesindeki tüm araçların ortalama şekil bilgisinin çıkartılması. a) Veri kümesindeki 24 adet hizalanmamış araçlara ait şekil bilgileri, b) Hizalanmış araç şekilleri ve ortalama araç şekli.	35
Şekil 2.4 : Ortalama araç şeklinin 1. 2. ve 3. temel bileşeninin (sıra sıralamalı) şekil parametresi b' 'nin ± 3 değerleri için sentezlenen şekiller.	38
Şekil 2.5 : a) Azalan sıralamada, araç şekil öz-değerleri (normalize edilmiş), b) İlk 7 özdeğer için %95'lik değişim aşıyor.	39
Şekil 4.1 : AGM'nin ilklendirilmesi: a) Rastgele ilklendirme, b) Rastgele ilklendirmenin hizalama sonucu. c) HPS ilklendirme, d) HPS ilklendirme için hizalama sonucu.	54
Şekil 4.2 : HPS ve AGM ile yüz şekil bilgisinin elde edilmesi: a) Giriş görüntüsünden HPS ile yüz saptama, b) HPS sonucuna göre ilklendirme, c) AGM'nin bulunduğu önemli noktalar, d) Saptanan noktalara geçirilen tel-örgü.	54
Şekil 4.3 : Farklı aydınlatma koşullarında çevrit seçimi: (a) Giriş Görüntüsü, (b) İnce ölçekte saptanan ayrıtlar, (c) Ayrıtlar eleme sonunda elde edilen yüz çevritleri.	55
Şekil 4.4 : Çevritlerin özelliklerine göre sıralanması: (a) Karşıdan aydınlatılmış görüntü için saptanan çevritler, (b) Eleme sonucu elde edilen çevritler, (c) Sağdan aydınlatılmış görüntü için saptanan çevritler, (d) Eleme sonucu elde edilen çevritler.	56
Şekil 4.5 : Tepe görüntülerinin eldesi:(a) Özgün görüntü, (b) Kullanılan süzgeç, (c) Kurulan tepe görüntüsü.	57
Şekil 4.6 : Yüz önemli noktalarının bulunması: (Üst) Özgün RGB giriş görüntüleri kullanan AGM'nin sonuçları (Alt) Tepe giriş görüntülerini kullanan AGM'nin sonuçları.	58
Şekil 5.1 : Çok bantlı HHG gösterimi: (a) Gri seviye bandı , (b) Tepe bandı , (c) Hue bandı, (d) HHG çok bantlı gösterim.	60
Şekil 5.2 : Üç-bant modelleme yüz hizalama sonuçları: Üst) Klasik AGM (RGB), Alt) Önerilen seçkin ayrıtlar tabanlı AGM (HHG-GAGM). .	62
Şekil 5.3 : Üç aşamalı yüz hizalama sisteminin modülleri ve her modülde kullanılan gösterimler.	64
Şekil 5.4 : Üç aşamalı yüz hizalama sisteminin modülleri	65
Şekil 5.5 : Aşırı ışık değişimleri için klasik GAGM'nin ürettiği sonuçlar. . .	67
Şekil 5.6 : Aşırı ışık değişimleri için Tepe değerleri kullanan GAGM'nin ürettiği sonuçlar.	68

Şekil 5.7 :	RGB değerleri kullanılarak elde edilen GAGM hizalama sonuçları.	68
Şekil 5.8 :	SolGözAGM için ilk konum ve yakınsama sonuçları: Üst) solGözAGM'nin ilklendirilmesi, Alt)12 çevrim sonucu elde edilen sonuçlar.	70
Şekil 5.9 :	AğızAGM için ilk konum ve yakınsama sonuçları: Üst) ağızAGM'nin ilklendirilmesi, Alt) 12 çevrim sonucu elde edilen sonuçlar.	71
Şekil 5.10 :	Bileşen temelli aktif görünüm modeli (solGözAGM) ile arama işlemi ve çevrimlere göre yakınsama sonuçları	72
Şekil 5.11 :	BAGM (solGözAGM) ile arama işlemi ve çevrimlere göre yakınsama sonuçları	73
Şekil 5.12 :	Normal ışık değişimlerine karşı yüz hizalama sonuçlarının karşılaştırılması: Üst) RGB-GAGM, Orta) Tepe-GAGM (ikinci aşama), Alt) HHG-BAGM.	74
Şekil 5.13 :	Aşırı ışık değişimlerinde hizalama sonuçlarının karşılaştırılması: Üst) Klasik GAGM, Orta) Tepe GAGM, Alt) BAGM	75
Şekil 6.1 :	Tam hizalanmış yüz için RI normalizasyon sonucu: a) Ortalama yüz, b) giriş görüntüsü, c) RI yüz normalizasyon sonucu.	79
Şekil 6.2 :	RI yöntemi kullanılarak elde edilen aydınlatma normalizasyonu sonuçları :Üst) Giriş görüntüleri, Alt) Normalize edilmiş görüntüler.	81
Şekil 6.3 :	HU yönteminin etkinliğini arttırmak için yüzün iki pencereye ayrılması.	84
Şekil 6.4 :	HU yönemi kullanılarak yüzün normalize edilmesi: a) Ortalama Yüz, b) Giriş görüntüsü, c) HU normalizasyon sonuçları. Alt satır görüntülere ait histogramları göstermektedir.	84
Şekil 6.5 :	Klasik AGM yüz hizalama: a) Normal ışıklandırma, (b) Kötü ışıklandırma.	86
Şekil 6.6 :	Önerilen Gürbüz AGM'nin genel yapısı.	87
Şekil 6.7 :	İdeal olarak aydınlatılmış on farklı bireye ait yüz görüntüleri. . .	88
Şekil 6.8 :	Yale B yüz veri kümesinden bir kişinin farklı aydınlatılmış yüz görüntüleri.	89
Şekil 6.9 :	AGM arama aşamasında <i>RI</i> ve <i>HU</i> yöntemlerinin ürettiği onarım sonuçları: a) Giriş görüntüsü, b) <i>RI</i> yöntemi, c) <i>HU</i> yöntemi. . .	90
Şekil 6.10 :	AGM arama aşamasında <i>RI</i> ve <i>HU</i> yöntemlerinin ürettiği iyileştirme sonuçları: a) Giriş görüntüsü, b) <i>RI</i> yöntemi, c) <i>HU</i> yöntemi.	92
Şekil 6.11 :	Kötü ışıklandırmaya sahip yüzler için Klasik AGM ve önerilen yöntemin karşılaştırılması. Üst satır: Klasik AGM, Alt satır: HU-AGM.	93
Şekil 6.12 :	Kötü ışıklandırmaya sahip yüzler için klasik AGM ve HU-AGM hizalama sonuçları. a) İlklendirme, b) Klasik AGM , (c) HU-AGM, d) HU-AGM + <i>RI</i> iyileştirme.	94
Şekil 6.13 :	Klasik AGM'nin optimizasyon aşamaları ve sentezlenen yüzler: a) Giriş görüntüsü, b) Ortalama yüz ile AGM ilklendirme, c) 3. çevrim, d) 6. çevrim optimizasyon sonucu ve sentezlenen yüzler. .	96
Şekil 6.14 :	HU-AGM'nin optimizasyon aşamaları ve sentezlenen yüzler: a) Giriş görüntüsü, b) Ortalama yüz ile AGM ilklendirme, c) 3. çevrim, d) 6. çevrim optimizasyon sonucu ve sentezlenen yüzler. .	97

Şekil 6.15 :	Hizalanmış ve dört küme şeklinde ayrılmış Yale B yüz görüntülerinin içerisinden, bir bireye ait 40'ar adet yüz görüntüleri: a) Özgün yüzler, b) RI işleminden geçmiş yüzler, c) HU işleminden geçmiş yüzler.	98
Şekil 6.16 :	Test ve eğitim kümesi verilerinin TBA ve DAA öznitelik vektörlerinin dağılımı a) Eğitim kümesi TBA öznitelik vektörlerinin dağılımı, b) Test kümesi için TBA öznitelik vektörlerinin dağılımı, c) Test kümesi için DAA öznitelik vektörlerinin dağılımı.	99
Şekil 6.17 :	Test kümesi verilerinin TBA ve DAA için öznitelik vektörünün boyuna göre tanıma sonucu. a) K_1 yüz veri kümesi için, b) K_2 yüz veri kümesi için, c) K_3 yüz veri kümesi için, d) K_4 yüz veri kümesi tanıma sonucu.	100
Şekil 6.18 :	TBA, DAA, 2B-MEDA ve 2B-TBA öznitelik uzayları için a) Özgün yüz görüntüleri, b) Oran-görüntüleri, c) HU normalizasyonu için tanıma başarımları.	102
Şekil 7.1 :	Üç farklı pozdaki yüz görüntüsü.	105
Şekil 7.2 :	Yüz poz değişimi: a)Yüz dokusu, b)Yüz önemli noktaları üzerine çizilen tel-örgü üçgenleri.	108
Şekil 7.3 :	Farklı pozlardaki yüzlerden karşıdan bakan yüzlerin elde edilmesi.	110
Şekil 7.4 :	Tam karşıdan bakan 2B yüz görüntülerinden farklı poz sentezleme.	110
Şekil 7.5 :	Üç farklı kişinin tam karşıdan bakan yüz şekillerinden sentezlenmiş farklı pozlarına ait yüz şekilleri.	112
Şekil 7.6 :	Kurulan yüz uzayındaki şekil, doku ve görünüm modeline ait özdeğerler.	113
Şekil 7.7 :	Tam karşıdan çekilmiş yüzlerden kurulan modelin ilk üç bileşenin ortalama yüze göre değişimi.	114
Şekil 7.8 :	Farklı pozlardaki yüz şekil verileriyle zenginleştirilmiş modelin en yüksek değişime sahip ilk üç bileşenin ortalama yüze göre değişimi.	115
Şekil 7.9 :	Kurulan yüz uzayındaki ilk 5 temel bileşene ait katsayıların rastgele değiştirilmesi ile elde edilmiş sentetik yüzler.	116
Şekil 7.10 :	Eğitim kümesinde sadece tam karşıdan bakan yüzler kullanılan yüzler için önerilen yüz model hizalama sonuçları.	116
Şekil 7.11 :	Hizalanmış ve üçgenlenmiş görüntü çerçevelerinden doğrusal bükme ile üç boyutlu yüz verisinin elde edilmesi.	119
Şekil 7.12 :	Dama tahtası test görüntü kümesi ve iyileştirme sonuçları: a) ve b) test kümesinden alınan hizalama hatasına sahip, gürültü eklenmemiş ard arda gelen iki çerçeve, c) Gauss gürültü eklenmiş çerçeve. d) Ortalama süzgeç, e) Ortanca süzgeç, f) Wiener süzgeci, g) 2B boyutlu yayılım süzgeci, h) 3B difüzyon süzgeci.	126
Şekil 7.13 :	Ağaç yapılı üç boyutlu yayılım süzgecinin iyileştirme sonuçları: a) Tüm bölgelerin kullanılması ile elde edilen sonuç, b) İkinci bölge'den elde edilen sonuç.	128
Şekil 7.14 :	a) AGM ile saptanmış nesneye ait önemli noktaların üçgenlere ayrılmış hali, b), c) ve d)'de test videolarından elde edilen hizalanmış ve şekilden arındırılmış düşük kaliteli çerçeveler.	129

Şekil 7.15 :	a) Test videosundan kesilen, şekilden arındırılmış ground truth görüntüler, b) Test kümesinden rastgele seçilmiş bir görüntü, c) Klasik 3B difüzyon süzgeci sonucu, d) Önerilen yöntemin sonucu, e) Önerilen yöntemin 2. bölge için ürettiği sonuç.	129
Şekil 7.16 :	Pointer veri kümesi	130
Şekil 7.17 :	AGM arama eniyileme adımları.	133
Şekil 7.18 :	Önerilen yöntemin yüz veri kümesi için iyileştirme sonuçları: a) Ground truth yüz görüntüsü, b) Gürültülü test videolarına ait çerçevelerden kesilen rastgele seçilmiş bir yüz görüntüsü, c) Önerilen ağaç yapılı 3B difüzyon süzgecinin sonucu (\bar{I}_{D_3}), d) (\bar{I}_{D_1, R_2}) sonucu.	134
Şekil 7.19 :	Test görüntülerindeki gürültü seviyesi (Gauss gürültü, $\sigma = [0.05, 0.70]$) değişimine bağlı olarak üç yöntemin iyileştirme performanslarının karşılaştırılması.	135
Şekil 7.20 :	Test görüntülerindeki çerçeve sayısına bağlı olarak üç yöntemin iyileştirme performanslarının karşılaştırılması	135
Şekil 8.1 :	Kimlik yüz veri kümesinden (K_{id}) beş farklı yüz.	143
Şekil 8.2 :	Yale-B yüz veri kümesindeki tek bir kişinin farklı ışıklandırma koşulları altındaki yüz görüntüleri.	144
Şekil 8.3 :	Eğitim kümesinde yer alan bir kişiye ait aydınlatma (fark) veri kümesi (K_{il}).	145
Şekil 8.4 :	Kimlik yüz uzayına ait ilk beş özyüz (Φ_{id}).	145
Şekil 8.5 :	Aydınlatma modeline ait ilk beş özyüz (Φ_{il}).	146
Şekil 8.6 :	Kimlik yüz modeline ait mod değişimleri.	147
Şekil 8.7 :	Aydınlatma yüz modeline ait mod değişimleri. Her satır aydınlatma modeline ait bir temel bileşeni göstermektedir. Her sütun ise soldan-sağa -2, -1, 0, 1, 2 mod değişimlerini göstermektedir.	148
Şekil 8.8 :	Ortalama yüzün kurulan model yardımı ile tekrar aydınlatılması. Kimlik model sabit tutulmuş değişim sadece aydınlatma modelinde uygulanmıştır.	148
Şekil 8.9 :	AAGM'nin kimlik model parametreleri ile sentezlenen yüzlerin, aydınlatma model parametreleri değiştirilerek sanal olarak aydınlatılması.	149
Şekil 8.10 :	Önerilen Aktif Aydınlatma ve Görünüm Modelinin (AAGM) genel yapısı.	150
Şekil 8.11 :	Özyüzler: a) Yüz modeline (Φ_{id}) ait ilk beş özyüz, b) Aydınlatma modeline ait (Φ_{il}) özyüzler, c) Ortogonal alt-uzay izdüşüm yöntemi ile elde edilen aydınlatma modeline (Φ_{il}^*) ait özyüzler. . .	151
Şekil 8.12 :	AAGM D_1 eğitim kümesi.	153
Şekil 8.13 :	Aydınlatma (fark) verilerine ortogonal alt-uzay izdüşüm yöntemi uygulanarak elde edilen görüntüler.	160
Şekil 8.14 :	Kimlik yüz veri kümesi.	162
Şekil 8.15 :	Tek bir bireyin farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş görüntüleri.	162
Şekil 8.16 :	Test kümesinde yer alan yüzler için klasik AGM hizalama sonuçları.	163
Şekil 8.17 :	Test kümesinde yer alan yüzler için AAGM hizalama sonuçları.	163

Şekil 8.18 :	Önerilen AAGM'nin aşırı aydınlatılmış yüz görüntüsü için çevrimlere göre (soldan sağa, yukarıdan aşağıya) yakınsama sonuçları. İlk görüntü aşırı aydınlatılmış giriş görüntüsü.	164
Şekil 8.19 :	Önerilen AAGM'nin düşük karşıtlığa sahip yüz görüntüsü için çevrimlere göre (soldan sağa, yukarıdan aşağıya) yakınsama sonuçları.	165
Şekil 8.20 :	AAGM'nin aşırı aydınlatılmış yüz görüntüsü için çevrimlere göre (soldan sağa, yukarıdan aşağıya) yakınsama sonuçları.	166
Şekil 8.21 :	Tam karşıdan aydınlatılmış bir adet yüz görüntüsü kullanılarak eğitilen AAGM'nin aynı kişiye ait farklı aydınlatılmış test görüntüsü için çevrimlere göre (soldan sağa, yukarıdan aşağıya) yakınsama sonuçları. İlk görüntü test giriş görüntüsü.	166
Şekil 8.22 :	Tam karşıdan aydınlatılmış bir adet yüz görüntüsü kullanılarak eğitilen AAGM'nin aynı kişiye ait farklı aydınlatılmış test görüntüsü için çevrimlere göre (soldan sağa, yukarıdan aşağıya) yakınsama sonuçları. İlk görüntü test giriş görüntüsü.	167
Şekil 8.23 :	Tam karşıdan aydınlatılmış bir adet yüz görüntüsü kullanılarak eğitilen AAGM'nin aynı kişiye ait farklı aydınlatılmış test görüntüsü için çevrimlere göre (soldan sağa, yukarıdan aşağıya) yakınsama sonuçları. İlk görüntü test giriş görüntüsü.	168
Şekil 8.24 :	AAGM ve AGM'nin kötü ikklendirmeye karşı gürbüzlüğünü test etmek için kullanılan dört farklı ikklendirme.	169

SEMBOLLER

b_s	:	Şekil Parametre Vektörü
b_g	:	Doku Parametre Vektörü
c	:	Görünüm Parametre Vektörü
\bar{g}	:	Ortalama Doku Vektörü
λ	:	Özdeğer
λ_{id}	:	Kimlik Uzayının Özdeğeri
λ_{il}	:	Aydınlatma Uzayının Özdeğeri
Λ	:	Özdeğerleri Tutan Köşegen Matrisi
Φ_{id}	:	Kimlik Uzayı Özyüzler Matrisi
Φ_{il}	:	Aydınlatma Uzayı Özyüzler Matrisi
Φ_{comb}	:	Birleştirilmiş Uzay Özyüzler Matrisi
J	:	Maliyet İşlevi
S_W	:	Sınıf İçi Saçılım Matrisi
S_B	:	Sınıflar Arası Saçılım Matrisi
Σ_g	:	Doku Saçılım Matrisi
Σ_s	:	Şekil Saçılım Matrisi
\bar{x}	:	Ortalama Şekil Vektörü
W	:	Ağırlıklandırma Matrisi
K_{id}	:	Kişi Görüntü Kümesi
K_{il}	:	Aydınlatma Görüntü Kümesi

AKTİF GÖRÜNÜM MODELİNE DAYALI GÜRBÜZ YÜZ HIZALAMA

ÖZET

Aydınlatma ve poz değişimleri yüz tanıma sistemlerinin başarımını doğrudan etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Yüz tanıma sisteminin başarılı bir şekilde çalışabilmesi için aydınlatma ve poz değişimlerinden olabildiğince az etkilenmesi gerekir. Yüz tanıma sistemlerinde tanıma işleminden önce ki en kritik aşama yüzün hizalanması işlemi ve tanımanın yapılacağı öznitelik uzayının doğru olarak belirlenmesidir. Tez kapsamında aydınlatma ve poz değişimlerinin yüz tanıma başarımına olan bozucu etkilerini ortadan kaldırmaya yönelik, istatistiksel bir modelleme yöntemi olan aktif görünüm modeline (*AGM*) dayalı yüz hizalama yaklaşımları üzerinde durulmuştur.

Tez kapsamında, ayrıtların seçilmesine olanak sağlayan bir yöntem yardımı ile yüzde ki doku değişimleri ve yüz bileşenlerinin (gözler, burun, çene vb.) fiziksel sınırlarından kaynaklanan ayrıtlar birbirlerinden ayrılarak güçlü ayrıtlar belirlenmiştir. Bu ayrıtlar üzerine kurulan tepe görüntüleri ile çalışan *AGM* temelli bir yüz hizalama yöntemi önerilmiştir. Ayrıca *AGM*'yi tek bantta çalıştırmak yerine farklı özniteliklere sahip bantlardaki değişimi modelleyebilen ve bunu tek bir parametre uzayında ifade edebilen bir yöntem kullanılmasının başarımı arttıracığı gösterilmiştir. Bu amaca yönelik üç-bantlı yeni bir gösterim geliştirilmiştir.

Tez kapsamında, yüz hizalama için aydınlatma ve poz değişimlerine karşı yeni bir gürbüz yöntem geliştirilmiştir. Önerilen yöntemde klasik aktif görünüm modeline (*AGM*), yüz için özelleştirilmiş aydınlatma normalizasyonu eklenerek, *AGM*'nin farklı aydınlatma koşullarındaki arama ve yakınsama başarımı iyileştirilmiştir. *AGM* şekil uzayı yapay olarak sentezlenen pozlar ile zenginleştirilerek yöntemin poz değişimlerine karşı daha az duyarlı olması sağlanmıştır. Çalışmamızda farklı öznitelik uzaylarının ve önileme yöntemlerinin yüz tanıma başarımı üzerindeki etkisi de ayrıntılı olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlarda, sentetik pozlarla ve yüz için özelleşmiş normalizasyon yöntemleri ile güçlendirilmiş önerilen yöntem ile yüz tanıma başarımı tüm öznitelik uzaylarında arttırıldığı gösterilmiştir.

Modellenmeye çalışılan giriş verisinde var olan aydınlatma değişimlerini belirleyip model içine dahil eden, *AGM*'ye göre çok daha etkin bir model yapısı oluşturulması amacıyla Aktif Aydınlatma ve Görünüm Modeli (*AAGM*) yaklaşımı önerilmiştir. *AAGM* sadece yüz hizalama problemine özel bir yaklaşım olmayıp birçok probleme uygulanabilecek özgün bir yöntemdir. *AAGM*'de aydınlatma etkisi, şekil ve kimlik ayrı model parametreleriyle kontrol edilebilmektedir. Böylece model uydurma büyük ölçüde aydınlatma değişimlerinden bağımsız hale geldiği gibi, bir kişinin farklı yerlerden aydınlatılmış görüntüleri de aydınlatmaya ilişkin model parametresi değiştirilerek sentezlenebilmektedir.

ACTIVE APPEARANCE MODEL BASED ROBUST FACE ALIGNMENT

SUMMARY

Illumination conditions and pose variations have an explicit effect on the performance of face recognition systems. In building a face recognition system for real-life scenarios, one usually faces the problem that is the selection of a feature-space and preprocessing methods such as alignment under varying illumination conditions and poses. In this thesis, we focus on the problems induced by varying illumination and poses. Our primary aim is to eliminate the negative effect of illumination and pose on the face recognition system performance through illumination and pose-invariant face alignment based on Active Appearance Model (*AAM*).

AAM is known to be very sensitive to the illumination variations. We have shown that edges, originating from object boundaries, are far less susceptible to illumination changes. We propose a contour selector which mostly collects contours originating from boundaries of the face components (eyes, nose, chin, etc.) and eliminates the others arising from texture. Rather than representing the image using grey values, we use edge based multi-band image representation. We demonstrate that the proposed image representation gives more accurate and reliable results as compared to image intensity alone under various lighting conditions for multi-band Active Appearance Modeling.

In this thesis, we developed a robust face alignment approach based on *AAM* by inserting an illumination normalization module into the standard searching procedure and inserting different synthetic poses of the same identity into the training set. The modified *AAM* search can now handle both illumination and pose variations in the same epoch, hence it provides better convergence in both point-to-point and point-to-curve senses. We also investigate how face recognition performance is affected by the selection of feature space as well as the proposed alignment method. The experimental results show that the combined pose alignment and illumination normalization methods increase the recognition rates considerably for all feature spaces.

We propose an approach integrating face identity and illumination models in order to reach acceptable and stable face recognition rates. For this purpose, *AAM* and proposed illumination model of faces are combined in order to obtain an illumination invariant face localization. The proposed method is an integrated Active Illumination and Appearance Model (*AIA*) which combines identity, illumination and shape components in a single model and allows us to control them, separately. One of the major advantage of the proposed *AIA* model is that efficient model fitting is achieved, whilst keeping the performance against illumination changes. In addition to model fitting, images illuminated from different directions can easily be synthesized by changing the parameters related to illumination modes.

1. GİRİŞ

Yüz tanıma problemi görüntü işleme, bilgisayarla görü ve örüntü tanıma konularında çalışan araştırmacıların yoğun olarak üzerinde çalıştıkları güncel, önemli ve zor problemlerden biridir. Özellikle yakın geçmişte ve günümüzde ortaya çıkan saldırılar sonucu giderek artan güvenlik gereksinimleri diğer biyometrik yöntemlerde olduğu gibi yüz tanımaya da olan gereksinimi ve ilgiyi artırmıştır. Yüz tanıma problemi üzerine yapılan çalışmalar yetmişli yıllara kadar dayanmaktadır. Geline seviye göz önüne alındığında yüz tanıma problemine getirilen çözümlerin artık belirli bir olgunluğa eriştiği söylenebilir. Özellikle iki boyutlu (2B) yüz tanıma olmak üzere, kontrollü alanlar için, bu konuda ticari ürün seviyesinde çözümler üretilir hale gelmiştir. Bu konuda uzun zamandır, çok sayıda bilim adamı çalışıyor olmasına karşın, problemin zorluğu nedeniyle gerçek yaşamda karşılaşılan sorunları çözmeye yetecek başarıma sahip yüz tanıma sistemleri henüz geliştirilememiştir.

Görüntüleme, veri aktarma ve iletişim teknolojileri alanındaki gelişmeler yanında, ulusal güvenlik vb. konulardaki gereksinimlerin artması nedeniyle yüz tanıma temelli sistemlere olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Fakat her türlü koşulda çalışabilecek, düşük maliyete sahip, mevcut görüntüleme/iletişim altyapısında da hizmet verebilecek, yüksek başarımlı ve güvenilir bir yüz tanıma yöntemi henüz geliştirilebilmiş değildir. Bu nedenle araştırmacılar yukarıda sayılan ihtiyaçlara cevap verebilmek için, yüz tanımanın temel zorlukları olan aydınlatma, poz/ifade değişimi vb. gibi yüz tanımanın alt dallarına yönelmişlerdir. Örneğin ticari yüz tanıma sistemlerinin bile açık havada ki yüz tanıma başarımları, aydınlatmanın bozucu etkisinden dolayı, oldukça düşük çıkmaktadır. Oysa ki yüz tanıma sistemlerinin yaygınlaşabilmesi için açık alandaki başarımın en az kontrollü alanlardaki başarıma ulaşması gerekmektedir. Özellikle son yıllarda literatürde yapılmış çalışmalar incelendiğinde, önerilen yöntemlerin genellikle bu alt problemler üzerinde yoğunlaştığı görülecektir.

Günümüzde, yüz tanıma problemi artık sadece görüntü işleme alanında çalışan araştırmacıların konusu değildir. Problem disiplinler arası bir çalışma konusu haline gelmiştir. Tez kapsamında verilen literatür özetinden de anlaşılacağı gibi yüz tanıma problemine görüntü işleme, bilgisayarla görü, örüntü tanıma, matematik/istatistik, nöro-psikoloji, makine öğrenmesi, nöroloji ve hatta biyoloji alanlarında çalışanların ortak katkıları bulunmaktadır.

Tez kapsamında yüz tanıma problemi genel hatlarıyla ortaya konulduktan sonra yüz tanımanın temel zorluklarından olan ve kontrolsüz ortamlarda arzu edilen başarıma ulaşılabilmesi için mutlaka çözümler üretilmesi gereken aydınlatma ve poz değişimi problemleri üzerinde yoğunlaşmıştır.

Literatürde son yıllarda nesne modelleme konusunda öne çıkan bir yöntem olan Aktif Görünüm Modeline (*AGM*) dayalı yöntemler üzerinde durulmuştur. Özellikle aydınlatma, poz ve kişiler arası değişimin tek bir yapı içinde modellenebileceği gösterilmeye çalışılmıştır. Yüz tanıma/modellemenin önemli ön işlemlerinden biri olan hizalama problemi üzerinde özellikle durulmuş ve hizalama başarımını artırıcı özgün yöntemler önerilmiştir.

Literatürdeki aydınlatma ve pozdan bağımsız yüz tanıma/modelleme ve hizalama yöntemleri dikkatle incelendiğinde son yıllarda üç boyutlu (*3B*) veriye dayalı yöntemlerin giderek öne çıktığı görülecektir. Bunun en önemli sebeplerinden biri *3B*'lu veriler üzerinde poz ve aydınlatma gibi değişimlerin analizinin iki boyutlu (*2B*) verilere kıyasla daha kolay ve modellemenin yüksek başarımla yapılabilmesi olmasıdır. Ayrıca günümüzde *3B*'lu verinin oluşturulmasını mili-saniyeler mertebesinde gerçekleştirebilen cihazların da üretilmeye başlanması *3B*'lu yöntemlere olan ilgiyi arttırmıştır.

Tüm bu gelişmelere rağmen *3B*'lu veri sağlayan tarayıcılar, gerçek zamanlı uygulamalar söz konusu olduğunda *2B*'lu görüntü/video sağlayan kameralara göre hala dezavantajlı konumdadırlar. Ayrıca kullanım yaygınlığı ve maliyetler açısından *2B*'lu kameraların günümüzde ve yakın gelecekte hala asıl görüntüleme donanımları olarak kullanılacağını söylemek mümkündür. Var olan alt yapıya uygun çözümler üretecek *2B*'lu özgün yöntemlerin ortaya çıkartılmasına yönelik çalışmalar, yakın gelecekte de hayati öneme sahip olacaktır.

Bu çalışma kapsamında üzerinde çalışılan nesne, yani insan yüzünün görünüm bilgisinin iki bileşeni olan şekil ve dokuya ait değişimler ayrı ayrı modellenmiş fakat daha sonra bu modeller *AGM* teorisine uygun olarak tek bir yapıda birleştirilmiştir. Nesnenin görünümünü etkileyen tüm değişimlerin mümkün olduğunca birbirlerinden yalıtılarak modellenebileceği ve bunların tek bir uzay kuracak şekilde bir araya getirilebileceği deneysel çalışmalarla desteklenerek ortaya konulmuştur. Bu amaca yönelik önerilen Aktif Aydınlatma ve Görünüm (*AAGM/AIA*) yöntemi sayesinde, eldeki verilerle daha önceden modellenmiş nesne için eğitim verilerinde yer almayan, nesneye ait başkaca bir değişim ayrıca modellenerek, kurulan önceki modellerle birleştirilebilmektedir. *AAGM* olarak isimlendirdiğimiz bu model sayesinde üzerinde çalışılan nesneye ait tüm değişimleri modelleme yeteneğine sahip olunmaktadır.

1.1 Tezin Organizasyonu

Tezin bu bölümünde yüz tanıma problemi genel hatları ile ortaya konulmuştur. Yüz tanımanın temel zorlukları ve bu zorluklara literatürde sunulan çözümler sistematik bir şekilde sunulmuştur. Literatürün tezin kapsamına dahil olan kısımları üzerinde özellikle durulmuş, sunulan tezin katkı yapmayı amaçladığı alan ve buradaki boşluklar ortaya konulduktan sonra ikinci bölümde, tezde ele alınan ve üzerinde çalışılan temel konulardan biri olan şekil modelleme üzerinde durulmuştur. Tezin üçüncü bölümünde ise doku modelleme yöntemi anlatılmaktadır. Ayrıca bu bölümde şekil ve doku modellerinin tek bir yapıda nasıl bir araya getirilebileceği sorusuna cevap verilmiş ve aktif görünüm modeli anlatılmıştır. Ayrıca *AGM* ile modellenen nesnenin giriş görüntüsünde nasıl saptanacağını gösteren *AGM* arama yöntemleri üzerinde durulmuştur.

Tez kapsamında *AGM*'ye dayalı yöntemlerin daha gürbüz hale getirilmesine yönelik bir çok yöntem tanıtılmıştır. Yüz görüntüsüne iki boyutlu şekil ve doku modelinin uydurulmasını amaçlayan *AGM*, özellikle aydınlanma ve poz değişimlerinden olumsuz etkilenmektedir. Tez kapsamında *AGM*'nin bu sorunlarını çözmek amacıyla farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Tezin dördüncü bölümünde ise ayrıtlara dayalı özgün bir *AGM* yöntemi önerilmiştir. Bu çalışmada literatürde ki gradyan ve ayrıtlara dayalı yaklaşımlardan farklı olarak yeni bir yöntem önerilmiştir. Ayrıtların seçilmesine olanak sağlayan bir yöntem yardımı ile doku değişimleri ve nesnenin fiziksel

sınırlarından kaynaklanan ayrıtlar birbirlerinden ayrılarak güçlü ayrıtlar belirlenmiştir. Bu ayrıtlar üzerine kurulan tepe [1] görüntüleri ile çalışan bir *AGM* yapısı önerilmiştir. Klasik yöntemlerden farklı olarak, modelleme aşamasında gri seviye veya *RGB* değerlerini kullanmak yerine çevrit seçimine dayalı tepe görüntülerinin kullanımının aydınlatma değişimlerine karşı oldukça başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca *AGM*'nin ilklendirmeden kaynaklanan hatalı yakınsama sorunlarını gidermek amacı ile *AGM*'nin ilklendirilmesine yönelik çözümler önerilerek *AGM* hizalama başarımı arttırılmaya çalışılmıştır.

AGM'de gri seviye giriş görüntüleri kullanmak yerine tepe görüntüleri gibi ışık değişimlerine karşı gürbüz bir gösterimle beraber, ışık değişimlerine karşı daha az hassas olan renk uzaylarının birlikte kullanımının başarımı arttıracığı görülmüştür. Ayrıca Aktif Görünüm Modelini tek bantta çalıştırmak yerine farklı özniteliklere sahip bantlardaki değişimi modelleyebilen ve bunu tek bir parametre uzayında ifade edebilen bir yöntem kullanılmasının başarımı arttıracığı öngörülmüştür. Tezin beşinci bölümünde bu amaca yönelik üç-bantlı yeni bir gösterim geliştirilmiştir. Bu gösterimde oldukça başarılı sonuçlar aldığımız çevrit seçimine dayalı tepelerden oluşturulan gösterime, ışık değişimlerine karşı gürbüz olduğu bilinen *HSV* (Hue, Saturation, Value) renk gösterimindeki renk (Hue) bileşeni ve gri seviye bilgisi ayrı renk bantları şeklinde bir araya getirilerek üç-bantlı *HHG* (Hue, Hill, Gray) gösterimi oluşturulmuştur. Bu gösterim, yüz hizalama probleminde kullanılan veri kümelerinde test edilmiş ve oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Tezin beşinci bölümünde; göz, burun ve ağız bileşenlerini ayrı ayrı modellemeye dayanan bileşen temelli *AGM* yöntemi önerilmiştir. Önerilen bu yöntem sayesinde çok daha hassas yüz hizalama sonuçlarının elde edilebileceği deneysel çalışmalarla gösterilmiştir. Ayrıca bu bölümde ışıktan bağımsız üç aşamalı yeni bir yüz hizalama yöntemi tanıtılmaktadır. Yüz hizalama yöntemimizin birinci aşamasında yüz saptama yapılmaktadır. İkinci aşamada ise global aktif görünüm modeli (*GAGM*) kullanılarak yüze ait önemli noktalar saptanır. *GAGM*'nin ilklendirilmesi hizalama sonucunu doğrudan etkilemektedir. *GAGM*'nin gerçek yüz öznitelik noktalarına yakınsayabilmesi için optimum noktaya oldukça yakın bir yerden *GAGM*'nin ilklendirilmiş olması gerekmektedir. Önerilen yöntemin ikinci aşamasında Haar Peşpeşe Sınıflandırıcılar (*HPS*) kullanılarak saptanan yüzü içine alan kutunun ağırlık

merkezi ilklendirmede kullanılmıştır. Son aşamada ise bileşen temelli aktif görünüm modeli (*BAGM*) kullanılarak hassas hizalama yapılmaktadır.

Tezin altıncı bölümünde; ışık değişimlerine dayanıklı *AGM* yöntemi geliştirmek amacıyla histogram eşleme, ve oran görüntüleri kullanılarak daha yüksek başarıma sahip gürbüz yeni bir yöntem tanıtılmıştır. Önerilen yöntem giriş olarak verilen farklı aydınlatılmış yüz görüntüsünü hem onarmaya hem de hizalamaya çalışmaktadır. Aydınlatmanın bozucu etkilerini gidermeye yönelik, yüz için özelleştirilmiş onarma yöntemleri *AGM* arama ve en-iyileme algoritmasında radikal değişiklikler yapmadan, *AGM* arama algoritmasının içine adapte edilerek gürbüz bir yöntem geliştirilmiştir. Önerilen yöntemin eğitimi için, aynı bireyin birden farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş görüntülerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Her birey için sadece bir adet önden çekilmiş görüntünün eğitim kümesinde olması yeterlidir. Deneysel çalışmalardan da görüleceği gibi önerilen yöntemin hizalama başarımı, farklı ışık koşulları söz konusu olduğunda bile, klasik *AGM*'ye göre oldukça yüksektir.

Tezin yedinci bölümünde; yüz tanıma ve modellemenin zorluklarından biri olan poz problemi ele alınmış, *AGM* çerçevesinde kişinin pozunun önceden belirlenmiş bir poza dönüştürülmesi (poz doğrultma) ve farklı pozlardaki görüntülerin oluşturulması (poz sentezleme) konuları üzerinde çalışılmıştır. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar sonucunda, modeldeki noktaların istenilen şekle bükülmesiyle, ± 30 derece aralığıyla sınırlı olmak koşuluyla, farklı poz görüntüleri elde edilebilmiştir. Bu yöntem biraz daha genişletilerek video görüntülerinin iyileştirilmesi ve çok çerçeveli görüntülerden yüksek kaliteli görüntülerin elde edilmesine yönelik özgün bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yöntem sayesinde çok gürültülü video çerçevelerindeki yüz görüntüleri istenilen poza doğrultularak tüm çerçevelerde yer alan yüz görüntülerinde karşılıklıdırma problemi ortadan kaldırılmıştır. Bu sayede çoklu çerçeveler üzerinde görüntü füzyonu yöntemleri kullanılarak iyileştirme gerçekleştirilebilmektedir.

Tezin sekizinci bölümünde; klasik *AGM*'de kişinin kimliğini (identity) ve aydınlatma bilgisini birlikte barındıran doku bileşeni, kimlik ve aydınlatma olarak ayrıştırılmış ve daha sonra şekil bileşeni ile birlikte kullanılarak kimlik, aydınlatma ve şekil bileşenlerinden oluşan birleşik *AGM* modeli önerilmiştir. Bu ayrıştırma sayesinde aydınlatma etkisi, şekil ve kimlik ayrı ayrı model parametreleriyle kontrol edilebilmektedir. Böylece model uydurma büyük ölçüde aydınlatma değişimlerinden

bağımsız hale geldiği gibi, bir kişinin farklı yerlerden aydınlatılmış görüntüleri de aydınlatmaya ilişkin model parametresini değiştirerek elde edilebilmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Tezin amacı yüz tanıma/modelleme ve hizalama konularında, $3B$ 'lu yöntemlerin başarımına yakın fakat düşük maliyetli ve yaygın olarak kullanılan $2B$ 'lu veri sağlayan kamera ve fotoğraf makinelerinden elde edilen görüntüler üzerinde çalışacak özgün yöntemler sunmaktır. Ayrıca yüz modelleme ve hizalama konusunda literatürde son yıllarda öne çıkan ve yüksek başarımları raporlanan AGM 'nin yetersiz kaldığı noktalarda yeni çözümler önerilerek daha güçlü hale getirilmeye çalışılmıştır. Tez kapsamında AGM konusunda oluşan literatür biraz daha ileri bir noktaya taşınmış ve kurulan veriyi daha güçlü hale getirebilmek için yeni yaklaşımlar sunulmuştur. Bu tez kapsamında sunulan yaklaşımlarla sadece yüz tanıma problemine özel çözümler sunulmamıştır. Tezin ardıl amaçlarından biri de yüz tanıma ve/veya farklı nesnelere modellenmesi konusunda araştırmalar yapan yerli araştırmacıların dikkatini AGM 'ye dayalı yaklaşımlara çekmek ve ülkemizde bu konuda bir farkındalık yaratmaktır.

1.3 Tezin Katkısı

Tez kapsamında aydınlatma ve poz değişimlerine karşı gürbüz özgün yüz hizalama/modelleme yöntemleri önerilmiştir. Bu amaçla özgün çok bantlı AGM yöntemi önerilmiş ve görüntüyü oluşturan renk bantlarından birinde, yüz bölgesinde ayırıt saptayıcıyla elde edilen ayırıtlar arasından belirlenen seçkin ayırıtın kullanılması önerilmiştir. Işık değişimlerine dayanıklı AGM yöntemi geliştirmek amacıyla histogram eşleme, ve oran görüntüleri AGM çerçevesi içinde kullanılarak daha yüksek başarıma sahip modellerin geliştirilmesi başarılmıştır. Tez kapsamında, AGM temelli yüz hizalama/modelleme yöntemlerine yapılan önemli katkılardan biri de göz, burun ağız bileşenlerini ayrı ayrı modellemeye dayanan bileşen tabanlı AGM yaklaşımıdır. Önerilen bu yöntem sayesinde çok daha hassas yüz hizalama sonuçlarının elde edilebileceği deneysel çalışmalarla gösterilmiştir.

Tez kapsamında Aktif Aydınlatma Görünüm Modeli ($AAGM$) olarak isimlendirdiğimiz özgün bir modelleme yöntemi geliştirilmiştir. Bu modelde, klasik AGM 'de kişinin kimlik ve aydınlatma bilgisini birlikte barındıran doku bileşeni, kimlik ve

aydınlatma olarak ayrıştırılmış ve daha sonra şekil bileşeni ile birlikte kullanılarak kimlik, aydınlatma ve şekil bileşenlerinden oluşan birleşik *AGM* modeli önerilmiştir. Bu ayrıştırma sayesinde aydınlatma etkisi, şekil ve kimlik ayrı ayrı model parametreleriyle kontrol edilebilmektedir. Böylece model uydurma büyük ölçüde aydınlatma değişimlerinden bağımsız hale geldiği gibi, bir kişinin farklı yerlerden aydınlatılmış görüntüleri de, aydınlatmaya ilişkin model parametresi değiştirilerek elde edilebilmektedir.

Tez kapsamında yüz tanıma ve modellemenin zorluklarından biri olan poz problemi de ele alınmış, *AGM* çerçevesinde kişinin pozunun önceden belirlenmiş bir poza dönüştürülmesi (poz doğrultma) ve farklı pozlardaki görüntülerin oluşturulması (poz sentezleme) konuları üzerinde çalışılmıştır. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar sonucunda, modeldeki noktaların istenilen şekle bükülmesiyle farklı poz görüntüleri elde edilebilmiştir. Bu yöntem biraz daha geliştirilerek video görüntülerinin iyileştirilmesi ve çok çerçeveli görüntülerden yüksek kaliteli görüntülerin elde edilmesine yönelik özgün bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yöntem sayesinde çok gürültülü video çerçevelerindeki yüz görüntüleri istenilen poza doğrultularak tüm çerçevelerde yer alan yüz görüntülerindeki karşılıklıdırma problemi ortadan kaldırılmıştır. Bu sayede çoklu çerçeveler üzerinde görüntü füzyonu yöntemleri kullanılarak iyileştirme gerçekleştirilebilmektedir.

1.4 Yazılım ve Verilerin Paylaşımı

Bu tez kapsamında sunulan sonuçlar, deneysel çalışmalar ve sonuçları görselleştirmek ve analiz etmek için geliştirilen yazılımlar [http : //www.be.itu.edu.tr/~fatih.kahraman/dissertation/](http://www.be.itu.edu.tr/~fatih.kahraman/dissertation/) web adresinde; *MATLAB* kaynak kodları, *MS Visual C++* projesi ve oluşturulan geniş veri kümesi şeklinde verilmiştir. Tez *LaTeX* dilinde yazılmış ve *PDF* olarak kaydedilmiştir. Elektronik kopyası [http : //www.be.itu.edu.tr/~kahraman/dissertation/thesis.pdf](http://www.be.itu.edu.tr/~kahraman/dissertation/thesis.pdf) web adresinde yayınlanmaktadır.

1.5 Literatür Özeti

Günümüzde, görüntü işleme ve bilgisayarla görü alanlarındaki araştırmacılar, insan yüzlerinin makineler tarafından tanınması konusunda oldukça yoğun çalışmalar

yapmaktadır. Buna rağmen özellikle gerçek zamanlı işlemin gerekli olduğu durumlarda otomatik bir tanıma sisteminin gerçekleşmesi hala zorluklar içermektedir. Bunun yanında yüzün $3B$ 'lu geometrisi nedeniyle oluşan aydınlatma ve poz değişimleri, yüz ifadesinden ve yaşlanmadan kaynaklanan değişimler ve sakal, bıyık, gözlük ve makyajdan kaynaklanan değişimler yüz tanımayı daha da zor hale getirmektedir. Aynı yüzün farklı ışıklandırma ve görüş açısı altında gösterdiği değişimin farklı insan yüzlerinin arasında gözlenen değişimden daha fazla olduğu söylenebilir. Özellikle değişken aydınlatma koşulları yüz tanımayı günümüzdeki en zor problemlerden birisi haline getirmiştir.

Her insan yüzü tekil bir görünüme sahiptir. Yani kişiler arasında yüz bilgisi oldukça büyük farklılıklar gösterir. Kişiler arası yüz görünümlerinin büyük farklılıklar arz etmesinin temel sebebi, her bireyin yüzünün şekil ve doku bakımından oldukça farklı yapıda olmasıdır. Şekil ve dokudaki farklılıklardan dolayı yüz çok farklı görünüme sahip olabilmektedir. Yüz görünümündeki, şekil ve doku değişimine bağlı farklılıklar yüz tanıma ve analiz problemini oldukça zor hale getirmektedir. Bireyler arası yüz görünüm farklılıklarının fazla olmasına karşın, her bireyin kendi yüz görünümünü farklı hale getirecek değişimler de mevcuttur. Bu değişimleri şu şekilde sıralamak mümkündür;

- **Poz değişimi:** Üç boyutlu bir nesne olan yüz farklı bakış açılarından tamamen farklı bir görünüme sahip olabilmektedir. Poz değişiminde örtme (occlusion) nedeniyle yüzün bazı bölümleri görünmez hale gelebilmektedir. Bunun yanında farklı bakış açılarından görüntülenen yüzler uzamsal benzerliklerini kaybettikleri için tamamen farklı veriler içerir hale gelmektedirler. Bu ise aynı birey için bile yüz tanıma işlemini daha zor hale getirmektedir.
- **Aydınlatma:** Poz sabit kabul edilsede ortamda bulunan ışık kaynaklarının konumu ve şiddeti, yüz görünümünü çok büyük ölçüde değiştirebilmektedir. Işık kaynağının konumuna göre yüzün belirli bölgelerinde yer alan beneklerin gri seviye değerleri değişmektedir. Ayrıca aydınlatmanın bir bozucu etkisinde, yüzün $3B$ 'lu yapısı nedeniyle oluşturduğu gölgelerdir. Oluşan gölgeler ortamdaki ışık kaynaklarının sayısı, konumu ve şiddetine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Bazı gölgeler yüz dokusunu tamamen örtmekte ve bir çeşit örtmeye (occlusion)

sebebiyet verebilmektedir. Bu ise yüz görünümünü radikal bir şekilde değiştirebilecek etkiye sahiptir.

- **Yüz ifadesi:** Yüz üzerindeki önemli noktaların çoğunluğu kafatası kemik yapısı üzerindeki noktalardan oluşmaktadır. Göz çukurunun kenarları, burun kemeri vb. gibi noktalar yüz kaslarındaki değişimlerden etkilenmezler. Bu tür noktalar kemik değişmez noktaları olarak adlandırılır. Kemik değişmez noktaları haricindeki yüz önemli noktaları yüz kasları hareket ettikçe konum değiştirirler. İnsanlar arası iletişimde yüz ifadesinin önemli bir yeri vardır ve konuşma anında, duyguların ifade edilmesi sırasında yüz ifadesinde büyük değişiklikler meydana gelir. Bu ise yüz tanıma/modelleme problemini çok daha zorlu hale getiren bir özelliktir.
- **Yaşlanma:** Yaş ilerledikçe yüz görünümünde yaşlanmaya bağlı bir çok değişiklik ortaya çıkar. Aradan geçen birkaç yılda bile yüzde oluşabilecek farklılıklar yüz tanımayı güçleştirebilmektedir. Yüz görünümündeki en büyük değişim çocukluktan ergenliğe geçişte yaşanmaktadır. Yaşlanmaya bağlı değişim kişiye bağlı gelişmektedir ve bu yüzden yaşlanmaya bağlı değişimler için genel bir çözüm ortaya koymak oldukça güçtür.
- **Makyaj ve Estetik :** Makyaj ve yüzde yapılan estetik operasyonlar yüz görünümünü büyük ölçüde değiştirebilmektedir. Aşırı makyaj ve yüz estetiği olduğu durumlarda yüz tanıma/doğrulama yüz kemik değişmez (cronofacial) noktaları dikkate alınarak yapılmaktadır.
- **Aksesuarlar:** Kullanılan gözlük vb. aksesuarlar yüz görünümünü büyük ölçüde değiştirebilmektedir. İdeal yüz tanıma/modelleme sisteminin yukarıda maddeler halinde sıralanan ve yüz değişimine sebep olan durumlardan etkilenmemesi beklenir. Fakat yüz tanıma sistemleri/yaklaşımları genellikle bu değişkenleri birbirinden bağımsız olarak ele alır ve bu değişimlerden bir veya bir kaçından etkilenmeyen bir çözüm ortaya koymaya çalışmaktadır. Birçok yüz tanıma sistemi ise bu değişimlere sebep olan durumları sabit olarak kabul eder ve bunlardan sadece birinin kontrollü değişimini analiz etmeye çalışır.

Değişken aydınlatma koşullarıyla başa çıkabilmek için bazı yöntemler ortaya atılmıştır. Bu yöntemleri dört ana sınıfa ayırabiliriz:

- Aydınlanmadan bağımsız özniteliklerin çıkartılması (ayrıt haritaları Gabor süzgeçleriyle evrişimler , vb.)
- Farklı aydınlanmaya sahip görüntüleri, görüntü işleme yöntemleri kullanarak özgün durumlarına çevirmek (Örn: görüntü iyileştirme)
- Aydınlanma değişimlerini modellemek (farklı ışıklandırılmış birçok yüz görüntüsü kullanılarak çıkartılan modeller)
- Yüzlerin ışıktan bağımsız üç boyutlu ($3B$) modellerini çıkarmak

Yüz görünümünde poz ve aydınlatmadan kaynaklanan değişim, bireyler arası değişimden daha büyük olabilmektedir. Yüzün üç boyutlu ($3B$) yapısından dolayı, ışığın yönü ve şiddetine bağlı olarak yüz bölgesindeki beneklerin gri seviye değerleri ve bunların dağılımları büyük oranda değişebilmektedir. Bu nedenle, yüksek başarılı ve gürbüz bir yüz tanıma sistemi için, aydınlatmadan kaynaklanan değişimlerin mutlaka normalize edilmesi gerekmektedir. Aydınlatma değişimleri yüz görüntüsü üzerindeki etkisinin ortadan kaldırılması oldukça zor bir problemdir ve literatürde bu amaca yönelik çeşitli yöntemler önerilmiştir.

Farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş yüz görüntülerinin modellenmesi için istatistiksel (TBA , DAA vb.) veya fiziksel (Lambertian vb.) modeller kurulabilir. Sadece istatistiksel modeller yardımı ile farklı aydınlatmalara sahip yüzler modellendiğinde yüzey yansıtma özellikleri gibi fiziksel parametrelere ihtiyaç duyulmamaktadır. Eğitim kümesinde yer alan yüz görüntülerine istatistiksel yöntemler uygulanarak, daha küçük bir alt uzayda hem yüz hem de aydınlatma değişimlerinin ayrılabilmesi amaçlanmaktadır. Fakat çoğu durumda kişiler arası değişim ile aydınlatmadan kaynaklanan değişimler sadece istatistiksel yöntemler kullanılarak birbirinden ayrılamamaktadır [2], [3], [4], [5].

İlk yüz tanıma sistemlerinin öznitelik tabanlı yöntemler olduğu görülmektedir. Kanade [6]'nin çalışmasında basit görüntü işleme teknikleri (ayrıt haritaları, histogramlar vb.) ve onlara ait Öklid uzaklıkları kullanılarak tanıma gerçekleştirilmiştir. Daha gelişmiş bir öznitelik çıkartma yöntemi olan bozulabilir şablon (deformable template) yöntemini Yuille, Cohen ve Hallinan [7] önermiştir. Genellikle bu tür yöntemlerde kullanılan arama teknikleri, bilgi tabanlı ve sezgisel yöntemleri kullanarak arama uzayını daraltmaya çalışmaktadır [8]. Fakat bu tür enerji enküçükleme yöntemlerinin oldukça

maliyetli oldukları ve yerel minimumlara karşı gürbüz olmadıkları bilinmektedir. Bozulabilir şablon karşılaştırmasını kullanan Roeder [9] ve Colombo'nun [10] öznitelik çıkartıcılarının, yüzün yerini saptama başarımı gerçek zamanlı bir uygulama için yeterli değildir. Bu gruba diğer öznitelik çıkartıcılardan Reisfeld'in [11] simetri operatörü ve Graf'ın [12] süzgeçleme ve morfolojik işlemlerini ekleyebiliriz.

Bunun yanında holistik teknikler son zamanlarda oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır Manjunath [13] dalgacık dönüşümü kullanarak öznitelik noktalarını çıkartmış ve bu noktalara GaborJet'leri [14] uygulayarak elde ettiği öznitelikleri, tanıma işleminde kullanmıştır. Bu teknik oldukça başarılı sonuçlar vermiş fakat yüksek enerjiye sahip önemli noktalar (fiducial points) seçilirken herhangi bir geometrik ilişkilendirmeye gidilmemiştir. Bunun yerine sadece bulunan önemli noktalardan elde edilen yerel öznitelikler veri kümesinde yer alan diğer görüntülerden elde edilen özniteliklerle karşılaştırılarak tanıma gerçekleştirilmiştir. Herhangi bir şekilsel özellik tanıma yöntemi bahsi geçen bu çalışma içinde kullanılmamıştır. Bu yöntemlere alternatif olarak istatistiksel eğitim temelli teknikler de geliştirilmiştir. Örneğin, Pentland [15] Karhunen-Loeve (*KL*) dönüşümü kullanarak vesikalık insan yüzlerini daha düşük boyutlu bir uzayda tekrar kurabileceğini ve bu uzaya ait parametreleri tanımada kullanabileceğini göstermiştir. Pentland'ın bir sonraki çalışması olan modüler özyüz [16] yönteminin geri çatma ve tanıma başarımının özyüz yöntemine göre daha iyi olduğu görülmektedir [17]. Bu yöntemde öznitelikler, *KL* dönüşümünü yüzün doğal ana bileşenleri olan, göz, burun ve ağız gibi bölgelerine uygulanması ile elde edilmektedir.

Birçok yüz tanıma algoritmasında insan yüzü görüntüden elle bölütlenmektedir ya da yüz dışındaki artalanın sabit ve basit olduğu varsayımı yapılmaktadır. Ayrıca, bu algoritmalarda yüksek tanıma başarımı için giriş yüzünün iyi aydınlatma koşulları altında ve aynı pozda olduğu varsayımı yapılmaktadır.

Fourier, Dalgacık, Karhunen-Loeve gibi dönüşümler doğrusal dönüşümlerdir. Bu yüzden doğrusal olmayan aydınlatma, $3B$ yönelim ve karmaşık artalanın bulunması gibi durumlarda tanıma performansı düşmektedir [18].

Literatürde sıklıkla kullanılan insan yüzü tanıma yöntemlerinin genellikle görünüm tabanlı olduğu (appearance-based) [15] [19] [20] bilinmektedir. Bu yöntemler her

insan için, farklı çevre koşullarını içerecek şekilde eğitim verisine ihtiyaç duymaktadır. Fakat gerçek uygulamalarda sınırlı sayıda eğitim verisi bulunur. Bu sistemler sınırlı veriden insan yüzüne ait tüm değişimleri yakalayamamaktadır. Temel Bileşen Analizine dayalı Özyüzler (Eigenfaces) [15] yöntemi en yaygın görünüm tabanlı yöntemdir. özyüzlere dayalı yöntemler hala sıklıkla kullanılmakta ve başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Bu yaklaşımın önemli sorunları arasında aydınlatma ve poz değişimlerine duyarlı olması yer almaktadır. Bu nedenle aydınlatma koşullarına daha az duyarlı olması yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Son yıllardaki çalışmalar, aslında daha önce de çok iyi bilinen bir yöntem olan Fisheryüzler (Fisherfaces) yönteminin, özellikle poz değişimleri ve aydınlanma değişimlerinde Özyüzler'e göre çok daha iyi tanıma başarımına sahip olduğunu göstermektedir [3]. Fisheryüzler, görüntü uzayını daha düşük boyutlu öznitelik uzayına izdüşürmede sınıf içi değişimleri azaltan ve sınıflar arası değişimleri arttıran Doğrusal Ayırıştırma Analizi (*LDA*) yöntemini kullanır. Son yıllarda *LDA* yöntemlerinin çeşitli türevleri geliştirilmiştir. Özellikle sıfır uzayı (*null – space*) temelli yöntemlerle başarılı sonuçlar elde edilmektedir [21]. Bu yöntemler düşük değışintili bilgilerden de faydalanmayı amaçlamaktadır. Günümüzde yüz tanımada kullanılan yöntemler karşılaştırıldığında sıfır uzayına dayalı doğrusal ayırıştırma yöntemleri ile yüksek başarımlar elde edildiği bilinmektedir. Bunun yanında model tabanlı insan yüzü tanıma sistemleri aktif çalışma alanı olarak bir adım öne çıkmıştır. Model tabanlı tanıma yöntemlerinin öne çıkmasının asıl nedeni insan yüzlerinin kurulan model parametreleri yardımıyla daha doğru ifade edilebilmesidir. Aynı zamanda bu model parametreleri kişinin tanınması, poz kestirimi, yüz ifadesinin saptanması gibi problemlerin çözümünde de sıklıkla kullanılmaktadır. Kısaca model tabanlı yöntemlerle bir insan yüzü tıkHz küme olarak ifade edilebilmektedir.

Fiziksel modeller kullanıldığında ise yüz ışık yansıtma özellikleri üzerine belirli varsayımlar yapılarak aydınlatma değişimleri modellenmeye çalışılmaktadır. Basri ve arkadaşları [22] aydınlatmayı küresel harmonik baz vektörleri ile düşük boyutlu doğrusal alt-uzaylarla ifade etmişlerdir. Harmonik görüntüler, verilen yüzey normalleri ve albedolar kullanılarak analitik olarak kolayca hesaplanabilmektedir. Fakat yüzey normalleri ve albedonun doğru kestirimi oldukça zordur. Ramamoorthi ve arkadaşları [23] ise aydınlatmayı küresel harmoniklerle modellemek yerine farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş yüz görüntülerini küresel harmoniklerle ifade ederek aydınlatma

değişimlerine karşı gürbüz bir yöntem önermiştir. Zhang [24] aydınlatmadan bağımsız yüz tanıma için küresel harmonik gösterimine dayalı yeni bir yöntem önermiştir. Bu yöntemde modelin kurulması için, ortam aydınlatması ve ışık kaynağının şiddeti/yönü ait herhangi bir ön bilgiye ihtiyaç duyulmamaktadır. Eğitim kümesinde her bir birey için sadece bir adet görüntü verilmesi yeterli olmaktadır. Fakat burada nesnelerin (yüz) $3B$ 'lu yüzey normallerinin modeli kurulması gerekmektedir. Bu çalışmanın devamı olarak kabul edilebilecek [25] [26]'de önerilen yöntemlerde ise yüzde ki hem poz hem de aydınlatma değişimleri küresel harmonikler yöntemi ile modellenmeye çalışılmıştır.

Zhao [27] [28] ve Doygard [29] çalışmalarında tonlamadan şekil kurmanın (SFS) [30] gelişkin bir versiyonu olan simetrik tonlamadan şekil kurmaya (Symmetric Shape from Shading) dayalı, aydınlatmaya karşı bağışık yüz tanıma yöntemi önermişlerdir. Bu yöntemde yüzün tam ortasından geçen simetri ekseninin bulunması gerekmektedir. Önerilen bu yöntem ile aydınlatmadan arındırılmış yüz görüntüsü tek bir giriş görüntüsünden elde edilebilmektedir. Çalışmalarında aydınlatmadan arındırılmış görüntüye prototip görüntü ismini vermişler ve bu görüntünün tanıma amaçlı kullanımının aydınlatma değişimleri olsa bile yüz tanıma başarımını arttırdığını raporlamışlardır.

Georghades ve arkadaşları [31] aydınlatma konileri adını verdikleri yöntemde, yüzde aydınlatmadan kaynaklanan değişimleri teorik olarak açıklayan, etkili bir model önermişlerdir. Bu yöntemde yüz üzerinde oluşan gölgelerde model yapısı içine alan yöntem sayesinde literatürde öne çıkan bir başarımlı raporlanmıştır. Aydınlatma konileri yönteminin başlıca sorunu hesaplama maliyetinin oldukça yüksek olması ve her birey için en az yedi adet farklı aydınlatılmış görüntüye ihtiyaç duymasındır.

Lee ve arkadaşları [19] ise dokuz noktasal ışık kaynağı adını verdikleri çalışmalarında ise küresel harmonikler yönteminde ki $3B$ şekil modeline duyulan ihtiyacı da ortadan kaldırmışlardır. Model kurulumu için temel istatistiksel yöntemlerde [32] olduğu gibi her bireyin farklı şekilde aydınlatılmış görüntüsüne de ihtiyaç duymuyor olması önerilen yöntemin avantajlarından biridir. Önerilen yöntem de, tüm yüz aydınlatma değişimini genelleyebileceği deneysel olarak gösterilmiş dokuz boyutlu aydınlatma uzayı kurulabileceği de gösterilmiştir.

Zhou ve arkadaşları ise [33] yüz görüntülerini hem Lambertian yansıtma modeli hem de doğrusal alt uzaylar yaklaşımı yöntemi ile analiz ederek insane yüzünü doğrusal Lambertian nesnesi olarak tanımlamışlardır. Bu sayede yüz görüntülerini Lambertian baz vektörlerinin doğrusal birleşimi şeklinde ifade edebilmektedirler.

Riklin ve Shashua [34] yüzün Lambertian yüzey olduğu ve yüz dokusunda herhangi bir gölge olmadığı ideal ortam varsayımı altında, farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş görüntüleri, ideal ortamda çekilmiş görüntülere oranlayarak aydınlatma değişimlerinin onarılabileceğini göstermişlerdir. Önerdikleri yöntem, oldukça basit ve uygulanabilir olması yanında $2B$ görüntüler kullanan yüz tanıma sistemlerinin ışığa karşı gürbüz hale gelmesine yardımcı olmaktadır. Wang ve arkadaşları [35] ise Shashua'nın önerdiği oran (quotient/ratio) görüntüsünü temel alarak yüzün dokusuna ait yansıma oranını (reflektans) kestiren bir yöntem önermişlerdir. Liu ve arkadaşları [36] tarafından oran görüntüleri yöntemi daha da geliştirilmiş ve yüz için özelleştirilmiş çevrimsel bir algoritma ile birlikte sunulmuştur. Her iki yöntem için temel zorluk tüm görüntülerin tamamen hizalanmış olduğu varsayımının gerçek çalışma koşullarında sağlanamaması ve hizalanmamış görüntüler için kabul edilemez ölçüde hatalı sonuçlar üretiyor olmasıdır.

Zhang [37], [38] ve An [39] çalışmalarında, oran görüntülerini temel alan yeni bir fotometrik normalizasyon yöntemi önermişlerdir. Önerilen yöntemlerin sonuçlarında, özellikle aşırı aydınlatma koşullarında çekilmiş yüz görüntüleri için, istenmeyen bozucu etkiler gözlenmektedir.

Literatürde önerilen fotometrik normalizasyona dayalı yöntemler, aydınlatma değişimlerinin bozucu etkilerini büyük ölçüde ortadan kaldırabiliyor ve aydınlatma değişimlerinin olduğu yüz görüntülerinde tanıma performansını arttırıyor olsa da, önerilen yöntemlerin aydınlatmadan tam olarak bağımsızlığı sağladığını söylemek güçtür. Fotometrik normalizasyonlara dayalı aydınlatmadan bağımsız yüz tanıma için birçok yöntem literatürde önerilmiştir, bunların karşılaştırmalı olarak incelemesi [40] ve [41]'de verilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar arasında öne çıkan, model tabanlı yöntemler ve bu yöntemlere referans oluşturan birçok çalışma vardır. Örneğin, Pentland ve arkadaşları [15] özyüz olarak bilinen yöntemi geliştirmişlerdir. Özyüz yönteminin şekil, poz ve ifade

değişimlerine karşı gürbüz olmadığı bilinmektedir. Ezzat ve Poggio [42] yaptıkları çalışmada eğitim görüntüleri kullanarak yeni insan yüzleri görüntüsü üretebilmişlerdir. Fakat bu yönteminde eğitim kümesinde yer almayan görüntüler için çalışmadığı ve test verileri için genelleme yeteneğinin kısıtlı olduğu görülmektedir [43].

Nastar ve grubu [44] üç boyutlu gri seviye yüzey modeli kullanarak insan yüzünün şekil ve görünümünü tam olarak sentezlemeye çalışmıştır. Fakat önerdikleri yöntemde yer alan arama algoritması yerel minimumlara takıldığı için gürbüz bir çalışma ortaya koyamamıştır. Lanitis ve arkadaşları [45] insan yüzüne ait şekil ve şekile göre normalize edilmiş gri seviye değerlerini (doku) ayrı ayrı modelleyen bir yöntem geliştirmişler. Edwards ise çalışmasında [43], Lanitis'in yöntemini, şekil ve gri seviye bilgisi arasındaki ilintiyi modelleyerek daha da geliştirmiştir. Edwards ve grubu aktif şekil modelleri (AŞM) kullanarak insan yüzüne ait şekil bilgisini, genel geçen en küçükleme yöntemlerine göre daha hızlı bir şekilde saptamışlardır. Daha sonra bulunan şekil bilgisine göre görüntü içerisindeki yüz normalize edilerek gri seviye, yani örüntü bilgisi, çıkartılmış ve bu şekle göre normalize olmuş insan yüzüne model parametreleri uydurulmuştur.

ASM oldukça etkin bir yöntem olmasına karşın, model parametreleri saptanırken yüze ait gri seviye bilgisinin tamamını kullanmamasından dolayı, yüz değişimlerine karşı her zaman güvenilir ve gürbüz model parametreleri üretememektedir [43]. İnsan yüzü gibi bir çok bilgisayarla görü probleminin yüksek başarımla çözümü için giriş görüntülerinin hizalanması gerekmektedir. Bu yüzden son yıllarda tüm araştırmalar bu yöne doğru kaymıştır. Genellikle getirilen çözümler model tabanlı yaklaşımlardan [46] oluşmaktadır. Bu model tabanlı yöntemler arasında insan yüzü hizalama işleminde en başarılı sonucu aktif görünüm modeli (AGM) [46] vermektedir. Yöntem, şekil ve örüntü arasında kurduğu model sayesinde hızlı ve gürbüz bir şekilde bozulabilir görüntü eşleşmesi yapabilmektedir.

Gerçek zamanlı yüz tanıma sistemlerinde yüksek başarımlı elde edebilmek için yüz saptama modülünün, mümkün olan en uygun pozunu belirlemesi, öznitelikleri çıkartması ve tanıma modüllerine göndermesi gerekir. Bu ise yüz saptandıktan sonra, yüze ait önemli noktalarının akan görüntü üzerinde sürekli takip edilmesi ve eğitim kümesindeki görüntülere en yakın bakış açısı elde edildiğinde sorgulamanın

yapılmasını gerektirir. Bu tür bir yüz izleme sisteminin oluşturulabilmesi için poz değişimlerine karşı gürbüz bir yüz saptama/modelleme yöntemine ihtiyaç vardır.

Yüz tanıma sistemlerinin farklı poz değişimlerine karşı da gürbüz olması ve başarılı bir tanıma gerçekleştirmesi istenir. Yüz görünümünde poz ve aydınlatmadan kaynaklanan değişim, bireyler arası değişimden daha büyük olabilmektedir. Yüzün üç boyutlu ($3B$) yapısından dolayı, ışığın yönü ve şiddetine bağlı olarak yüz bölgesindeki beneklerin gri seviye değerleri ve bunların dağılımları büyük oranda değişebilmektedir. Bu nedenle yüz tanıma sistemlerinde kabul edilebilir bir tanıma başarımına ulaşılabilmesi için poz değişimlerini normalize eden bir modül yer alması gerekir. Bu durum sadece yüz tanıma problemi ile sınırlı değildir.

Poz değişiminden bağımsız, iki boyutlu ($2B$) yüz saptama/hizalama konusunda yapılmış daha önceki çalışmalar incelendiğinde genel yaklaşımın her bir poz için farklı bir model kurmak ve uydurma (fitting) esnasında uygun model seçilerek arama işlemini gerçekleştirmek şeklinde olduğu görülmektedir. Bu tür yöntemlerde yüz hizalama modülüne giriş görüntüsü verilmeden önce, bakış açısı saptama modülü yardımı ile yüze ait poz saptanmakta ve bu poza en yakın yüz altuzayı seçilerek yüz hizalama işlemi yapılmaktadır. Birden fazla alt modeller arasında geçiş yapılarak poz saptamak hem çok maliyetli hem de her bir alt yüz uzayının oluşturulması için her bireyin mümkün olduğunca farklı pozlardaki görüntülerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Genel olarak literatürde yer alan $2B$ 'lu pozdan bağımsız yüz tanıma yöntemlerini dört ana başlıkta toplamak mümkündür. Bu yöntemler, özgün görüntü/poz üzerinde doğrudan tanıma, $2B$ 'lu dönüşümler yardımı ile poz değişiminden arındırıldıktan sonra tanıma, öznitelik uzayında poz değişimlerinden arındırarak tanıma ve son olarak $3B$ 'lu yüz verileri üzerinden yüz tanıma şeklinde özetlenebilir. Birinci sınıfta ki yöntemlerin poz değişimi olmayan, yani önden çekilmiş yüzleri tanımaktan her hangi bir farkı yoktur ve poz değişiminden kaynaklanan problemlerin çözümü için her hangi bir çözüm sunmamaktadır. Tek fark tanıma işleminin bulunduğu pozda yapılmasıdır. Bu sınıfta ki yöntemler genel olarak görüntü tanımada sıklıkla kullanılan istatistiksel öznitelik çıkartıcıları kullanarak tanımayı gerçekleştirmektedirler.

Yapılan ilk çalışmalarda, poz değişiminin yüz tanıma sistemleri üzerine etkisini azaltmak için önerilen yaklaşımlar genel olarak her birey için farklı pozda çekilmiş

olabildiğince fazla görüntünün toplanması üzerine kurulmuştur. Bu yaklaşıma verilebilecek en tipik örneklerden biri Beymer'in [47] önerdiği yöntemdir. Bu yöntemde her birey için farklı pozlarda çekilmiş 15 adet yüz fotoğrafı veri tabanında tutulmaktadır. Tanıma işlemi, giriş olarak verilen test görüntüsü ile veri tabanında ki fotoğrafların doğrudan kıyaslanması yapılarak gerçekleştirilmektedir. Gerçekte her birey için, tüm pozları içerir fotoğrafların elde edilmesi oldukça zordur. Ayrıca her birey için veri tabanında 15 farklı poz görüntüsünün tutulması da maliyetli bir işlemdir. Gerçek görüntülerin kıyaslanmasına dayalı yöntemlerin verebileceği başarı oranı da kabul edilemeyecek düzeyde çıkmaktadır. Bu sınıfta yer alan çalışmaların başlıcaları [6] - [15] arasında verilmiştir.

İkinci sınıfta yer alan $2B$ dönüşümlerle poz değişimlerinin ortadan kaldırılmasına dayalı yöntemlerde ise genellikle elde ki az sayıda poz görüntüsünden sentetik pozların sentezlenmesi amaçlanmaktadır. Bu yöntemlerin ortak zorluğu ise poz dönüşümlerinin yapılabilmesi için görüntüler arası karşılıklılandırma (correspondence) probleminin çözülmesi gereğidir. Temel olarak $2B$ 'lu bükme (warping) [48] [49] yöntemleri ile poz dönüşümleri yapılmaktadır. Yüz tanıma ve modellemenin temel zorluklarından biri olan poz problemi de tez kapsamında ele alınmıştır. *AGM* çatısı altında, eğitim kümesinde yer alan ve tam karşıdan çekilmiş bir kişiye ait yüzün, önceden belirlenmiş başkaca bir poza dönüştürülmesi (poz doğrultma) ve farklı pozlardaki görüntülerin oluşturulması (poz sentezleme) konuları üzerinde çalışılmıştır [50]. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar sonucunda, modeldeki yüz şekline ait önemli noktaların istenilen şekle bükülmesiyle, düzlem dışı azimuth ve yükselti açılarında ± 30 derece aralığıyla sınırlı olmak koşuluyla, farklı poz görüntüleri elde edilebilmiştir. Önerilen yöntem sadece yüz hizalama problemi için özel bir yaklaşım değildir ve başkaca nesnelerin modellenmesinde de kullanılabilir genel bir yaklaşımdır. Önerilen yöntemin ana katkısı; yüz modeli kurulurken, eğitim kümesindeki yüz şekilleri kullanılarak, şekil verilerinin sentetik olarak zenginleştirilmesi ve bu sentetik şekillerden sentetik yüzler oluşturularak poz değişimlerini de içeren gürbüz bir model oluşturulmasıdır. Önerdiğimiz yönteme benzer bir yaklaşım Gao ve arkadaşları [51] tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde, pozdan bağımsız hale getirilen yüz görüntülerine ait yerel öznitelikler çıkartılarak yüz tanıma gerçekleştirilmiştir. Bu sınıfta yer alan

yöntemler genel olarak ± 45 derecelik poz değişimleri için kabul edilebilir sonuçlar elde edilebilmektedir.

Bu problemlerin çözümü için önerilen yöntemlerden biri de Singh [52]'in önerdiği panoramik yüz gösterimidir. Bu gösterimde belirli kısıtlar dikkate alınarak çekilmiş üç farklı poz görüntüsünün bir araya getirilerek kişinin tüm poz değişimlerini panoramik olarak oluşturmak amaçlanmaktadır. Genellikle kullanılan yüz görüntüleri tam karşıdan, aynı eksende olmak kaydıyla, yüzün sağ ve sol profillerine ait olmak üzere üç adet yüz görüntüsü kullanılmıştır. Tanıma işlemi yüz panoramaları üzerinden yapılabildiği gibi, eğitim kümesinde var olan kişinin tek bir pozu için çekilmiş yüz görüntüsü içinde panorama yüz üzerinde yerel öznitelikler kullanılarak, kısmi tanıma işlemi de yapılabilmektedir. Tanıma için kullanılan yerel öznitelikler Gabor süzgeçler yardımı ile çıkartılmış ve yüz panoramaları oluşturulduktan sonra ki kısımlar genel amaçlı doku tanıma problemi olarak ifade edilmiştir. Yöntem özgün bir yaklaşım sunuyor olsa da panorama yüzlerin oluşturulması aşamasında, yüzlerin hizalanmamış olması ve tüm panoramayı kurmaya yeterli bilgi içermemesi gibi durumlarda sorunlar yaşandığı aynı çalışmada raporlanmıştır.

Beymer'in [47] çalışmasının devamı sayılabilecek [53]'da tanıtılan yöntemde ise tüm görüntü benekleri arasında karşılıklılandırma problem çözüldükten sonra, veri kümesinde yer alan bir bireye ait poz değişimlerini gösterir bükme tabloları ile veri kümesinde yer almayan başkaca bir bireyin poz deformasyonları kestirilmeye çalışılmaktadır. Bu yöntemde karşılıklılandırılmış yüzlerden bükme algoritmaları yardımı ile sentetik yüz pozları sentezlenmeye çalışılmıştır.

Jimenez ve arkadaşları [54] yüz önemli noktalarının istatistiksel dağılımından elde ettikleri modeli kullanarak, Aktif Şekil Modeli yapısı içinde sentetik pozları sentezlenmesine dayalı poz değişimlerinden bağımsız bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde de tanıma amaçlı öznitelikler [53]'da olduğu gibi Gabor süzgeçlerden elde edilmiştir.

Yine bu sınıf içinde değerlendirebileceğimiz bir diğer çalışma da Cootes ve arkadaşları [55] poz probleminin çözümü için, tam karşıdan, yarım profilden ve tam profilden çekilmiş üç farklı yüz için kurulmuş üç ayrı Aktif Görünüm Modelini bir araya getiren bir yöntem önermişlerdir. Farklı bir poza sahip bir giriş görüntüsü

verildiğinde, her model için ayrı ayrı arama işlemi yapmak yerine, önerdikleri yapı sayesinde, doğru pozu tutan modelin olduğu uzayda arama yaparak, çok daha hızlı yakınsama gerçekleştirilebileceğini göstermişlerdir. Ayrıca çalışmalarında model parametrelerinden poz kestiriminin de yapılabileceğini ve girilen farklı pozda ki yüzün, tam karşıdan görünen halini belirli bir hata toleransı ile sentezleyebileceklerini göstermişlerdir. Önerilen model, eğitim kümesinden elde edilen istatistiksel model yardımı ile yüz önemli noktaları kestirir ve bu noktalar üzerine kurulan üçgenleri bükerek farklı pozları sentezlemektedir. Burada ki en büyük zorluk poz değişimi nedeniyle yüzdeki bazı bölgelerin bir kısmı veya tamamının görünmez (self-occlusion) hale gelmesidir. O bölgelerdeki üçgenler her ne kadar ihmal edilecek kadar küçültülmüş olsa da, bu gibi durumlarda sentezlenen yüzde yapay çıkıntı/kenarların oluşmasına neden olabilmektedir. Bu durumda, hatalı sentezlenen üçgenlerden dolayı artan model geri çatma hatası, model parametrelerin kestiriminin de hatalı olmasına sebep olmaktadır. Bu ise önerilen yöntemin hizalama başarımı büyük ölçüde düşebilmektedir.

Öznitelik uzayında yapılan dönüşümler yardımı ile poz değişimlerine karşı bağışık yüz tanıma yapan yöntemlerde ise doğrusal/doğrusal olmayan istatistiki dönüşümler yardımı ile poz değişimleri olsa da bireylerin öznitelik uzaylarında kolayca ayrıştırılması amaçlanmaktadır.

Prince ve arkadaşları [56] ise Tied Faktör Analizi (*TFA*) olarak isimlendirdikleri istatistiksel bir model yardımı ile her bireyin poz değişimlerinin öznitelik uzayında nasıl bir değişime sebep olduğunu araştırmışlar ve tüm poz değişimlerini önerdikleri öznitelik uzayında kişiden bağımsız olarak tanımlamaya çalışmışlardır. Bilinen pozlardan birine sahip yüz görüntü girişi olarak modele verildiğinde, önerilen yöntem beklenti maksimizasyonu (*EM*) yardımı ile o yüzün eğitim kümesinde ki bireylerden kime ait olduğunu çevrimsel bir algoritma ile kestirebilmektedir. Bu çalışmada, çok büyük poz değişimlerinin olduğu yüz veri tabanları için de, *TFA* yönteminin oldukça başarılı sonuçlar verdiği raporlanmıştır. Önerilen yöntemde kişiler arası kimlik değişimi ile poz değişimleri iki ayrı alt uzayda tanımlanabilmektedir.

Poz ve aydınlatma değişimlerinden bağımsızlığı $2B$ yüz verileri üzerinde tam olarak sağlamak, yüzün kendine özgü $3B$ 'lu yapısı gereği oldukça zor bir problemdir. Poz ve aydınlatma değişimlerinden bağımsız yöntemler için son yıllarda $3B$ 'lu yüz

modellerinden de yararlanılmaktadır. Özellikle poz problemi için $3B$ 'lu yöntemler oldukça iyi sonuçlar verebilmektedir. Önerilen yöntemler soysal (generic) $3B$ 'lu yüz şekil modelleri [57] [58], her birey için özel $3B$ 'lu şekil çıkartıcı algılayıcılarla elde edilmiş $3B$ yüz verileri [59] [60] [61] veya her bireyin $2B$ 'lu görüntülerinden sentezlenen, o kişiye özel $3B$ 'lu modeller şeklinde üç ana sınıfta toplanmaktadır.

Bilgisayarla görü teorisine göre herhangi bir nesnenin hassas $3B$ geometri bilgisini elde edebilmek için en az üç adet o nesneye ait görüntüye ihtiyaç duyulur. Tek bir görüntüde $3B$ geometriyi bütünüyle kuracak yeterli bilgi bulunmamaktadır. Gerçek hayatta, her kişinin üç adet görüntüsüne çoğu zaman sahip değiliz. Blanz [62] ve Vetter'in [63] önerdiği bozulabilir model uydurma yöntemiyle ($3DMM$), $3B$ yüz verilerinden oluşan eğitim kümesiyle kurulan model yardımıyla $2B$ tek bir görüntüden özgün pozlar elde edilebilmektedir. Fakat bu ve benzeri $3B$ yaklaşımların en büyük problemi hesaplama maliyetlerinin çok yüksek olmasıdır. Blanz ve Vetter'in yönteminde $3B$ uydurması için gerekli süre yaklaşık olarak 5 dakika civarındadır [62] [63]. Bu tür bir hesaplama maliyeti gerçek zamanlı sistemlerde benzer yaklaşımların kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Bunun yanında $3B$ yüz tarama için özelleşmiş $3B$ tarayıcılara ihtiyaç olması ve bu tür donanımların hem çok maliyetli hem de yeterli çözünürlükteki $3B$ veri için tarama süresinin mevcut teknolojiyle oldukça uzun sürmesi $3B$ yaklaşımların olumsuz taraflarıdır. Benzer bir şekilde, Wang ve arkadaşları [64] $3DMM$ en-iyileme yapısını değiştirerek daha etkin bir model ortaya koymuşlardır.

Kittler ve arkadaşları [65] ise poz değişimlerinden etkilenmeyen öznelikler bulmak için, doğrusal ve doğrusal olmayan istatistiksel öznelik çıkartıcılar ve yüz görüntülerini $2B$ 'tan $3B$ 'a dönüştürmek için soysal (generic) bir $3B$ yüz modelinden oluşan karma bir model önermişlerdir. Önerilen yöntemde, kullanılan öznelik çıkartıcılar ve $2B$ 'lu dönüştürücülerden gelen veriler biraraya getirilerek, poz değişimlerine karşı gürbüz yüz tanıma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde kullanılan $3B$ yüz modeli, tüm bireyler için ortak kullanıldığı için, bu model yardımı ile gerçekleştirilen poz sentezi gerçekçi olmayan yüzlerin sentezlenmesine sebep olmaktadır.

Görünüm temelli yaklaşımlarda eğitim kümesinde yer alan tüm görüntüler genellikle daha düşük boyutlu bir uzayda temsil edilmeye çalışılırlar. Kurulan bu uzay görüntü uzayı olarak adlandırılır. Görünüm temelli yaklaşımlarda tanıma, sınıflandırma v.b.

tüm işlemler $2B$ 'lu gerçek görüntüler yerine oluşturulan görüntü uzayı üzerinde yapılmaya çalışılır. Gerçekte hiçbir istatistiksel model kullanılmadan da $2B$ 'lu görüntüleri çok yüksek boyutlu bir uzayda bir nokta olarak temsil etmek mümkündür. Bunu bir örnek üzerinde anlatacak olursak; $I(x, y)$, $M \times N$ 'lik $2B$ 'lu bir görüntü olsun. İki boyutlu gösterim yerine, görüntüde yer alan her bir benek için bir boyuta sahip $M \times N$ -boyutlu bir uzayda her görüntü bir nokta olarak görünecektir. Benzer görüntüler yüksek boyutlu bu uzayda birbirlerine yakın bölgelerde, farklı görüntüler ise uzayın başkaca bölgelerinde toplanacaktır. Bir görüntünün boyutları dikkate alındığında $M \times N$ -boyutlu bir uzayın modelleme açısından fazla büyük olduğu görülecektir.

Giriş görüntüsünde yer alan ve bir bilgi taşımayan birçok benek doğrudan model içinde yer aldığı için kurulan görüntü uzayının boyutları pratikte kullanımını sınırlayacak oranda büyümetedir.

$I(x, y)$ görüntülerinin çözünürlüğü arttığında kurulacak uzayın boyutları daha da büyük olacaktır. Bir örnek üzerinde bu durumu açıklayacak olursak; elimizde 50 adet 100×100 'lük, $2B$ 'lu görüntü olduğunu düşünelim. Bu görüntülerden kurulan 10.000-boyutlu görüntü uzayında tüm görüntüler sadece 50 noktaya karşılık düşecektir. Uzayın büyük bölümünün boş olduğu ve gözlerin görüntü uzayının sadece bir küçük bölümünde yer aldığı açıktır. Bu noktada sorulması gereken soru şudur: elimizde sınırlı sayıda gözlem varken 10.000-boyutlu bir uzay yerine gözlem sayımızın büyüklüğüne uygun, daha küçük bir uzay kurabilmek mümkün mü? Bu soruda ki anahtar kelime, gözlem sayısıdır ve gözlem sayısı genellikle kurulan uzayın boyutlarına göre oldukça küçük olmaktadır. Yukarıda verilen 10.000-boyutlu görüntü uzayı yerine giriş görüntüsündeki olası tüm değişimleri içerecek daha küçük bir görüntü uzayı kurmak mümkündür. Bu değişimlerin neler olabileceğini yüz verisi üzerinden örneklendirebiliriz. Giriş görüntüsü olarak yüz seçildiğinde giriş verilerinde kişi, poz, aydınlatma vb. değişimler olacaktır. Yüz verisinin ana değişimlerine ait gözlemlerin bulunduğu görüntü veri kümesi yardımı ile bu tür bir uzay kurulabilir.

Kurulacak yüz uzayı sadece yüze ait ana değişimleri içine alan ve görüntü uzayından çok daha küçük bir uzay olacaktır. Yüz örneği üzerinden gidecek olursak, kurulacak yüz uzayında yer alan her farklı kişiye ait yüz görüntülerinin yüz uzayının belirli bir bölgesinde kümeleneceği öngörüsü hatalı olmayacaktır. Çünkü ideal durumda her farklı bireye ait yüzlerin oluşturduğu kümeler görüntü uzayında farklı bölgelere denk

gelmesi beklenir ve bu bölgeler görüntü uzayının boyutları dikkate alındığında oldukça küçük öbeklere karşılık gelecektir. Görüntü uzayından çok daha küçük ve tıkHz bir uzay kurmaya yarayan istatistiksel bir çok yöntem literatürde yer almaktadır [15] [16] [66] [67] [68] [69] [70]. Bunlardan en bilineni temel bileşen analizi (TBA) [71] olarak bilinen yöntemdir. TBA tezin ilerleyen bölümlerinde modelleme amaçlı kullanıldığı için yöntemin detayları *EK – A*'da detaylı olarak verilmiştir.

AGM kısaca şu şekilde çalışır; önceden yüze ait önemli noktaların koordinatları saptanmış şekildeki eğitim görüntüleri ile eğitilerek kurulan model yardımı ile yeni insan yüzleri sentezlenebilmektedir. İki resmin eşlenmesi işlemi ise giriş görüntüsü ile sentezlenen görüntü arasındaki farkı minimize eden model parametrelerini bulmaya çalışır [72]. Model bazlı nesne saptama/tanıma çalışmalarında, modelleme yeteneği *ASM*'den daha yüksek olduğu ispatlanmış *AGM*'nin insan yüzü tanıma probleminin model temelli çözümünde *ASM*'ye göre çok daha iyi sonuç vereceği öngörülmektedir. Bu tezde insan yüzüne ait önemli noktaların çıkartılması ve insan yüzüne ait modelin kurulması aşamasında *AGM* yöntemi kullanılacaktır.

Veri kümesinde yer alan yüz görüntüleri üzerinde işaretlenen önemli noktalarının hizalanması konusunda yapılan ilk çalışmalardan biri [73]'de tanıtılmaktadır. Yüz şekil verisini yüz önemli noktaları ile tanımlayıp bu noktalara TBA uygulayarak nokta dağılım modeli (*NDM*) oluşturulmasına dayalı bir yaklaşımlar, [74] [75] [76] [77] [78] [79]'daki çalışmalarda önerilmiştir. Yüz şekil nokta dağılım modeli olarak adlandırılan bu yaklaşımda *2B*'lu yüz görüntülerinde yüzün olan çene, göz kenarları, kaşlar vb. bileşenlerinin fiziksel nesne sınırları üzerinde belirli sayıda nokta belirlenmiştir. Bu noktalar yüz şekil verisini oluşturmaktadır ve veri kümesinde yer alan tüm yüzler için aynı sayıda ve aynı kurallara göre işaretlenmişlerdir.

Nesne sınırları üzerlerinde tanımlanan bu önemli noktalar sayesinde bireyin yüzün *2B*'lu şekil bilgisi büyük ölçüde tanımlanmış olmaktadır. Fakat *2B*'lu görüntü üzerindeki uzamsal konumlara karşılık gelen bu nokta kümesinin, *3B*'lu bir dönüşüme karşılık gelen poz değişiminden etkileneneği ortadadır. Bu yüzden *NDM* benzeri yaklaşımlarla şekil verisi modellenirken poz değişimi gibi değişimler için ya ayrıca bir çözüm önerilmekte ya da poz değişiminin belirli bir aralıkla sınırlı olduğu (örn: ± 30 derece) varsayımı altında çözümler sunulmaktadır.

NDM'lere dayalı yöntemlerle yüz önemli noktalarını saptamaya yönelik kayda değer ilk çalışma aktif şekil modeli (*ASM*)'dir. Cootes ve Taylor [74] tarafından önerilmiştir. Bu çalışmada *2B*'lu yüz görüntüsünde yer alan yüz ayrıtları temel alınarak bir çözüm ortaya konulmuştur. *ASM*'de dönme, yer değiştirme, ölçek ve şekil değişimleri çevrimsel arama/uydurma yaklaşımı ile aşılmaya çalışılmıştır. Her çevrim iki aşamadan oluşmaktadır; birinci aşamada *ASM* şekil noktaları görüntü içerisinde yer alan ayrıtlara dik olacak konumlandırılmaktadır. Bu noktalar ayrıtların en büyük genliğe sahip olduğu noktalara doğru yerleşecek şekilde konumlandırılmaya çalışılmaktadır.

İkinci aşamada ise *NDM* şekil parametreleri yardımı ile yüz şekilleri yeniden sentezlenerek arama çevrimi yeniden yapılmaktadır. Mümkün olduğunca eğitim veri kümesinden elde edilen ve *AŞM*'nin kullandığı *NDM*'nin genelleme yeteneğini en çoklayıcı şekilde, her çevrimde kural tabanlı şekil bozulması uygulanıp tekrar arama yapılmaktadır. Fakat istenmeyen sonuçların önüne geçebilmek için parametre güncelleme ve şekil bozmaya belirli kısıtlarda konulmuştur. Burada arama çevrimi öncesi yapılan şekil bozmadan kasıt, *NDM* geri çatma hatasını en azlayan ilgin dönüşüm parametresi ile şekil nokta kümesinin deformasyona uğratılmasıdır. Bu sayede *AŞM* ile dönme, ölçek ve yer değiştirme gibi ilgin dönüşüme uğramış nesnelerin şekilleride arama çevrimleri sonunda saptanabilmektedir.

AŞM'nin, üzerinde güçlü ayrıtlar olan, basit nesnelere oldukça iyi sonuçlar verirken, karmaşık ve güçlü ayrıtlara sahip olmayan nesnelere için iyi sonuçlar veremediği [76]'deki çalışmada raporlanmıştır. Ayrıta dayalı bir yaklaşım olan *AŞM* için bu beklenen bir durumdur. Bu nedenle ikinci nesil *ASM* [76] olarak isimlendirilen yeni bir model önerilmiştir. İkinci nesil *ASM*, modellemeyi sadece ayrıtlara dayalı yapmak yerine *NDM* için kullanılan şekil noktaları altında kalan yerel bölgedeki gri-seviye profillerini de kullanmıştır. Daha açık bir anlatımla, TBA yardımı ile giriş verilerinin her şekil noktası için gri-seviye profilleri modellenmiştir. Daha sonra her çevrimde TBA'dan elde edilen izdüşüm parametreleri kullanılarak geri çatılan gri-seviye profilleri ile *ASM*'nin ilgili noktasına ait gri-seviye profili arasında farkı minimize edecek şekilde arama/uydurma işlemi yapılmaktadır. Bahsi geçen çalışmada amaç, yüz şekil verisini oluşturan önemli noktaların daha etkin bir şekilde saptanmasıdır.

AŞM'ye dayalı yüz tanıma yöntemi ilk olarak Lanitis ve arkadaşları [78] tarafından önerilmiştir. Bu çalışmada AŞM yardımı ile yüz şekil noktaları saptanmış daha sonra bu noktaların çevrelediği yüz dokusu görüntüden çıkartılarak tanıma amaçlı kullanılmıştır. Çıkartılan doku yüz dokusu giriş görüntülerinin ortalaması olan referans yüz şekline bükülerek, şekilden bağımsız yüz doku vektörleri elde edilmiştir. TBA yardımı ile bu doku vektörleri modellenerek birinci nesil AŞM'den farklı olarak bir de doku modeli kurulmuştur. Yüz tanıma aşamasında hem şekil hem de doku TBA modelleri yardımı ile elde edilen izdüşüm parametreleri bir arada kullanılmıştır. Tanıtılan yaklaşım şekil ve doku modellemenin bir çok alanda kullanılabilceğini ve aynı zamanda AŞM benzeri yöntemlerle çok daha etkin sonuçlar alınabileceğini göstermesi açısından nesne tanıma modelleme alanında yeni bir alan açmıştır.

[78]'da tanıtılan yaklaşım daha da geliştirilerek AŞM'nin gri-seviye profillerine dayalı şekil bulma yöntemi değiştirilerek, tüm dokunun kullanılmasına dayalı yöntemler önerilmiştir. Sadece şekil noktaları etrafındaki yerel bir bölgedeki gri-seviye profillerinin kullanılmasının modelin doğru yere yakınsaması için yetersiz kaldığı bilinmektedir. Yüz dokusu bilgisinden sadece önemli noktalar etrafındaki tekil profiller şeklinde yararlanmak yerine, şekil noktalarının çevrelediği tüm dokuyu kullanmak model uydurma ve yakınsama için daha doğru bir yaklaşım olduğu yapılan çalışmada gösterilmiştir.

İlk olarak Sclaroff ve Isidora [77] aktif öbek (active blob) olarak isimlendirdikleri yöntemde doku bilgisinin tümünün kullanımına dayalı bir model önermişlerdir. Ardından Cootes, [79]'deki çalışmasında aktif görünüm modeli (*AGM*) isminde, aktif öbek yönteminin gelişkin hali olan yeni bir model önermişlerdir. *AGM* eğitim kümesinde yer alan görüntülerin önemli noktaları işaretlenerek şekil bilgisi oluşturulmaktadır. Ayrıca *AGM*'de görüntü üzerinde tanımlanan şekil noktalarının çevrelediği dış bükey alan içinde kalan doku bilgisi referans bir şekile bükülerek doku verileri oluşturulmaktadır. Hem şekil hem de doku verileri *TBA* ile ayrı ayrı modellendikten sonra şekil ve doku izdüşüm parametreleri bir araya getirilerek tek bir görünüm modeli oluşturulmaya çalışılmıştır. Tanım olarak görünüm, şekil ve doku gibi iki değişimi içinde barındırmaktadır. *AGM* bu tanıma uygun olarak her iki değişimi tek bir platformda bir araya getirmiştir. Model parametre güncellemesi tamamen sentezlenen doku ile referans şekile bükülen dokunun farkını en küçükleyecek şekilde

seçilmektedir. *AGM* parametre güncellemeleri ve en iyileme adımları konusunda detaylı bilgi tezin ilerleyen bölümlerinde verilmiştir.

AGM'nin uygulama alanını genişletmek için Cootes [55]'daki çalışmasında bakış açısından bağımsız yeni bir *AGM* önermiştir. Çalışmada farklı pozlardaki yüzlerden eğitilmiş beş farklı *AGM*'nin bir araya getirilmesi ile bakış açısından bağımsız bir yaklaşım önerilmiş olsa da ilk *AGM* ile eniyileme ve modelleme bakımından bir farkı yoktur.

AGM en iyileme yapısında yakınsama başarımını arttırmak ve arama zamanını azaltacak yönde bazı değişiklikler yapılarak yeni *AGM* yöntemleri de önerilmiştir. Pizarro ve arkadaşları tarafından önerilen yöntemde [80], giriş görüntülerini klasik *AGM*'de olduğu gibi *RGB* olarak kullanmak yerine aydınlatma değişimlerinden daha az etkilendiğini belirttikleri *logRGB* olarak kullanarak aydınlatmadan daha az etkilenen bir *AGM* yapısı önermişlerdir. Bir diğer çalışma, Matthews ve Baker tarafından önerilen ve *ICIA* [81] olarak isimlendirdikleri görüntü hizalama yöntemidir. Bu yöntemin *AGM*'ye olan en önemli üstünlüğü en iyileme sırasında dokular arası hata ile parametre güncelleme arasındaki ilişkiyi kontrol eden ilinti matrisini, dinamik olarak matematiksel yöntemlerle maliyet fonksiyonundan çıkartıyor olmasıdır. *ICIA*, *AGM*'ye göre daha az çevrimde yakınsamaktadır. Bunun nedeni *ICIA*'da sadece şekil parametreleri çevrimsel olarak güncellenmektedir. Doku parametreleri ise şekil parametreleri bulunduktan sonra tek adımda kestirilmeye çalışılmaktadır. Hem şekil hem de doku parametreleri kestiriminde *AGM*'de olduğu gibi Jakobian matrisleri kullanılmaktadır.

Giriş olarak verilen yüzün aydınlatma değişimi hariç, birebir aynısı eğitim kümesinde yer alsa bile klasik *AGM* doğru yakınsamayı sağlayamamaktadır. Tez kapsamında öncelikle aydınlatmanın yüz görünümünde ne gibi değişikliklere sebep olduğu sorusunun yanıtı aranmıştır. Bu amaca yönelik olarak ideal olarak aydınlatılmış yüz görüntüleri ve bu yüzlerin farklı ışıklandırma altında çekilmiş görüntüleri yardımı ile aydınlatma değişim verileri hesaplanmıştır. Doğrudan giriş görüntülerini modelleme aşamasında kullanmak yerine eğitim kümesindeki ideal görüntüler ve hesaplanan aydınlatma değişim verileri ayrı ayrı modellenmiş ve elde edilen iki model tek bir modelde birleştirilerek ışığa karşı gürbüz yeni bir model oluşturulmuştur. Modellenmeye çalışılan giriş verisinde olması muhtemel önemli değişimlerin

belirlenip model içine dahil edilmesiyle çok daha etkin bir model yapısı oluşturulması amacıyla **Aktif Aydınlatma ve Görünüm Modeli (AAGM)** [82] önerilmiştir. *AAGM* sadece yüz hizalama problemine özel bir yaklaşım olmayıp birçok probleme uygulanabilecek özgün bir yöntemdir. Yüz görünümü üzerinde etkili olan değişimler: kişinin ideal ortamda görüntülenmiş yüz dokusu, yüz şekli ve yüz görünümünde ışık kaynağının yeri ve şiddetine bağlı olarak oluşabilecek aydınlatma değişimi verileri birbirlerinden mümkün olduğunca ayrıştırılmaya çalışılarak modellenmeye çalışılmıştır

ICIA oldukça hızlı ve etkin bir yöntem olmasına karşın kullanım alanı oldukça sınırlıdır. Özellikle dönme ve aydınlatma ile ilgili değişimlerde oldukça kötü sonuçlar vermektedir. *AGM* ve *ICIA*'nın problemleri olan yönlerini aşabilmek için [83]'deki çalışmada yeni bir yöntem tanıtılmıştır. *ICIA* algoritmasının *3DMM* [84] yöntemine uyarlanmış hali olan bu yöntem, *ICIA* kadar hızlı olmamakla birlikte lokalizasyon başarımı ve uygulama alanları bakımından *ICIA*'ya göre çok daha fazladır.

[85]'deki çalışmada ise değiştirilmiş *3DMM* yöntemi ile hem poz hem de aydınlatma ile ilgili değişimlerde başarılı sonuçlar elde edildiği raporlanmıştır. *2B + 3B AGM* olarak adlandırılan bir yöntem de [86]'da tanıtılmıştır. Bu yöntem ile *3B*'lu şekil verisi kestirilebilmekte, ayrıca yüz görünümü çok etkin bir şekilde modellenmektedir. [86]'daki çalışmada *2B + 3B AGM*'nin 240 fps'lik bir hız ile yüz modelleme/arama işleminin yapılabildiği raporlanmıştır. Raporlanan bu hız gerçek zamanlı sistemlerden çok daha hızlıdır ve yüksek hızlı video görüntülerinin hizalanması alanında daha hızlı çalışan bir yöntem henüz raporlanmamıştır. Yöntemin tek kısıtı *ICIA* yönteminde olduğu gibi bu yöntemde de kişiye özel çözümler sunabiliyor olmasıdır. Yani bu yöntem sadece eğitim kümesinde verilen kişinin yüzü için yüksek başarımlı sonuçlar verebilmektedir. Ayrıca *3B*'lu şekil verisini sağlayan gerçek zamanlı yüz takibi için literatürde öne çıkan yöntemlerden biridir.

Klasik *AGM* teorisinde model parametre güncellemesi ile sentezlenen ve giriş görüntüsü arasındaki doğrusal ilişkiyi veren sabit gradyan matrisi kullanılmıştır. *AGM* en-iyileme aşamasında sabit gradyan matrisleri yerine başkaca yöntemler de önerilmiştir. [87]'de tanıtılan çalışmada, *AGM* gradyan matrislerinin hesaplanması için uyarlamalı bir yöntem önerilmiştir. Bunlar arasında en başarılı olanı [88]'de önerilen yöntemdir. Bu yöntem *AGM*'nin yakınsama başarımını arttırırken, model

karmaşıklığını da büyük ölçüde azaltmayı başarmıştır. Fakat [88]'de önerilen bu yöntem sadece kişiye özel olarak (örn: tek bir birey için) hazırlanan *AGM*'ler için çalışabilmektedir. Bu ise uygulama alanını kısıtlaması bakımından yöntemin olumsuz yönü olarak sayılabilir. Bunun yanında *AGM*'nin en-iyileme yöntemi ve kullanılan giriş görüntüsünün aydınlatmadan bağımsız hale getirilmesi gibi değişiklikler yapılmasına dayalı birçok yöntem literatürde raporlanmıştır [72]- [89] [87] [88] [90] .

2. ŞEKİL ve DOKU MODELLEME

2.1 Şekil Modelleme

Aktif görünüm modelinin (*AGM*) tam olarak anlaşılabilmesi için *AGM*'de kullanılan şekil modelleme kavramının doğru olarak anlaşılması gerekmektedir. Bu bölümde şekil verisinin nasıl oluşturulduğu, matematiksel olarak bir nesnenin şekil değişiminin nasıl modellenebileceği gösterilmeye çalışılacaktır. Ayrıca şekiller arası değişimin temel bileşen analizi (*TBA*) ile nasıl etkin bir şekilde modellenebileceği gösterilecektir.

Amacımız yüz modeli çıkartılırken yüze ait önemli noktalardan oluşan tıkız bir şekil gösterimi elde etmektir. Bu aşamada yüzü en iyi şekilde ifade edecek noktalar kümesinin nasıl bulunacağı ve bu noktalardan yüz şekil verisinin nasıl oluşturulabileceği sorusuna cevap vermemiz gerekmektedir.

Öncelikle şekil tanımından işe başlayalım; şekil için birçok tanım ortaya konulabilir fakat en basit haliyle, bir nesnenin kendine özgü ve/veya ayırt edici özelliklerini oluşturan çevritlerinin bütününe şekil denilebilir. *AŞM*, *AGM* ve benzeri yöntemler üzerine yapılan birçok çalışmada başkaca şekil tanımları da yapılmıştır [91]. Şekil bilgisi ait olduğu nesne döndürülse, ölçeği değiştirilse veya konumu değiştirilse bile ait olduğu nesnenin karakteristik özelliklerini tam olarak verebilir. Bu yüzden şekilsel olarak ifade edilebilen nesnelere için şekil bilgisi oldukça ayırt edici öznitelikler verebilmektedir.

Şekil modelinin kurulmasının en kolay yolu, analiz edilen nesnelere ait ayırt edici şekilsel özniteliklerin sonlu ve yeterli sayıda nokta ile işaretlenmesi ve bu noktalar kümesinin her nesne için belirli bir kurala göre matematiksel olarak ifade edilmesiyle olur. n adet nokta ile ifade edilen şeklin matematiksel ifadesinde, her noktayı gösteren k adet boyut bilgisiyle birlikte $n \times k$ uzunluğunda bir vektör oluşturulur. İki boyutlu şekiller için $k = 2$ 'dir. Şekil vektörü,

$$S_0 = ((x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_K, y_K)) \in R^{2K} \quad (2.1)$$

biçiminde ifade edilebilir. Üç boyutlu ($3B$) şekil vektörlerinde ise boyut, $k = 3$ 'tür ve şekil vektörü

$$S_0 = ((x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_K, y_K, z_K)) \in R^{3K} \quad (2.2)$$

biçimini alır. Denklem (2.1) ve denklem (2.2)'de sadece koordinat eksenindeki (x, y, z) noktaları şekil vektöründe yer aldığı ve noktaların birbiriyle ilişkileri belirtilmediği için farklı dizilimlerde ifade edilebilir. Tim Cootes [46] [43] [72] ve Stegman [91] çalışmalarında şekil vektörlerini $k = 2$ için,

$$S_0 = ((x_1, x_2, x_3, \dots, x_K), (y_1, y_2, y_3, \dots, y_K)) \in R^{2K} \quad (2.3)$$

biçiminde ifade etmişlerdir. Şekil vektörünü oluşturan noktaların otomatik olarak saptanması bu bölümün ana konusu olmadığı için tüm noktaların işaretlenmiş olduğu varsayımıyla (örn: el yordamıyla) şekil vektörleri oluşturulmuştur. Bu noktaların otomatik olarak nasıl saptanacağı ilerleyen bölümlerde detaylı olarak anlatılacaktır.

2.1.1 Şekil hizalama

Şekil vektörleri üzerinden analiz yapabilmek ve şekil değişimlerini tam olarak modelleyebilmek için şekillerdeki ölçek, dönme ve yer değiştirme farklılıklarının giderilmesi gerekir. Bu amaçla modellenecek şekil vektörlerindeki tüm bu değişimleri ortadan kaldıracak bir normalizasyon yöntemi gerekmektedir. Bunun en iyi bilinen yolu tüm şekil vektörlerini ortak bir referans şekle izdüştürmeye denk gelen Genelleştirilmiş Procrustes Analizi'dir (*GPA*) [92] [49]. Bu yöntemde amaç şekil vektörlerindeki tüm ilgin (affine) dönüşümlerinden kaynaklanan bozulmaları ortadan kaldırmak ve tüm şekilleri tek bir şekil uzayında ifade edilebilir hale getirmektir.

Aşağıda verilen hizalama adımlarından da anlaşılacağı gibi, şekil hizalamak için genel yaklaşım kısaca şöyledir; şekiller öncelikle orijine çekilir, sonra tüm şekiller aynı ölçeğe göre ölçeklendirilir, şekiller arası uzaklığı en aza indirgeyecek doğru dönme yönü bulunur. Şekiller arası uzaklığı en aza indiren doğru dönme açısı ile şekiller döndürülerek hizalama gerçekleşir. Bu işlemler arasında hedef şekil olarak kullanılan ortalama şeklin doğru olarak saptanması hizalamanın başarımını etkileyen en önemli adımdır. *GPA* algoritmasının adımları aşağıda verilmiştir.

1. Nesnelerin önemli noktalarını işaretleyerek x şekil vektörlerini oluştur ve her şeklin geometrik ağırlık merkezini hesapla,

2. Şekillerdeki yer değiştirmeyi sıfırlamak için her şeklin ağırlık merkezini eksen merkezine çek,
3. Veri kümesindeki ilk şekili ortalama şekil olarak al ve ortalama şeklin (\bar{x}) normunu, $|\bar{x}| = 1$ olacak şekilde ölçeklendir.
4. Ortalama şekli x_0 olarak isimlendir ve x_0 'ı referans şekil olarak kullan,
5. Veri kümesindeki tüm şekilleri referans şekil olarak belirlenen şekile hizala,
6. Referans şekile hizalanmış şekillerin ortalamasını yeniden hesapla,
7. Yeni hesaplanan ortalama şeklin normunu $|\bar{x}| = 1$ olacak şekilde ölçeklendir ve ortalama şekli kaydet,
8. Eğer önceki ortalama ile yeni hesaplanan ortalama şekil arasında belirlenen hata durma koşulundan fazlaysa 4. adıma git ve işlemlere yakınsama kriterleri sağlanana kadar devam et. Yakınsama sağlandıysa çevirimden çık.

GPA için tüm şekiller aynı sayıda noktadan oluşmalıdır. *GPA* en küçük kareler yöntemiyle şekiller arası mesafeyi en aza indirmeye çalışır. Procrustes analizinde uzaklık,

$$P_d^2 = \sum_{j=1}^n [(x_{j1} - x_{j2})^2 + (y_{j1} - y_{j2})^2] \quad (2.4)$$

biçiminde L_2 norm olarak hesaplanır. Buradaki uzaklık ölçütü P_d , x_1 ve x_2 gibi iki şekil vektörünün n adet şekil noktası için farklarının karelerinin toplamının kare kökü olarak ifade edilmektedir. İki boyutlu bir şekil vektörünün geometrik merkezi

$$(\bar{x}, \bar{y}) = \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j, \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \right) \quad (2.5)$$

denkleminde hesaplanır.

Procrustes analizinin en önemli aşaması dönme farklılıklarının ortadan kaldırılması için yapılan işlemlerdir. Şekiller arası dönme değişimlerini ortadan kaldırmak için Tekil Değer Ayrışımı (*SVD*) ilk olarak [93]'de tanıtılmıştır. *SVD* algoritması kullanılarak dönme farklılıklarının en-küçüklenme adımları aşağıda verilmiştir:

1. Dönmeye karşı hizalanacak tüm şekil vektörlerinin öncelikle ölçeklerini normalize et,

2. Tüm şekil vektörlerinin geometrik merkezlerini orijine çekerek konumdan bağımsız hale getir,
3. Tüm şekil vektörlerini $n \times k$ 'lık matrisler şeklinde ifade et (n : nokta sayısı, k : boyut)
4. x_1 ve x_2 gibi iki şeklin $n \times k$ 'lık matrislerini $x_1^T x_2$ çarpımlarının SVD 'lerini hesaplayarak UDV^T 'yi bul.
5. Denklem (2.6) gösterilen VU^T dönme matrisini, en düşük hatayı verecek hale getir.

İki boyutlu şekil vektörleri için dönme değişimlerini ortadan kaldırmak için kullanılan algoritma,

$$VU^T = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Şekillerin ölçek normalizasyonu için şekil ölçek metriğine ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil ölçeğini belirlemek için aşağıdaki L_2 normu kullanılır:

$$S(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^n [(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2]}. \quad (2.7)$$

Buradaki \bar{x} ve \bar{y} ortalama şeklin ağırlık merkezinin x ve y bileşenlerini göstermektedir.

2.1.2 Şekil değişimlerinin modellenmesi

Şekil kavramının ne olduğu ve iki ve üç boyutlu bir nesnenin şeklinin nasıl ifade edileceği bir önceki bölümde gösterilmişti. Şimdi diğer bir önemli soruya cevap aranacaktır: Benzer nesnelerin şekilleri aynı sayıda noktayla ifade edilip oluşturulduktan sonra şekiller arasında var olan değişiklikler ya da farklılıklar nasıl modellenebilir?

Veri kümesindeki şekil değişimleri temel bileşen analizi (TBA) ile modelleyebilmek mümkündür. Modelleneyecek nesneye ait şekillerdeki değişimin analizinin yüksek doğrulukla yapılabilmesi için, nesne şekil bilgisini oluşturan herbir noktanın, veri kümesinde karşılık gelen diğer noktalarla hizalanmış olması gerekir. Hizalama işlemini gerçekleştirme yöntemi olarak Genelleştirilmiş Procrustes Analizi (GPA) yöntemi kullanılabilir. Bu yöntem, aynı nesne sınıfına ait iki şekil arasındaki; dönme, yer değiştirme ve ölçek farklılıklarını, karşılık gelen noktalar arasındaki uzaklıkların karelerinin ağırlıklı ortalamalarını en aza indirgeyecek şekilde hizalar.

GPA hizalama yönteminin detaylı açıklamasını ilerleyen bölümlerde vereceğiz. Burada kısaca GPA ile şekil hizalamanın nasıl yapıldığından bahsedilecek. Şekil

hizalamada en genel yaklaşım, tüm nesnelere ait şekillerin koordinat merkezine taşınması ardından $|\bar{x}| = 1$ olacak şekilde normalize edilmesi ve son olarak doğru dönmeyi hesaplayarak şekiller arası değişimin en aza indirilmesidir. Her şekil için doğru dönmenin bulunması ile elde edilen ortalama şekil, veri kümesindeki tüm şekillere en yakın uzaklıktadır ve tüm hizalama işlemi bu ortalama şekil temel alınarak yapılır.

GPA ile hizalamanın en önemli aşaması dönme değişimlerinin ortadan kaldırılması aşamasıdır. Dönme için Frobenius normu Denklem (2.8)'de gösterildiği gibi $m \times n$ 'lik A gibi bir matrisin eşlenik transpozu olan A^H ile çarpımının izine (trace) eşittir. Frobenius norm, vektörler için de hesaplanabilmektedir. Şekiller arasında dönmeden kaynaklanan değişimleri en aza indirecek dönüşüm için,

$$\|A\|_F = \text{iz}(A^H A) \quad (2.8)$$

yukarıda ki ifadenin

$$\|XQ - \bar{X}\| \rightarrow \min \quad (2.9)$$

biçiminde minimize edilmesi gerekir. Denklem (2.9)'da merkeze çekilmiş ve normalize edilmiş şekiller X matrisiyle gösterilmiştir. Q ise X 'i ortalama şekile hizalamakta kullanacağımız ortogonal dönme matrisini göstermektedir. \bar{X} ise ortalama şekili tutan matrisi ifade etmektedir. Frobenius normu denklem (2.9)'da gösterilen minimizasyon ifadesine uygularsak aşağıda ki

$$\|XQ - \bar{X}\| = \text{iz}(X^H X + \bar{X}^H \bar{X}) - 2 * \text{iz}(\bar{X}^H XQ) \quad (2.10)$$

ifadeyi elde ederiz. Denklem (2.10)'daki ifadenin sağ tarafında ki ilk ifadede dönmeyi kontrol eden Q ifadesi yer almamaktadır. Dönme değişimlerini minimize ederek, eşitliğin sol tarafını minimize edebilmenin bir yolu denklemin en sağındaki ifadenin en iyilemesini sağlamaktır:

$$\text{iz}(\bar{X}^H XQ) \rightarrow \text{maksimum}. \quad (2.11)$$

$\bar{X}^H X = USV^H$, nin tekil değer ayrışımı ve iz 'in döngüsellik özelliği yardımı ile ifade

$$\text{iz}(\bar{X}^H XQ) = \text{iz}(USV^H Q) = \text{iz}(SV^H QU) = \text{iz}(SH) \quad (2.12)$$

şeklinde yazılabilir. İfadedeki H ortogonal matrislerin çarpımıyla, $V^H QU$, oluşturulan $p \times p$ boyutunda ortogonal bir matristir. Bu yüzden $\text{iz}(SH)$ 'ı

$$\text{iz}(SH) = \sum_{i=1}^p s_i h_{ii}. \quad (2.13)$$

biçiminde yazmakta mümkündür. Buradaki s_i bileşenleri pozitif sayılardan oluşur, $iz(SH)$ en büyük değerine $h_{ii} = 1$ olduğunda ulaşır. Buradan hareketle aşağıdaki ifadeyi yazabiliriz.

$$H = I = V^H Q U. \quad (2.14)$$

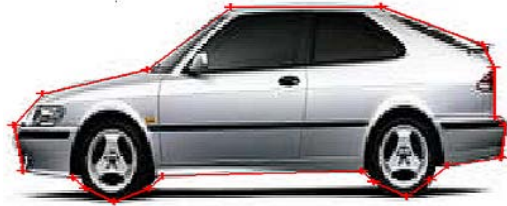
Q matrisinin $\|XQ - \bar{X}\|$ 'yi en küçükleyen değeri şu şekilde yazılabilir;

$$Q = VU^H. \quad (2.15)$$

Q matrisi dönmeyi kontrol eder. Böylelikle GPA 'nın en önemli aşaması olan dönme normalizasyonu, şekil bilgisini tutan ve ortalama şekil \bar{X} üzerine hizalamak istediğimiz X ile VU^H 'nin çarpımı ile gerçekleşmiş olur.

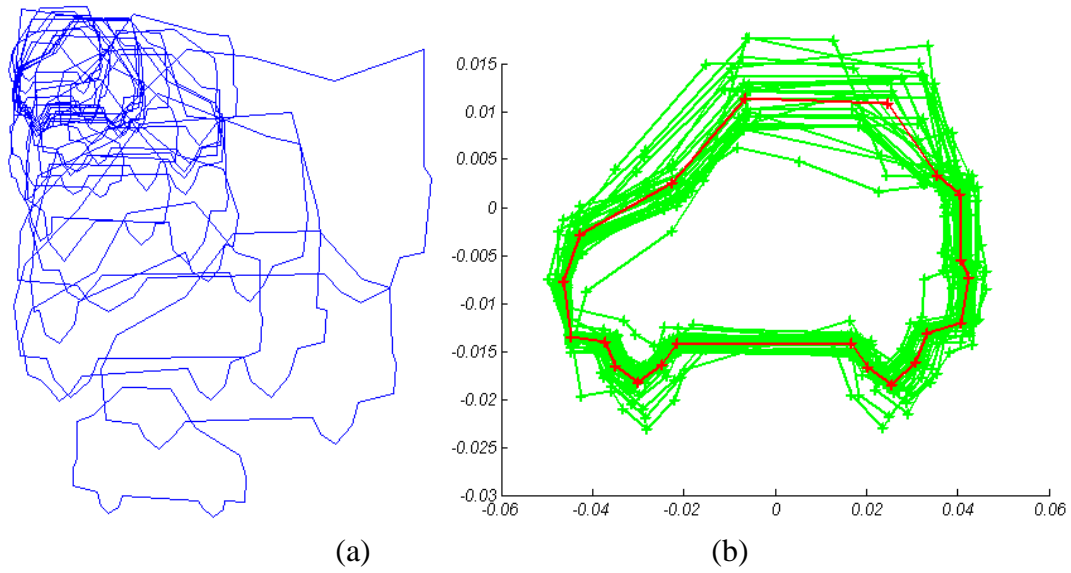


Şekil 2.1. Şekil modellemede kullanılan araçlara ait veri kümesi.



Şekil 2.2. Araç veri kümesinden 21 noktalı şekil bilgisinin çıkartılması.

Şekil 2.1'de 24 adet otomobile ait görüntü veri kümesi gösterilmektedir. Şekil 2.2'de ise her aracın şekli, 21 nokta ile belirli bir kurala göre işaretlenmiş araç şekil bilgisi gösterilmektedir. Şekil 2.3.a'da ise Procrustes analizi ile şekil hizalamanın nasıl yapıldığını göstermek amacı ile araç veri kümesindeki otomobillerin nesne sınırlarından oluşturulan şekil vektörleri koordinat ekseninde gösterilmiştir. Burada hiçbir normalizasyon işlemi yapılmamıştır. Dikkat edilirse otomobillere ait şekiller arasındaki markadan ya da türden kaynaklı farklılıklardan daha çok ilgin (affine)



Şekil 2.3. Veri kümesindeki tüm araçların ortalama şekil bilgisinin çıkartılması. a) Veri kümesindeki 24 adet hizalanmamış araçlara ait şekil bilgileri, b) Hizalanmış araç şekilleri ve ortalama araç şekli.

dönüşümden kaynaklanan farklılıkların olduğu görülecektir. Bu veri üzerinde ölçek, yer değiştirme ve dönmeyi içeren ilgin dönüşüm farklılıkları giderilmeden, istatistiksel bir modelleme yapılamaz.

Şekil 2.3.b'de ise bu veri üzerinde *GPA* ile hizalanmış aynı şekillerin koordinatları çizilmiştir. Hizalanmış otomobil şekilleri yeşil renkte çizilmiş, bunların ortalamasına karşılık gelen şekil ise kırmızı olarak çizilmiştir. Şekil 2.3.a ve Şekil 2.3.b karşılaştırıldığında yer değiştirme, ölçek ve dönme normalizasyonunun tüm şekillerde iyi sonuç verdiği açıkça görülecektir. Artık hizalanmış bu şekil verilerinden, istatistiksel bir model kurulabilir. Kurulan modelde ilgin dönüşümden kaynaklanan bir bileşen bulunmayacaktır. Otomobil şekillerindeki marka/modelden kaynaklı değişimler kurulan istatistiksel modelde yer alacaktır. Böylelikle ilgin dönüşüm farklılıklarının modeli kötü yönde etkilemesi engellenmiş olacaktır.

Şekil vektörleri referans bir şekle göre hizalandıktan sonra model çıkartmada en sık kullanılan yöntem Temel Bileşen Analizi (*TBA*)'dir. *TBA* yardımıyla şekiller arası değişim istatistiksel bir model olarak ifade edilir. Şekil vektörlerinden kurulan Σ_s saçılım matrisi,

$$\Sigma_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^T (x_i - \bar{x}) \quad (2.16)$$

biçiminde bulunur. Buradaki \bar{x} , GPA ile hizalanmış N adet görüntünün ortalaması olan şekil vektörüdür. Şekil saçılım matrisinden şekil özdeğer ve özvektörleri,

$$\Sigma_s \Phi_s = \Phi_s \Lambda_s \quad (2.17)$$

gibi hesaplanmaktadır. Burada Λ_s aşağıda verildiği gibi diyagonal üzerinde sıralanmış özdeğerleri içeren bir diagonal matristir.

$$\Lambda_s = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & . & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{2n} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Φ_s ise denklem 2.19'de gösterildiği gibi şekil özvektörlerinin sütun sütun birleştirilmesi ile elde edilen bir matristir.

$$\Phi_s = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_{2n}] \quad (2.19)$$

Şekil öz değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanır. Bu sıralamaya denk gelecek şekilde öz vektörler sıralanır. Sonunda öz vektörler (Φ_s) ve Λ_s öz değerler ile şekil uzayını oluşturur. Temel bileşen analizi yöntemi ile verilen bir şeklin ortalama şekilden olan farkını öz şekil vektörlerinin doğrusal birleşimi olarak ifade etmek mümkündür. Benzer şekilde ortalama şekle öz şekil vektörlerinin belirli bir doğrusal birleşimini ekleyerek yeni bir şekil üretmek mümkündür. Üretilen şekil, ortalama şeklin, katsayıların belirlediği bir deformasyonundan ibarettir. TBA 'yı

$$x = \bar{x} + \Phi_s b_s \quad (2.20)$$

biçiminde ifade etmek mümkündür. Buradaki Φ_s öz vektörlerini, b_s ise şekil model parametrelerini göstermektedir. Model parametreleri giriş şekil vektörü olan x 'in, ortalama şekil vektörü \bar{x} 'ten çıkartılarak, merkeze taşınmasından sonra elde edilen şeklin saçılım matrisine iz düşürülmesi ile elde edilir. Buna göre şekil model parametreleri olan b_s ,

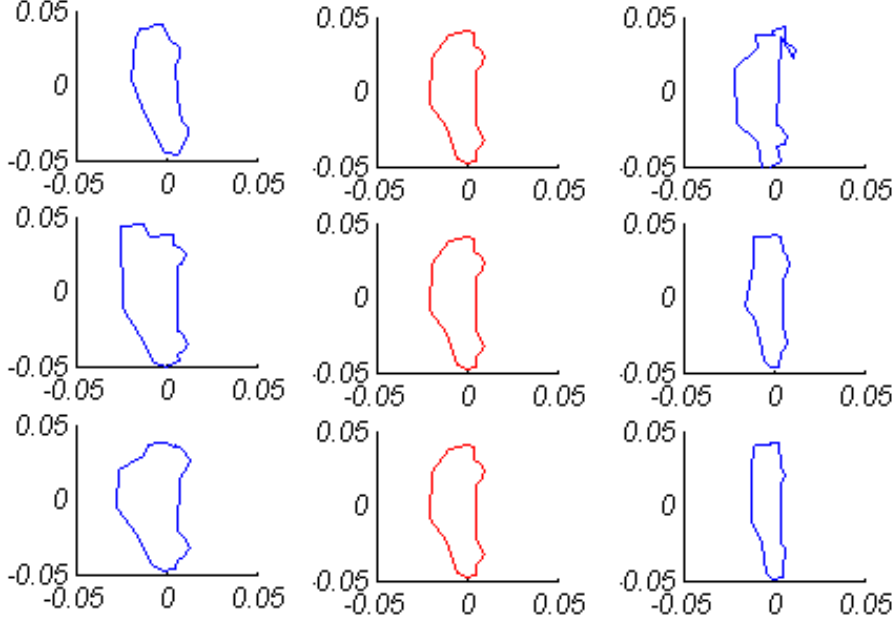
$$b_s = \Sigma_s^T (x - \bar{x}) \quad (2.21)$$

biçiminde hesaplanır. Kurulan şekil uzayının, şekil veri kümesindeki hangi değişimleri modellediğini ortaya çıkarmanın en kolay yolu herbir özvektörün ayrı ayrı bileşime katkısının ortalama şekli ne kadar bozduğunu incelemektir.

Şekil modellemenin detaylarını Şekil 2.3'te gösterilen ve *GPA* ile hizalanmış otomobil şekilleri örneği üzerinden anlatabiliriz. Hizalanmış otomobil şekilleri yukarıda anlatıldığı gibi *TBA* yardımı ile modellenir. Bu sayede otomobil şekil verilerine ait bir şekil uzayı kurulmuş olacaktır. Kurulan bu uzay, en yüksek özdeğere sahip özvektörler yardımı ile ifade edilmektedir. Herbir özvektör şekil veri kümesindeki bir veya birkaç temel değişimi kontrol etmektedir. İstatistiksel bir model kurulurken, uzayı oluşturan temel bileşenlerin ne tür değişimlere karşılık geldiğini anlamak oldukça önemlidir. Bu tür bir analizi yapabilmek için en etkin yöntem, uzayı kuran temel bileşenlerin her birinin, ortalama şekil üzerinde ne tür bir değişikliğe sebep olduğunu göstermektir. Her temel bileşen pozitif ve negatif bir katsayı ile çarpılır ve çıkan sonuç ortalama şekile eklenmesi ile oluşturulan temel değişim grafikleri elde edilir. Negatif ve pozitif katsayıların geri çattığı yeni şekiller ile ortalama şekil karşılaştırmalı olarak temel değişim grafiklerinde sergilenmektedir. Değişim katsayıları için genellikle ilgili temel bileşene karşılık gelen özdeğerin kare kökünün ± 3 katı kullanılmaktadır.

Şekil (2.4)'da şekil modeline ait temel bileşenlerin ortalama şekli nasıl bozduğunu gösteren temel değişim grafiği verilmiştir. Sadece ilk üç temel bileşenin değişimlerinin gösterildiği bu grafik dikkatle incelendiğinde şu sonuçlara ulaşılabilecektir; birinci temel bileşen otomobillerin hatchback ve sedan olma özelliğine ait değişimleri daha baskın olarak kontrol etmektedir. İkinci temel bileşenin ise spor otomobiller ile 4×4 otomobillerin değişimlerini kontrol ettiğini söylemek mümkündür. Üçüncü temel bileşenin ise otomobil şekil uzayında daha çok araçların yüksekliği ile ilgili değişimleri modellediğini söylemek mümkündür. Her temel bileşenin sadece bir değişimi kontrol ettiğini söyleyebilmek oldukça güçtür. Bunun olabilmesi için veri kümesinde var olan tüm değişimlerin birbirinden tamamen bağımsız ve doğrusal olarak ta ayrılabilir olması gerekir. Hizalama işleminden geçirilmemiş veriler üzerinde yapılan istatistiksel modellerde temel bileşenlere ait temel değişim grafiklerini çizmek anlamlı sonuçlar verememektedir. Çünkü asıl değişimlerden çok, ilgin dönüşümlerden kaynaklı değişimler verinin içinde yer almaktadır. Verilerin hizalama işlemine tabi tutulmadan doğrudan modellemeye geçilmesinin ne gibi sonuçlar doğuracağı Şekil 2.3.(a)'daki veri kümesine ait şekiller incelendiğinde kolayca görülecektir. Hizalama işleminin en büyük katkısı istenmeyen her türlü değişimden verilerin arındırılmasını sağlamasıdır.

Model kurulumu için kullanılacak veriden, verinin genel karakteristiğini verebilecek, başka bir ifadeyle, istatistiksel bir genelleme için yeterli/uygun bir alt küme seçilmelidir. Seçilen bu veri kümesinin mümkün olduğunca, modellemeye çalıştığımız değişimleri içermesi beklenir. Bazı çalışmalarda, *TBA* tabanlı model kurulumu için gerekli, bahsi geçen bu veri kümesi "eğitim veri kümesi" olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.4. Ortalama araç şeklinin 1. 2. ve 3. temel bileşeninin (satur sıralamalı) şekil parametresi b 'nin ± 3 değerleri için sentezlenen şekiller.

Temel bileşen analizinin en önemli özelliği, veri içerisindeki temel değişimleri koruyarak, veriyi çok daha küçük boyutlarda tıknaz olarak ifade etmeye imkan sağlamasıdır. Optimum modelleme için indirgenme boyutu belirlenirken, verideki ana değişimlerin korunması garanti edilmeye çalışılır. Verinin *TBA* ile indirgeneceği boyutun otomatik olarak saptanması için birçok yöntem mevcuttur.

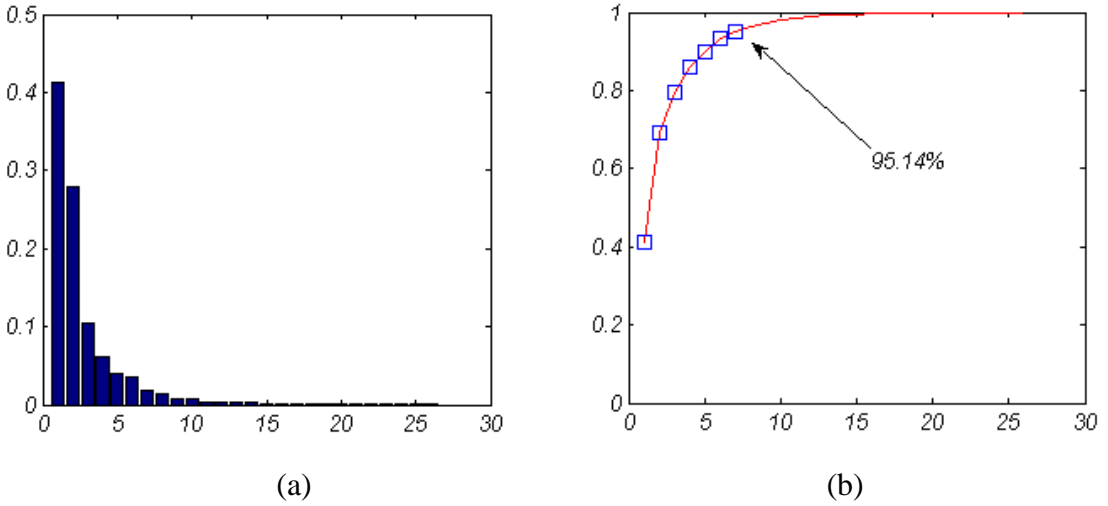
Çalışmamızda, şekil eğitim kümesi içerisindeki toplam değişimin, önceden belirlenen bir yüzdesine karşılık gelen boyutu, indirgenecek optimum veri boyutu olarak seçilmektedir. Bu oran eğitim kümesinde yer alan şekillerdeki gürültüden kaynaklanan istenmeyen değişimlerin, kurulacak model içerisinde girmesi engellenip, asıl modellenmek istenen şekil değişimlerinin ise model içerisinde kalması sağlanarak belirlenir. *TBA* ile veri indirgemedede veri boyutu,

$$\sum_{i=1}^t \lambda_i \geq \frac{p}{100} \sum_{i=1}^{2n} \lambda_i \quad (2.22)$$

eşitsizliği sağlayacak şekilde bulunur. Burada toplam değişim bilgisi, şekil saçılım matrisinden elde edilen özdeğerlerin toplamı olarak kabul edilmiştir. Denklem (2.22)'in sol tarafındaki ifade eğitim kümesindeki şekillerin öz değerleri üzerinden toplamı olarak hesaplanmıştır. Dikkat edilirse, $2n$ tane öz değer yerine, $\%p$ 'lik değişime karşılık gelen, ilk t adet öz değer saptanmaya çalışılmıştır. Tez kapsamında $\%90$ ile $\%95$ arasında değişimleri verecek indirgeme boyutları tercih edilmiştir.

2.2 Doku Modelleme

Şekil modellemede nesnenin karakteristik özelliklerini öne çıkartan önemli noktaların belirli bir sıraya göre işaretlenmesi ile elde edilen noktaların koordinatları, nesneye ait şekil bilgisinin modellenebilmesi için yeterli bilgiyi bize veriyordu. Şekil imgeye ilişkin seyrek bir bilgi içerirken doku, tüm imge benekleri boyunca sürekli değişen yoğun bir bilgi içermektedir. Fakat doku modelleme şekil modelleme kadar kolay olmamaktadır. Doku bilgisinin birden fazla benek gri seviye değerlerinin bir araya gelmesiyle oluşan bir veri olması nedeniyle, dokunun hangi önemli noktalar arasındaki bölgeden alınacağını da seçilmesi gerekmektedir. Çünkü doku bilgisi, tanımlanan şekil içerisinde kalan bölgedeki tüm benek değerlerinin bir arada vektörel gösterimi ile oluşturulmaktadır. Eğer $M \times N$ 'lik iki boyutlu bir görüntünün tamamı doku bölgesi



Şekil 2.5. a) Azalan sıralamada, araç şekil öz-değerleri (normalize edilmiş), b) İlk 7 özdeğer için $\%95$ 'lik değişim aşıyor.

olarak tanımlanacak olursa şekil bilgisi oluşturulmadan da doku modelleri doğrudan kurulabilir. Fakat bu bölümde sadece modellenecek nesneye ilişkin doku modelini kurmaya yönelik bir yöntem üzerinde durulacaktır.

Özellikle aktif görünüm modeli yapısı içerisinde kullanacağımız doku modeli için sadece ilgilenilen bölgelerdeki benek değerlerinin her türlü ilgin bozulmadan arındırılarak modellenmesi gerekmektedir. Bu yüzden doku vektörleri oluşturulabilmesi için bir önceki bölümde açıklandığı biçimde, örneklenecek doku bölgesini gösteren bir şekil bilgisinin tanımlanmış olması gerekmektedir.

Şekil bilgisinin hazırlanması aşamasında ele alınan nesne bozulabilir (deformable) bir nesne ise, perspektif bozulmaların yanında nesnenin yapısındaki bozulmaya bağlı olarak oluşabilecek her türlü şekil değişimlerini gösterebilecek nirengi noktalarıyla şekil bilgisi kurulmalıdır. Ayrıca nesne şeklindeki değişimlerin fazla olduğu bölgelerde ve/veya yüksek detay istenilen bölgelerde görece olarak çok daha fazla nirengi noktası tanımlanmalıdır.

Doku modellemeye geçilmeden önce doku vektörlerinin, tanımlanan şekil nirengi noktaları kullanılarak, görüntü üzerinden belirli bir kurala göre örneklenmesi gerekmektedir. Bunun için bilgisayarla grafikte sıklıkla kullanılan, şekil nirengi noktaları temel alınarak görüntünün üçgenlenmesi yöntemi tercih edilmektedir [79]. Doku vektörlerinin kurulabilmesi için, öncelikle modellenecek nesnelere ait şekil nirengi noktaları arasında üçgenler kurulur. Her şekil için aynı sayıda nirengi noktası kullanıldığından her nesne eşit sayıda üçgen ile ifade edilmiş olur. Modelleme işleminde en önemli noktalardan biri de, modellenecek vektörlerin mutlaka eşit boyutlarda olması gereğidir. Bu şartın sağlanabilmesi için her üçgen içinde kalan doku bölgesi, ortalama şekil ve/veya referans şekil olarak adlandırılan şekilde karşılık gelen üçgende doku bölgesine aktarılması gerekir. Bu işlem için literatürde bükme/eğme olarak bilinen yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. [91] ve [48]'te detayları verilen parçalı ilgin bükme yöntemi, çalışmamız kapsamında bükme için kullanılmıştır.

Şekil vektörünü oluşturan noktalara Delaunay üçgenleri giydirilmiş ve bu üçgenler referans şekle bükülerek dokular aynı şekil ile temsil edilir hale getirilmiştir. Diğer bir ifadeyle şekilden arındırılmış, aynı boyutta, doku vektörleri oluşturulmaktadır. Doku vektörlerinin oluşturulabilmesi için öncelikle yukarıda bahsedildiği gibi doku vektörleri çıkartılacak görüntülerin, aynı sayıda nirengi noktalarından oluşturulması ve şekil bilgisinin kurulması gerekir. Şekil nirengi noktaları arasına kurulan şekil üçgenleri referans yüze bükülerek, şekiller arası karşılık gelen doku üçgenleri eş ölçüğe çekilmiş olur. Üçgenler arası bükme işleminde yetersiz veri durumları için

ara değerleme (interpolation) veya örnekleme (sub-sampling) işlemleri kullanılmalıdır. Ara değerleme sayesinde referans şekle bükülen görüntüye ait doku üçgenlerinin içerisinde karşılığı olmayan noktalara, komşu benek değerleri dikkate alınarak, uygun değerler kestirilebilmektedir. Böylelikle görüntüde oluşabilecek yapay bozulmalar en aza indirilmiş olmaktadır.

Aynı boyuta getirilmiş doku vektörleri kullanılmadan önce, görüntüler arasında olması muhtemel aydınlatmaya bağlı gri-seviye farklılıklarını ortadan kaldıracak için son bir normalizasyon işleminden geçirilmesi gerekir. Bu aşamadan sonra oluşturulan doku vektörleri modellemeye uygun hale getirilmiş olmaktadır. Dikkat edilirse doku vektörlerinde, her türlü şekil değişimleri ve gri seviye değişimlerine sebep olacak dış etkenler olabildiğince ortadan kaldırılmaya çalışılmış ve geriye sadece "ilgilenilen nesne bölgesine ait doku değişimleri" bırakılmıştır.

Oluşturulan doku vektörleri modellemeyi olanaklı kılacak hale getirdiğinden istatistiksel modelleme yöntemlerinden herhangi biri (*TBA*, *BBA*, vb.) bu aşamada doku modelleme amaçlı olarak kullanılabilir. Bu çalışmada da asıl amacın veri kümesindeki doku değişimlerini daha düşük boyutta ama olabildiğince özgün verideki değişimleri kaybetmeden modelleyebilmektir. Bu nedenle *TBA* yönteminin kullanılması uygun görülmüştür. Bükme işlemi delaunay üçgenlerinin her birine uygulanır. Bükme işlemi aslında P nokta kümesindeki genlerin P_{ref} nokta kümesinde karşılık gelen üçgenlere ilgin dönüşümle iz düşürülmesiyle gerçeklenmektedir. P nokta kümesinde yer alan herhangi bir üçgen içindeki bir noktayı (x) genin köşe noktaları (x_1, x_2, x_3) cinsinden

$$x = (1 - \beta - \gamma)x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3 \quad (2.23)$$

biçiminde ifade edebiliriz. $(1 - \beta - \gamma)$ katsayısını α olarak tanımlarsak, bu ifade basitçe

$$x = \alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3 \quad (2.24)$$

olarak gösterilebilir. Köşe noktalarının katsayıları toplamı $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 'dir. Katsayıların α , β ve γ 'nın herbiri $[0, 1]$ aralığında değerler almaktadır. Bu kısıtlar altında P nokta kümesindeki herhangi bir nokta için P_{ref} nokta kümesindeki karşılık gelen üçgenin bağlı pozisyonu denklem (2.25)'teki gibi ifade edilebilir.

$$x' = f(x) = \alpha x'_1 + \beta x'_2 + \gamma x'_3 \quad (2.25)$$

Aynı şekilde P nokta kümesi içerisinde yer alan bir üçgenin üç noktası verilirse, bu üçgenin içinde yer alan $x = (x, y)^T$ noktası için α, β ve γ 'yı hesaplamak için,

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 - (\beta + \gamma) \\ \gamma &= \frac{xy_2 - xy_1 - x_1y_2 - x_2y_1 + x_1y_2}{-x_2y_3 + x_2y_1 + x_1y_3 + x_3y_2x - x_3y_1 - x_1y_2} \\ \beta &= \frac{yx_3 - x_1y - x_3y_1 - y_3x + x_1y_3 + xy_1}{-x_2y_3 + x_2y_1 + x_1y_3 + x_3y_2x - x_3y_1 - x_1y_2} \end{aligned} \quad (2.26)$$

denklemlerin birlikte çözülmesi gerekir. Parçalı (Piece-wise) doğrusal ilgin bükme işleminin sözde-kodu aşağıda verilmiştir:

1. Şekil dış bükey eğrisi üzerindeki her $x = [x, y]^T$ için
2. x 'in içinde bulunduğu t üçgenini bulmak için $0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1$ şartını sağlayan tüm üçgenleri tara ve x 'in içinde bulunduğu t üçgenini bul.
3. Verilen x noktasının t üçgeni için denklem (2.26) yardımıyla bağıl pozisyonunu bul.
4. Denklem (2.25) yardımıyla karşılık gelen üçgende x' noktasını hesapla.
5. $P_{ref}(x) = P(f(x))$ 'yü eşitle,
6. 1. adıma dön.

P_{ref} , nokta kümesindeki x' noktası bir tam sayıya karşılık gelmeyebilir. Bu yüzden ara değerlendirme (enterpolasyon) işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Stegmann [94] ve Cootes [95] çalışmalarında ara değerlendirme yöntemi olarak literatürde sıkça kullanılan temel yöntemlerden biri olan çift-doğrusal (bi-linear) ara değerlendirme yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışmada da komşu beneklerin gri-seviye değerlerinin doğrusal ara değerlemesi ile hesaplanan çift-doğrusal ara değerlendirme yöntemi kullanılmıştır. Doğrusal ara değerlendirme yerine görsel kaliteyi arttıracak daha karmaşık (örn:2. dereceden çift-küçük vb.) ara değerlendirme yöntemleri literatürde kullanılmaktadır. Fakat *AGM* tabanlı ve/veya benzeri uygulamalarda ara değerlendirme işlemi yoğun olarak kullanıldığı için, karmaşık ve maliyetli ara değerlendirme yöntemlerinin kullanımı genellikle tercih edilmemektedir.

Bir önceki bölümde şekil verileri üzerindeki değişimi modelleme amacıyla kullanılan Temel Bileşen Analizini doku verilerinin modellenmesi amacıyla da kullanmak mümkündür. Şekil ve doku modelleme arasındaki en büyük fark, şekil modellemede nirengi noktalarının yerleşke bilgisini veren (x, y) noktaları modellenirken, doku modellemede ise şekil nirengi noktaları arasında kalan bölgedeki beneklere ait

gri-seviye değerleri modellenir. Dikkat edilirse iki verinin genel karakteristikleri tamamen farklıdır. Doku olarak adlandırdığımız veri iki boyutlu ($2B$) görüntüler için şekil ile sınırlanan alan içerisindeki beneklere ait gri seviye değerlerinin örneklenerek vektörler haline getirilmesi ile elde edilir. Oluşturulan doku vektörü g ile gösterilirse, N adet görüntüden elde edilen doku vektörlerinin ortalaması,

$$\bar{g} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_i \quad (2.27)$$

biçiminde bulunur. Temel bileşen analizi ile özdeğer ve özvektörlerin bulunması için Σ_g doku saçılım matrisinin hesaplanması gerekir. Doku saçılım matrisi, doku vektörünün ortalama dokuya olan farkları cinsinden

$$\Sigma_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (g_i - \bar{g})(g_i - \bar{g})^T \quad (2.28)$$

şeklinde hesaplanır. Burada g_i şekil nirengi noktaları ile belirlenmiş alan içinden örneklenen doku vektörlerini göstermektedir. Hesaplanan Σ_g doku saçılım matrisinin özdeğer ve özvektörlerini bulmak için,

$$\Sigma_g \Phi_g = \Phi_g \Lambda_g \quad (2.29)$$

biçiminde ifade edilen eşitlikten yararlanabiliriz. Denklem (2.29)'deki Λ_g , özdeğerlere karşılık gelen ve köşegeninde özdeğerleri tutan bir köşegen matristir. Φ_g ise özvektörleri göstermektedir. Ortalama doku vektörü \bar{g} özvektörlerin doğrusal bileşimi kadar bozularak yeni doku sentezlemek artık mümkün hale gelmiştir. Sentezlenen doku vektörü (g_{sentez}), doku model parametresi b_g olmak üzere,

$$g_{sentez} = \bar{g} + \Phi_g b_g \quad (2.30)$$

biçiminde yazılabilir. Doku model parametreleri b_g ,

$$b_g = \Phi_g^T (g - \bar{g}) \quad (2.31)$$

şeklinde hesaplanır.

2.2.1 Doku normalizasyonu

Doku vektörü g elde edilirken global aydınlatma değişimlerini bastırmak için normalizasyon yapılması gerekir. Giriş görüntüsünde olması muhtemel global aydınlatma değişimlerinin doku vektöründe yer almasını önlemek ve veri kümesinden

elde edilen doku vektörlerini aynı gri seviye aralığında ifade etmek modellemeyi olumlu yönde etkiler.

Global aydınlatma değişimlerini normalize etmek için bir çok yöntem vardır. Bu çalışmada ise Cootes'un [46] önerdiği normalizasyon yönteminin kullanılması tercih edilmiştir. Tüm n -elemanlı g_{im} doku vektörleri veri kümesinden elde edildikten sonra,

$$g = \frac{(g_{im} - \eta \cdot 1)}{\nu} \quad (2.32)$$

biçiminde normalize edilir. Buradaki η ve ν değerleri aşağıdaki ifadeye göre normalize edilir.

$$\begin{aligned} \nu &= g_{im} \cdot \bar{g} \\ \eta &= g_{im} \cdot 1/n \end{aligned} \quad (2.33)$$

İfadede yer alan \bar{g} normalize edilmiş doku vektörlerinin ortalamasıdır. Yukarıda ki ifadeden de görülebileceği gibi \bar{g} vektörünün ortalaması 0 ve değışintisi ise 1'dir. Aslında normalizasyon işlemi bir çeşit standardizasyondur ve modellenecek verilerin içeriğine bakmadan verileri ortak bir ön işlemde geçirmeye karşılık düşmektedir.

3. AKTİF GÖRÜNÜM MODELİ

FBI ajanı Sean Archer, sadist bir terörist olan Castor Troy'un Los Angeles'ta sakladığı biyolojik silahın peşine düşer. Archer, oğlunun ölümünden sorumlu tuttuğu Troy'u ele geçirir ve onun yüzünü alarak terör çetesinin içine girmeyi planlar. Ancak öldüğünü sandığı Troy komadan çıkararak Archer'ın laboratuvarında bıraktığı yüzü ameliyatla kendine taktırır. Archer, teröristlerin arasında kalırken, Troy'da Archer'ın ailesinin içine sızar...

Face Off - (Yüz Yüze)

3.1 Görünümün Tanımı

Bir görüntüde yer alan nesneyi, geometrik özelliklerini oluşturan şekil bilgisi ve nesneye ait doku bilgileri ile ifade edebiliriz. Bir nesnenin hem şekil hem de doku özelliklerinin bir araya gelmesi sonucu oluşan görüntüye ise görünüm diyoruz. Genellikle şekil, doku ve görünüm tanımları birbirine karıştırılmaktadır.

Şekil, doku ve görünüm tanımlarını daha anlaşılır kılmak için insan yüzü örneğinde açıklamaya çalışalım: Uzun ve toplu diyebileceğimiz yüz kemik yapılarına sahip, *A* ve *T* isimli iki kişi düşünelim. Bu kişilerin yüz derilerinin cerrahi bir müdahale ile maske şeklinde çıkarıldığını varsayalım. Morfolojik değişimleri ihmal edersek, bu maskeler bizim doku tanımımıza karşılık gelecektir. Yüz kemik yapıları olan çene, göz çukurları, burun kemiği dudak yapısı ve tüm diğer yüz bileşenlerinin birbirlerine göre konumları ve büyüklükleri ise yüz şekline karşılık gelecektir.

A kişisinden çıkartılan yüz maskesinin *T* kişisine transfer edildiğini varsayalım. Bu durumda *A* kişinin yüz kemik yapısının üstüne, *T* kişinin yüz dokusu gerilmiş olacaktır. Transfer sonrası oluşan yüzlere baktığımızda yüz görünümünün fark edilir şekilde değiştiği görülecektir. Ortaya çıkan yüzlere bakarak o kişinin *A*'mı yoksa *T*'mi olduğunu söylemek oldukça zordur. Sadece şekil veya sadece dokuya göre o kişinin kim olduğuna karar vermek yanıltıcı olacaktır. Bir kişinin *A*'mı yoksa *T*'mi olduğunu söyleyebilmek için hem şekil hem de dokunun o kişiye ait olması gerekir.

3.2 AGM En İyileme Problemi

Bu bölümde şekil ve dokunun bir araya gelerek oluşturduğu görünümün nasıl modelleneceği ve hedef görüntüye olabildiğince yakın görünümü sentezleyebilecek model parametrelerinin nasıl kestirileceği anlatılmaktadır. Daha önceki bölümlerde şekil ve dokunun nasıl modellenebileceği gösterilmişti. Yukarıdaki örnekten de anlaşılacağı gibi nesne modelleme/tanımda sadece şekil veya sadece dokunun kullanılması çoğu zaman yetersiz kalmaktadır.

Aktif Görünüm Modeli (*AGM*) ile şekil ve doku değişimleri tek bir parametre vektörü ile kontrol edilebilecek şekilde modellenmektedir. Bir görüntünün matematiksel olarak modellenmesi aslında o görüntüye en yakın görüntünün model yardımı ile sentezlenmesini sağlayacak parametre kümesini kestirmeye karşılık düşer. Bu parametre kümesinde görüntüde yer alan ve modellenmeye çalışılan nesnenin şekli, konumu, ölçeği ve görünümüne ait parametreler bulunur. Modelleme sayesinde bir görüntü bahsi geçen bu parametreler cinsinden ifade edilmiş olur. Model parametreleri, görüntüyü her bakımdan ifade eden ve gerekirse görüntünün geri çatılmasını sağlayabilecek tıkHz bir kümedir. Burada önemli olan model parametrelerinin nasıl kestirileceğidir.

Amacımız, kurulan model sayesinde giriş görüntüsüne belirlenen kriterlere göre olabildiğince yakın bir görüntü sentezleyebilmemizi sağlayacak c gibi model parametre vektörünü kestirmektir. Bu aslında en basitinden bir en-iyileme problemidir. Hedef görüntüdeki modelleme nesneyi en iyi şekilde ifade eden model parametrelerinin bulunması, belirlenen bir maliyet fonksiyonun en-iyilenmesine karşılık gelir. Şöyle ki, $F(c)$ bir uygunluk fonksiyonun en iyi c parametresi için en düşük hatayı üretmesi beklenir. Burada $F(c)$ 'nin bir hata ölçümüne karşılık geldiği varsayılmaktadır. Zaten amaç en düşük hatayı veren parametreleri bulabilmektir. Burada uygunluk fonksiyonu olan F 'in seçimi oldukça kritiktir çünkü seçilen fonksiyona göre en-iyileme süreci değişecektir.

Görünüm modeli için parametreler; şekil dönüşüm parametreleri olan X_t, Y_t, s, Θ ve görünüm parametreleri c 'den oluşmaktadır. Şekil dönüşüm parametreleri bir önceki bölümde de anlatıldığı gibi nesnenin konum, ölçek ve düzlem içi dönmesini ifade eden

parametrelerdir. Görünüm parametreleri ise nesneye ait şekil ve doku değişimlerini aynı anda kontrol eden parametreleri ifade etmektedir.

Görünüm modellemesinin amacı hedef görüntü ile modelin sentezleyeceği görüntü arasındaki farkı minimize edecek parametreleri kestirmektir. Eğer hedef görüntüde modellenen nesneye ait öncül bilgilere göre, model iklendirilemiyor ise modelin istenen sonuca yakınsaması oldukça güçtür. Bu tür problemler benzetimli tavlama [96] [97] ve genetik algoritmalar [98] [99] gibi global en-iyileme yöntemleri ile çözülebilmektedir.

Tez kapsamında her zaman bir iklendirme olduğu varsayıldığı için problemin en-iyileme tarafına yoğunlaşılmanın ve en-iyileme tezin kapsamı dışında tutulmuştur. Fakat tezin literatür çalışmasından da görülebileceği gibi, *AGM* en-iyileme aşaması için literatürde birçok farklı yöntem önerilmiştir.

3.3 *AGM* Arama ve Model Uydurma

Eğitim kümesindeki görüntü ve şekil bilgisi kullanılarak *AGM* eğitilir ve model oluşturulur. Yeni bir görüntü geldiğinde *AGM* arama işlemi algoritma aşağıda gösterildiği gibi yapılır:

1. *AGM* model parametrelerini kullanarak ilk sentez görüntü $I_m(p)$ 'yi oluştur.
2. Sentezlenen görüntü ile altında kalan resme ait bölgeyi ortalama yüze eş ve fark (residue) değerlerini hesapla,

$$r(p) = I_m(p) - I_{im}(p) \quad (3.1)$$

3. Parametre vektöründeki değişimi belirle. Eğitim kümesinden elde edilen ve fark (residue) ile parametre değişimi arasında doğrusal bir ilişki varsayımına dayalı R 'yi ve residue'yü kullanarak değişim vektörünü hesapla,

$$\delta p = Rr \quad (3.2)$$

4. Parametre vektörü olan p 'yi güncelle.

$$p = p - \delta p \quad (3.3)$$

5. Yakınsama sağlanıncaya kadar 2 – 5 arası çevrime devam et.

3.4 Görünüm Modelinin Oluşturulması

Görünümün modellenmesi için doku ve şekil modellerinin tek bir model içinde bir araya getirilmesi gerekecektir. Doku ve şekil değişimlerini tek bir görünüm parametre vektörüyle kontrol edebilmek için öncelikle doku ve şekil model parametreleri arasında olası ilintilerin kaldırılması gerekir. Bunun için bir önceki bölümlerde şekil model parametreleri b_s ve doku model parametreleri b_g vektörlerinin sistematik bir şekilde bir araya getirilmesi ve ardarda eklenmesi ile oluşturulan yeni vektörlere üçüncü bir *TBA*'nın uygulanması yöntemi seçilmiştir. Böylelikle her iki model parametrelerinin birleşimine kıyasla çok daha derli toplu ve etkili bir gösterim elde edilmiş olacaktır. Denklem (3.4)'de b_s ve b_g 'nin ardı ardına eklenmesi ile oluşturulan vektöre *TBA* uygulanması sonucu elde edilen birleşik modele ait c parametrelerinin nasıl hesaplandığı gösterilmektedir.

$$b = \Phi_c c \quad (3.4)$$

Bir önceki bölümlerde şekil model parametreleri b_s ve doku model parametreleri b_g 'nin nasıl elde edildiği anlatılmıştı (Bkz. denklem (2.21) ve (2.31)). Denklem (3.4)'deki Φ_c parametre vektörleri olan b_s ve b_g 'nin birleşmesiyle oluşturulan yeni ve uzun vektörlerin saçılım matrislerinden hesaplanmış özvektörleri göstermektedir. Model parametre vektörleri b_s ve b_g ,

$$b = \begin{pmatrix} W_s b_s \\ b_g \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

biçiminde bir araya getirilmektedir. Denklem (3.5)'den de açıkça görülebileceği gibi doku ve şekil vektörlerinin değer aralıkları ve modelledikleri bilginin farklılığı gibi nedenlerden dolayı, şekil ve doku model parametreleri W_s gibi bir ağırlıkla çarpılarak aynı ölçeğe çekilmişlerdir. Bunun amacı (x,y) koordinatları ile beneklerin 0 – 255 aralığında değişen gri seviye değerleri arasındaki farklılığı ortadan kaldırmaktır. W_s bir çeşit normalizasyon amacıyla konulmuş köşegen matristir. Bu tür bir normalizasyon yapmadan doku ve şekil model parametrelerinin bir arada modellenmesi imkânsızdır. [94] ve [55]'de ağırlık matrisinin köşegenleri, şekil özdeğerlerinin toplamının, doku özdeğerlerinin toplamına oranı olarak ifade edilmiş ve bu oranlar W_s matrisinin köşegen değerleri olarak kullanılmıştır. Eğitim kümesindeki şekil ve dokuya ait toplam değişimleri ifade eden λ_s ve λ_g ,

$$\begin{aligned} \lambda_g &= \sum \lambda_{g_i} \\ \lambda_s &= \sum \lambda_{s_i} \end{aligned} \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilir. Yukarıdaki ifadelerden de anlaşılacağı gibi şekil ve dokudaki toplam değişimler, ayrı ayrı şekil ve doku özdeğerlerinin toplamı olarak ifade edilmiştir. [71]'de bu durumun sebebi detaylı olarak anlatılmaktadır. λ_s ve λ_g değerleri hesaplandıktan sonra toplam doku değişiminin, toplam şekil değişimine oranı, λ_g/λ_s hesaplanabilir. Buradan hareketle, birleşik modelde şekil ve model parametrelerinin birleştirilmesinde ağırlık matrisi olarak kullanılacak olan W_s ,

$$W_s = \begin{bmatrix} \lambda_g/\lambda_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_g/\lambda_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & . & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_g/\lambda_s \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

biçiminde oluşturulur. Denklem (3.5)'de verilen birleşik model parametre hesabı ile denklem (2.21) ve denklem (2.31)'da verilen b_s ve b_g ifadeleri birleştirilerek,

$$b = \begin{pmatrix} W_s \Phi_s^T (x - \bar{x}) \\ \Phi_g^T (g - \bar{g}) \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

denklem (3.5)'yi daha açık bir şekilde yeniden yazabiliriz. Son olarak denklem bu ifade yardımı ile şekil vektörünün birleşik model parametresi c 'ye göre

$$\begin{aligned} x &= \bar{x} + Q_s c \\ g &= \bar{g} + Q_g c \end{aligned} \quad (3.9)$$

biçiminde sentezlenebilir. Buradaki Q_s ve Q_g 'yi daha açık olarak,

$$\begin{aligned} Q_s &= \Phi_s W_s^{-1} \Phi_{c,s} \\ Q_g &= \Phi_g \Phi_{c,g} \end{aligned} \quad (3.10)$$

biçiminde yazabiliriz. Verilen herhangi bir c parametre vektöründen görüntü sentezlemek için öncelikle şekil verisini oluşturan önemli noktalar, yani x vektörü daha sonra şekilden arındırılmış doku vektörü olan g denklem (3.9) ve (3.10) kullanılır. Denklem (3.10)'deki $\Phi_{c,s}$ birleşik modelin özvektörlerinin şekil ile ilgili olan ilk bölümünü gösterirken, $\Phi_{c,g}$ ise doku modeli ile ilgili diğer parçasını ifade etmektedir.

$$\Phi_c = \begin{pmatrix} \Phi_{c,s} \\ \Phi_{c,g} \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

4. AYRIT TEMELLİ YENİ BİR YAKLAŞIM

Yüz tanıma probleminin zorlukları göz önüne alındığında bunlar; poz değişimi, ışık kaynağının yeri ve şiddetindeki değişimler, yüz ifadesindeki değişimler, ölçek sorunu, zamanla veya yaşlanmayla oluşan değişimler, arama yapılacak yüz veri tabanının büyüklüğü ve işlem zamanı şeklinde özetlenebilir. İnsan yüzünün doğal bileşenlerinin yerlerini hassas bir şekilde ve otomatik olarak bulmak oldukça zor bir problemdir. Bu problemi aşmak için bazı alternatif öneriler getirilmiştir. Literatürde yüz tanıma için yerel öznitelikleri kullanan ilk çalışmalarda, giriş görüntüsüne doğrudan bir ızgara geçirilerek, tüm ızgara düğümlerinden öznitelik çıkartan yöntemler önerilmiştir. [100]'te farklı frekans ve ölçeğe sahip Gabor süzgeçler yardımı ile yerel öznitelikler çıkartılmış ve bu öznitelikler tanıma amaçlı kullanılmıştır. Bunun yanı sıra [101]'da, yüz üzerindeki önemli noktaları Gabor süzgeçler ve Genetik algoritmalar yardımı ile saptayan bir yöntem önerilmiştir. [14]'teki çalışmada insan yüzü tanımada yüz temel bileşenleri etrafındaki noktaları kullanmak yerine, yüz görüntüsü üzerinde gezdirilen Gabor süzgeçlerin verdiği yanıtlardan, yüksek enerjili noktalar belirlenmiş ve bu noktalardan yerel öznitelik çıkartılmıştır. [102]'de ise, öznitelik seçme algoritmaları ve genetik algoritmalar yardımı ile önden çekilmiş ve hizalanmış yüz görüntüleri üzerindeki noktaların tanıma başarımına etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada raporlanan sonuçlar incelendiğinde tanıma için kullanılacak yerel öznitelik noktalarının yüzün temel bileşenleri etrafında öbeğlendiği görülmüştür.

Bu çalışmada giriş olarak verilen görüntüdeki yüzün yeri Haar dalgacık benzeri öznitelikler kullanan Haar Peşpeşe Sınıflandırıcılar (HPS) [103] ile saptanmaktadır. Yüzün yeri saptandıktan sonra Aktif Görünüm Modeli (AGM) [104] ile yüze ait önemli noktalar bulunmaktadır. AGM'nin belirlediği yüz önemli noktaları üzerinde Gabor süzgeçlerle evrişim yapılarak yerel öznitelikler elde edilmektedir.

Tezin bu bölümünde sırasıyla yüz saptama ve AGM iklendirmede kullanılan HPS yöntemi, üçüncü bölümde yüze ait temel bileşen noktalarının bulunmasında

kullandığımız AGM yöntemi ve AGM'nin ışık değişimlerine karşı gürbüz hale getiren bir yöntem tanıtılmaktadır. Ayrıca Gabor süzgeçler yardımı ile yerel öznitelik vektörlerinin eldesi, deneysel sonuçlar ve çıkarımlar anlatılmıştır.

4.1 Aktif Görünüm Modelinin İklendirilmesi ve Yüz Sezimi

Giriş görüntüsü üzerinde insan yüzü aday bölgelerinin yerinin saptanmasında ölçek değişimlerine karşı gürbüz bir yöntem olan ve Haar özniteliklerini kullanan *Haar Peşpeşe Sınıflayıcılar (HPS)* kullanılmıştır. İnsan yüzü yer saptama modülü üzerine yapılan ilk testlerde sistemin gürültü, bulanıklık, düşük kontrast gibi durumlarda bile başarı ile çalıştığı gözlenmiştir. Fakat tanıma aşaması için saptanan yüzün hizalanması gerekmektedir. *HPS* ise yüz koordinatlarını kabaca verebilmektedir.

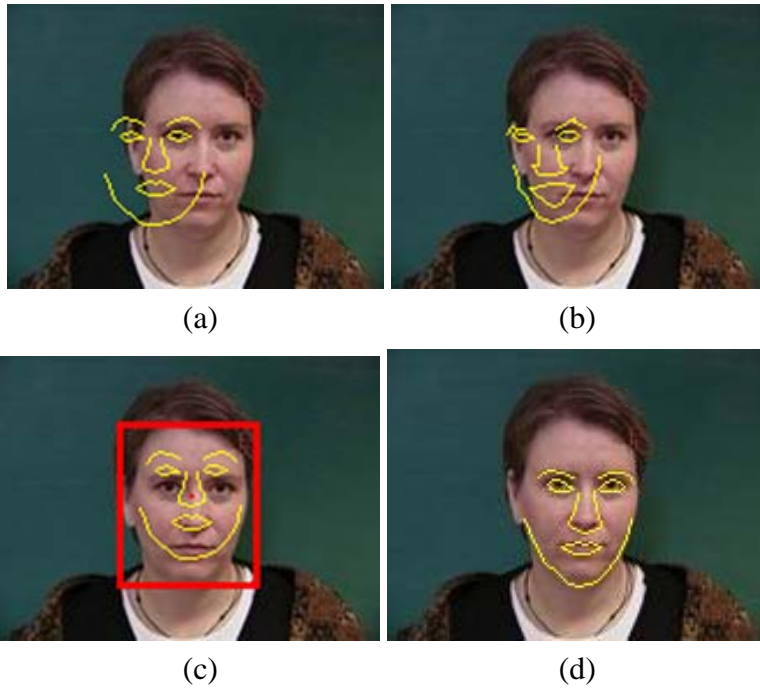
Birçok nesne bulma uygulamasında başarı ile kullanılan *HPS* ilk olarak Viola [103] tarafından önerilmiş ve yöntem Lienhart [105] tarafından geliştirilmiştir. Sınıflandırıcı insan yüzüne ait bölgelerden alınmış, aynı ölçekteki görüntülerle (pozitif örnekler) ve insan yüzü içermeyen diğer bölgelerden alınmış aynı ölçekteki (örn: 20×20) imgeler (negatif örnekler) kullanılarak eğitilir. Eğitimden geçmiş sınıflandırıcıya insan yüzü içeren bir görüntü giriş olarak verildiğinde insan yüzünün bulunduğu bölge için sınıflandırıcı "1" çıkışını, diğer bölgeler için "0" çıkışını üretir.

Giriş resmindeki insan yüzlerine ait bölgelerin bulunması işlemi tüm görüntü taranarak gerçekleştirilir. Sınıflandırıcı değişik boyutlardaki insan yüzlerini bulacak şekilde tasarlanabilir. Bu ise görüntünün boyutlarını değiştirmekten daha etkin bir yöntemdir. Bu yüzden giriş resmi içerisindeki değişik ölçeklerdeki insan yüzlerini bulabilmek için sınıflandırıcı aynı arama sürecini değişik ölçek parametreleri için tekrar eder. Sınıflandırıcının isminde yer alan "peşpeşe" kelimesi, oluşturulan sınıflandırıcının, basit yapılı birden fazla sınıflandırıcının bir araya gelerek karmaşık bir yapı meydana getirdiğini göstermek amacı ile kullanılmaktadır. Basit yapılı bu sınıflandırıcılar, herhangi bir sınıflandırıcı katmanı geri çevrime vermediği sürece tüm katmanlar geçilene kadar giriş görüntüsüne ardarda uygulanır. Yapı içerisindeki her sınıflandırıcı katman öznitelik uzayında farklı bir bölgeyi taramaktadır. Burada kullanılan basit sınıflandırıcılar en az iki yapraklı karar ağaçlarıdır. Haar öznitelikleri bu sınıflandırıcılara giriş olarak verilir.

HPS yardımıyla giriş görüntüsündeki yüzün yeri saptanmış daha sonra *HPS*'nin verdiği konaç bilgileri bir sonraki modül olan *AGM*'nin ilklendirilmesinde kullanılır. *AGM* en-iyileme sonucu ilklendirmeye göre değişebilmektedir. Herhangi bir yüz sezim algoritması kullanılmadan, *AGM* arama işlemi ile yüz hizalama yapmak oldukça maliyetlidir. Ayrıca *AGM*, arama safhasında yerel minimumlara kolayca takılmakta ve hatalı bir noktaya yakınsayabilmektedir. Şekil 4.1.b'de (üst satır) rastgele ama optimum noktaya yakın olan bir ilklendirmenin bile hatalı bir yere yakınsadığı görülmektedir. Burada önemli olan, giriş görüntüsündeki yüzün ölçeği ile *AGM*'nin başlangıç şeklinin ölçeğinin de birbirlerine yakın olmasıdır. Bu yüzden giriş resmi üzerinde hiç bir varsayım yapılmadan ölçek bilgisinin de otomatik olarak elde edilmesi *AGM* en iyileme sonucunun başarısı için önemlidir. Bu aşamada *HPS*'nin belirlediği, yüzü içine alan, kutunun ölçek bilgisinin kullanımı da başarıyı arttırmıştır. Şekil 4.1.c'de *HPS*'nin verdiği sonuca göre ilklendirme yapılmış ve Şekil 4.1.d 'de *AGM*'nin ürettiği sonuç gösterilmektedir. Bu çalışmada yüze ait önemli noktaların saptanması için *AGM* kullanılmıştır. *AGM* için ilklendirme çok önemlidir. Hatalı ilklendirme *AGM* başarısını kötü yönde etkilemektedir. Bu çalışmada *HPS*'nin belirlediği yüzü içine alan kutunun genişliği ve konaç bilgileri kullanılarak ilklendirme problemi aşılmaktadır. İlklendirme aşamasında *HPS*'nin kullanımı ile yüz bileşenleri daha hızlı bir şekilde saptanmıştır.

4.2 Yüzün Önemli Noktalarının Bulunması

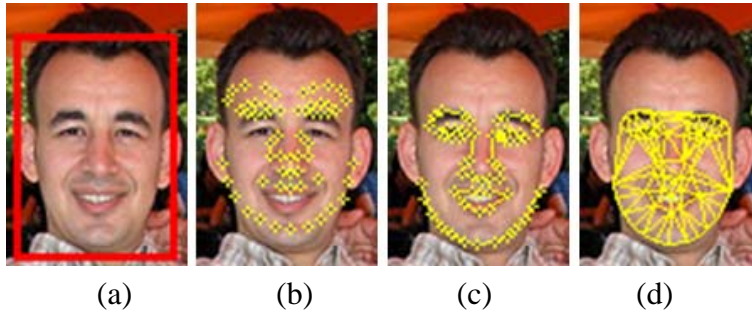
İnsan yüzü tanımda yüksek başarımlar elde edebilmek için giriş görüntülerinin hizalanması gerekmektedir. Bu yüzden son yıllarda araştırmalar bu yöne doğru kaymıştır. Genellikle getirilen çözümler model tabanlı yaklaşımlardan oluşmaktadır. Bu model tabanlı yöntemler arasında insan yüzü hizalama işlemi en başarılı sonucu *AGM* ve *AGM*'nin türevleri vermektedir. Yöntem, şekil ve örüntü arasında kurduğu model sayesinde hızlı ve gürbüz bir şekilde bozulabilir resim eşleşmesi yapabilmektedir. Tezde yüze ait önemli noktaların çıkartılması ve insan yüzüne ait modelin kurulması aşamasında *AGM* yöntemi kullanılmıştır. *HPS*'den elde edilen insan yüzüne ait konaç ve ölçek bilgileri kullanılarak *AGM* ilklendirmesi yapılmaktadır (Şekil 4.2.b). *AGM*'nin belirlediği, kaşlar, gözler, burun, ağız ve çene yayının üzerindeki 58 nokta Şekil 4.2.c'de gösterilmektedir. *AGM* yüz şekil



Şekil 4.1. AGM'nin ilkendirilmesi: a) Rastgele ilkendirme, b) Rastgele ilkendirmenin hizalama sonucu. c) HPS ilkendirme, d) HPS ilkendirme için hizalama sonucu.

bilgisini, eğitim aşamasında kurulan modeli kullanarak, sentezlenen görüntü ile ortalama şekle eğilmiş giriş resmi arasındaki hatanın minimum olduğu yerde aramayı sonlandırmaktadır. Şekil 4.2.d'de gösterildiği gibi *AGM* tarafından bulunan yüz önemli noktaları üzerine gerilen tel-örgü ile ortalama yüzün şekil tel-örgüsü arasındaki fark analiz edilerek poz açısı belirlenebilir. Ayrıca bileşen temelli tanıma için gerekli olan yüz bileşenleri, bu noktalar yardımı ile kolayca ve yüksek doğrulukta saptanabilir.

4.3 Aydınlanma Değişimlerine Karşı Ayrıt Temelli AGM

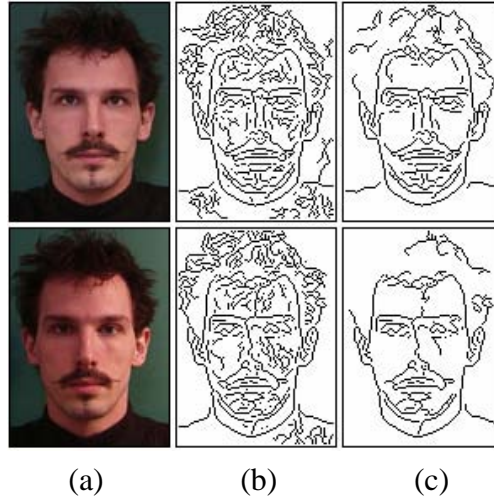


Şekil 4.2. HPS ve AGM ile yüz şekil bilgisinin elde edilmesi: a) Giriş görüntüsünden HPS ile yüz saptama, b) HPS sonucuna göre ilkendirme, c) AGM'nin bulunduğu önemli noktalar, d) Saptanan noktalara geçirilen tel-örgü.

RGB değerleri kullanılarak eğitilen klasik *AGM*'de, eğitim kümesinde yer alan yüz görüntülerindeki doku bilgisi, şekil bilgisi ile birlikte modellenir. Model eşlemede ise verilen yüz görüntüsünde, modele en yakın doku bölgesi eşleştirilir. Bu nedenle farklı aydınlatma koşullarına sahip görüntülerde doku, modelden oldukça uzaklaşmış olduğundan, *AGM* ile hizalama hatalı sonuçlar verir. Bu sonuç, durum, temel bileşenler analizine dayalı bir yöntem olan klasik *AGM*'nin aydınlanmadan kaynaklanan benek değerlerindeki değişimlerden etkilendiğini gösterir. [106]'deki çevrite dayalı bir görüntü sıkıştırma yönteminde bu iki türden çevritin karşılık, eğim, uzunluk gibi özellikler kullanılarak başarılı bir şekilde ayrıştırılabildiği gösterilmiştir. Burada çevritler bu özelliklerine göre bir öncelik sıralamasına sokulmaktadır. Öncelik sıralaması için,

$$Oncelik(C(i)) = w_u U(C(i)) + w_e E(C(i)) + w_k K(C(i)) \quad (4.1)$$

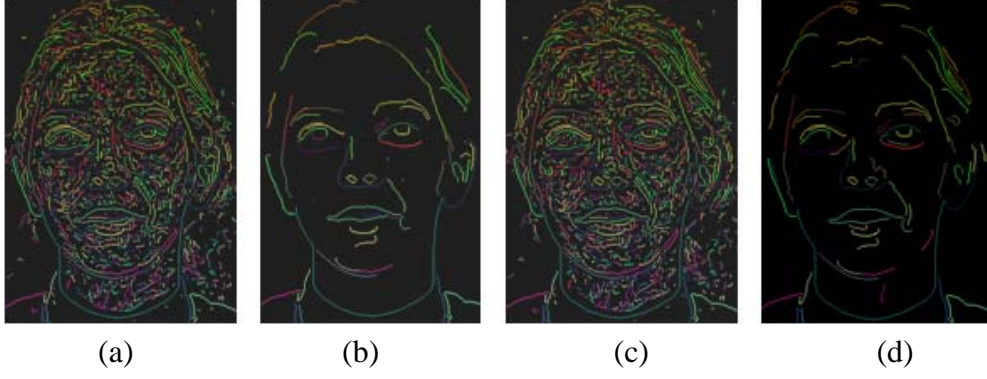
öncelik fonksiyonu kullanılmaktadır. İfadede yer alan C çevriti, U uzunluk, E eğrilik ve K ise karşılık fonksiyonunu ifade etmektedir. Öncelik fonksiyonunda, ayrıtlar uzunluk, eğrilik ve karşılık gibi özniteliklerine göre önceliklendirilmektedir. Daha sonra bu sıralamada önde olan çevritler tutulurken, diğerleri elenmektedir. Elenen çevritler çoğunlukla dokulardan kaynaklanan çevritlerdir. Şekil 4.3.c'de gösterilen yüz çevrit haritasının genel olarak aynı oldukları görülebilir. *AGM* ile yüz hizalamada çevrite dayalı yöntemin kullanılmasının başarımı arttıracağı açıktır. Çevritlerin seçimi



Şekil 4.3. Farklı aydınlatma koşullarında çevrit seçimi: (a) Giriş Görüntüsü, (b) İnce ölçekte saptanan ayrıtlar, (c) Ayrıtlar eleme sonunda elde edilen yüz çevritleri.

esnasında en uygun ölçek ve diğer parametreler eğitim kümesi için belirlenmiştir.

Tüm ayrıtlar etiketlenerek özelliklerine göre hangi çevritlerin elenmesi gerektiği yukarıda tanımlanan yöntemle belirlenmiştir. Şekil 4.4.a ve Şekil 4.4.c'de farklı



Şekil 4.4. Çevritlerin özelliklerine göre sıralanması: (a) Karşıdan aydınlatılmış görüntü için saptanan çevritler, (b) Eleme sonucu elde edilen çevritler, (c) Sağdan aydınlatılmış görüntü için saptanan çevritler, (d) Eleme sonucu elde edilen çevritler.

aydınlanma koşulları altında elde edilen çevrit haritaları gösterilmiştir. Şekil 4.4.b ve Şekil 4.4.d'de ise çevrit eleme algoritması sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlardan nesne sınırlarına karşı düşen ayrıtların aydınlanma koşulları ile fazla değişmediği görülmektedir. Aydınlanma koşullarından etkilenmeyen ve insan yüzünü tam olarak ifade eden ayrıtlar [106]'de tanımlanan genel çevrit sıralama yöntemiyle saptanmış ve bu çevritler üzerine,

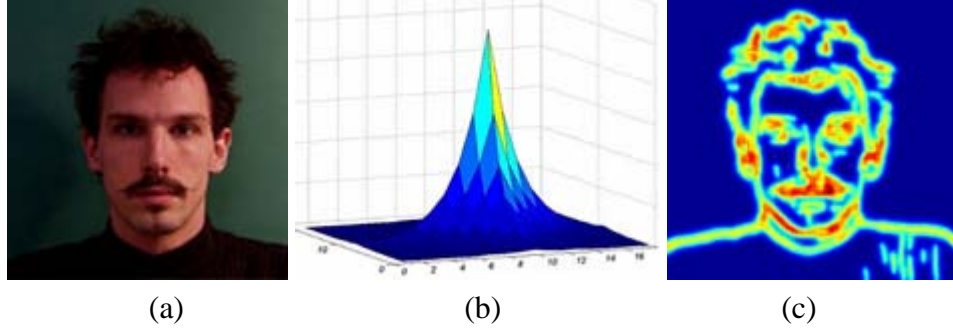
$$E_{zar}(f; \lambda) = \iint (f - d)^2 + \lambda (f_x^2 + f_y^2) d\Omega \quad (4.2)$$

biçiminde ifade edilen zar yüzeyi gerilmiştir. Gerilen bu zar yüzeyi ayrıtları önemli ölçüde korumaktadır. Yüzey kurmada kullanılan çekirdek fonksiyonu, $R_1(x,y)$ şu şekilde ifade edilebilir,

$$R_1(x,y) = \frac{1}{2\lambda} e^{-\frac{(|x|+|y|)}{\lambda}}. \quad (4.3)$$

İnce ölçeklerde yüz ayrıtları saptandığında, ışık değişiminin özellikle dokudan kaynaklanan yalancı ayrıtları etkilediği fakat nesne sınırları olan ve/veya fiziksel ayrıtlara karşılık gelen çene yayı, gözler, kaşlar, burun delikleri ve dudaklarda gri seviye farklılığını koruduğu ve bunlara karşılık gelen çevritlerin fazla değişmediği görülür. Ayrıca yapılan deneylerde dokudan kaynaklanan yalancı ayrıtların kaba ölçeklerde kaybolduğu gözlenmiştir. Şekil 4.3.b'de ince ölçekte saptanmış ayrıtlar gösterilmektedir. Dikkat edilirse üst ve alt satırda aynı yüzün farklı aydınlatma koşullarındaki ayrıtlar arasında büyük farklılıklar vardır. Alt ve üst satırdaki yüz

için artalarda ve yüzün sağ/sol tarafında sadece ışık değişimi ile birçok ayrıt yok olmuş ve/veya ortaya çıkmıştır. Fakat Şekil 4.3.b'den görülebileceği gibi, iki farklı aydınlatılmış görüntünün ayrıtları arasında bazı değişmez ayrıtlar olduğu gözlenmiştir. Bunlar yüz bileşenlerinin nesne sınırları, çene sınırları, saç yüz birleşim bölgelerine karşılık gelen çevritlerdir. Şekil 4.3.b'deki ayrıtlar üzerinde, ayrıtların oluşmasını

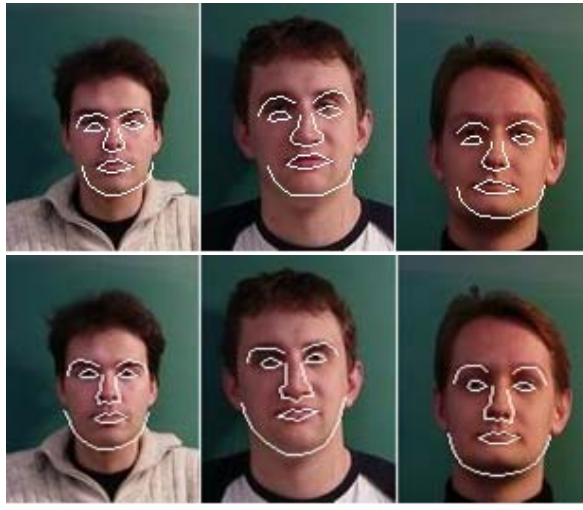


Şekil 4.5. Tepe görüntülerinin eldesi:(a) Özgün görüntü, (b) Kullanılan süzgeç, (c) Kurulan tepe görüntüsü.

sağlayan özellikler (karşıtlık, eğrilik, uzunluk, vb.) ile çevritlerin uzunluğu gibi parametrelere göre bir eleme yapıldığında yüze ait şekil bilgisini verecek ayrıtlar bulunabilmektedir. Şekil 4.3.c'de bu seçim işlemi sonrasında elde edilen çevritler gösterilmektedir. Şekil 4.3.c'de alt ve üst satırda gösterilen yüz çevritleri bazı küçük farklılıklar dışında genel olarak aynı oldukları görülebilir. Yüz doğal bileşenlerinin *AGM* ile saptanması için bu gösterime dayalı bir yöntemin kullanılmasının başarımı arttıracığı açıktır. Ayrıtların seçimi esnasında en uygun ölçek ve en uygun parametreler denemeler sonunda belirlenmiştir. Tüm ayrıtlar tek tek etiketlenmiş ve özelliklerine göre sıralanmış ve hangi ayrıtların silinmesi gerektiği belirlenmiştir. Kullanılan süzgeç çekirdek fonksiyonu Şekil 4.5.b'de gösterilmiştir. Şekil 4.5.c incelendiğinde ayrıt olan yerlerin kullanılan süzgeç çekirdeğinin özelliğinden dolayı korunduğu görülecektir. Bu ise sıradan ortalama almaya göre daha doğru sonuçlar almamızı sağlamıştır.

4.4 Deneysel Sonuçlar

Kullandığımız *IMM* [107] yüz görüntü veri kümesinden 640×480 çözünürlükte, nötral yüz ifadesine sahip, karşıdan ve sağdan aydınlatılmış toplam rastgele 68 yüz görüntüsü seçilmiştir. Veri kümemizde her kişinin bir adet karşıdan çekilmiş görüntüsü eğitim amaçlı, sağdan aydınlatılmış diğer resmi ise test amaçlı kullanılmıştır.



Şekil 4.6. Yüz önemli noktalarının bulunması: (Üst) Özgün RGB giriş görüntüleri kullanan AGM'nin sonuçları (Alt) Tepe giriş görüntülerini kullanan AGM'nin sonuçları.

Yüz saptama modülü, yüzün konumunu kabaca vermektedir. *AGM*, *HPS*'nin belirlediği yüz bölgesinde arama yapmaktadır. Böylelikle, en aza indirgeme yöntemi çözüme yakın bir noktadan başladığı için, daha hızlı bir yakınsama sağlanmakta ve yerel minimum noktalarına yakalanmadan daha gürbüz sonuç elde edilebilmektedir. Yaptığımız testlerde klasik *AGM*'nin eğitim kümesinde yer alan görüntülerdeki aydınlanma koşulları ile aynı aydınlanma koşullarına sahip test görüntüleri için oldukça başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiştir. *AGM*, temel bileşenler analizi tabanlı bir yöntem olduğu için, farklı ışıklandırma koşullarında elde edilmiş görüntülerde, yüzün temel bileşenlerini yanlış noktalarda saptayabilmektedir. Yüz dokusunu benek değerlerinden bağımsız olarak, tepe görüntüleri ile kurup, aynı şekilde tepe görüntüleri ile *AGM*'yi eğittiğimizde, aynı test görüntüleri için, ışık değişimlerine karşı daha gürbüz sonuçlar alınmıştır. Şekil 4.6.a incelendiğinde, sağdan aydınlatılmış resimlerde, *AGM* 'nin eğitim kümesinde kullanılan resimlerdeki dokuyu bulmaya çalıştığı ve bu yüzden hatalı sonuçlar verdiği görülmektedir. Şekil 4.6.(üst)'te saptanan yüz önemli noktalarının eğitim kümesindeki ışık koşullarına benzeyen yüzün sağ tarafına kaydığı görülecektir. Şekil 4.6.(alt)'ta tepe görüntüleri kullanılarak eğitilen *AGM*'nin ürettiği sonuç görülmektedir. Aynı görüntünün ayrıtları bulunup, *AGM* arama işlemi tepeler üzerinde yapıldığında ışık değişimi olmasına rağmen doğru sonuçlar elde edilmiştir.

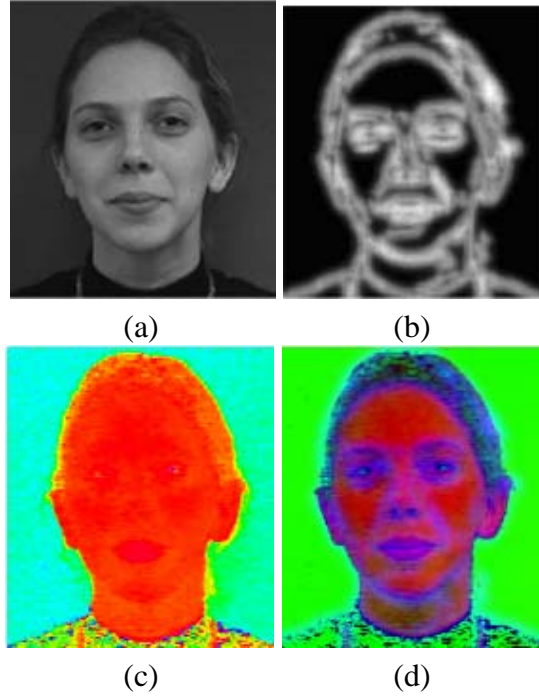
5. ÇOK BANTLI MODELLEME ve YENİ BİR GÖSTERİM

5.1 Yüz Hizalama için Çok Bantlı Yeni Bir Gösterim (HHG)

Klasik *AGM*'den farklı olarak, modelleme aşamasında gri seviye veya *RGB* değerlerini kullanmak yerine çevrit seçimine dayalı tepe görüntülerinin kullanımı ışık değişimlerine karşı oldukça gürbüz ve başarılı sonuçlar vermiştir. Fakat *AGM* test aşamasında gri seviye değerleri kullanıldığında yüz ten rengi artalana göre oldukça ayırt edici bilgiler taşımaktadır. Tepe görüntülerinin kullanımı ten rengi bilgisini tamamen ortadan kaldırmakta ve hem artalan hemde yüz için aynı gri seviye değerlerine sahip yüzeyler kurmaktadır. Yüz hizalama için sadece tepe görüntüleri kullanıldığında, *AGM* için yüze ait tepe görüntüleri ile artalana ait tepe görüntüleri arasında hiç bir fark kalmamaktadır. Bu durum, eğer ilkendirme iyi yapılmamış ise *AGM*'nin yerel minimumlara takılmasına sebep olmaktadır. Haar peşpeşe sınıflandırıcılar kullanılarak optimum bir noktadan *AGM* arama işlemi başladığı için hizalama başarımına bu durum yansımamaktadır. Fakat yüz için ayırt edici bir bilgi olan ten rengi bilgisinin tepe görüntüleri kullanıldığında kaybedilmesi birinci bölümde önerdiğimiz yöntem için bir yitimidir.

Doğrudan ten rengi bilgisinin yüz hizalama probleminin çözümünde kullanılması farklı aydınlatma koşullarında benek değerlerinde meydana gelen değişimler nedeniyle iyi sonuçlar vermemektedir. Bu problemin çözümü için tepe görüntüleri gibi ışık değişimlerine karşı gürbüz bir gösterime ek olarak, ışık değişimlerine karşı daha az hassas olan renk uzaylarının birlikte kullanımının başarımı arttıracığı düşünülmüştür. Ayrıca Aktif Görünüm Modelini tek bantta çalıştırmak yerine farklı özniteliklere sahip bantlardaki değişimi modelleyebilen ve bunu tek bir parametre uzayında ifade edebilen bir yöntem kullanılmasının başarımı arttıracığı öngörülmüştür. Bu amaca yönelik üç-bantlı yeni bir gösterim geliştirilmiştir. Bu gösterimde bir önceki çalışmamızda oldukça başarılı sonuçlar aldığımız çevrit seçimine dayalı tepeler (Hill), ışık değişimlerine karşı gürbüz olduğu bilinen *HSV* renk gösterimindeki Hue

bileşeni ve gri seviye bilgisi bir arada kullanılarak *RGB* gösterimine benzer üç-bantlı *HHG* (Hue, Hill, Gray) gösterimi oluşturulmuştur. Bu gösterim, yüz hizalama probleminde kullanılan veri kümelerinde test edilmiş ve oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Literatürde aktif görünüm modeli için çok bantlı modelleme üzerinde yapılan çalışmalarda [75] [46] yüz hizalama için oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Çok bantlı modellemenin *AGM*'nin modelleme yeteneğini arttırdığı referansları verilen bu çalışmalarda raporlanmıştır. [46]'de *RGB* görüntüleri yerine *HSV* bandına geçilerek ışığa olan duyarlılık azaltılmaya çalışılmış ve *HSV*'den Hue ve Value bantları ile resmin gradyanı bir araya getirilerek (*VHE*) şeklinde yeni bir gösterim oluşturulmuştur. Bu çalışmada yüz için çevrit seçimi ve tepe görüntülerinin yüz



Şekil 5.1. Çok bantlı *HHG* gösterimi: (a) Gri seviye bandı , (b) Tepe bandı , (c) Hue bandı, (d) *HHG* çok bantlı gösterim.

hizalamada *VHE* benzeri bir yapıda kullanımının başarımı arttıracığı öngörülmüştür. Bu amaca yönelik gerçekleştirdiğimiz çok bantlı gösterim ile üç bantlı modelleme yapılmıştır. Yüz hizalama için [46]'de test için kullanılan veri kümesi üzerinde önerdiğimiz yöntem test edilmiş ve oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Önerdiğimiz yeni yöntem ana hatlarıyla Şekil 5.1'de gösterilmektedir.

Önerilen yöntemde ayrıtlar ince ölçekte saptanmakta ve bu ayrıtlar üzerinde yüz bileşenlerine ait çevritler belirli kriterlere göre sıralanmaktadır. Çevrit sıralamada

eğrilik, çevrit uzunluğu ve karşıtlık bilgisi kullanılmıştır. Bu kriterlere göre sıralanan çevritlerden yüz şekil bilgisini veren çevritler seçilmektedir. Seçilen çevritlere zar modeli ile yüzey uydurularak Tepe bandı elde edilmektedir. Diğer bantlar için görüntü *RGB* renk uzayından *HSV* renk uzayına dönüştürülür. *HSV* renk uzayında ten rengi bölgesi için en uygun bölge deneysel olarak belirlenerek gösterimde kullandığımız *Hue* bandı elde edilmektedir. En son olarak giriş görüntüsünün gri seviye değeri de üçüncü bant olarak alınarak gösterimde kullanılan tüm bantlar ayrı ayrı elde edilir. Bu üç bant birleştirilerek *Hue*, *Hill*, *Gri* seviye (*HHG*) gösterimi üretilir. Bu gösterimde amaç *AGM*'nin her bantta yer alan veriyi kullanarak yüz şekil ve doku değişimlerini daha doğru modelleyebilmesini sağlamaktır. Her bandın taşıdığı bilgiler modelleme aşamasında dikkate alındığı için daha gürbüz ve güçlü bir gösterim elde edilmiş olmaktadır.

5.1.1 Hue, Tepe (Hill) ve Gri seviye bantların elde edilmesi

Işık değişimlerine karşı gürbüz bir modelleme için *AGM*'de *RGB* değerlerinin giriş olarak kullanılmasının uygun olmadığı görülmüştür. Literatürde *RGB* yerine farklı renk uzaylarına geçilerek ışığa daha az duyarlı yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin *HSV* gösterimindeki *Hue* bandı gri seviye değerlerine göre ışığa karşı daha az duyarlıdır. Işık değişimlerine karşı duyarlılığı azaltmak için izlenecek yol *RGB* gösteriminden *HSV* gösterimine geçilip, *Hue* bandını modelleme amaçlı kullanmak olacaktır. Işık değişimleri insan ten rengi bölgelerindeki benek değerlerinde oldukça bozucu değişimlere neden olmaktadır. Bu değişimler *HSV* renk uzayına geçildiğinde daha az hissedilmektedir. Bu yüzden çok bantlı gösterimde *Hue* bandının kullanılması ışık değişimlerine karşı daha gürbüz bir gösterimin oluşturulmasını sağlayacaktır. Şekil 5.1.c'de renkli giriş görüntüsü için elde edilen *Hue* bileşeni gösterilmektedir. Şekil 5.1.c'deki *Hue* bandı görüntüsü incelendiğinde ten rengi bölgelerinde art alana göre oldukça farklı benek değerleri olduğu görülecektir. Bu ise ışık değişimlerinden fazlaca etkilenmeden yüze ait bölgelerin ayırt ediciliğini arttırmaktadır. Şekil 5.1.b'de ise önerdiğimiz çok bantlı gösterimin diğer bileşeni olan "Tepe" bandı gösterilmektedir. Tepe görüntüleri, bir önceki bölümde detayları verilen ayırt seçimine dayalı zar yüzey kurma ile elde edilmiştir. Bir önceki bölümde yüz hizalama için ışık değişimlerine karşı daha az duyarlı ve daha yüksek başarıma sahip bu gösterim önerilen çok bantlı gösterimin bir diğer bandını oluşturmaktadır.



Şekil 5.2. Üç-bant modelleme yüz hizalama sonuçları: Üst) Klasik AGM (RGB), Alt) Önerilen seçkin ayrıt tabanlı AGM (HHG-GAGM).

Şekil 5.1’de önerilen çok bantlı gösterimin Hue, Tepe (Hill) ve Gri seviye değerinden oluşan tüm bantları gösterilmektedir. Önerdiğimiz çok bantlı gösterim *HHG* olarak adlandırılmıştır.

5.1.2 Çok bantlı modelleme

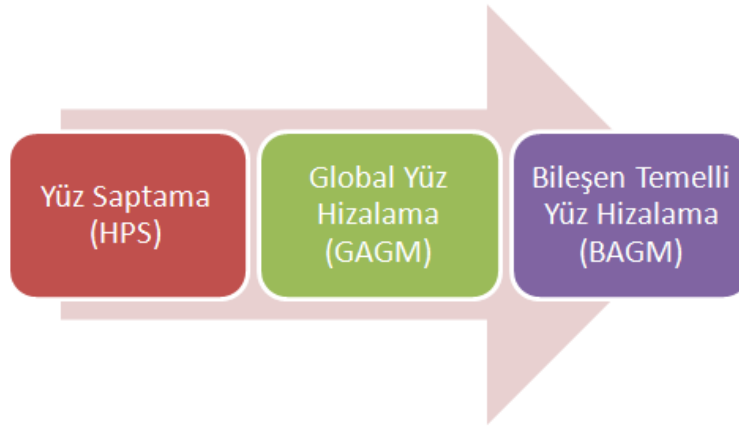
Tek bantlı gösterimle *AGM* modelleme yapılabilir. Renkli görüntüler için ise çok bantlı modelleme gerekmektedir. Çok bantlı modellemede genellikle kırmızı, yeşil ve mavi kanallardaki bilgi modellenmeye çalışılmaktadır. *RGB* kanallarındaki bilgiler yerine tek bir gri seviye değerinin kullanılmasının modelleme yeteneğini azalttığı bilinmektedir. Çok bantlı modelleme ilk olarak Edwards’ın [43] çalışmasında önerilmiş ve daha sonra Stegmann [108] çok bantlı yeni bir gösterimi *AGM* ile yüz hizalamada kullanmıştır. Çok bantlı modellemede her banttan örneklemeler yapılarak oluşturulan doku bilgileri ardarda eklenir. Arda arda eklenerek elde edilen doku vektörüne aynen tek bantlı gösterimdeki gibi temel bileşen analizi uygulanarak dokunun değişimi modellenmiş olur. Bundan sonraki aşamalar *AGM* için aynıdır.

5.1.3 Deneysel çalışmalar

Çok bantlı *HHG* gösteriminin yüz hizalamadaki başarımını test etmek için literatürde benzer bir gösterimin [108] test edildiği *IMM* veri kümesi [107] kullanılmıştır. Bu veri kümesinin kullanılması sayesinde önerdiğimiz yöntemin literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırılması sağlanmıştır. Kullandığımız *IMM* veri kümesinde 74 adet 640×480 çözünürlüğünde renkli görüntüler içermektedir. Tüm görüntüler tam karşıdan çekilmiş, gözlüksüz, nötr yüz ifadesine sahip yüzlerden oluşmaktadır. Görüntülerin ilk 37 adeti tam karşıdan aydınlatılmış, diğer 37 adet resim ise

soldan aydınlatılmıştır. Karşıdan aydınlatılmış olan 37 tanesi *AGM*'nin eğitimi için kullanılmış, soldan aydınlatılmış görüntüler ise test amaçlı kullanılmıştır.

Işık, poz ve ölçek değişimlerine karşı oldukça gürbüz bir yöntem olan Haar Peşpeşe Sınıflandırıcılar tezimiz kapsamında hem yüz sezimi hem de aktif görünüm modelin ilklendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. *AGM* bilindiği gibi yerel minimum noktaları kolaylıkla aşamayan bir yöntemdir. Bu yüzden modelin başlangıç koşulları oldukça önemlidir. *AGM* arama işlemi için Tavlama (Simulated Annealing) gibi global minimumu bulmaya yönelik bazı yöntemler önerilmiştir. Fakat gerçek zamanlı uygulamalar için bu tür yöntemler çok maliyetlidir ve bu nedenle fazlaca kullanılmamaktadır. Bunun yerine bu çalışmada da kullanıldığı gibi başka bir yüz saptayıcı yardımı ile *AGM* arama bölgesi sınırlandırılmış ve optimum noktaya mümkün olan en yakın noktadan başlamaya çalışılmıştır. Bu yaklaşım düşük maliyeti ile öne çıkmaktadır. *HPS* yüz sezimi algoritması literatürdeki en başarılı yüz sezimi algoritması olmasına rağmen yüzün yerini kabaca verebilmektedir. *AGM* ile *HPS*'nin sınırladığı alanda akıllı arama yöntemleri kullanılarak optimum çözüme ulaşılmaktadır. Deneysel çalışmalar sonucunda yüz nesne sınırlarının ışık değişimlerine karşı daha az hassas olduğu görülmüştür. Işık değişimlerine karşı daha az duyarlı olan Hue bandı ile ayırıt seçimine dayalı tepe gösterimi çok bantlı bir gösterim ile bir araya getirildiğinde *AGM* yüz hizalama başarımı artmıştır. Yüz hizalama başarımı nokta-nokta (*pt.pt.*) ve nokta-eğri (*pt.crv.*) olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.2'de *RGB* renk uzayındaki giriş görüntülerini kullanan klasik *AGM* ile önerilen üç bantlı gösterim olan *HHG*'yi kullanan *AGM*'nin yüz hizalama sonuçları sergilenmektedir. Karşılaştırmalı sonuçlar Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çizelgeden görüleceği gibi önerdiğimiz yöntem (*HHG*) hem orjinal *AGM* hem de Stegmann'ın önerdiği çok bantlı gösterime [108] göre daha başarılı olmuştur. Stegmann'ın önerdiği VHE gösterimi orijinal *AGM*'ye göre *pt.-pt.* olarak %7'lik bir iyileşme sağlarken, önerdiğimiz yöntem %19'luk bir iyileşme elde etmiştir. Aynı şekilde *pt.-crv.* olarak VHE %6'lık bir iyileşme sağlarken, önerilen yöntemle %26'lık bir iyileşme elde edilmiştir. Bu çalışmada yüz hizalama problemi için yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem literatürdeki benzer yöntemlerle aynı veri kümeleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Genelleştirilmiş ayırıt saptayıcının [109] belirlediği ayırıtlar karışıklık, eğrilik ve uzunluk kriterlerine göre sıralanmış ve doku bilgisinden kaynaklanan



Şekil 5.3. Üç aşamalı yüz hizalama sisteminin modülleri ve her modülde kullanılan gösterimler.

Çizelge 5.1. AGM'nin üç ayrı gösterim için elde edilen yüz hizalama sonuçları.

	Ort. Hata (Nokta-Nokta)	Ort. Hata (Nokta-Egri)
RGB	2.84 + 0.78	1.35 + 0.49
Tepe	2.63 + 0.64	1.27 + 0.40
HHG	2.28 + 0.10	1.00 + 0.03

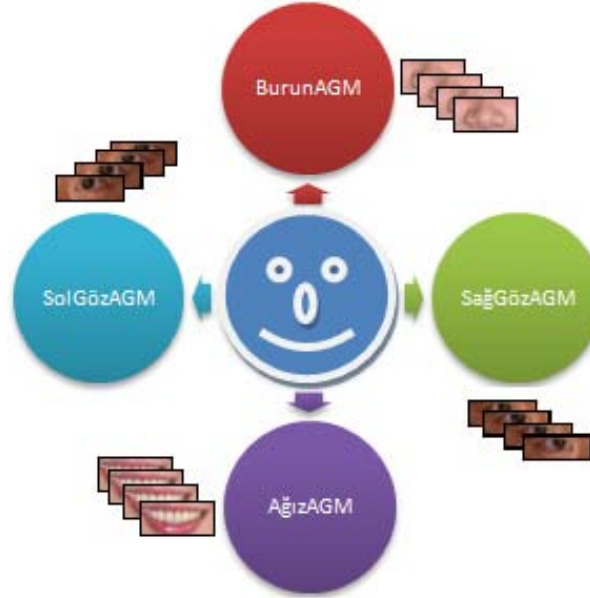
yalancı çevritler silinerek yüz şekil bilgisine en yakın çevritler elde edilmiştir. Elde edilen çevritlerin üzerine ışık değişimlerinden daha az etkilenen tepe görüntüsü zar (membrane) yardımı ile oluşturulmuştur. Tepe görüntüsü, ışığa daha az duyarlı olan Hue bandı ve gri seviye değeri bir araya getirilerek üç bantlı *HHG* gösterimi önerilmiş ve bu gösterim *AGM*'nin üç bantta modellenmesi ile yüz hizalamada kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre önerdiğimiz ilklendirme ve üç bantlı gösterimin yüz hizalama için oldukça başarılı olduğu görülmüştür.

5.2 Üç Aşamalı Yüz Hizalama Yöntemi

Bu bölümde ışıktan bağımsız üç aşamalı yeni bir yüz hizalama yöntemi tanıtılmaktadır. Yüz hizalama yöntemimizin birinci aşamasında yüz saptama yapılmaktadır. Bu aşamada Haar Peşpeşe Sınıflandırıcılar (*HPS*) yardımı ile yüzün yeri kabaca saptanmaktadır. İkinci aşamada ise global aktif görünüm modeli (*GAGM*) kullanılarak yüze ait önemli noktalar saptanır. *GAGM*'nin ilklendirilmesi hizalama sonucunu doğrudan etkilemektedir. *GAGM*'nin gerçek yüz öznelik noktalarına yakınsayabilmesi için optimum noktaya oldukça yakın bir yerden *GAGM*'nin ilklendirilmiş olması gerekmektedir. Önerdiğimiz yöntemin ikinci aşamasında

HPS'nin belirlediği yüzü içine alan kutunun ağırlık merkezi iklendirme de kullanılmıştır.

Son aşamada ise bileşen temeli aktif görünüm modeli (*BAGM*) kullanılarak hassas hizalama yapılmaktadır. Yüz hizalamada başarı ile kullanılan *AGM* ile yüz tanıma literatüründe yüksek tanıma başarımları raporlanmış olan bileşen temelli yöntemler bu çalışmada bir araya getirilmiştir. Yüz hizalamanın en önemli zorluklarından biri ışık değişimleridir. RGB değerleri kullanılarak eğitilen klasik *AGM*'de, eğitim kümesinde modellenen doku bilgisi ile aynı özelliklere sahip doku bölgeleri arandığı için farklı aydınlatma koşullarına sahip görüntülerde hatalı sonuçlar vermektedir. Bu ise klasik *AGM*'nin aydınlanmadan kaynaklanan gri seviye değişimlerinden etkilendiğini göstermektedir. Bu çalışmada ışığa karşı gürbüz bir yüz hizalama yöntemi geliştirebilmek amacıyla RGB değerlerini kullanmak yerine, yüz ayrıtlarına dayalı yeni gösterimler kullanılmıştır. Ayrıtların saptanması, yüze özel çevritlerin bulunması, yüz dokusu ve yüz nesne sınırlarından kaynaklanan ayrıtların seçiminde kullanılan yöntemler bir önceki bölümde anlatılmıştı.



Şekil 5.4. Üç aşamalı yüz hizalama sisteminin modülleri .

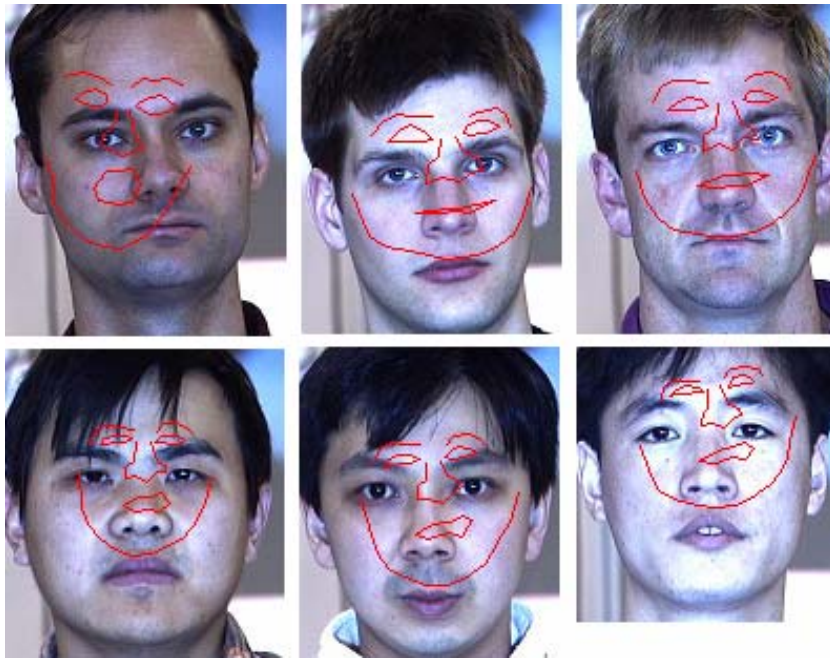
Doğrudan gri seviye değerlerinin yüz hizalama probleminin çözümünde kullanılması farklı aydınlatma koşullarında benek değerlerinde meydana gelen değişimler nedeniyle iyi sonuçlar vermemektedir. Bu problemin çözümü için tepe görüntüleri gibi ışık değişimlerine karşı gürbüz bir gösterimle beraber, ışık değişimlerine karşı daha az

hassas olan renk uzaylarının birlikte kullanımının başarımı arttıracığı bir önceki bölümde deneysel sonuçlarla gösterilmişti. Ayrıca Aktif Görünüm Modelini tek bantta çalıştırmak yerine farklı özniteliklere sahip bantlardaki değişimi modelleyebilen ve bunu tek bir parametre uzayında ifade edebilen bir yöntem kullanılmasının da başarımı arttıracığı gösterilmiştir. Bu amaca yönelik geliştirdiğimiz üç-bantlı HHG (Hue, Hill, Gri) gösterimi üç-aşamalı yüz hizalama yönteminin son aşaması olan hassas hizalama modülünde kullanılmıştır.

Önerilen yöntemin birinci aşaması yüzün yerini kabaca saptayan HPS [103] tabanlı bir yüz saptayıcıdır. İkinci aşamada ise yüzün yerini saptayan birinci aşamanın belirlediği yüz konaç bilgilerini kullanarak ilklendirilmiş global aktif görünüm modeli (*GAGM*) bulunmaktadır. *GAGM* ile yüze ait önemli noktalar belirli bir hassasiyetle saptanır. Bu aşamada ışıktan bağımsız bir çözüm için tepe görüntüleri kullanılmaktadır. Son aşamada ise hassas hizalama yapabilmek için *GAGM*'nin yakınsadığı yüz önemli noktalarına ait konaç bilgileri kullanılarak ilklendirilmiş bileşen temelli aktif görünüm modelleri ile arama yapılmaktadır. Bu amaçla sağGözAGM, solGözAGM, burunAGM, ağızAGM oluşturulmuş ve her bileşenin birbirinden bağımsız olarak arama ve hassas hizalama yapabilmesi amaçlanmıştır.

5.3 Birinci Aşama: Yüz Saptama

Giriş görüntüsü üzerinde insan yüzü aday bölgelerinin yerinin saptanmasında ölçek değişimlerine karşı gürbüz bir yöntem olan ve Haar özniteliklerini kullanan Haar Peşpeşe Sınıflayıcılar (HPS) kullanılmıştır. İnsan yüzü yer saptama modülü üzerine yapılan testlerde sistemin gürültü, bulanıklık, düşük karışıklık gibi durumlarda bile başarı ile çalıştığı gözlenmiştir. Basit yapılı bu sınıflandırıcılar, herhangi bir sınıflandırıcı katmanı geri çevrime vermediği sürece tüm katmanlar geçilene kadar giriş resmine ardarda uygulanır. Yapı içerisindeki her sınıflandırıcı katmanı öznitelik uzayında farklı bir bölgeyi taramaktadır. Burada kullanılan basit sınıflandırıcılar en az iki yapraklı karar ağaçlarıdır. Haar öznitelikleri bu sınıflandırıcılara giriş olarak verilir. Bu çalışmada yüze ait önemli noktaların saptanması için *AGM* kullanılmıştır. *AGM* için ilklendirme çok önemlidir. Hatalı ilklendirme *AGM* başarısını kötü yönde etkilemektedir. Bu çalışmada HPS'nin belirlediği yüzü içine alan kutunun genişliği



Şekil 5.5. Aşırı ışık değişimleri için klasik *GAGM*'nin ürettiği sonuçlar.

ve konaç bilgileri kullanılarak iklendirme problemi aşılmaya çalışılmıştır. İklendirme aşamasında *HPS*'nin kullanımı ile yüz bileşenleri daha hızlı bir şekilde saptanmaktadır.

5.4 İkinci Aşama: *GAGM* Tabanlı Yüz Hizalama

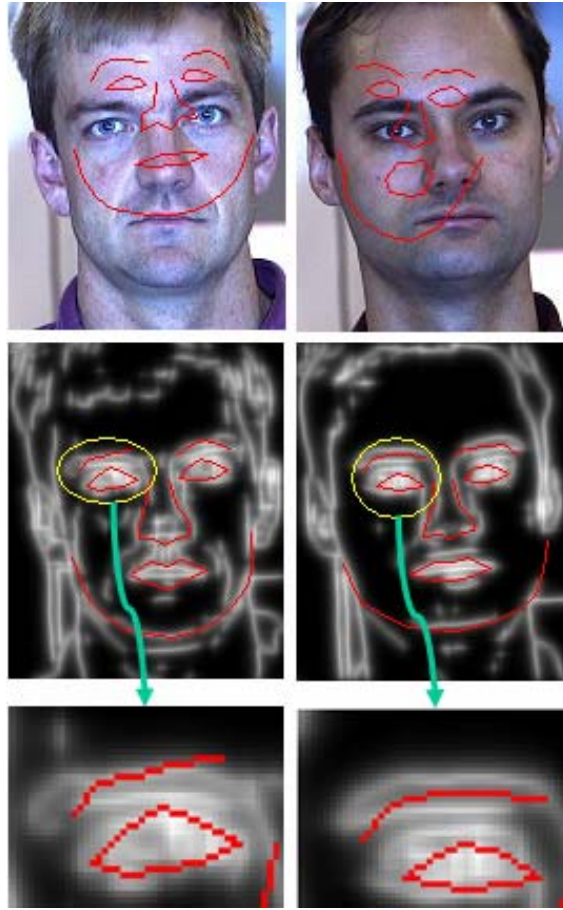
İnsan yüzü tanımda yüksek başarımlar elde edebilmek için giriş görüntülerinin hizalanması gerekmektedir. Bu yüzden son yıllarda tüm araştırmalar bu yöne doğru kaymıştır. Önerilen çözümler genellikle model tabanlı yaklaşımlardan oluşmaktadır. Model tabanlı bu yöntemler arasında insan yüzü hizalama işleminde en başarılı sonucu aktif görünüm modeli vermektedir. Yöntem, şekil ve örüntü arasında kurduğu model sayesinde hızlı ve gürbüz bir şekilde bozulabilir resim eşlemesi yapabilmektedir. İkinci aşamada insan yüzüne ait önemli noktaların çıkartılması ve insan yüzüne ait modelin kurulması aşamasında *GAGM* yöntemi kullanılmıştır. *GAGM*, eğitim kümesindeki görüntü ve şekil bilgisi kullanılarak eğitilir ve *AGM* modeli oluşturulur.

5.5 Tepe Görüntüsü Temelli Global *AGM*

Klasik Global *AGM*'de giriş görüntüsü olarak RGB değerleri kullanılmaktadır. Çalışmamızda RGB değerleri yerine önerdiğimiz tepe görüntüleri kullanılmıştır. Tepe görüntülerini kullanma nedenimiz *GAGM*'yi ışık değişimlerine karşı daha gürbüz bir



Şekil 5.6. Aşırı ışık değişimleri için Tepe değerleri kullanan GAGM'nin ürettiği sonuçlar.



Şekil 5.7. RGB değerleri kullanılarak elde edilen GAGM hizalama sonuçları.

hale getirmektedir. Tepe görüntülerinin kullanımı *GAGM*'nin ışık değişimlerinin olduğu görüntülerdeki hatalı yakınsama problemini çözmüştür.

Tepe görüntüleri ile *GAGM*'nin yerel minimumlara takılmasını önlemektedir. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'de önerilen *GAGM* ile klasik *GAGM* 'nin sonuçları gösterilmiştir. Özellikle eğitim ve test kümesindeki görüntülerde aşırı ışık değişimlerinin olduğu *CMU* [110] yüz veri kümesi için klasik *GAGM*'nin oldukça kötü sonuçlar ürettiği Şekil 5.5 'de gösterilmektedir. Aynı veri kümesinde doğrusal olmayan çevrit seçimine dayalı tepe görüntülerinin kullanımı daha kabul edilebilir sonuçlar üretmiştir.

Şekil 5.7'de ise klasik *GAGM* ve Tepe görüntüleri kullanarak elde edilen hizalama sonuçları gösterilmektedir. Dikkat edilirse önerilen yöntem yakınsama problemini aşabilmiştir. Fakat Şekil 5.7'in en alt satırında tepe görüntüleri ile elde edilen sonuçlara daha yakından bakıldığında hala belirli bir hizalama hatasının olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise global *AGM*'nin global hatayı düşürebilecek bozulmaları yapabilirken daha hassas yerel düzeltmeleri gerçekleyememesidir. Global *AGM* arama uzayında tepe görüntüleri kullanılarak elde edilen sonuçların arama uzayındaki global minimuma çok yakın bir yer olduğu söylenebilir. Fakat bu uzay, alt uzaylara bölünüp, her alt uzayda ayrı ayrı arama yapılırsa hizalamanın hem daha hassas hem de daha esnek olacağı ön görülmüştür. Problemi alt uzaylara bölebilmek için arama yapılacak her alt uzaya mümkün olan en yakın noktadan başlatılabilecek bir ön aşama olarak sadece tepe görüntülerinin kullanımı yeterli olacaktır.

5.6 Üçüncü Aşama: Bileşen Temelli AGM (BAGM) ile Yüz Hizalama

Önerdiğimiz üç aşamalı yapının en son aşamasında hassas hizalama yapılmaktadır. Hassas hizalama için Global *AGM*'nin sorunlarından biri olan, hatanın tüm görüntüye yayılmasından kaynaklanan, yeterince esnek olamama problemi, bileşen temelli *AGM*'ler oluşturularak aşılmaktadır. Bu çalışma ile bileşen temelli yöntemlerle Aktif Görünüm Modeli bir araya getirilerek özgün bir yüz hizalama yöntemi geliştirilmiştir. Işık değişimleri ve örtme (occlusion) durumlarında bileşen temelli yüz tanıma ve saptama yöntemlerin global yaklaşımlara göre çok daha iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir [16] [111] [112]. Örnek olarak ışık ve poz değişimlerinde tüm yüzde meydana gelen gri seviye değişimleri yüze ait bileşenlerdeki değişimlerle

karşılaştırılamayacak kadar büyüktür. Bu durumun sebeplerinden biri de yüzün üç boyutlu yapısıdır.

Tezde yüz hizalama probleminin çözümü için Bileşen Temelli Aktif Görünüm Modeli (BAGM) önerilmektedir. Bu yöntemde yüz ana bileşenleri olan sağ/sol göz, burun, ağız bölgeleri olmak üzere dört bileşene ayrılmıştır. BAGM'nin başarılı bir şekilde çalışabilmesi için modelin mümkün olan en yakın noktadan başlatılması gereklidir. Bu şart doğru yakınsamanın gerçekleşmesi için global *AGM*'de de geçerlidir [113].



Şekil 5.8. SolGözAGM için ilk konum ve yakınsama sonuçları: Üst) solGözAGM'nin ilklendirilmesi, Alt)12 çevrim sonucu elde edilen sonuçlar.

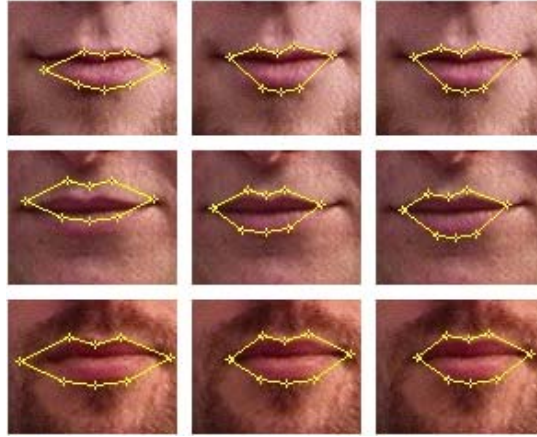
BAGM'yi ilklendirmede yöntemimizin ikinci aşamasında yüzün önemli noktalarını kabaca bulmak için kullandığımız *GAGM*'nin yakınsadığı noktalar giriş olarak kullanılmaktadır. *GAGM* arama işlemi sonlandığında, bileşen temelli *AGM* arama işlemi başlatılmaktadır. Üç aşamalı yapı sayesinde sonraki her modülün en optimum noktalardan ilklendirilmesi garanti altına alınmaktadır. Bu ise yüz hizalama başarımını arttıran bir faktördür.

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da önerdiğimiz *BAGM*'nin RGB değerleri için ürettiği sonuçlar gösterilmektedir. Bu şekillerde tüm ilklendirme bilgisi bir önceki modül olan Tepe görüntüsü temelli *GAGM*'lerden elde edilmiştir. Aynı eğitim ve test kümesinde *GAGM*'nin ürettiği sonuçlar bir önceki bölümde de gösterildiği gibi optimum noktalardan uzaktır. Fakat aynı görüntüler için doğrudan RGB değerleri kullanılmasına rağmen Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da da gösterildiği gibi sonuçlar oldukça başarılıdır.

Önerdiğimiz *BAGM*'nin ışıktan bağımsız ve daha zengin öznitelikler kullanıldığında daha başarılı sonuçlar vereceği açıktır. Bu amaçla bir önceki bölümde tanıttığımız çok bantlı modelleme ve çok bantlı gösterimler yöntemimizin son aşamasında kullanılması yerinde olacaktır. Bir önceki çalışmamızda üç bantlı gösterimlerin tek bantlı modellemeye göre çok daha maliyetli olması ve işlem zamanının uzaması gibi olumsuz yönleri *BAGM* ile ortadan kalkmaktadır. Çünkü bileşen temelli *AGM*'de yüz oldukça küçük bölgelere ayrılmakta ve bu bölgelerin ayrı ayrı modellenmesi tüm yüz görüntüsüne kıyasla çok daha az maliyetli olmaktadır.

5.7 Deneysel Sonuçlar

Deneysel çalışmalarda, *IMM* [104] [107] ve *PIE* [110] yüz veri kümeleri kullanılmıştır. *IMM* veri kümesinde yer alan ve literatürde yüz hizalama amaçlı kullanılan 74 adet yüz görüntüsünün tamamı deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Ayrıca ışık değişimlerine karşı önerilen yöntemin davranışını görmek amacıyla *PIE* veri kümesinde aşırı ışık değişimlerinin olduğu 60 adet görüntü seçilmiştir. *IMM* veri kümesinde 37 adet karşıdan çekilmiş yüz görüntüsü eğitim amaçlı, sağdan aydınlatılmış geriye kalan 37 görüntü ise test amaçlı kullanılmıştır. *PIE* veri kümesinden flaş (spot light) kullanılmadan çekilmiş 30 adet görüntü eğitim amaçlı, aynı kişilere ait 30 flaş kullanılarak çekilmiş görüntü ise test amaçlı kullanılmıştır.

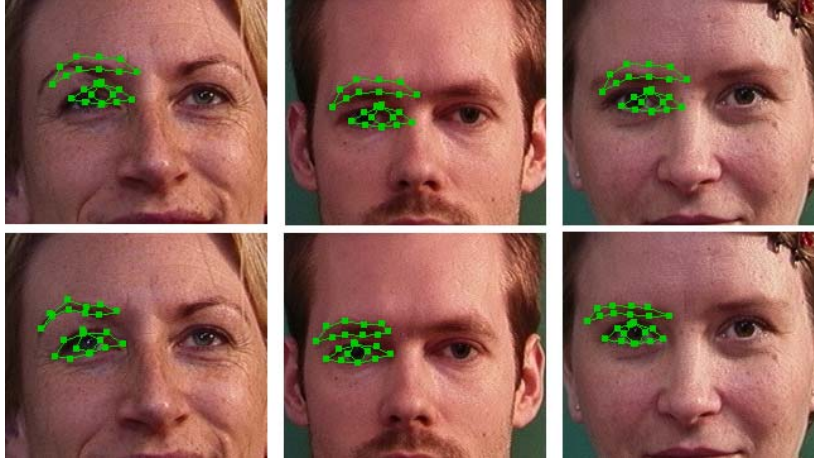


Şekil 5.9. AğızAGM için ilk konum ve yakınsama sonuçları: Üst) ağızAGM'nin ilklendirilmesi, Alt) 12 çevrim sonucu elde edilen sonuçlar.

Standart *IMM* veri kümesindeki 58 adet yüze ait önemli nokta yerine 74 adet noktadan oluşan daha detaylı yüz şekil bilgisi el yordamı ile işaretlenmiştir. İşaretleme işlemi

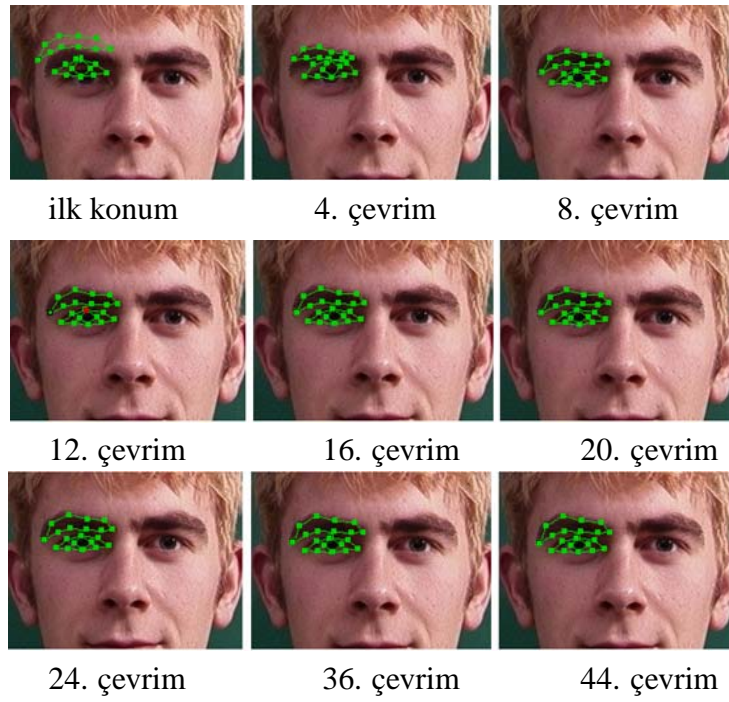
için toplam 9916×2 koordinat bilgisi saptanıp el yordamı ile işaretlenmiştir. 74 adet yüze ait önemli noktanın yüz bileşenlerine göre dağılımı şu şekildedir: 8 nokta ağız, 11 nokta burun, 22 nokta sağ göz, 22 nokta sol göz ve 11 nokta ise çene yayı . Üç aşamalı yüz saptama yöntemimizin ilk modülü olan HPS ile yüz saptama yüz konum bilgisini kabaca verebilmektedir. İkinci modül olan *GAGM*, HPS'nin belirlediği yüz bölgesinde arama yapmaktadır. Böylelikle, en iyileme yöntemi çözüme yakın bir noktadan başladığı için, daha hızlı bir yakınsama sağlanmaktadır ve yerel minimum noktalarına yakalanmadan daha gürbüz sonuçlar elde edilebilmektedir.

Standart *GAGM* eğitim kümesindeki görüntülere benzer test resimlerinde oldukça başarılı sonuçlar verirken, eğitim kümesindeki görüntülerden farklı olan test görüntüleri için çok hatalı sonuçlar üretebilmektedir. Bu durumun en önemli etkenlerinden biri de *GAGM*'nin Temel Bileşen Analizi (TBA) tabanlı bir yöntem olmasıdır. Doğrusal bir yöntem olan TBA ile doğrusal olmayan ışık değişimleri tam olarak modellenememektedir. Bir önceki bölümde belirttiğimiz gibi ayırıt seçimine dayalı tepe gösterimi *GAGM*'yi ışık değişimlerine karşı daha bağışık hale getirmektedir.



Şekil 5.10. Bileşen temelli aktif görünüm modeli (solGözAGM) ile arama işlemi ve çevrimlere göre yakınsama sonuçları .

Yüz hizalamada sadece RGB değerleri kullanıldığında Şekil 5.12'de (üst satır) görüldüğü gibi *GAGM*, eğitim kümesindeki dokuya daha yakın olan bölgeye doğru kaymaktadır. Bunun nedeni *GAGM*'nin RGB değerleri kullanıldığında ışık değişimlerini tam olarak modelleyememesidir. Yüzdeki fiziksel ayrıtlara karşılık gelen yüz bileşenlerine ait nesne sınırlarının üzerine kurulan Tepe görüntüleri ve bunun

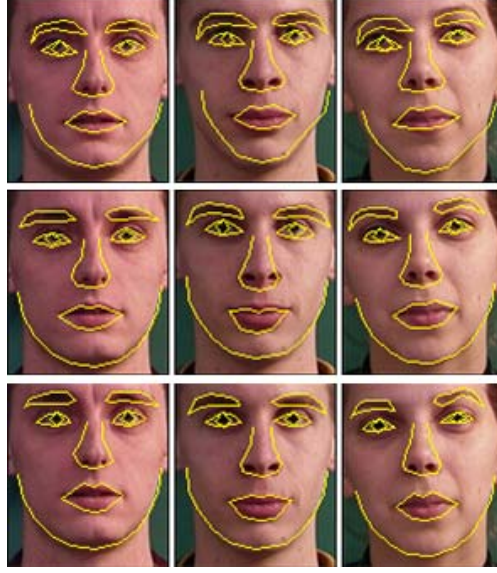


Şekil 5.11. BAGM (solGözAGM) ile arama işlemi ve çevrimlere göre yakınsama sonuçları .

zenginleştirilmiş bir versiyonu olan üç-bantlı HHG ile üç-aşamalı yüz hizalamada oldukça başarılı sonuçlar alınmıştır. Önerdiğimiz üç-aşamalı yöntemdeki her modül kendinden sonraki modülün kullanacağı ilk değerleri üretmektedir.

Şekil 5.13'de eğitim kümesindeki görüntülerden çok farklı test görüntüleri için karşılaştırmalı sonuçlar gösterilmektedir. En üst satırdaki sonuçlara dikkat edilirse standart *GAGM*'nin rastgele sonuçlar üretmektedir. Orta satırda aynı test görüntülerinde Tepe görüntüleri kullanan *GAGM*'nin ise kabul edilebilir sonuçlar ürettiği görülmektedir. Tepe görüntülerinin kullanımı ile *GAGM*'nin yakınsama probleminin çözüldüğü fakat sonuçlar dikkatle incelendiğinde hala noktaların olması gereken ideal konumlardan uzak olduğu görülecektir. En son aşamada hassas hizalama için sadece tepe görüntülerinin kullanılması beklenenin aksine başarıyı azaltmıştır. Bu yüzden tek bantlı tepe görüntüsüne göre çok daha maliyetli olan üç-bantlı modelleme, bileşen temelli yöntemin son aşamada kullanılmıştır. Yüze ait gözler, burun ve ağız gibi bileşenlerin bütün yüze oranla oldukça küçük olması üç bant modellemenin daha az maliyetle yapılmasını sağlamıştır. Önceki bölümde detaylı olarak anlattığımız HHG [114] gösterimi hem ışık değişimlerine karşı gürbüz hem de dokuya ait ten rengi gibi detayları koruyan bir gösterimdir. Bu gösterimde Hue, Tepe, Gri olmak

üzere üç bant bulunmaktadır. Literatürdeki daha önceki çalışmalardan *HSV* renk uzayındaki Hue'nun ışık değişimlerinden fazlaca etkilenmediğini biliyoruz. Ortam aydınlatmasının aşırı değişimi yüz görüntüsündeki ten renginde aşırı değişimlere sebep olmaktadır. Bu bozulma renk bilgisini kullanan bir çok yüz saptama algoritmasında *HSV* renk uzayına geçilerek azaltılmaya çalışılmıştır. Bu yüzden bizim üç bantlı gösterim oluşturulurken Hue değerlerinden de faydalanılmıştır. Çizelge 5.2 ve .5.3'den



Şekil 5.12. Normal ışık değişimlerine karşı yüz hizalama sonuçlarının karşılaştırılması: Üst) RGB-GAGM, Orta) Tepe-GAGM (ikinci aşama), Alt) HHG-BAGM.

görülebileceği gibi üç bantlı gösterimin kullanımı hem Global hem de Bileşen Temelli *AGM*'de başarıyı arttırmıştır. Özellikle *BAGM*'de *HHG*'nin kullanımı sadece *RGB* veya sadece Tepe kullanılması durumlarından daha iyi sonuçlar vermiştir. Yaptığımız deneylerde bileşen temelli *AGM* için detaylı doku bilgisine ve detaylı işaretlemeye ihtiyaç olduğu görülmüştür. Örnek olarak gözlerde detaylı işaretleme yapılması her iki gözde de oldukça iyi sonuçlar almamızı sağlamıştır. Fakat burun gibi bileşenler işaretlenirken bazı zorluklarla karşılaşmıştır. Burun üç boyutlu özgün yapısı gereği ışık değişimlerinde gölge oluşumuna sebep olan bir yüz bileşenidir. Ayrıca nesne sınırları da kesin olarak belirlenememektedir. Bu yüzden bileşen temelli *AGM*'de burunAGM bazı durumlarda hatalı noktalara yakınsamıştır.

Önerilen üç-aşamalı yüz hizalama yönteminin saptadığı yüze ait önemli noktalarının doğruluğu, her yüz için el yordamıyla belirlenmiş 74 nokta ile *GAGM* ve *BAGM* yöntemleri ile saptanan noktalar arasında hesaplanan benek uzaklığı ($pt - pt$) hataları

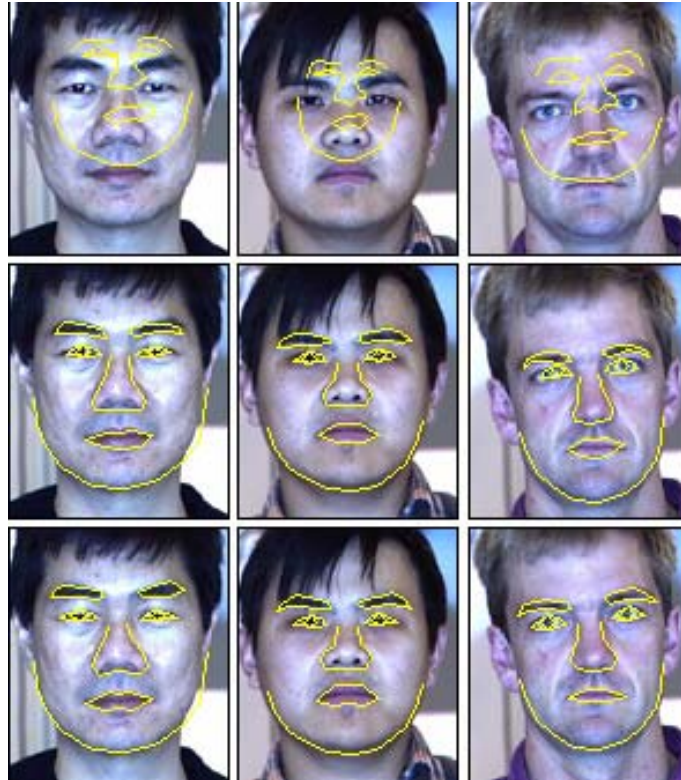
Çizelge 5.2. İkinci aşamada kullanılan GAGM'nin üç ayrı gösterim için *PIE* ve *IMM* yüz veri kümesinde elde edilen yüz hizalama sonuçları.

	<i>IMM</i> (640 × 480)	<i>PIE</i> (640 × 480)
RGB	6.37 + 1.35	38.67 + 2.04
Tepe	6.09 + 0.31	6.35 + 0.39
(Onerilen)HHG	4.82 + 0.23	5.95 + 0.27

Çizelge 5.3. Üçüncü aşamada kullanılan BAGM'nin üç ayrı gösterim için *PIE* ve *IMM* yüz veri kümesinde elde edilen yüz hizalama sonuçları.

	<i>IMM</i> (640 × 480)	<i>PIE</i> (640 × 480)
RGB	4.64 + 0.10	21.70 + 1.98
Tepe	5.30 + 0.17	6.11 + 0.27
HHG	3.59 + 0.09	5.23 + 0.19

ile gösterilmiştir. Bu sonuçlar karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'de verilmiştir. Çizelgeler incelendiğinde önerdiğimiz ışıktan bağımsız tepe ve HHG gösterimlerinin başarımı arttırdığı görülecektir. Ayrıca bu çalışmamızda önerdiğimiz özgün BAGM'nin yüz hizalamayı çok daha esnek hale getirebilme potansiyeli olduğu çizelgeler incelendiğinde görülecektir.



Şekil 5.13. Aşırı ışık değişimlerinde hizalama sonuçlarının karşılaştırılması: Üst) Klasik GAGM, Orta) Tepe GAGM, Alt) BAGM

5.8 Sonuç ve Tartışma

Deneysel çalışmalardaki sonuçlar incelendiğinde *BAGM* ve üç-aşamalı yüz hizalama yönteminin çok daha hassas yüz hizalama sonuçları verdiği görülecektir. Ayrıca önerdiğimiz yeni gösterimler *AGM*'nin aşırı ışık değişimlerinde kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar vermesini sağlamıştır. Yaptığımız deneyler önerdiğimiz üç aşamalı yüz hizalama sisteminin hem kötü ilklendirmeye hem de ışık değişimlerine karşı gürbüz olduğunu göstermiştir. Ayrıca *BAGM*'nin yeterli ve kesin sayıda işaretleme yapıldığında *GAGM*'ye göre çok daha iyi sonuçlar verebileceği gösterilmiştir.

6. AYDINLATMAYA KARŞI GÜRBÜZ YÜZ MODELLEME

6.1 Yüzdeki Işık Değişimleri için Özelleşmiş Normalizasyon Yöntemleri

Birçok yüz tanıma senaryosunda kişinin genelde sadece bir adet fotoğrafı kullanılmaktadır. Bu fotoğrafın da mümkün olduğunca tam karşıdan çekilmiş ve ideale yakın bir şekilde aydınlatılmış olması tercih edilmektedir. Bunun yanında yüz tanıma sistemlerinin, ideal olmayan ortamlarda da iyi sonuç üretmesi beklenir. Özellikle bizim ilgi alanımız olan ışık değişiminin tanıma başarımı üzerinde etkisi büyüktür. Bu etkiyi en aza indirmek için yüz tanıma sistemlerinde ışığın bozucu etkisini onaracak bazı yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Yüzün sanal olarak tekrar aydınlatılması ve aydınlatmanın tam benzeşiminin yapılabilmesi için yüze ait yüzey normalleri ve yüz doku modeli gibi verilerin elde edilmesi gerekir. Fakat bunlar gerçek zamanlı uygulamalar için oldukça karmaşık ve maliyetli hesaplamalar ve donanımlar gerektirmektedir. Bunun yerine $2B$ görüntülerde elde edilen eğitim verisinden elde edilen bilgiler kullanarak yüz ışıklandırma normalizasyonu yapan yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde bu bağlamda öne çıkan güncel algoritmalarından biri Ratio-Image (RI) olarak bilinen Dang Hui'nin [36] önerdiği yöntemdir. Aydınlatma ortamı ve ışık kaynağı hakkında yeterli bilgi olmasa bile, RI yöntemi yüzdeki ışıktan kaynaklanan bozulmayı onarabilmektedir. Bu yüzden çalışmamızda ilk olarak literatürde başarılı sonuçları raporlanmış bu yöntem üzerinde durulmuştur.

6.1.1 Oransal görüntü aydınlatma normalizasyon yöntemi

RI yöntemi ilk olarak Shashua [115] ve Tammy [34] tarafından ışıktan bağımsız yöntemler için önerilmiştir. Yüzün Lambertian yüzey olduğu ve yüz dokusunda herhangi bir gölge olmadığı ideal ortam varsayımı altında, farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş resimleri, ideal ortamda çekilmiş resimlere oranlayarak ışık değişimlerinin onarılabileceği gösterilmiştir. Çalışmalarındaki en büyük katkı,

yöntemin oldukça basit ve uygulanabilir olması yanında $2B$ görüntüler kullanan yüz tanıma sistemlerinin ışığa karşı gürbüz hale gelmesine olanak sağlamasıdır.

RI yönteminin daha önceki yöntemlere göre bir çok kazanımı vardır. Örneğin, eğitim aşamasında sadece bir adet ideal koşullarda çekilmiş görüntüye ihtiyaç duyar. Diğer yöntemlerde olduğu gibi aynı nesnenin (yüz) değişik aydınlatma koşullarında çekilmiş görüntüsü gerekmemektedir. Ayrıca aydınlatmadan kaynaklanan bozulmaları onarmak için yüzey normalleri, albedo, ışık kaynağının yönü [32] ve yüzey yansıtma özellikleri gibi elde edilmesi oldukça maliyetli olan bilgilere ihtiyaç duymamaktadır.

RI yönteminin etkin bir şekilde uygulanabilmesi için yüz görüntülerinin önceden hizalanmış olması gerekmektedir. Dang Hui'nin makalesinde [36] deneylerde kullanılan tüm yüzler önceden el yordamı ile hizalanmıştır. Bu makalede yüz görüntülerinin nasıl hizalanacağı hakkında herhangi bir öneride bulunulmamıştır. Yöntem özet olarak hizalama probleminin nasıl yapılacağından çok, hizalanmış görüntülerin başarılı bir şekilde nasıl onarılacağı sorusuna cevap aramaktadır.

RI yönteminde yüz görüntüsü Lambertian modeline uyan bir nesne olarak kabul edilir. Standart Lambert denklemi aşağıda verilmiştir

$$I(x, y) = \alpha(x, y)n(x, y)^T s \quad (6.1)$$

Buradaki $I(x, y)$ görüntünün (x, y) noktalarındaki benek değeri, $\alpha(x, y)$ ise (x, y) noktalarındaki yüzey albedosunu, $n(x, y)$ ise (x, y) noktasındaki yüzey birim vektörünü göstermektedir. Denklemdaki s ise ışık kaynağının yönünü veren sütun vektörüdür. I_{ik} , i . kişinin s_k . ışık kaynağı altında çekilmiş görüntüsü olsun. I_{r0} ise başkaca bir kişinin tam karşıdan aydınlatan ışık kaynağı (s_0) altında çekilen görüntüsü olsun. Ve I_{r0} ilk aşamada referans görüntü olarak kullanıldığını kabul edelim. F ise $\alpha_y = \alpha_x = \alpha$ olacak şekilde bulanıklaştırma amaçlı kullanılan Gauss süzgeci olduğunu kabul edelim. F süzgeci kullanılarak I_{ik} ve I_{r0} görüntülerinin bulanıklaştırılmış versiyonları B_{ik} ve B_{r0} olsun. Öyleyse B_{ik} ve B_{r0} 'ı

$$\begin{aligned} B_{ik} &= F * I_{ik} = F * (a_i n_i^T s_k) = (F * a_i n_i^T) s_k \\ B_{r0} &= F * I_{r0} = F * (a_r n_r^T s_0) = (F * a_r n_r^T) s_0 \end{aligned} \quad (6.2)$$

şeklinde ifade edilebiliriz. Denklem (6.2)'deki $*$ evrişim işlemini ifade etmektedir. Tüm yüz şekillerin birbirine benzer olduğu varsayımı altında, eğer F yeterince büyükse aşağıdaki ifadeyi yazabiliriz.

$$B_{i0} \approx B_{r0} \quad (6.3)$$



Şekil 6.1. Tam hizalanmış yüz için RI normalizasyon sonucu: a) Ortalama yüz, b) giriş görüntüsü, c) RI yüz normalizasyon sonucu.

Bu yaklaşıklık, iki ayrı kişiye ait yüzün aynı ışık altındaki görüntüsü yeterince büyük F gibi bir süzgeç yardımı ile bulanıklaştırıldığında birbirlerine benzeyeceği varsayımına dayanmaktadır. Denklem (6.3)'teki ifadeyi daha açık olarak aşağıda gösterildiği yazabiliriz.

$$F * a_i n_i^T \approx F * a_r n_r^T \quad (6.4)$$

Sonuç olarak denklem (6.2) ve (6.4) kullanılarak, i . kişinin tam karşıdan aydınlatılmış görüntüsü olan H_{i0} 'ı, s_k gibi bir ışık kaynağından (k . yön) aydınlatılmış i . kişinin görüntüsü olan I_{ik} yardımıyla,

$$H_{i0} = a_i n_i^T s_0 \approx a_i n_i^T s_k \frac{(F * a_r n_r^T) s_0}{(F * a_i n_i^T) s_k} = I_{ik} \frac{B_{r0}}{B_{ik}} \quad (6.5)$$

şeklinde hesaplayabiliriz. Şekil 6.1'te tam hizalanmış giriş görüntüsü için RI yöntemi kullanılarak elde ettiğimiz iyileştirme sonucu gösterilmektedir. Şekil 6.2'te ise aşırı ışık değişimi altında çekilmiş görüntüler için RI yönteminin ürettiği sonuçlar gösterilmiştir. H_{i0} , i . kişinin tam karşıdan aydınlatılmış I_{i0} görüntüsünün tahmini veya I_{ik} 'nin onarılmış halidir. Eğitim kümesi içerisinde rastgele herhangi bir yüzü referans yüz olarak seçmek yerine eğitim kümesindeki yüzlerin ortalaması algorithmada referans yüz olarak kullanılmaktadır.

Kullanılan süzgecin boyu çok büyük seçildiğinde yüz görüntüsündeki gölge ve karanlık bölgelerdeki gürültü onarılmış görüntüde görünür hale gelmektedir. Küçük süzgeç boyları kullanıldığında ise onarım için çok daha fazla çevrime ihtiyaç duyulmaktadır. Deneylerimizde süzgeç boyu 11 olarak belirlenmiştir ve tüm deneylerde süzgeç boyutu olarak bu değer kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar ve tartışma bölümünde RI yönteminin sonuçları verilmiştir.

TBA kullanılarak elde edilen ϕ_s yüz öz uzayı, denklem (6.5) kullanılarak elde edilen onarılmış yüz görüntüsünde ortaya çıkan istenmeyen gürültü ve hatalı bölgeleri süzmek amaçlı kullanılmaktadır. Elde edilen ilk onarılmış yüz görüntüsü, yüz uzayına iz düşürülür ve elde edilen katsayılar, öz vektörler ve ortalama yüz kullanılarak yüz görüntüsü geri çatılır.

1. Sadece önden çekilmiş ve önden aydınlatılmış yüzlerden oluşan eğitim veri kümesi kullanılarak ortalama yüz hesaplanır. Ayrıca eğitim kümesindeki yüz görüntülerinden Temel Bileşen Analizi (*TBA*) yardımı ile öz vektörler bulunur.
2. Referans görüntü olarak eğitim kümesinden elde edilen ortalama yüz kullanılır. Denklem (6.5) yardımı ile ilk onarılmış görüntü hesaplanır. Deneylede bulanıklaştırma amaçlı kullanılan Gauss süzgecinin (F) boyu 11 olarak seçilmiştir. Onarılan yüz görüntüsü 1. adımda elde edilen yüz uzayına izdüşürülerek yüz görüntüsü geri çatılmıştır. Onarılan görüntünün yüz uzayına izdüşürülüp, izdüşüm katsayıları ve özvektörler yardımı ile tekrar görüntünün geri çatılması, *TBA*'nın bir çeşit gürültü süzgeci olarak uygulanmasıdır. Geri çatılan görüntü çok daha az gürültülüdür ve *RI* onarımında ortaya çıkan bozulmalar daha azdır.
3. *RI*'nın yinelemeli yordamı kullanılarak en son onarılmış görüntü elde edilir. Yinelemeli yordam sırasında referans görüntü ve giriş görüntüsü Gauss süzgeci yardımıyla bulanıklaştırılır. Ayrıca her yineleme sonunda referans görüntü geri çatılmış görüntüyle güncellenir. Bu sayede her yinelemede görsel olarak iyileştirilmiş onarım sonucu kullanılır. Yinelemeli süreçte yakınsama gerçekleştiğinde ve/veya durma koşulu (hata, maksimum yineleme gibi) sağlanana kadar devam eder.
4. Elde edilen onarılmış yüz görüntüsü yüz hizalama yöntemimizce giriş görüntüsü olarak kullanılır.

RI onarım algoritmasından elde edilen görüntü yeterli kalitede olmamaktadır. Dang Hui çalışmasında, *RI*'nin performansını arttıracak çevrimsel bir yöntem önermiştir. Bu çalışmada çevrimsel *RI* onarımı gerçekleştirilmiş ve ışık değişimlerinden kaynaklanan bozulma bu algoritma kullanılarak onarılmıştır. Şekil 6.2'de aşırı ışık değişimi altında çekilmiş görüntüler için *RI* yönteminin ürettiği sonuçlar gösterilmiştir. *RI* tarafından onarılmış görüntüler dikkatle incelendiğinde özellikle gölge olan bölgelerde yüksek



Şekil 6.2. RI yöntemi kullanılarak elde edilen aydınlatma normalizasyonu sonuçları :Üst) Giriş görüntüleri, Alt) Normalize edilmiş görüntüler.

miktarda bozulma ve gürültü olduğu görülecektir. Ayrıca giriş görüntüsünün büyük oranda değiştirildiği Şekil 6.2'deki sonuçlardan görülecektir. Çevrimsel *RI* onarım algoritması şu şekilde çalışır: Öncelikle yukarıda belirtildiği gibi *RI* ile görüntü ilk olarak onarılır ve onarılmış yüz görüntüsü *TBA* ile kurulan yüz uzayı yardımı ile geri çatılır. Bir sonraki çevrim için referans yüz olarak ortalama yüz yerine elde edilen bu geri çatılmış yüz kullanılır. Çünkü geri çatılmış yüz, ortalama yüze oranla görsel olarak daha iyi ve gürültüden arındırılmış olmaktadır. Bu çevrim algoritma aşağıda adım adım özetlenmiştir:

1. Referans yüz olarak eğitim kümesinden elde edilen ortalama yüz atanır. Süzgeç boyu 11 olan Gauss ile *RI*'ya giriş olarak verilen görüntü bulanıklaştırılır.
2. $t \leq N_{max}$ olmak koşulu ile t . çevrimde yeni veya ilk referans yüz 1. basamakta kullanılan süzgeç ile bulanıklaştırılır.
3. Denklem (6.5) kullanılarak $H_{i0}(t)$ hesaplanır.
4. $H_{i0}(t)$ 'nin geri çatılmış hali olan $H'_{i0}(t)$ hesaplanır. Referans yüz ileriki çevrimlerde kullanılmak üzere $H'_{i0}(t)$ ile güncellenir.
5. $H_{i0}(t - 1)$ arasındaki fark denklem (6.6)'deki gibi hesaplanır;

$$D(t) = \frac{\|H_{i0}(t) - H_{i0}(t-1)\|}{\sqrt{\|H_{i0}(t)\| \cdot \|H_{i0}(t-1)\|}}, t \geq 2 \quad (6.6)$$

Eğer $|D(t) - D(t-1)| < \varepsilon$ veya $t > N_{max}$ koşulu sağlanana kadar çevrim 5. ve 2. basamaklar arasında devam ettirilir, aksi durumlarda çevrim sonlandırılır. Denklem

(6.6)'deki $\|H_{i0}(t)\|$ benek değerlerinin karelerinin toplamının kare kökünü, ε ise pozitif küçük bir sayıdır.

6.1.2 Histogram temelli normalizasyon yöntemleri

Bu bölümde yüz görüntüsündeki aydınlatma farklılığından kaynaklanan bozulmayı onarmak için histogram temelli yöntemler üzerinde durulacaktır. Yüzün üç boyutlu şekli düşünüldüğünde, ışık kaynağının yeri ve ışık kaynağının şiddetine bağlı olarak genellikle yüzün sağ veya sol tarafında karanlık/parlak bölgeler oluşur. Yüksek başarılı modelleme/tanıma/hizalama için, yüzü ideal dokusundan uzaklaştıran karanlık ve parlak bölgelerin normalize edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada global histogram eşitleme (*GHE*) gibi yöntemlerin çözüm üretmediği aşırı ışık değişimleri altındaki yüz görüntülerini başarılı bir şekilde onarmak ve *AGM* arama aşamasına uyarladığımız *Histogram Uydurma* yöntemi tanıtılacaktır. Bilindiği gibi *GHE* düşük karışıklığa sahip görüntüleri görsel olarak çok daha kaliteli hale getirebilmektedir. Giriş görüntüsünün benek değerlerinin histogram dağılımını uniform bir hale getirerek ışıktan kaynaklanan bozucu etkiler ortadan kaldırılabilmektedir [116]. Fakat iyi aydınlatılmış birçok görüntü bile birörnek histogram dağılımında değildir. Bu nedenle *GHE* benzeri yöntemler gerçekçi olmayan aydınlatma sonuçları ve hatta bazı durumlarda giriş görüntüsünden çok daha kötü sonuçlar üretebilmektedir [17]. *GHE* benzeri yöntemlerin kullanımı yerine yüz için özelleşmiş histogram temelli yöntemlerin kullanılması çok daha sağlıklı sonuçlar verecektir. [116]'de tanıtıldığı gibi histogram uydurma yöntemlerinin çok kötü aydınlatma koşullarına sahip yüz görüntüleri için bile oldukça başarılı sonuçlar üreteceği açıktır. Deneysel çalışmalarda da detaylarını verdiğimiz *AGM* hizalama sonuçlarını ışık değişimlerine karşı çok daha gülbüz bir hale getirecek yaklaşımlardan *HU* yöntemi, *AGM* arama aşamasında oldukça başarılı sonuçlar vermiştir.

6.1.3 Histogram uydurma normalizasyon yöntemi

Çalışmamızda farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş yüz görüntülerini, ideal aydınlatma koşullarında çekilmiş yüz görüntülerinin histogramına benzer bir hale getirerek, aydınlatma normalizasyonu sağlamak amacıyla *HU* yöntemi kullanılmıştır. Kullandığımız eğitim kümesi tamamen iyi aydınlatılmış yüz görüntülerinden oluştuğu için, ideal yüz resmi olarak herhangi bir yüzü kullanmak yerine tüm bu yüzlerin

ortalaması kullanılmıştır. Çünkü bu yüzlerden oluşturulacak ortalama yüz hem ideal aydınlatılmış yüze ait histogram bilgilerini taşımakta hem de kişiye özel farklılıklar ve gürültüden arındırılmış olmaktadır. Bu yüzden çalışmamızda tüm yüz görüntülerinin histogramları eğitim kümesinden elde edilen ortalama yüzün histogramına uydurulmaya çalışılmıştır.

HU yöntemi aynı zamanda Histogram Özelleştirme [116] olarak ta adlandırılır ve literatürde sıklıkla kullanılır. Bu bölümde *HU* yöntemi hakkında kısaca bilgi verilecektir. $H(i)$ giriş görüntüsüne ait histogram fonksiyonu ve $G(i)$ ise uydurulmaya çalışılan hedef histogram fonksiyonumuz olsun. Amacımız $f_{H \rightarrow G}(i)$ gibi bir dönüşüm fonksiyonu elde etmektir. Öncelikle $H(i)$ ve $G(i)$ histogramlarını $U(i)$ gibi uniform bir histograma çeviren $f_{H \rightarrow U}(i)$ ve $f_{G \rightarrow U}(i)$ histogram dönüşüm fonksiyonları hesaplanır. Bu işlem çok iyi bilinen histogram eşitleme (*GHE*) olarak adlandırılır.

Asıl amacımız olan $H(i)$ histogramını $G(i)$ histogramına dönüştürme fonksiyonu olan $f_{H \rightarrow G}(i)$ 'yi elde edebilmek için daha önceden hesaplanan $f_{G \rightarrow U}(i)$ gibi bir dönüşüm fonksiyonu elde etmektir. Öncelikle $H(i)$ histogramını $G(i)$ histogramına dönüştürme fonksiyonu olan $f_{H \rightarrow G}(i)$ 'yi elde edebilmek için, daha önceden hesaplanan $f_{G \rightarrow U}(i)$ fonksiyonun ters dönüşümü olan $f_{U \rightarrow G}(i)$ fonksiyonu hesaplanır.

Bu dönüşüm fonksiyonlarının ayrık değerli olmasından dolayı ters dönüşüm hesaplanırken histogram fonksiyonunda karşılığı olmayan tanımsız değerler ortaya çıkacaktır. Bu tanımsızlık problemi basit bir doğrusal ara değerlendirme işlemi ile çözülmeye çalışılmıştır. Bu sayede ters dönüşüm fonksiyonunda tanımlı olmayan noktalar, tanımlı noktalar kullanarak oluşturulan eğri yardımı ile belirlenebilmektedir. Bu çalışmada Thin Plate Spline [117] kullanılarak noktalar arası geçiş sağlanmıştır. $H(i)$ histogramını $G(i)$ 'ye dönüştüren fonksiyon

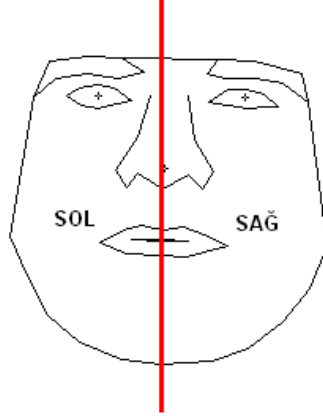
$$f_{H \rightarrow G}(i) = f_{U \rightarrow G}(f_{H \rightarrow U}(i)) \quad (6.7)$$

biçiminde tanımlanır.

6.1.4 Yüz için özelleştirilmiş histogram uydurma (HU) yöntemi

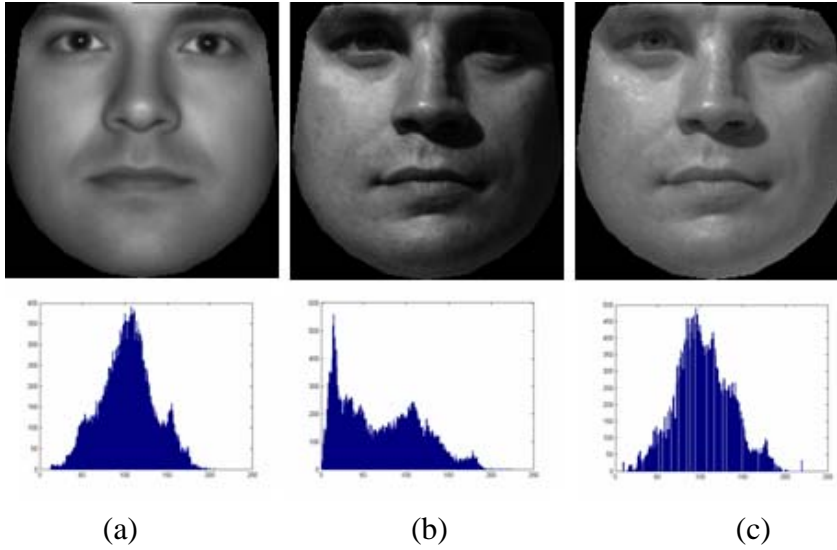
Esas amaçlarımızdan biri, ışık kaynağının konumuna bağlı olarak, yüzün sağ ve sol tarafında oluşan gri seviye farklılıklarını (gölge, parlak bölgeler vb.) onarmak olduğu için *HU* yönteminde etkin olarak kullanılan pencerelerden elde edilen histogramları

çalışmamızda kullandık. Bu amaca yönelik yüz sağ pencere (sağP) ve sol pencere (solP) olmak üzere Şekil 6.3'te gösterildiği gibi iki bölgeye ayrıldı. *HU* yöntemi yüzde oluşturulan **sağP** ve **solP** bölgelerine ayrı ayrı uygulanır. Bu sayede karanlık olan bölge daha aydınlık hale gelirken, ideale göre çok parlak olan bölge ise histogram üzerinde sola doğru kaydırılarak parlaklık oranı azaltılmış olmaktadır.



Şekil 6.3. *HU* yönteminin etkinliğini arttırmak için yüzün iki pencereye ayrılması.

Öncelikle $H_{solP}(i)$ ve $H_{sağP}(i)$ histogramları ve bunların dönüşüm fonksiyonları olan $f_{H_{solP}} \rightarrow G$ ve $f_{H_{sağP}} \rightarrow G$ hesaplanır. $G(i)$ bizim çalışmamızda eğitim kümesinden elde edilen ortalama yüze ait histogramdır.



Şekil 6.4. *HU* yöntemi kullanılarak yüzün normalize edilmesi: a) Ortalama Yüz, b) Giriş görüntüsü, c) *HU* normalizasyon sonuçları. Alt satır görüntülere ait histogramları göstermektedir.

Eğer kullanılan yüz veri tabanında sakal ve bıyık gibi ten rengi bölgelerini kapatan görüntüler bulunuyorsa, yüzü dikey simetri çizgisine göre *sağP* ve *solP* gibi iki

parçaya ayırmak yerine, bıyık ve sakal bölgelerini içermeyecek şekilde daha dar iki bölgede tercih edilebilir. Hizalanmamış görüntüler için önerilen benzer bir çalışma [17] tanıtılmıştır. Bu sayede saç bölgeleri olarak adlandırdığımız bu bölgelerde doğal olmayan onarım sonuçları engellenmiş olacaktır. Bu yöntemde $H_{solP}(i)$ ve $H_{sagP}(i)$ histogramları ve bunlara karşılık gelen $f_{H_{solP}} \rightarrow G$ ve $f_{H_{sagP}} \rightarrow G$ dönüşüm fonksiyonları hesaplanırken kısıtlanmış (kaşlarla burun arası bölge) pencereler kullanılsa da dönüşüm tüm pencereye uygulanmalıdır. Kullandığımız veri tabanında sakallı bireylerin olmaması nedeniyle bu yöntem gerçekleştirilmiş olmasına rağmen deneylerde kullanılmamıştır.

HU yöntemini, *sagP* ve *solP* gibi iki ayrı pencereden elde edilen histogramlar kullanılarak gerçeklemek, iki pencerenin birleşme bölgesinde istenmeyen gri seviye farklılıkları yaratabilmektedir. *sagP* ve *solP* geçiş noktalarındaki istenmeyen blok etkisini ortadan kaldırabilmek için yumuşak geçişleri sağlayacak bir dönüşüm yöntemi uygulanmıştır. [17]'de tanıtılan çalışmada yumuşak geçişlerin sağlanabilmesi için iki pencereden elde edilen dönüşüm fonksiyonlarının belirli bir ağırlıklandırma ile ortalamasının alınmasının iyi sonuçlar verebileceği gösterilmiştir. Bu çalışmada $f_{H_{toplam}} \rightarrow G$ dönüşüm fonksiyonu olarak denklem (6.8)'de ki fonksiyon kullanılmıştır.

$$f_{H_{toplam}} \rightarrow G(i) = solluk \times f_{H_{solP}} \rightarrow G(i) + (1 - solluk) \times f_{H_{sagP}} \rightarrow G(i) \quad (6.8)$$

Denklem (6.8)'de ki *solluk* parametresi 1 ile 0 arasında değerler alabilmektedir. Bunun anlamı $f_{H_{toplam}} \rightarrow G$ dönüşüm fonksiyonu elde edilirken *sagP* ile *solP* üzerinde hareket edilmesidir. Eğer yüzün ilgili beneği *solP* bölgesinin içlerinde kalıyorsa *solluk* parametresinin değeri 1'e çok yakın olacak ve $f_{H_{toplam}} \rightarrow G$ dönüşüm fonksiyonun elde edilmesinde daha baskın olacaktır. *HU* yöntemi ve yukarıda bahsettiğimiz yumuşak geçiş dönüşümü kullanılarak elde edilen onarım sonucu ve görüntülere karşılık gelen histogramlar Şekil 6.4'da gösterilmektedir.

6.2 Aydınlatma Değişimlerine Karşı Gürbüz AGM

Birçok uygulamada olduğu gibi *AGM* ile yapılan yüz modelinde de veri kümesindeki her birey için sadece bir adet ideal koşullarda çekilmiş görüntü eğitim amaçlı kullanılmaktadır. Yüz görüntüsü için ideal aydınlatmadan genellikle tam karşıdan aydınlatılmış, yüzde herhangi gölge veya parlak bölge oluşturmayan aydınlatma kastedilmektedir. Sadece önden aydınlatılmış yüz görüntülerinden oluşturulan

AGM modeli farklı kişilere ait yüz dokusu ve yüz şekil değişimini modellemeye çalışmaktadır. Özellikle yüz dokusu modellenirken diğer tüm değişimlerin etkisi ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır. Bunun için yüz öncelikle referans bir şekle eğilir. Bu sayede ölçekten, ötelemeden ve dönmeden kaynaklanan tüm değişimler sıfırlanabilmektedir. Geriye kalan doku bilgisi, kişiler arası doku farklılığının modellenmesi için kullanılmaktadır. Dikkat edilirse klasik *AGM* yapısında dikkate alınan değişimler ölçek, öteleme ve dönme açılarıdır. Yüz görünümünü bütünüyle değiştirebilen aydınlatma koşulları klasik *AGM*'nin başarımını doğrudan olumsuz olarak etkileyebilmesine rağmen ışık değişimlerini ortadan kaldırmaya yönelik bir normalizasyon *AGM* yapısı içerisinde düşünülmemiştir. Şekil 6.5.a'da normal



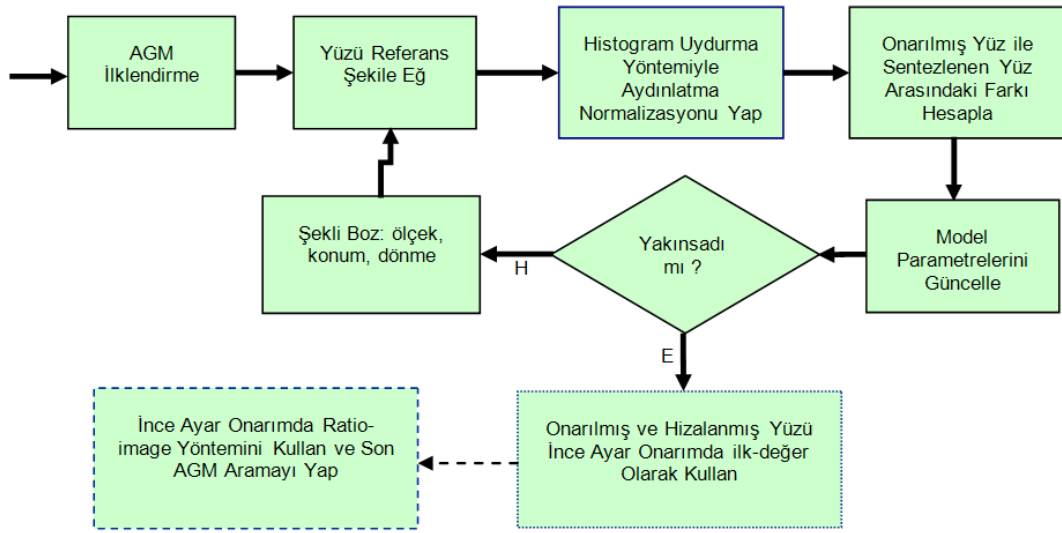
(a)

(b)

Şekil 6.5. Klasik *AGM* yüz hizalama: a) Normal ışıklandırma, (b) Kötü ışıklandırma.

ışıklandırma için klasik *AGM*'nin yakınsama sonucu görülmektedir. Şekil 6.5.b'de ise farklı ışıklandırma altında aynı modeli kullanan klasik *AGM*'nin, aynı kişi için ürettiği sonuç gösterilmektedir. Klasik *AGM*'nin farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş yüz görüntüsü için verdiği sonucun hatalı olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada bilinen *AGM* yapısına yüz için özelleştirilmiş aydınlatma normalizasyonu eklenerek *AGM*'nin farklı ışık koşullarındaki arama ve yakınsama performansını arttıran yeni bir yöntem tanıtılmaktadır. Öncelikle bilinen aydınlatma normalizasyonu yöntemleri yüz için özelleştirilmiştir. Çalışmanın asıl amacı yüz için özelleştirilen bu yöntemleri klasik *AGM* yapısına uyarlayarak *AGM*'yi ışık değişimlerine karşı daha gürbüz hale getirmektir. Şekil 6.6'de önerdiğimiz yöntemin genel yapısı gösterilmektedir.



Şekil 6.6. Önerilen Gürbüz AGM'nin genel yapısı.

Yüz görünümünde ışık değişimlerinden kaynaklanan bozulmaları onarmak amacıyla ratio image [34] [115], global histogram eşitleme [116] ve yüze özel histogram uydurma [17] [116] yöntemleri deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı bu tür bir normalizasyon yönteminin *AGM* ile yüz hizalama başarımını arttırabileceğini göstermektir.

AGM'nin ışık değişimlerine karşı daha gürbüz sonuçlar verebilmesi için kullandığımız ilk normalizasyon yöntemi literatürde Ratio-image (*RI*) [36] olarak bilinen yöntemdir. *RI* yöntemi, giriş yüz görüntüsünün Gauss süzgeçler kullanılarak bulanıklaştırılmış halinin referans (ortalama) yüz görüntüsüne oranını kullanarak belirli bir çevrim ile yüzdeki ışık değişimini referans görüntüye yakın hale getirmeye çalışan bir normalizasyon yöntemidir. *RI* yöntemi kullanılarak farklı şekilde aydınlatılmış yüz görüntüleri onarılabilmektedir. Dang Hui'nin önerdiği çevrimsel yöntem sayesinde *RI* onarım sonucu daha da iyileşmektedir. Bu çalışmada birincil amacımız yüz ışık değişimi normalizasyonu değildir. Amacımız yüz hizalama amaçlı kullandığımız *AGM*'nin arama sonucundaki yakınsama performansını arttıracak en uygun yöntemi belirlemektir. Bu bağlamda *RI* yöntemi üzerinde bazı deneyler yapılmış ve sonuçlar deneysel çalışmalar bölümünde tartışılmıştır.

RI yönteminden başka histogram temelli ışık normalizasyonu yöntemleri de çalışmamız kapsamında incelenmiştir. Bu yöntemlerden Global Histogram Eşitleme (*GHE*) ve yüz için özelleştirilmiş Histogram Uydurma (*HU*) üzerinde deneyler

yapılmıştır. Özellikle HU yönteminin *AGM* arama aşamasında kullanımının oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Elde edilen tüm sonuçlar karşılaştırmalı olarak raporlanmış ve deneysel çalışmalar bölümünde tartışılmıştır.

6.2.1 Önerilen modelin kurulması

Yale B [118] veri kümesinde yer alan görüntülerde yüze ait 73 adet önemli nokta el yordamı ile işaretlenmiştir. 73 adet yüze ait önemli noktanın yüz bileşenlerine göre dağılımı şu şekildedir: 16 nokta ağız, 12 nokta burun, 9 nokta sağ göz, 9 nokta sol göz, 8 nokta sol kaş, 8 nokta sağ kaş ve 11 nokta çene yayı.

AGM ile önceden yüze ait önemli noktaların koordinatları saptanmış eğitim görüntüleri ile eğitilerek kurulan model yardımı ile yeni insan yüzleri sentezlenebilmektedir. İki görüntünün eşlenmesi işleminde giriş görüntüsü ile sentezlenen görüntü arasındaki fark minimize edilerek model parametreleri bulunur. Deneylerde *Yale B* veri



Şekil 6.7. İdeal olarak aydınlatılmış on farklı bireye ait yüz görüntüleri.

kümesindeki tüm farklı bireylerin (10 farklı kişi) görüntüleri kullanılmıştır. Veri kümesini oluşturan bu 10 kişinin resimleri Şekil 6.7’de gösterilmiştir. Her kişinin 20 farklı aydınlatma koşulu altında çekilmiş görüntüsünde yüze ait önemli noktalar el yordamı ile işaretlenmiştir. Bu 20 farklı resimden tam karşıdan aydınlatılmış olan imge kimlik modeli oluşturulurken eğitim amaçlı kullanılmıştır. Geriye kalan 19 görüntü ise aydınlatma modelinin oluşturulmasında kullanılmıştır. Şekil 6.8’de *Yale B* veri kümesinden bir kişinin farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş görüntüleri gösterilmektedir.

Aktif Görünüm Modeli için ilk önce eğitim kümesinde yer alan her kişinin ideal olarak aydınlatılmış sadece bir adet imge ve bu imgeye karşılık gelen yüze ait önemli

noktaları kullanılarak modelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle eğitim kümesinde yer alan yüz görüntülerinin %95 şekil değişimini (shape variation) kapsayacak şekil modeli oluşturulmuştur. Daha sonra eğitim kümesinde yer alan tüm görüntüler şekil modeli oluşturulurken GPA (Generalized Procrusted Analysis) yardımı ile hizalanır ve hizalanmış yüz şekilleri kullanılarak ortalama yüz şekli hesaplanır. Eğitim kümesinde yer alan tüm görüntülere ait doku bilgisi ortalama şekile, üçgenleme (triangulation) yöntemi ile eğilir. Hizalanmış ve ortalama yüze eğilmiş yüz görüntüleri yaklaşık 33.000 benekten oluşmaktadır. Normalize edilmiş bu yüz dokularındaki %95'lik değişim 8 boyutlu doku uzayı ile modellenmiştir. Şekil uzayı ise 7 boyutlu bir uzay yardımı ile yine şekildeki toplam değişimin %95'i kapsayacak şekilde modellenmiştir. En son olarak doku ve şekil değişimini birlikte modelleyen görünüm modeli 8 boyutlu bir uzayla ifade edilmiştir.

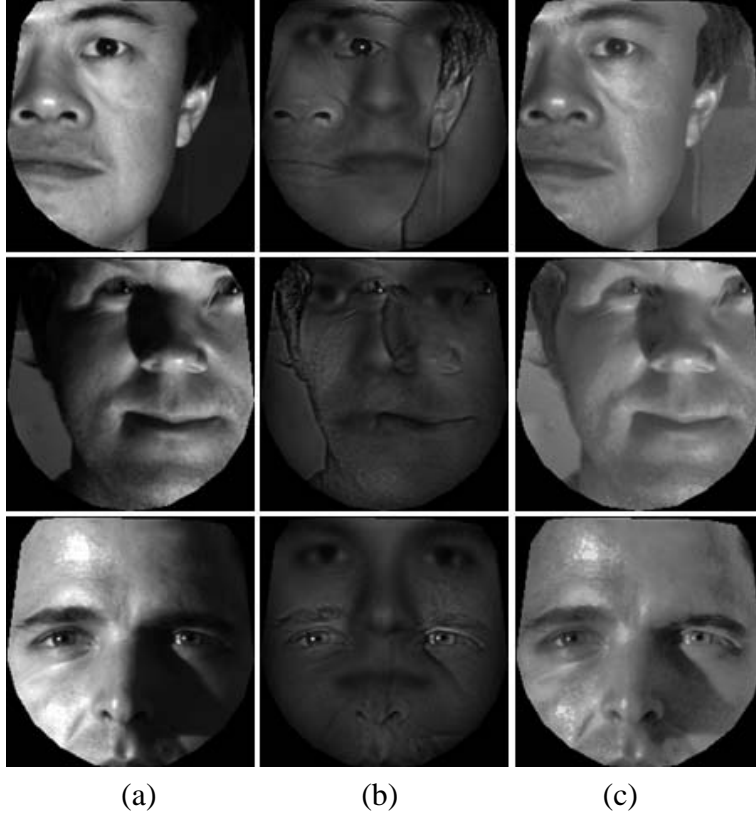
Aktif Görünüm Modeli şekil ve doku değişimlerini tek bir modelde birleştirmektedir. AGM hizalama algoritması (AGM arama algoritması olarak isimlendirilir) altında



Şekil 6.8. Yale B yüz veri kümesinden bir kişinin farklı aydınlatılmış yüz görüntüleri.

bir çeşit en iyileme algoritmasıdır. En iyileme kriteri olarak *AGM* tarafından sentezlenen yüz görüntüsü ile test görüntüsünde kullanılan yüz şekline eğilen yüz arasındaki fark kullanılmaktadır. Aydınlatma probleminden kaynaklanan bu fark hatası oldukça fazla olduğu için klasik *AGM* yöntemleri yanlış sonuçlar

üretmektedir. Önerdiğimiz yöntemde, test görüntüsünden referans şekile eğilen yüz, yüz için özelleşmiş normalizasyon yöntemleriyle onarıldıktan sonra, *AGM* tarafından sentezlenen yüz görüntüsü ile arasındaki fark hesabı yapılmaktadır. Bu sayede klasik *AGM*'de ışık değişimlerinden kaynaklanan büyük fark (en-iyileme kriteri olan hata), önerdiğimiz yöntemde *AGM* arama işleminde ortadan kaldırılmış olmaktadır. *AGM* algoritmasına eklediğimiz yeni bir modül yardımı ile hata hesabı yapılmadan önce ışık normalizasyonu yapıldığı için *AGM* test görüntülerindeki ışık değişiminden etkilenmeyen daha gürbüz bir hale getirilmiş olmaktadır.



Şekil 6.9. *AGM* arama aşamasında *RI* ve *HU* yöntemlerinin ürettiği onarım sonuçları: a) Giriş görüntüsü, b) *RI* yöntemi, c) *HU* yöntemi.

Çalışmamızda önerdiğimiz yöntemin *AGM* arama işleminde başarıyla uygulanabilir olup olmadığını göstermek amacıyla *RI* ve *HU* normalizasyon yöntemleri üzerinde bazı testler yapılmıştır. Bu testlerden birincisi *AGM* arama işlemi sırasında yüze belirli bir uzaklıkta başlangıç konumu verilerek *AGM* iklendirilmiş ve arama işlemi esnasında *RI* ve *HU* kullanılarak her iki yöntemin ürettiği normalizasyon sonuçları incelenmiştir. Şekil 6.9'da *RI* ve *HU* yöntemlerinin test sonuçları gösterilmektedir. Hizalanmamış yüzlerde Dang Hui'nin önerdiği ve oldukça güncel bir yöntem olan *RI*'nin tamamen

kötü sonuçlar ürettiği gözlenmiştir (Bkz. Şekil 6.9.b). Özgün *RI* makalesinde sadece hizalanmış görüntüler kullanıldığı için bu tür bir problemten hiç bahsedilmemiştir.

RI yönteminin yinelemeli bir algoritmayla sürekli güncellediği referans yüz görüntüsünün bulanıklaştırılmış halinin onarım esnasında bir ağırlıklandırma matrisi olarak kullanılması tamamen hatalı sonuçların elde edilmesine yol açmaktadır. Örneğin hiç bir insan yüzünün bulunmadığı homojen bir bölgeden kesilmiş ve referans şekile eğilmiş ve kırılmış bir görüntünün *RI* ile onarım sonucunda referans yüze ait bilgiler görülmektedir. Yani *RI* onarım sonucunda yüz görüntüsü sürekli olarak görülmektedir. *AGM* arama işleminde sentezlenen yüz ile onarım sonucundan elde edilen görüntü arasındaki hataya (fark) göre arama işleminin yapıldığı düşünülürse, *RI* yönteminin kullanımının, yüz olmayan bölgelerde bile düşük hataların elde edilmesine sebep olacağı görülecektir.

AGM + RI ile yaptığımız testlerde *AGM* ilklendirmesi tam olarak yüzün üzerinde optimum noktada değilse doğru yakınsama elde edilememektedir. *AGM*'de ilk fark hesabı ortalama doku vektörü ile yapıldığından, yüz olmayan bölgeler için bile *RI* yöntemi, ortalama yüze ait bilgileri onarım sonucunda vermektedir. Bu yüzden *RI*, yüz olmayan bir örnek bölgeler için ortalama yüze benzer sonuçlar verdiği için dokular arası fark sıfıra yakın olduğu için *AGM* arama sonucu yüz olmayan bölgelere doğru kaymaktadır. Şekil 6.9.c'deki ise aynı görüntüler için *HU* yönteminin ürettiği sonuçlar gösterilmektedir. Giriş görüntüleri için *HU*'nun ürettiği onarım sonuçları var olan bilgiye yeni bilgiler eklemek yerine sadece gri seviyeleri yüz için özelleştirilmiş histogram bilgisine dayanarak değiştirmektedir. *RI*'dan farklı olarak, eğer giriş görüntüsünde yüz varsa ve kötü aydınlatılmışsa doğru şekilde onarımı yapmaktadır. Bu sayede *AGM* arama işleminde en-iyileme kriteri olarak kullanılan fark (residue) klasik *AGM* yöntemine göre daha doğru hesaplandığından *AGM* ışık değişimlerine karşı daha gürbüz sonuçlar üretebilme yeteneği kazanmış olmaktadır. Aynı şekilde eğer giriş görüntüsünde yüz yoksa *HU* yöntemi *AGM*'de hesaplanacak farkı daha da arttıracak şekilde o görüntüyü değiştirmektedir. *RI*'nın yaptığı gibi fazladan ya da olmayan bir bilgiyi onarım sonucuna yansıtmadığı için *AGM* arama işlemi çok daha başarılı olmaktadır.

Bu sonuçlar ışığında *AGM* arama işleminde *HU* yönteminin kullanımının *RI*'ya göre daha uygun olduğu görülmüştür. Diğer deneyimiz ise arama işlemi tamamlanmış,



Şekil 6.10. AGM arama aşamasında RI ve HU yöntemlerinin ürettiği iyileştirme sonuçları: a) Giriş görüntüsü, b) RI yöntemi, c) HU yöntemi.

yani hizalanmış görüntüler için *HU* ve *RI* yöntemlerinin nasıl sonuçlar ürettiğini görmek amacıyla yapılmıştır. Şekil 6.10'da bu deneyde elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Şekil 6.10'da gösterilen, aşırı ışıklandırma altında çekilmiş ve hizalanmış yüz görüntüleri dikkatle incelendiğinde *RI* yönteminin gölgeyi ortadan kaldırırken görüntüyü çok fazla bozduğu görülmektedir. Özellikle görüntüyü onarmak yerine, eksik olan bilgileri referans yüze ait bilgilerle doldurması *RI* yönteminin bir diğer olumsuz yanı olarak gözlenmiştir.

Şekil 6.10'daki *HU* onarım sonuçları, giriş görüntüsündeki aydınlatma değişiminden kaynaklanan bozulmayı ortadan kaldırdığı görülmüştür. *HU* yönteminin onarım sonuçlarında dikkat çeken diğer bir nokta ise onarılan görüntünün doku bilgisinin eğitim kümesindeki dokuyla birebir aynı olmamasıdır. Bu ise modelleme açısından istenmeyen bir durumdur.

RI yöntemi Şekil 6.10'daki tüm yüzler için oldukça kötü sonuçlar üretmektedir. Çok kötü ışıklandırmaya sahip bu görüntülerin *HU* yöntemi ile onarılmış görüntüleri görsel olarak kabul edilebilir düzeye getirilmiştir. Şekil 6.10'daki görüntüler dikkatle

incelendiğinde yüzün karanlık tarafında kalan bölgesindeki onarım sonuçlarının gürültü içerdiği ve diğer tarafta ise nispeten daha parlak bölgelerin bulunduğu görülecektir. Fakat aynı görüntüler için *RI* yönteminin ürettiği sonuçlarla karşılaştırıldığında *HU* onarım sonucunun özgün görüntüye çok daha yakın olduğu görülecektir. Yukarıda detaylarını verdiğimiz normalizasyon yöntemlerini *AGM*'nin çalışma şekline uyarladığımızda *AGM* arama sonuçları ışık değişimlerine karşı çok daha gürbüz hale gelmiştir. Genel *AGM* yapısını bozmadan algoritmaya eklediğimiz normalizasyon modülü *AGM* optimizasyonu öncesi giriş görüntüsünü onarmaya çalışmaktadır. *HU* yönteminin yüz olan bölgelerde verdiği sonuçlar göz önüne getirildiğinde *AGM*'nin en iyilemeye çalıştığı hata farkının yüze doğru yaklaştıkça azalacağı anlaşılacaktır. *AGM*'de ilk değer olarak atanan referans yüz (ortalama



Şekil 6.11. Kötü ışıklandırmaya sahip yüzler için Klasik *AGM* ve önerilen yöntemin karşılaştırılması. Üst satır: Klasik *AGM*, Alt satır: *HU-AGM*.

şekil ve ortalama doku) ile başlayan algoritma ilk değer olarak verilen şekil bilgisine göre yüz dokusunu keser ve yüzü referans yüze eğerek, şekilden bağımsız yüz görüntüsünü elde eder. Bu aşamadan sonra, kesilen ve ortalama yüze eğilen yüz adayı, önerdiğimiz normalizasyon algoritmasına giriş olarak verilir. *RI* yönteminin yüz olmayan bölgelerde ürettiği hayali yüz bilgisi nedeniyle, *RI* yöntemi *AGM* arama



Şekil 6.12. Kötü ışıklandırmaya sahip yüzler için klasik AGM ve HU-AGM hizalama sonuçları. a) İlkendirme, b) Klasik AGM , (c) HU-AGM, d) HU-AGM + RI iyileştirme.

aşamasında tercih edilmemiştir. *RI* yerine *HU* yöntemi normalizasyon bloğu olarak arama aşamasında kullanılmıştır.

Normalizasyon aşamasına giriş olarak verilen referans yüze eğilmiş yüz görüntüsü için *HU*'nun ürettiği sonuç ile sentezlenen yüz (ilk aşamada ortalama yüz dokusu) arasındaki fark hesaplanır. Eğitim seti kullanılarak oluşturduğumuz modelde fark ile görünüm parametre vektörü güncelleme değeri arasında kurduğumuz doğrusal model (jacobian veya regresyon analizi) kullanılarak parametre güncelleme değerleri elde edilir. Yüz sentezlemede kullandığımız görünüm vektörü bu değerler kullanılarak güncellenir. Giriş olarak verilen şekil belirli bir bozulmuş yordamı uygulanarak her çevrimde bozulur. Hangi deformasyon hesaplanan hatanın azalmasına yardımcı oluyorsa, deformasyon kabul edilir. Hatanın azalmasının iki nedeni olabilir:

1. Şekil deformasyonu ile gittikçe yüze yaklaşılmaktadır,
2. Görünüm vektörü ile yüz gittikçe daha doğru bir şekilde sentezlenmektedir.

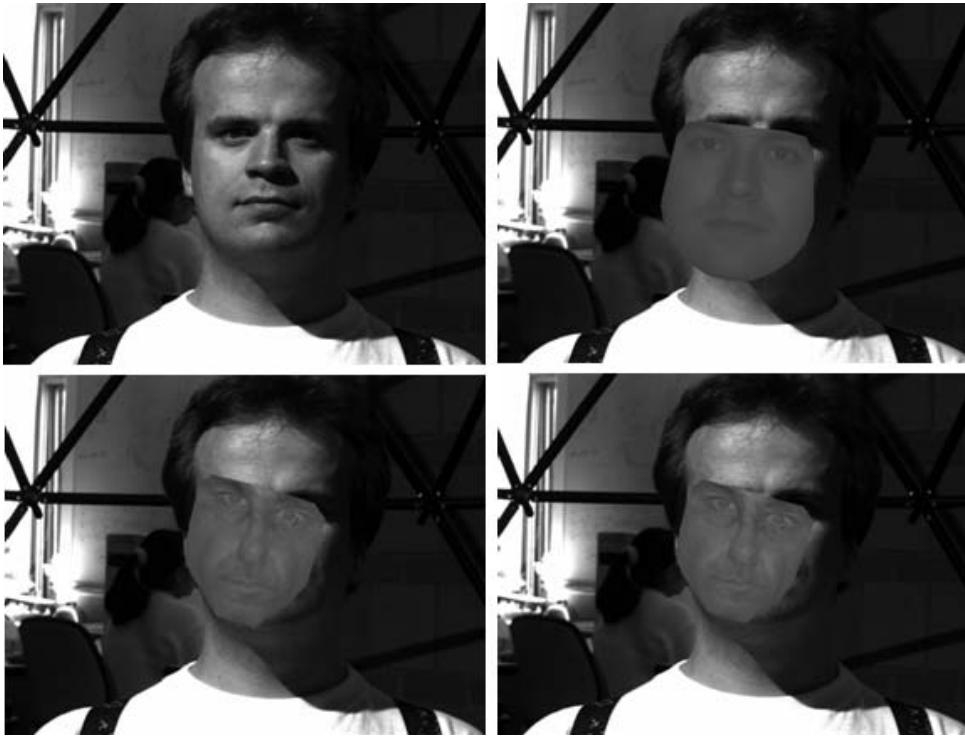
AGM arama çevrimi yakınsama sağlanana kadar veya durma koşulları oluşuncaya kadar devam eder. Eğer *AGM* çok uzaktan başlamamışsa çevrim sonunda

yüz bölgesine yaklaşmış ve hizalama işleminin kabul edilebilir bir hata oranı ile tamamlanmış olması beklenir. Şekil 6.11’de klasik AGM ile önerdiğimiz AGM yönteminin eğitim kümesindeki görüntülerden farklı olarak aydınlatılmış giriş görüntüsü için ürettikleri sonuçlar gösterilmektedir. Şekil 6.11’de klasik AGM’nin hatalı sonuç verdiği görülmektedir. Aynı giriş görüntüsü için klasik AGM ile aynı eğitim kümesi kullanılarak oluşturulan önerdiğimiz AGM’nin Şekil 6.12.c.’de gösterilen sonuçları incelendiğinde oldukça başarılı sonuç verdiği görülmektedir.

Yaptığımız bir diğer deneyde ise *HU* ve *RI* normalizasyonlarının birlikte kullanılarak elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Bu testlerde genel arama işlemi sırasında *HU* yöntemi kullanılmış ve hassas hizalama için *HU* kullanan AGM’nin yakınsadığı yerden itibaren *RI – AGM* yöntemi yeni bir çevrim yapılmıştır (Bkz. Şekil 6.12.d.).

Şekil 6.12.d’de önerdiğimiz yöntem olan *HU + RI* AGM’nin hem hizalama hem de onarım sonucu gösterilmektedir. Önerdiğimiz yöntemin normal AGM yapısına eklenen onarım algoritmaları sayesinde klasik AGM’ye oranla, ışık değişimlerine karşı daha gürbüz bir yapı oluşturulmaktadır. Bunun yanında AGM çevrimi bittiğinde hem hizalanmış yüz hem de yüzün iyileştirilmiş hali çıkış olarak üretilmektedir. Şekil 6.13’te klasik AGM için ilklendirme ve optimizasyon çevrimleri gösterilmektedir. Klasik AGM’nin farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş görüntüler için modelleme yeteneğini görmek açısından Şekil 6.13’teki ilk altı çevrim sonuçlarına bakmak yeterlidir. Örneğin Şekil 6.13’te klasik AGM’nin optimizasyon çevrimleri gösterilmektedir. Sentezlenen yüz görüntüsüne dikkatle bakıldığında en iyileme ölçütü olan farkın (residue) azaltılması için model parametresi ilk üç çevrimde değiştirilirken, şekil bozulması olarak baskın olarak sadece ölçek değişimi yapıldığı görülecektir. Klasik AGM için üçüncü çevrimden sonra sentezlenen yüzün pekte değişmediği görülmektedir. Bunun sebebi ise AGM’nin modellediği yüz dokusundan ışık değişimleri nedeniyle çok farklı bir dokuyu AGM’nin modelleme yeteneğinin olmamasıdır.

Şekil 6.14’te ise önerilen *HU – AGM* için ilklendirme ve optimizasyon çevrimleri gösterilmektedir. Önerilen yöntemin farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş görüntüler için modelleme yeteneğini görmek açısından Şekil 6.14’teki ilk altı çevrim sonuçları oldukça önemli bilgiler vermektedir. Şekil 6.14’teki sonuçlar dikkatle incelendiğinde, önerilen yöntemin her çevrimde gerçek yüze daha da yaklaştığı ve



Şekil 6.13. Klasik AGM'nin optimizasyon aşamaları ve sentezlenen yüzler: a) Giriş görüntüsü, b) Ortalama yüz ile AGM iklendirme, c) 3. çevrim, d) 6. çevrim optimizasyon sonucu ve sentezlenen yüzler.

Çizelge 6.1. Klasik AGM hizalama başarımı.

	$K1$	$K2$	$K3$	$K4$
$Pt. - Pt.$	4.96 ± 0.20	11.46 ± 0.57	16.41 ± 0.58	21.67 ± 0.64
$Pt. - Crv.$	2.93 ± 0.11	6.83 ± 0.33	9.95 ± 0.36	13.29 ± 0.44

altıncı çevrimde kabul edilebilir bir sonuç ürettiği görülecektir. Bu ise yöntemin öngörüldüğü şekilde çalıştığını göstermesi açısından önemlidir. Tezin bu bölümünde farklı öznitelik uzaylarının ve önışleme yöntemlerinin yüz tanıma sistemlerinde tanıma başarımı üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir ve yapılan çalışmaların sonuçları ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu çalışmanın ana katkısı klasik AGM ile yüz bölütlemeye, özgün yüz aydınlatma normalizasyonunu AGM bükme (warping) işleminden hemen sonra ve her çevrimde yaparak, ışık değişimlerine karşı bağışık yaklaşım sunmasıdır.

Deneyisel çalışmalarda, kurulan modelin ışık değişimlerine karşı önerilen yöntemle, klasik AGM yöntemi başarım olarak karşılaştırılmıştır. Deneylerde *Yale B* veri kümesindeki tüm farklı bireylerin (10 kişi) görüntüleri kullanılmıştır. Her kişinin



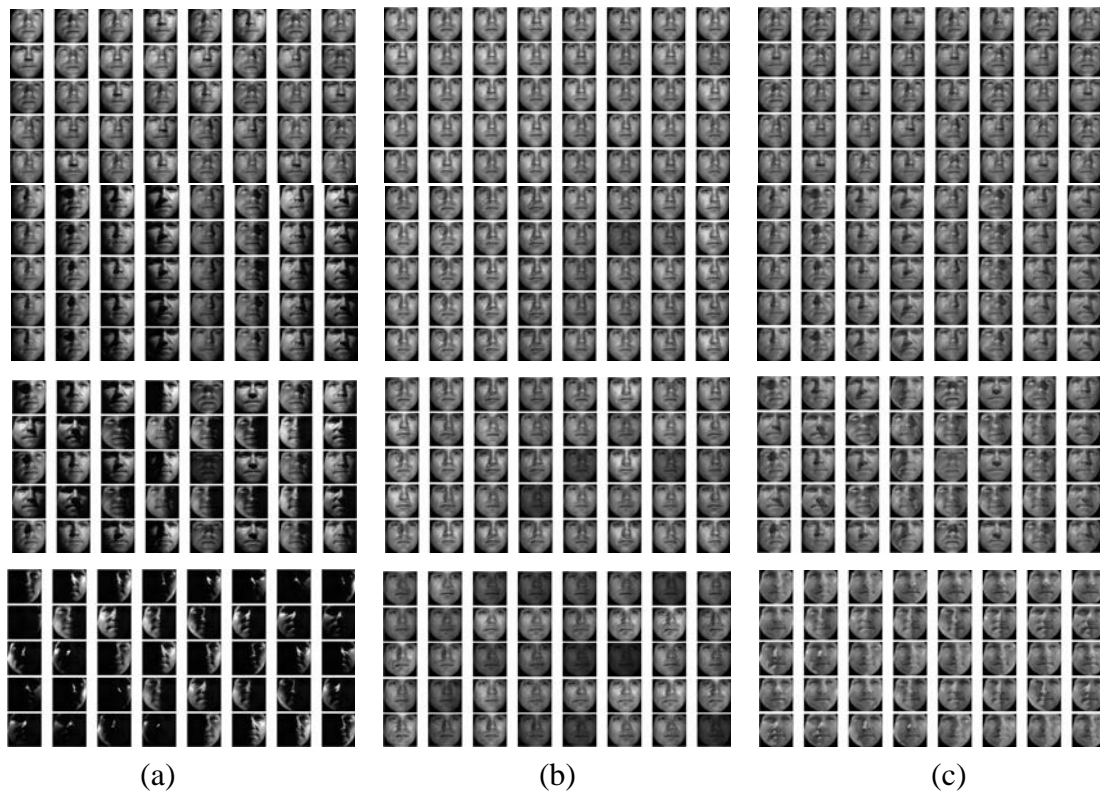
Şekil 6.14. HU-AGM'nin optimizasyon aşamaları ve sentezlenen yüzler: a) Giriş görüntüsü, b) Ortalama yüz ile AGM ilkendirme, c) 3. çevrim, d) 6. çevrim optimizasyon sonucu ve sentezlenen yüzler.

Çizelge 6.2. Önerilen AGM hizalama başarımı.

	$K1$	$K2$	$K3$	$K4$
$Pt. - Pt.$	4.10 ± 0.12	7.37 ± 0.34	10.91 ± 0.41	16.23 ± 0.58
$Pt. - Crv.$	2.48 ± 0.08	4.78 ± 0.23	7.38 ± 0.29	11.10 ± 0.42

20 farklı yönden aydınlatılmış yüz görüntüsünün önemli noktaları el yordamı ile işaretlenmiştir. Her bireyin tam karşıdan aydınlatılmış ve tam karşıya bakan pozunu yüz modeli oluşturulurken eğitim amaçlı kullanılmıştır. Geriye kalan tüm farklı aydınlatılmış yüzlerle ise aydınlatma test kümesi oluşturulmuştur. Çizelge 6.1'de bu test kümeleri için hizalama sonuçları gösterilmiştir.

Tez çalışmasında ayrıca önerilen yöntemin yüz tanıma başarımını nasıl etkilediği incelenmiştir. Deneysel çalışmada, TBA , DAA , $2B - MEDA$ ve $2B - TBA$ öznitelik uzayları kullanılmıştır. Eğitim kümesi, K_1 veri kümesinden rasgele seçilen 25 yüz imgesinden oluşturulmuştur. Dört kümeye ayrılan imge veri tabanında, her kümede, kişilerin toplam 8 farklı pozunu almaktadır. K_1 'den geriye kalan tüm imgeler test amacıyla kullanılmıştır. TBA , DAA ve $2B - TBA$ öznitelik uzaylarının tümü de yüzdeki

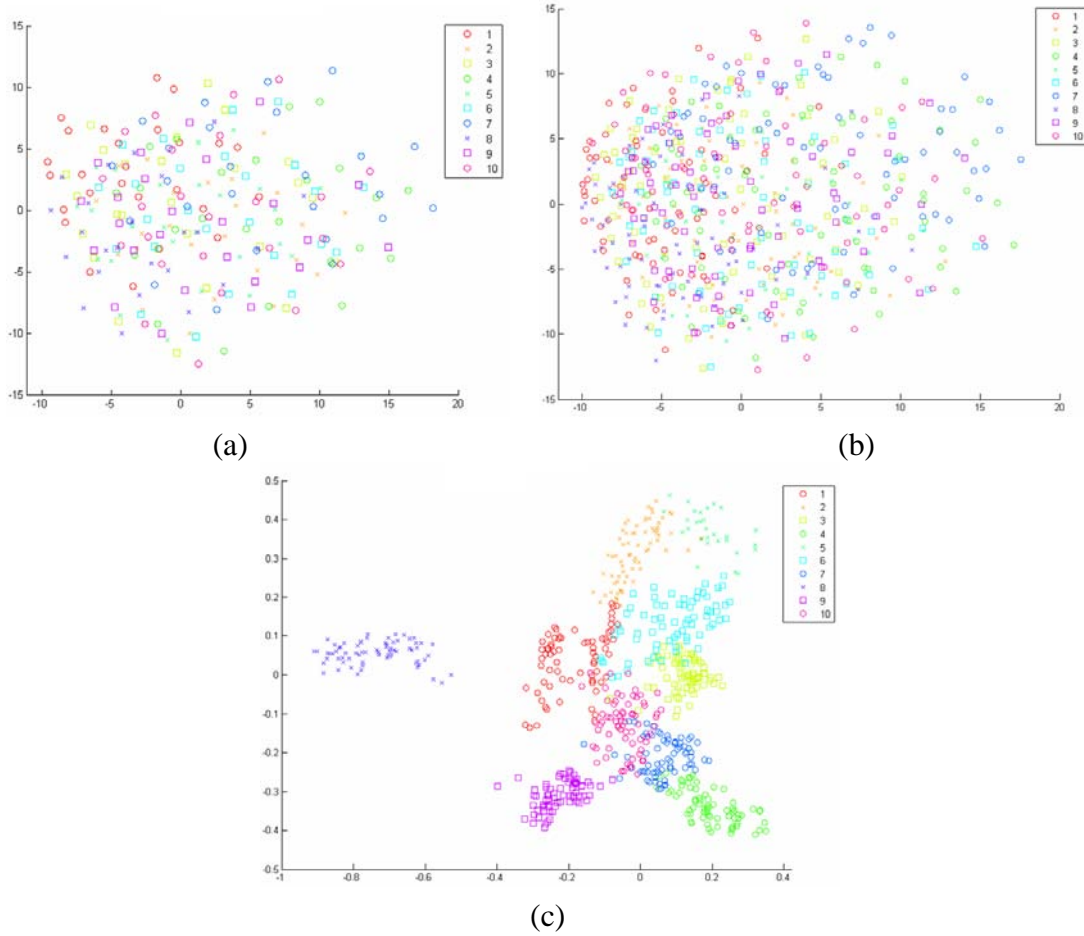


Şekil 6.15. Hizalanmış ve dört küme şeklinde ayrılmış Yale B yüz görüntülerinin içerisinde, bir bireye ait 40'ar adet yüz görüntüleri: a) Özgün yüzler, b) RI işleminden geçmiş yüzler, c) HU işleminden geçmiş yüzler.

yanlış hizalamaya karşı son derece duyar olduğu bilinmektedir. Şekil 6.16'da test ve eğitim kümesi verilerinin *TBA* ve *DAA* için öznitelik vektörlerinin dağılımı verilmiştir. Tanıma başarımı, özgün imgeler kullanıldığında, beklenildiği gibi tüm öznitelik uzayları için oldukça düşük sonuç vermiştir. Çizelge 6.2'den çıkarılan diğer önemli sonuç ise *AGM*'nin histogram uydurma ile birlikte kullanılmasının tanıma başarımını olumlu yönde etkilediğidir. *HU* yöntemi kullanıldığında, yüz tanıma başarımı tüm kümelerde ve tüm öznitelik uzaylarında daha iyi sonuç vermiştir. Şekil 6.18'de dört farklı öznitelik uzayı için özgün imgelerin kullanılması, oran-görüntüsü yönteminin kullanılması ve histogram uydurma yönteminin kullanılması durumları için ayrı ayrı tanıma başarımları, öznitelik vektörünün boyutuna bağlı olarak verilmiştir.

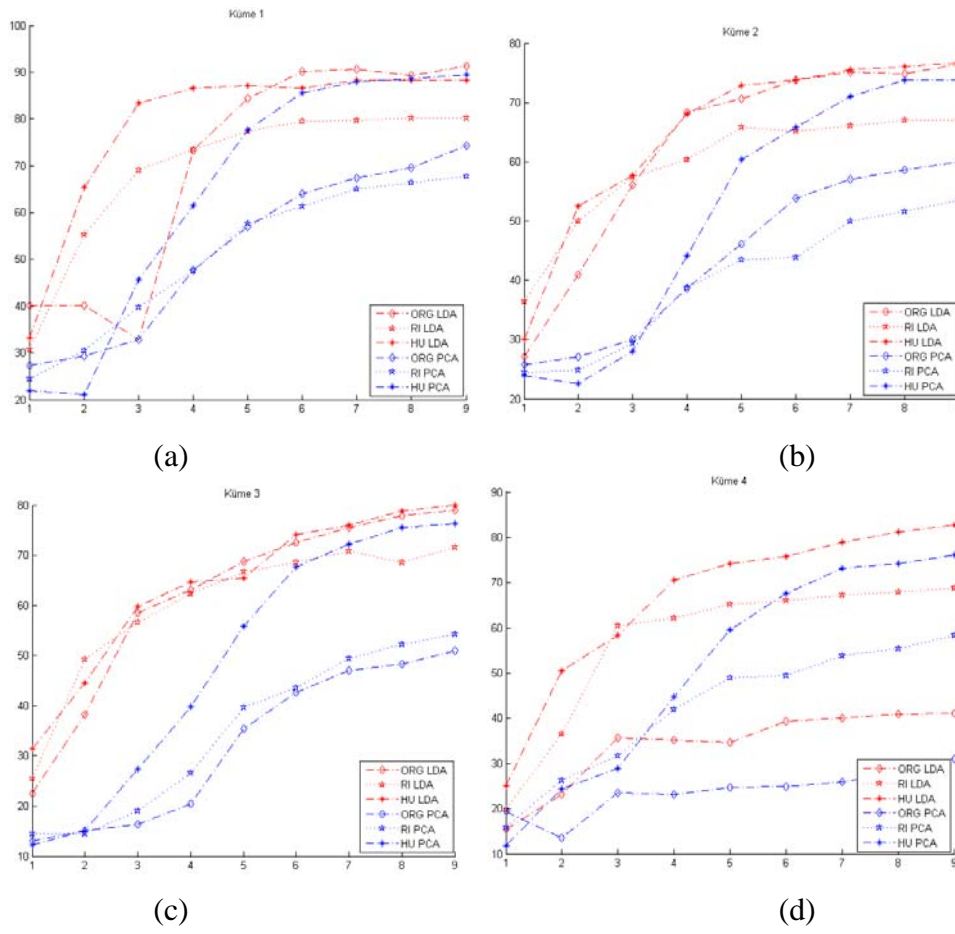
6.2.2 Sonuçlar ve tartışma

Bu çalışmada otomatik yüz hizalama için ışık ve poz değişimlerine karşı gürbüz yeni bir yöntem tanıtılmıştır. Yöntem giriş olarak verilen farklı aydınlatılmış ve farklı bir poza sahip yüz görüntüsünü hem onarmaya hem de hizalamaya çalışmaktadır. Önerilen yöntemde model eğitimi için aynı bireyin farklı aydınlatma ve poza



Şekil 6.16. Test ve eğitim kümesi verilerinin TBA ve DAA öznitelik vektörlerinin dağılımı a) Eğitim kümesi TBA öznitelik vektörlerinin dağılımı, b) Test kümesi için TBA öznitelik vektörlerinin dağılımı, c) Test kümesi için DAA öznitelik vektörlerinin dağılımı.

sahip görüntülerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu ise yöntemin gerçek problemlere uygulanmasını kolaylaştıran bir özelliktir. Önerilen yöntemde ışık değişimlerine karşı bağımsık bir yapı oluşturulması için karmaşık aydınlatma modelleri gerekmemektedir. Deneysel çalışmalardan da görüleceği gibi önerilen yöntem, farklı ışık ve pozlarda bile, klasik *AGM*'ye göre oldukça iyi sonuçlar vermiştir. *Yale B* yüz veri tabanı üzerinde oluşturulan dört ayrı küme üzerinde tanıma başarımları farklı öznitelik çıkarıcılar üzerinde sınanmıştır. Önerilen histogram tabanlı aydınlatma normalizasyonu, tanıma sonuçlarını aydınlatma koşullarındaki zorluğa göre ayrılmış 4 yüz kümesinde (K_1 , K_2 , K_3 , K_4) kabul edilebilir seviyeye çıkarmıştır. K_1 ve K_2 'deki ışık değişimlerinin bozucu etkileri çok olmadığı için özgün görüntülerde bile *DAA*, *MEDA* gibi öznitelik



Şekil 6.17. Test kümesi verilerinin TBA ve DAA için öznelik vektörünün boyuna göre tanıma sonucu. a) K_1 yüz veri kümesi için, b) K_2 yüz veri kümesi için, c) K_3 yüz veri kümesi için, d) K_4 yüz veri kümesi tanıma sonucu.

çıkarcılar kullanıldığında iyi tanıma başarımları elde edilmiştir. K_3 ve K_4 'te ise aydınlatma normalizasyonunun etkisi daha net görülebilmektedir.

6.3 Sonuçlar

Bu bölümde otomatik yüz hizalama için ışık değişimlerine karşı gürbüz yeni bir yöntem tanıtılmıştır. Yöntem giriş olarak verilen farklı aydınlatılmış yüz görüntüsünü hem onarmaya hem de hizalamaya çalışmaktadır. Onarım (aydınlatma normalizasyonu) aktif görünüm modeli arama algoritmasının içine eklenmiştir.

Önerilen yöntemin özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- Önerilen yöntemin eğitimi için eğitim kümesindeki her birey için sadece bir adet önden çekilmiş görüntüsünün olması yeterlidir. Bu yöntemin gerçek problemlere uygulanmasını kolaylaştıran bir özelliktir. Yöntemde, aynı bireyin birden farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş görüntülerine ihtiyaç duyulmamaktadır.

Çizelge 6.3. DAA kullanılarak K_1 'deki yüz tanıma sonuçları.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Özgün	40.14	40.14	32.81	73.38	84.36	90.14	90.70	89.29	91.26
Oran	30.70	55.35	69.15	73.52	77.32	79.57	79.71	80.14	80.14
HU	33.23	65.35	83.38	86.61	87.04	86.61	88.30	88.30	88.30

Çizelge 6.4. TBA kullanılarak K_1 'deki yüz tanıma sonuçları.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Özgün	27.32	29.29	32.81	47.74	57.04	64.08	67.46	69.57	74.36
Oran	24.50	30.56	39.71	47.46	57.60	61.40	65.07	66.33	67.74
HU	21.97	21.12	45.63	61.54	77.74	85.63	87.88	88.59	89.43

Çizelge 6.5. DAA kullanılarak K_2 'deki yüz tanıma sonuçları.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Özgün	27.09	40.96	56.12	68.38	70.64	73.87	75.16	74.83	76.45
Oran	36.45	50.00	57.41	60.32	65.80	65.16	66.12	67.09	67.09
HU	30.00	52.58	57.74	68.06	72.90	73.87	75.48	76.12	76.77

Çizelge 6.6. TBA kullanılarak K_2 'deki yüz tanıma sonuçları.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Özgün	25.80	27.09	30.00	38.70	46.12	53.87	57.09	58.70	60.00
Oran	24.51	24.83	29.35	38.70	43.54	43.87	50.00	51.61	53.54
HU	23.87	22.58	28.06	44.19	60.32	65.80	70.96	73.87	73.87

Çizelge 6.7. DAA kullanılarak K_3 'teki yüz tanıma sonuçları.

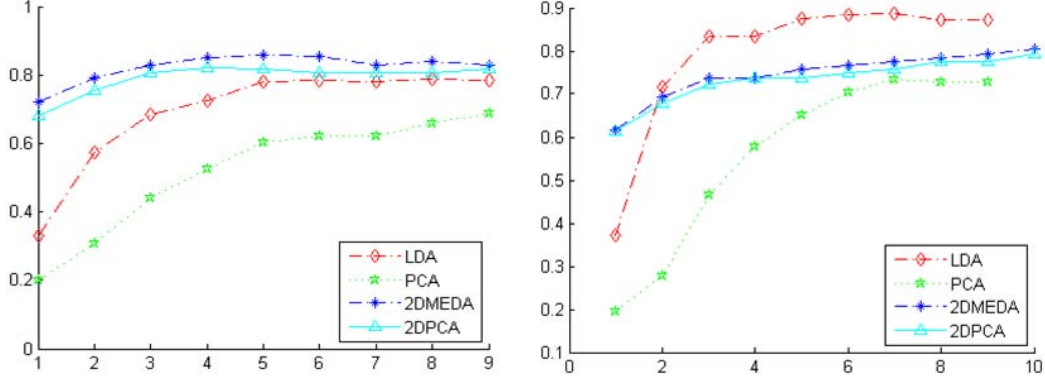
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Özgün	22.54	38.17	58.45	63.10	68.73	72.54	75.49	77.89	79.01
Oran	25.49	49.30	56.62	62.25	66.76	68.59	70.85	68.59	71.55
HU	31.41	44.51	59.86	64.65	65.49	74.08	76.06	78.87	80.00

Çizelge 6.8. Temel Bileşen Analizi (TBA) kullanılarak K_3 'deki yüz tanıma sonuçları.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Özgün	13.10	15.07	16.34	20.42	35.35	42.68	47.04	48.31	50.99
Oran	14.51	14.51	19.01	26.62	39.58	43.66	49.44	52.25	54.23
HU	12.25	15.07	27.32	39.86	55.92	67.61	72.25	75.49	76.34

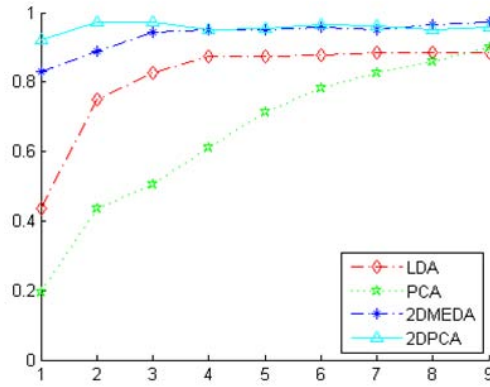
Çizelge 6.9. DAA kullanılarak K_4 'teki yüz tanıma sonuçları.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Özgün	15.49	23.24	35.77	35.21	34.65	39.44	40.00	40.85	41.13
Oran	19.86	36.62	60.42	62.25	65.21	66.06	67.18	67.89	68.87
HU	25.07	50.56	58.31	70.56	74.23	75.77	78.87	81.13	82.68



(a)

(b)



(c)

Şekil 6.18. TBA, DAA, 2B-MEDA ve 2B-TBA öznelik uzayları için a) Özgün yüz görüntüleri, b) Oran-görüntüleri, c) HU normalizasyonu için tanıma başarımları.

- Önerilen yöntemde, ışık değişimlerine karşı bağışık bir yapı oluşturulması için karmaşık aydınlatma modellerinin kurulması gerekmemektedir.
- Önerilen yöntemin en büyük kazanımlarından bir tanesi de basit normalizasyon yöntemleri kullanılarak yüksek başarımlar elde etmeye olanak vermesidir. *AGM* arama ve en-iyileme algoritmasında radikal değişiklikler yapmadan normalizasyon/onarma algoritmaları önerilen yöntemde *AGM*'ye uyarlanmıştır. Bu ise önerilen yöntemin uygulanabilirliğini arttırmaktadır. Bu iş için özelleşmiş

Çizelge 6.10. TBA kullanılarak K_4 'teki yüz tanıma sonuçları.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Özgül	19.44	13.52	23.52	23.10	24.65	24.93	25.92	28.03	30.99
Oran	15.92	26.34	31.69	41.97	49.01	49.44	53.80	55.49	58.31
HU	11.83	24.37	28.87	44.79	59.58	67.61	73.10	74.23	76.20

başkaca normalizasyon algoritmaları ile çok daha iyi sonuç alınabileceği sunulan deneysel çalışmalardan görülmektedir.

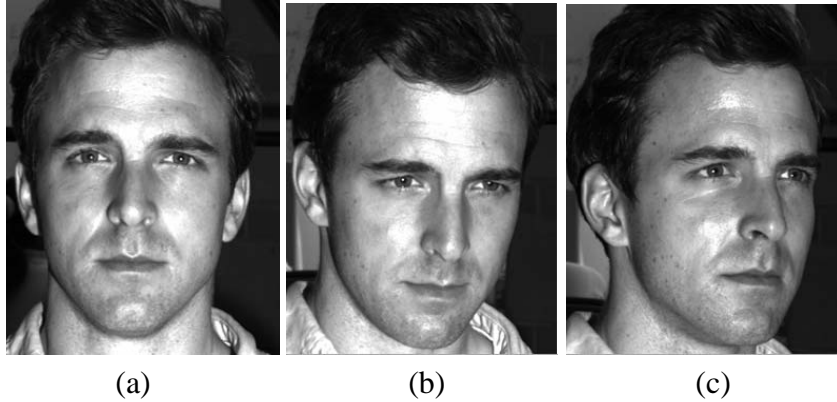
- Önerilen yöntem hem *Yale B* [118] hem de *IMM* [107] yüz veri kümelerinde denenmiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçların kullanılan veri kümesinden bağımsız olduğu görülmüştür.

Önerilen yöntem sadece ön cepheden çekilmiş yüz görüntüleri için denenmiştir. Değişik pozlardaki yüzler için yöntemin genelleştirilmesi gelecek çalışmalar arasındadır. Deneysel çalışmalardan da görüleceği gibi, önerilen yöntemle klasik *AGM*'nin hizalama başarımı farklı aydınlatma koşulları söz konusu olduğunda bile oldukça yüksektir.

7. POZ DOĞRULTMA VE POZ SENTEZLEME

Yüzdeki poz değişimi yüz tanıma sistemlerinin başarımını etkileyen en büyük problemlerden biridir. Bu çalışmada tam karşıdan çekilmiş, tek bir giriş görüntüsünden, o kişinin farklı pozlara sahip görüntülerini sentezleyen bir yöntem tanıtılmaktadır. Genellikle yüz tanıma sistemleri ya tam karşıdan çekilmiş yüz görüntülerinde çalışmakta ya da belirli pozlara sahip yüz görüntülerinde çalışabilmektedir. Fakat gerçek hayatta varsayılan yüz pozlarından farklı bir yüz sisteme giriş olarak gelebilmekte, bu ise tanıma başarımını çok büyük oranda etkileyebilmektedir.

Yüz tanıma/modelleme problemlerinde genel yaklaşım eğitim kümesinde yer alan bireylerin olabildiğince fazla poz, ifade, aydınlatma v.b. değişimlerini gösteren örnekleri kullanarak bir yüz uzayı kurmak ve kurulan model yardımıyla eğitim kümesinde yer almayan yüzler ve/veya yüzlere ait farklı varyasyonlarını tanımaya ya da modellemeye çalışmaktır. Bu tür bir yaklaşımda en büyük zorluk eldeki verilerin tüm yüz uzayını genelleyecek özellikte olduğu varsayımını yerine getirmektir. Gerçek hayatta her bir birey için, o bireye ait tüm yüz değişimlerini gösteren yeter sayıda örnek oluşturmak neredeyse imkansızdır (örn: farklı pozlardaki tüm yüz görüntüleri). Yeter sayıda örneğin (gözlemin) olmaması, kurulan model/uzayın o örneği tam olarak modelleyememesi sonucunu doğurmaktadır. Şekil 7.1’de aynı



Şekil 7.1. Üç farklı pozdaki yüz görüntüsü.

kişiyeye ait farklı pozlarda çekilmiş yüz görüntüleri gösterilmektedir. Dikkat edilirse yüz ifadesi ve aydınlatma her üç adet yüz için sabit olmasına karşın poz değişimi yüz bilgisi üzerinde büyük bir değişime sebep olmaktadır. Düzlem dışı bir dönme, üç boyutlu ($3B$) özel bir örüntüye sahip olan yüzün bazı noktalarını görünmez hale getirebilirken, bir önceki pozda görünmeyen bazı detayların ortaya çıkarmasına sebep olabilmektedir. Şekil 7.1.a'daki gibi, tam karşıdan çekilmiş yüzlerle kurulan bir yüz uzayına, Şekil 7.1.b veya Şekil 7.1.c'deki bir yüz iz düşürüldüğünde, kurulan modelde poz değişimine dair herhangi bir temel bileşen olmadığı için oldukça hatalı sonuçlar elde edilecektir. Gerçek zamanlı yüz tanıma sistemlerinde yüksek başarımla elde edebilmek için yüz saptama modülünün, mümkün olan en uygun pozunu belirlemesi, öznelikleri çıkartması ve tanıma modüllerine göndermesi gerekir. Bu ise yüz saptandıktan sonra, yüze ait önemli noktalarının akan görüntü üzerinde sürekli takip edilmesi ve eğitim kümesindeki görüntülere en yakın bakış açısı elde edildiğinde sorgulamanın yapılmasını gerektirir. Bu tür bir yüz izleme sisteminin oluşturulabilmesi için poz değişimlerine karşı gürbüz bir yüz saptama/modelleme yöntemine ihtiyaç vardır. Yüz önemli noktaları doğru bir şekilde bulunabilirse, bir önceki bölümde detayları verilen bükme yöntemi ile poz değişimini tam karşıdan bakar hale doğrultmak mümkün olacaktır.

Poz değişiminden bağımsız, iki boyutlu ($2B$) yüz saptama/hizalama konusunda yapılmış daha önceki çalışmalar incelendiğinde genel yaklaşımın her bir poz için farklı bir model kurmak ve uydurma (fitting) esnasında uygun model seçilerek arama işlemini gerçekleştirmek şeklinde olduğu görülmektedir. Bu tür yöntemlerde yüz hizalama modülüne giriş görüntüsü verilmeden önce, bakış açısı saptama modülü yardımı ile yüze ait poz saptanmakta ve bu poza en yakın yüz altuzayı seçilerek yüz hizalama işlemi yapılmaktadır. Birden fazla alt modeller arasında geçiş yapılarak poz saptamak hem çok maliyetli hem de her bir alt yüz uzayının oluşturulması için her bireyin mümkün olduğunca farklı pozlardaki görüntülerine ihtiyaç duyulmaktadır.

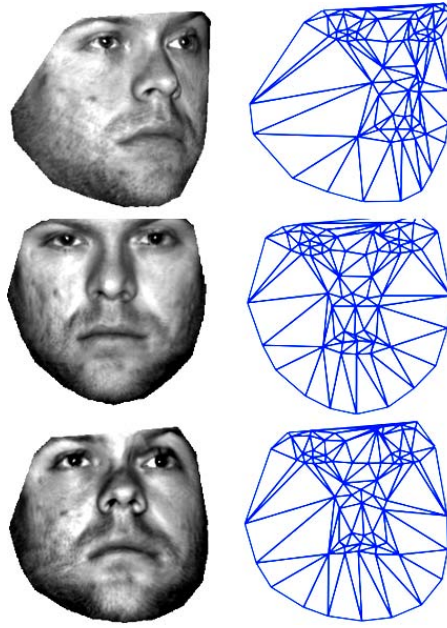
Bilgisayarla görü teorisine göre herhangi bir nesnenin hassas $3B$ geometri bilgisini elde edebilmek için en az üç adet o nesneye ait görüntüye ihtiyaç duyulur. Tek bir görüntüde $3B$ geometriyi bütünüyle kuracak yeterli bilgi bulunmamaktadır. Gerçek hayatta, her kişinin üç adet görüntüsüne çoğu zaman sahip değiliz. Blanz [62] ve Vetter'in [63] önerdiği bozulabilir model uydurma yöntemiyle ($3DMM$), $3B$ yüz verilerinden oluşan

eğitim kümesiyle kurulan model yardımıyla $2B$ tek bir görüntüden özgün pozlar elde edilebilmektedir. Fakat bu ve benzeri $3B$ yaklaşımların en büyük problemi hesaplama maliyetlerinin çok yüksek olmasıdır. Örneğin; Blanz ve Vetter'in yönteminde $3B$ uydurması için gerekli süre yaklaşık olarak 5 dakika civarındır [62] [63]. Bu tür bir hesaplama maliyeti gerçek zamanlı sistemlerde benzer yaklaşımların kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Bunun yanında $3B$ yüz tarama için özelleşmiş $3B$ tarayıcılara ihtiyaç olması ve bu tür donanımların hem çok maliyetli hem de yeterli çözünürlükteki $3B$ veri için tarama süresinin mevcut teknolojiyle oldukça uzun sürmesi $3B$ yaklaşımların olumsuz taraflarıdır.

Bu çalışmada [63]'de tanıtılan ve oldukça maliyetli olan $3B$ bozulabilir model benzeri bir yaklaşım için uydurma (fitting) modelini $2B$ verideki poz değişimlerinin basit bir modeli çıkartılarak çok daha hızlı ve etkin bir yakınsamanın sağlanabileceği gösterilmeye çalışılmıştır. Yöntemin oluşturulmasındaki temel düşünce poz değişiminde asıl değişimin doku değil, şekil olduğudur. Vetter ve Poggio'nun [119]'te tanıtılan doğrusal-nesne-sınıfı yöntemi ve bu yöntemin daha sonraki versiyonlarının 45 – 90 derece gibi poz değişimlerinde oldukça kötü sonuçlar ürettiği görülmektedir. Ayrıca 0 – 45 derecelik poz değişimlerinde derinlik bilgisi fazlaca hissedilmediği için sadece $2B$ görüntüler modellenerek yeni bakış açıları ve eğitim kümesindekilerden farklı pozlar sentezlemek mümkün olduğu görülecektir.

Bu çalışmada amaç, var olan karmaşık yüz poz sentezi yöntemleri yerine oldukça basit ve örnek tabanlı çalışan bir yöntemi geliştirmektir. Var olan yüz poz sentezi yöntemleri incelendiğinde genellikle $3B$ bilgisine ihtiyaç duyulduğu görülecektir. Oysaki ± 45 düzlem içi ve düzlem dışı yüz pozlarının sentezlenmesinde $3B$ bilgisi kullanmaksızın, sadece basit doğrusal bükme ve yüz şekil bilgisini oluşturan noktaların uyarlanırlar olarak bozulması ile farklı poza sahip yüzler belirli bir yakınsamayla sentezlenebilir.

Yüz belirli bir açıyla sağa/sola veya yukarı/aşağı baktığında, yüz şeklinden bağımsız olarak yüzü oluşturan doku üçgenleri yaklaşık olarak aynı açısal yolu alırlar. Bu ise yüzü oluşturan doku üçgenlerinin belirli bir kurala göre deforme olması, ölçek değiştirmesi ve/veya ötelenmesi anlamına gelir. Eğitim kümemizdeki yüzlere ait doku üçgenlerinin poza göre nasıl bir değişim yaptığı şekil bilgisini oluşturan noktaların hareketi referans alınarak modellenenebilir. Bu noktalar üzerine Delaunay üçgenleri oluşturulduğuunda poz değişimi modellenenebilmektedir. Farklı pozlarda yüz şekil ve



Şekil 7.2. Yüz poz değişimi: a)Yüz dokusu, b)Yüz önemli noktaları üzerine çizilen tel-örgü üçgenleri.

doku bilgisinin nasıl değiştiğini Şekil 7.2.a ve Şekil 7.2.b'ye bakarak anlayabiliriz. Dikkat edilirse üç farklı pozdaki en büyük değişimin yüz şekil bilgisini oluşturan tel-örgü üçgenlerinde olduğu görülecektir. Her üç pozda da yüzü oluşturan üçgen sayısı eşittir, çünkü yüz üzerindeki önemli noktaların sayısı aynıdır. Pozdaki değişimle üçgenler ölçek ve şekil değiştirmekte ve buna bağlı olarak dokuyu oluşturan beneklerde ise ara değerlendirme yöntemi ile değişmektedir. Her bir pozdaki doku bilgisi alınıp referans bir yüze, örneğin; tam karşıdan bakan yüze ait tel-örgünün üzerine yeniden kurulursa yaklaşık olarak benzer ve tam karşıdan bakan bir yüz görüntüsü oluşturduğu görülecektir.

İki boyutlu bir yüz görüntüsü üzerinde sadece şekil deformasyonu yapılarak farklı pozlar elde edilebileceği anlamına gelmektedir. Poz sentezindeki en büyük zorluk yüzün poz değişimi nedeniyle yüzdeki bazı bölgelerin bir kısmı veya tamamının görünmez (self-occlusion) hale gelmesidir. O bölgelerdeki üçgenler her ne kadar ihmal edilecek kadar küçültülmüş olsa da, bu gibi durumlarda sentezlenen yüzde yapay çıkıntı/kenarların oluşmasına neden olabilmektedir.

Modellenmeye çalışılan yüzlerde olası tüm poz değişimleri sentezlenip modellenirse, bu şekilde elde edilen *AGM* poz değişimlerinden bağımsız hale getirilmiş olur. Bu bölümde, geliştirilen Pozdan Bağımsız *AGM* (*PB – AGM*) tanıtılacaktır.

Çalışmamızda sadece 2B yüz görüntüleri kullanılmıştır. Yüzün 3B şekli hakkında bir ön bilgi kullanılmamıştır. Önerdiğimiz bu yöntemde, yüz tanıma ve hizalamanın bilinen zorluklarından biri olan poz değişimi problemi üzerinde durulmuştur. Fakat önerdiğimiz yöntem sadece yüz hizalama problemi için özel bir yaklaşım değildir ve başkaca nesnelerin modellenmesinde de kullanılabilir genel bir yaklaşımdır.

Yapılan deneysel çalışmalar önerdiğimiz yöntemin başlangıçta öngördüğümüz sonuçları doğrulamıştır. Önerilen yöntem bilinen modelleme yaklaşımlarına göre uygulanabilirlik ve performans olarak öne çıkmaktadır.

PB – AGM'nin oluşturulurken, yüz tanıma/modelleme problemindeki ana değişimler belirlenmeye çalışılmış ve her bir değişim mümkün olduğunca birbirinden ayrıştırılmaya çalışılmıştır. Yüz görünümü üzerinde etkili olan ana değişimler:

- Kişiye ait özgün yüz dokusu (identity)
- Kişiye ait özgün yüz şekli (shape)
- Yüz şekil bilgisini özgün yüz şekline göre deforme eden poz değişimi (pose)
- Yüz doku ve şekil bilgisini ağız, göz gibi bileşenler etrafında değiştirebilen ifade değişimi (expression)
- Yüz doku bilgisini oluşturan benek değerlerini bozucu bir şekilde değiştirebilen ışık değişimi (illumination)

Şekil 7.3'te farklı pozlardaki yüzlerin karşıdan bakan hale dönüştürülmüş halleri gösterilmektedir. Şekil 7.3'te gösterilen yüzlerde bazı gerçek dışı deformasyonlar görülmektedir. Bunun nedeni gerçek poz şeklini oluşturan noktaların belirlenmesindeki hatadır. Kullanılan nokta sayısı, doku üzerinde kurulan üçgen sayısının az veya çok olmasını etkilediği için sentezlenen görüntülerin kalitesinde nokta sayısı da etkilidir. Detaylandırılması istenilen yerlerde çok daha fazla nokta kullanılırsa poz sentezleme sonucu gerçek görüntüye yaklaşacaktır. Şekil 7.3'teki doğrultulmuş yüzler dikkatle incelendiğinde farklı pozlardaki yüzlerin karşıdan bakan bir hale dönüştürüldüğü görülecektir. Fakat özellikle gözlerdeki bakış yönünün eski pozdan izler taşıdığı görülmektedir. Bunun nedeni yukarıda bahsettiğimiz detaylandırma işleminin gözler için yeterince yapılmadığıdır. Göz bebekleri için yüz şekil bilgisinde sadece bir nokta koyulmuştur. Göz bebekleri için daha fazla nokta



Şekil 7.3. Farklı pozlardaki yüzlerden karşıdan bakan yüzlerin elde edilmesi.

kullanılırsa gözü temsil eden üçgen sayısı artacağı için bozulma yeteneği çok daha artar. Böylece gözlerdeki doğrultma başarısı artacaktır. Şekil 7.4'te yaklaşık olarak karşıdan bakan (+5 *derece*) bir yüze ait önemli noktalar ve aynı yüze ait farklı bir poz için (+45 *derece*) yüz önemli noktaları görülmektedir. Yüzdeki önemli noktaların poz değişimi ile nasıl bir değişim gösterdiği, her bir noktanın hareket vektörleri çıkartılarak bulunabilir. Hareket vektörleri hesaplanırken aynı kişinin yüz şekil ölçeği dikkate



Şekil 7.4. Tam karşıdan bakan $2B$ yüz görüntülerinden farklı poz sentezleme.

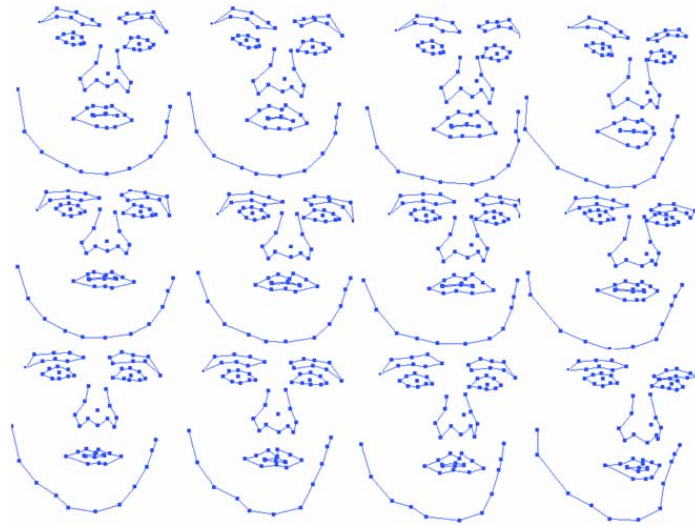
alınarak, bağıl hareket miktarı hesaplanmaktadır. Bu sayede yeni bir kişiye ait çok farklı bir yüz şekil verildiğinde, hesaplanan bağıl hareket miktarları kullanılarak, o yüz için poz sentezi yapılabilir. Yukarıda sıralanan yüz değişimlerini fiziksel olarak

birbirinden ayırtırmak mümkün olmasa da, kurulacak model üzerinde bu değişimleri birbirinden olabildiğince ayırtırmak pratik olarak olasıdır.

Özellikle yüz verisi için bunu gerçeklemek, tüm yüzlerin $3B$ özellikler bakımından benzer özelliklere sahip olması nedeniyle mümkündür. Poz değişimini göz önüne alacak olursak; sağa dönen herhangi birinin yüz görünümü, tam karşıdan bakan bir kamera için, sağ taraftaki yüz dokusunu oluşturan üçgenlerin küçülmesi ve benzer bir şekilde deforme olmasını sağlarken, yüzün sol tarafının ise daha görünür olmasını sağlayacaktır. Aynı poz değişimi yaklaşık olarak her bireyin yüz görünümünde benzer bir değişikliğe sebep olur. Poz değişimleri bir önceki bölümde anlatıldığı gibi bağıl olarak hesaplanır ve farklı bireylere ait tam karşıdan çekilmiş yüz şekil bilgisi hesaplanan bağıl poz değişimi kullanılarak deforme edilerek poz değişimleri sentezlemek mümkündür.

$2B$ görüntülerden doğrusal bükme ve hizalama yardımıyla yüz poz doğrultmaktaki birincil amacımız, yüz saptama aşamasında önemli noktaları belirli bir doğrulukla bulunan yüzlerden tanıma amaçlı öznitelikler çıkartmadan önce kurulan poz deformasyon modeli yardımıyla eğitim kümesindeki bakış açısına yüzü doğrultmaktır. Bu işlemi ön-işlem olarak kabul edebiliriz. Eğitim kümesindeki yüksek karşıtlığa sahip görüntüler kullanılarak kurulan yüz uzayına, test görüntüsü olarak aynı özelliklere sahip, fakat düşük karşıtlığa sahip bir yüz izdüşürüldüğünde, modelimiz doğru olmasına rağmen tamamen hatalı öznitelikler elde ederiz. Bu problemin çözümünde yapılması gereken yüz uzayına izdüşürülecek görüntülerin mümkün olduğunca eğitim kümesindeki yüzlere benzer hale getirmektir. Aynı şekilde sadece karşıdan bakan yüzlerden oluşturulmuş yüz uzayına, farklı pozdaki bir yüz izdüşürülüp, elde edilen öznitelik vektörlerle yüzü geriçattığımızda tümüyle hatalı bir yüz elde edilecektir.

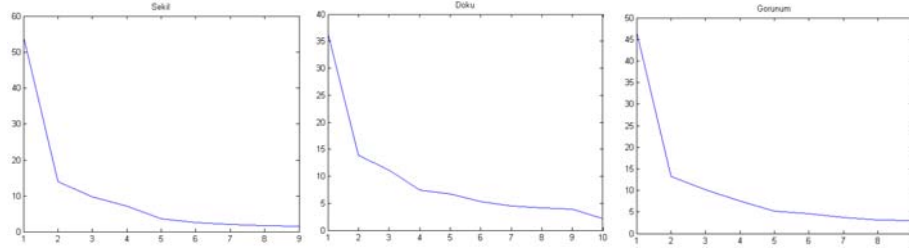
Bu problemin çözümü için akla gelen ilk çözüm yüzdeki önemli iki noktaya göre (örn: göz bebekleri) tüm görüntülerin hizalanması olabilir. Fakat bu tür bir hizalama kesilen yüzdeki yer değiştirme durumlarını çözmek dışında bir işe yaramayacağı açıktır. Çünkü poz değişimi çok daha karmaşık bir dönüşüme karşılık gelmektedir. Özellikle düzlem dışı ve düzlem içi dönmelerde, ± 30 dereceden büyük poz değişimleri olduğunda, yüzdeki karşıdan bakan yüzeye göre bozulma çok daha büyük olmaktadır. Bu yüzden, yüz önemli noktaları saptandıktan sonra poz doğrultma işlemi bir ön-işlem olarak kullanılabilir.



Şekil 7.5. Üç farklı kişinin tam karşıdan bakan yüz şekillerinden sentezlenmiş farklı pozlarına ait yüz şekilleri.

Yale B [118] veri kümesinde yer alan görüntülerin el yordamı yüze ait 73 adet önemli noktaları işaretlenmiştir. 73 adet yüz önemli noktalarının yüz bileşenlerine göre dağılımı şu şekildedir: 16 nokta ağız, 12 nokta burun, 9 nokta sağ göz, 9 nokta sol göz, 8 nokta sol kaş, 8 nokta sağ kaş ve 11 nokta çene yayı. Şekil 7.5’de üç farklı kişinin tam karşıdan bakan yüz şekillerinden sentezlenen farklı poz şekilleri gösterilmektedir. Şekil 7.5’deki tüm yüzler sentetik olarak elde edilmiş ve şekil sentezinde daha önceden başkaca bir kişinin poz değişim şekillerinden hesaplanan bağıl poz değişim katsayıları poz Şekil 7.5’de gösterilen üç kişinin tam karşıdan bakan yüz şekillerine uygulanarak elde edilmiştir. Yani poz sentezleme modülüne sadece tam karşıdan bakan yüz şekil bilgisi giriş olarak verilmiş ve tüm diğer pozlar sentezlenmiştir. Verinin yetersiz olduğu durumlarda eldeki verilerden yeni verilerin sentezlenmesi ve bu sentetik verilerde hesaplara katılması ile çok daha gürbüz modellerin oluşturulması amaçlanmaktadır. Buradaki varsayımımız elimizde her bir bireyin tam karşıdan bakan yüzlerinin olduğudur. Tam karşıdan bakan yüzler kullanılarak elde edilen modelin/uzayın sadece tam karşıdan bakan yüzlerle ait değişimleri modelleyecektir ve bu modelin farklı bir poza sahip bir yüz için sağlıklı sonuç vermesi mümkün değildir. Bu yüzden model kurulması aşamasında sentetik olarak elde edilen yüze ait yüz değişimlerinin de eklenmesinin bu tür değişimlerinde model içerisinde yer almasını sağlaması amaçlanmaktadır. *AGM*, önceden yüze ait önemli noktaların koordinatları saptanmış eğitim görüntüleri ile eğitilerek kurulan model yardımı ile yeni insan yüzleri

sentezlenebilmektedir. İki resmin eşlenmesi işlemi ise giriş görüntüsü ile sentezlenen görüntü arasındaki farkı minimize eden model parametrelerini bulmaya çalışır. Eğitim kümesindeki tüm insan yüzlerinin önemli noktaları elle belirlenmiştir.



Şekil 7.6. Kurulan yüz uzayındaki şekil, doku ve görünüm modeline ait özdeğerler.

Eğitim kümesindeki tüm yüzleri $\{(S, T)\}$ şeklinde ifade edebiliriz:

$$S_i^0 = ((x_{i,1}, y_{i,1}), (x_{i,2}, y_{i,2}), \dots, (x_{i,K}, y_{i,K})) \in R^{2K} \quad (7.1)$$

S_i^0 , i . kişinin tam karşıdan çekilen yüz imgesinde işaretlenmiş, K adet önemli noktadan oluşan şekil vektörüdür. K çalışmamızda 73 olarak belirlenmiştir. Her bireye ait S^0 şekil vektöründen her poz için ayrı ayrı hesaplanmış olan şekil oran vektörüyle ağırlıklandırılarak p farklı poza ait S_i^p şekilleri sentezlenir. Aynı kişinin tam karşıdan ve p pozundaki iki görüntüsüne ait şekil vektörleri arasında tanımladığımız şekil oran vektörü,

$$r_p(S^p, S^0) = \left(\left(\frac{x_{p,1}}{x_{0,1}}, \frac{y_{p,1}}{y_{0,1}} \right), \dots, \left(\frac{x_{p,K}}{x_{0,K}}, \frac{y_{p,K}}{y_{0,K}} \right) \right) \quad (7.2)$$

biçiminde ifade edilir. Şekil-oran vektörü kullanılarak, farklı bir kişinin tam karşıdan elde edilmiş görüntüsüne ait şekil vektöründen, kişinin görülmemiş p pozuna ait şekil vektörü yaklaşık olarak elde edilebilir:

$$\hat{S}_j^p = r_p S_j^0 \quad (7.3)$$

AGM şekil altuzayı, tam karşıdan bakan ve sentetik olarak elde edilen p adet $\{S_i^0, (\hat{S}_i^{pk}; k = 1, 2, \dots, p)\}$ şekil vektörü ile temel bileşen analizi kullanarak, $S = \bar{S} + P_s \cdot s$ şeklinde elde edilir. Burada P_s kovaryans matrisinin en yüksek değerli k adet özdeğerine karşılık gelen k adet öz vektördür. Eğitim kümesindeki tüm yüzlerin şekilleri ortalama şekle deforme edildikten sonra şekillere karşılık gelen dokulardan doku altuzayı, $T = \bar{T} + P_t \cdot t$ şeklinde oluşturulur. *AGM* altuzayında herhangi bir şekil $s = P_s^T (S - \bar{S})$ ile doku ise $t = P_t^T (T - \bar{T})$ İnsan yüzünün şeklindeki bir değişim aynı

anda yüz dokusunda da bir değişime neden olmaktadır. *AGM* altuzayı hem şekil S_s hem de doku S_t hem de doku S_t alt uzaylarından oluşturulmaktadır. Herhangi bir görüntü için görünüm G , şu şekilde ifade edilebilir;

$$A = \begin{pmatrix} \Lambda_s \\ t \end{pmatrix}. \quad (7.4)$$

Λ şekil parametrelerini ağırlıklandırılan köşegen matristir. *AGM* görünüm alt uzayı A , *TBA* kullanılarak, $A = P_a \cdot a$ şeklinde elde edilir. Burada P_a görünüm alt uzayı A 'daki değişimi ifade eden m adet temel bileşendir. *AGM* görünüm altuzayında herhangi bir görünüm alt uzayı $a = P_a^T A$ şeklinde elde edilmektedir.



Şekil 7.7. Tam karşıdan çekilmiş yüzlerden kurulan modelin ilk üç bileşenin ortalama yüze göre değişimi.

Şekil 7.6'de, kurulan poz değişimleri eklenmiş yüz modeli için oluşturulan şekil, doku ve görünüm modellerinde %95'lik toplam değişime karşılık gelen en yüksek özdeğerler gösterilmiştir. Özellikle şekil uzayına eklenecek ekstra sentetik şekiller sayesinde çok daha karmaşık (yan profil, yüksek düzlem dışı dönme vb.) pozlarda modellenenebilir hale gelecektir. Bu bölümde, şekil değişim uzayının sentetik pozlarla zenginleştirilmesinin poz saptama ve pozdan bağımsız yüz hizalama için yeterli olduğu fikri tanıtılmaya çalışılmıştır.

Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'da sadece tam karşıdan bakan yüzlerden ve farklı poz verisiyle zenginleştirilmiş yüz görünüm modellerine ait temel bileşenlerin modelleme

yetenekleri gösterilmeye çalışılmıştır. Şekil 7.7’de tam karşıdan çekilmiş yüzlerden kurulan modelin en yüksek değişime sahip ilk üç bileşenin ortalama yüze göre değişimi $-2, 0, +2$ ağırlıkları ve o bileşene ait özdeğer $(\pm 2\lambda_i)$ kullanılarak sentezlenmiş yüz görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 7.8. Farklı pozlardaki yüz şekil verileriyle zenginleştirilmiş modelin en yüksek değişime sahip ilk üç bileşenin ortalama yüze göre değişimi.

Şekil 7.8’da ise farklı pozlardaki yüz şekil verileriyle zenginleştirilmiş yüzlerden kurulan modelin en yüksek değişime sahip ilk üç bileşenin ortalama yüze göre değişimi temel bileşenlerinin $\pm 2\lambda_i$ kadar ortalama yüzden sapması ile elde edilen yüz görüntüleri gösterilmektedir. Burada ki $\lambda_i, i.$ öz vektöre karşılık gelen özdeğeri göstermektedir.

Şekil 7.9’da ise kurulan poz değişimi anlamında zenginleştirilmiş yüz modeli parametrelerinin $w = 3$ gibi bir ağırlık ile güçlendirilip rasgele olarak değiştirildiğinde sentezlenen yüzler gösterilmektedir. Dikkat edilirse kurulan modellerle çok farklı poz ve kimlikteki yüzlerin geri çatılabildiği görülmektedir. Eğitim kümemizin çok küçük olmasına rağmen, eğitim kümemizde yer almayan yüzlerin sentezlenebiliyor olması yöntemin genelleme başarımı açısından olumludur. Bireyler arasındaki yüz şekil ve doku değişimi modelin içinde belirli temel bileşenlere karşılık gelecek şekilde modellenmiş olması, eğitim kümemizde sadece tam karşıdan bakan hali olan yüzlerin bile belirli bir yakınsamayla farklı pozlarının bulunabilmesini sağlamaktadır.

Yüz tanıma/modelleme problemlerinde genel yaklaşım, eğitim kümesindeki verilerin



Şekil 7.9. Kurulan yüz uzayındaki ilk 5 temel bileşene ait katsayıların rastgele değiştirilmesi ile elde edilmiş sentetik yüzler.



Şekil 7.10. Eğitim kümesinde sadece tam karşıdan bakan yüzler kullanılan yüzler için önerilen yüz model hizalama sonuçları.

mümkün olduğunca tüm yüz uzayını genelleyebilecek özellikte olmasıdır. Buradaki

Çizelge 7.1. Yüz hizalama sonuçları.

	<i>Klasik AGM</i>	<i>PB – AGM</i>
<i>Pt. – Pt. (Hata)</i>	12.32 ± 18.4	3.66 ± 4.68

temel zorluk, gerçek hayatta her bir bireyin, tüm yüz değişimlerini gösteren yeter sayıda örnek olmamasıdır. Yeter sayıda gözlemin olmaması kurulan modelin genelleme yeteneğinin yetersiz kalmasına sebep olur.

Bu çalışmanın ana katkısı; yüz modeli kurulurken, eğitim kümesindeki yüz şekilleri kullanılarak, şekil verilerinin sentetik olarak zenginleştirilmesi ve bu sentetik şekillerden sentetik yüzler oluşturularak poz değişimlerini de içeren gürbüz bir model oluşturulmasıdır. Deneysel çalışmalarda hem kurulan modelin poz değişimi ve yüz modelleme kapasitesi test edilmiş hem de klasik AGM yöntemi başarımlı olarak karşılaştırılmıştır. Deneylerde *Yale B* veri kümesindeki tüm farklı bireylerin (10 kişi) görüntüleri kullanılmıştır. Her kişinin 20 farklı aydınlatma ve 8 farklı pozda çekilmiş görüntüsünün yüze ait önemli noktaları el yordamı ile işaretlenmiştir. Her bireyin tam karşıdan aydınlatılmış ve tam karşıya bakan pozunu ile aralarından rastgele seçilmiş kişinin tüm pozları yüz modeli oluşturulurken eğitim amaçlı kullanılmıştır. Geriye kalan tüm pozlarla, poz test kümesi, geriye kalan tüm farklı aydınlatılmış yüzlerle ise aydınlatma test kümesi oluşturulmuştur. Çizelge 7.1’de bu test kümeleri için hizalama sonuçları gösterilmiştir. Şekil 7.10’de ise, önerilen yöntemin farklı pozlardaki test görüntüleri için ürettiği sonuçlar gösterilmiştir.

Şekil 7.7’de sentetik poz değişimleriyle güçlendirilmiş yüz modeli için oluşturulan şekil, doku modellerinde en yüksek özdeğerlere karşılık gelen öz vektörler gösterilmiştir. Şekil 7.8’de sadece tam karşıdan bakan yüzlerden ve farklı poz verisiyle zenginleştirilmiş yüz görünüm modelinin modelleme yeteneği gösterilmeye çalışılmıştır. Şekil 7.8’deki yüzler, kurulan model parametrelerinin $w = 3$ gibi bir ağırlık ile güçlendirilip rastgele olarak değiştirilmesiyle sentezlenmiştir. Kurulan model ile çok farklı poz ve kimlikteki yüzlerin geri çatılabildiği görülmektedir.

Eğitim kümesinde sadece tam karşıdan bakan hali olan yüzlerin bile belirli bir yakınsamayla farklı pozlarının bulunabilmesi önerilen yöntemin genelleme başarımını göstermesi açısından önemlidir.

7.1 Çok Çerçevesel Hizalanmış Görüntülerde İyileştirme

Çok çerçevesel görüntülerde ve videolarda görüntü onarma ve görüntü iyileştirme işlemleri farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemlerden biri de tüm çerçevelerde yer alan nesnenin tek tek hizalanıp daha sonra referans bir şekile bükülmesiyle elde edilen görüntüler üzerinden iyileştirme yapmaktır (Bkz. Şekil 7.11.b. Şekilden arındırılmış nesneye ait görüntülerde poz, ölçek ve dönme gibi değişimler ortadan kaldırılmış olduğu için birden fazla çerçevedeki bilgileri bir araya getirerek onarma ve iyileştirme amaçlı kullanmak mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada çoklu çerçevelerde yer alan nesnelerin şekilden bağımsız hale getirilmesi şu şekilde yapılmaktadır;

- Görüntülerdeki nesnenin (yüz, plaka, vb.) önemli noktaları saptanır.
- Parçalı-doğrusal bükme yöntemi ile çerçevelerdeki önemli noktaları işaretlenmiş nesne referans olarak belirlenen şekile bükülüp, şekilden bağımsız hale getirilerek tüm ilgin değişimler ortadan kaldırılır.

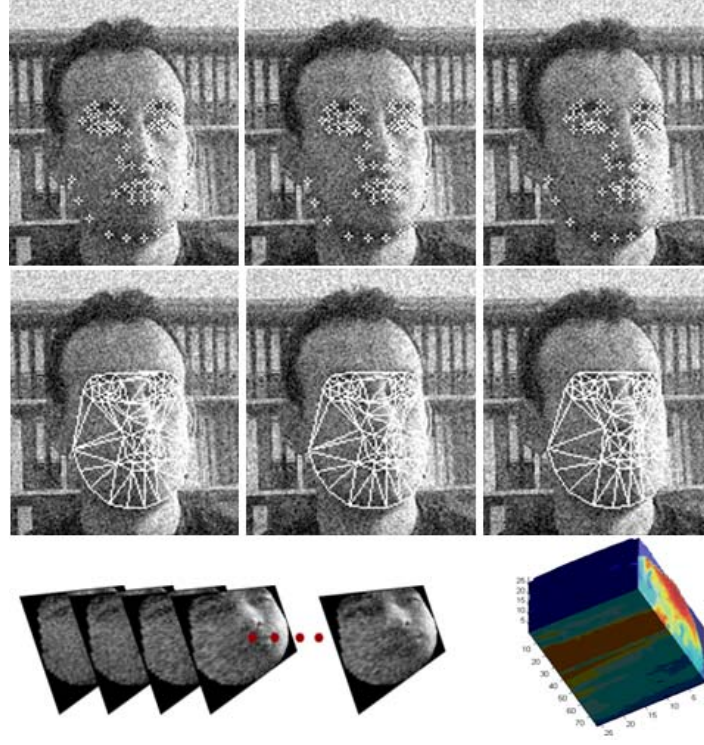
Bu işlemlerden sonra çoklu çerçevelerdeki nesnelere ait doku bilgileri eş boyutlu vektörler halinde, Şekil 7.11.c'de ki gibi ifade edilebilmektedir. Bu sayede, birbirinden farklı çerçeveler üzerinde her türlü görüntü füzyonuna dayalı iyileştirme/onarma yöntemi uygulanabilir hale gelmiş olmaktadır.

Bu çalışmada çoklu görüntülerdeki nesnelerin şekilden bağımsız hale getirilmiş iki boyutlu (2B) doku bilgileri bir araya getirilerek oluşturulan üç boyutlu (3B) bir veri gösterimi oluşturulmuş ve tüm iyileştirme ve onarma işlemleri Şekil 7.11.c'te gösterilen 3B veri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

7.1.1 Görüntü çerçevelerinin şekilden bağımsız hale getirilmesi

Çoklu çerçevesel görüntüler üzerinde iyileştirme işlemine başlanmadan önce tüm görüntülerin şekilden bağımsız hale getirilmesi gerekmektedir. Çerçeveler arasındaki her türlü ilgin değişimin ortadan kaldırılması ve bunlara ek olarak üzerinde çalışılan

nesnenin şekilden bağımsız hale getirilmesi, tüm görüntülerin referans bir şekle bükülmesi ile olmaktadır. Görüntülerin şekilden bağımsız hale getirilmesi işlemi bir çeşit normalizasyon işlemidir. Bükme yardımı ile yapılan bu normalizasyon işleminden sonra, şekilden arındırılmış görüntülere ait doku bilgisi üzerinde yapılan her türlü analiz ve iyileştirme amaçlı işlemler yüksek başarımla sağlanmaktadır.



Şekil 7.11. Hizalanmış ve üçgenlenmiş görüntü çerçevelerinden doğrusal bükme ile üç boyutlu yüz verisinin elde edilmesi.

Bükme işlemi veri kümesinde yer alan her çerçevede yer alan nesnenin şekil bilgisi otomatik ve/veya el yordamı ile işaretlenmekte ve bu önemli noktalara ait koordinat bilgileri bükme işleminde kullanılmak üzere saklanmaktadır. Tüm çerçeveler için, önemli noktalardan oluşan şekil bilgisi oluşturulduktan sonra noktalar üzerine üçgenlerden oluşan bir örgü (mesh) kurulur. Belirlenen referans şekil üzerine de aynı sayıda üçgenlerden oluşan örgü kurulduktan sonra tüm çerçevelerdeki üçgenler tek tek, referans şekildeki karşılık gelen üçgenlere, parçalı ilgin bükme yardımı ile dönüştürülür. Bükme işlemi s_0 ve s gibi iki örgü üzerinde tanımlanmış üçgenler üzerinde gerçekleştirilmektedir. Parçalı ilgin bükme işlemi s 'den s_0 'a doğru yapılmaktadır. s_0 örgüsündeki her üçgene s 'de karşılık gelen bir üçgen bulunmaktadır. Bu üçgenler arasında tekil bir bükme işlemi tanımlanır ve bu işlemler tüm üçgenler için ayrı ayrı uygulanır. Bükme işlemi kısaca şöyle hesaplanmaktadır:

- s_0 'daki her x beneğinin hangi üçgen içinde yer aldığını belirle,
- x beneğinin yer aldığı üçgenin s karşılık gelen üçgeni için bükme işlemini gerçekleştir.

Parçalı ilgin bükme işlemi $W(x)$ olsun. s_0 ise $x = (x, y)^T$ gibi s_0 referans şekil örgüsü içindeki benek olsun. Referans şekil örgüsü s_0 'daki her x beneği için $W(x)$ bükmeyi hesapla ve giriş görüntüsü I 'nın o bölgesi için benek değerini örnekle veya aradeğerleme yap. s_0 içindeki her benek mutlaka bir üçgenin içinde yer alacaktır. Bu üçgenleri oluşturan üç nokta $(x_i^0, y_i^0)^T$, $(x_j^0, y_j^0)^T$ ve $(x_k^0, y_k^0)^T$ olsun. Giriş görüntüsünde tanımlı şekil örgüsündeki karşılık gelen üçgenin köşe noktaları ise $(x_i, y_i)^T$, $(x_j, y_j)^T$ ve $(x_k, y_k)^T$ olsun. Bu aşamada, $x = (x, y)^T$ noktasının referans şekil örgüsü s_0 'daki $(x_i^0, y_i^0)^T$, $(x_j^0, y_j^0)^T$ ve $(x_k^0, y_k^0)^T$ 'in oluşturduğu üçgende yer aldığı varsayımı altında, x beneği aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$x = (x, y)^T = (x_i^0, y_i^0)^T + \alpha[(x_j^0, y_j^0)^T - (x_i^0, y_i^0)^T] + \beta[(x_k^0, y_k^0)^T - (x_i^0, y_i^0)^T] \quad (7.5)$$

denklem (7.5)'teki α ve β şu şekilde ifade edilebilirler,

$$\alpha = \frac{(x - x_i^0)(y_k^0, y_i^0) - (y - y_i^0)(x_k^0, x_i^0)}{(x_j^0 - x_i^0)(y_k^0, y_i^0) - (y_j^0 - y_i^0)(x_k^0, x_i^0)} \quad (7.6)$$

$$\beta = \frac{(y - y_i^0)(y_k^0, x_i^0) - (x - x_i^0)(y_k^0, y_i^0)}{(x_j^0 - x_i^0)(y_k^0, y_i^0) - (y_j^0 - y_i^0)(x_k^0, x_i^0)} \quad (7.7)$$

Buna göre parçalı ilgin bükme ise şu şekilde ifade edilebilir;

$$W(x; p) = (x_i, y_i)^T + \alpha[(x_j, y_j)^T - (x_i, y_i)^T] + \beta[(x_k, y_k)^T - (x_i, y_i)^T] \quad (7.8)$$

Denklem (7.8)'teki $(x_i, y_i)^T$, $(x_j, y_j)^T$ ve $(x_k, y_k)^T$ ise s şekil örgüsü içinde yer alan üçgenin köşe noktalarını ifade etmektedir. Denklem (7.6), (7.7) ve denklem (7.8) birleştirilerek ilgin bükme işlemini şu şekilde de ifade etmek mümkündür;

$$W(x) = (a_1 + a_2x + a_3y + a_4 + a_5x + a_6y)^T \quad (7.9)$$

Buradaki a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 ve a_6 bükme parametreleri olarak isimlendirilmektedir. Bu parametrelerin her benek için hesaplanmasına gerek yoktur, her üçgen için hesaplanmış olması yeterlidir. Parçalı ilgin bükmenin hesaplama adımları aşağıda belirtildiği gibidir.

1. s şekil örgüsü içindeki her $(x_i, y_i)^T$ 'yi hesapla.

2. a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 ve a_6 parametrelerini her üçgen için hesapla.
3. s_0 şekil örgüsü içindeki her x benek değerinin hangi üçgen içinde yer aldığını ve o üçgen için hesaplanmış ilgili a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 ve a_6 bükme parametrelerini belirle.
4. Son olarak denklem (7.9)'i kullanarak $W(x)$ 'i hesapla.

Amaca yönelik olarak tercih edilebilecek bir çok bükme yöntemi bulunmaktadır. Bu çalışmada, sıklıkla kullanılan en basit bükme yöntemi olan doğrusal ilgin bükme yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem hakkında daha fazla bilgi için [90] ve [48]'deki kaynaklara başvurulabilir.

7.1.2 Çerçeve ortalamasına dayalı iyileştirme

Çoklu çerçeve görüntü iyileştirme, eğer çerçeveler tek bir referansa göre hizalanmış ise çerçevelerin ortalaması alınarak gerçekleştirilebilir. Video ve benzeri çok çerçeveli görüntülerde yer alan toplamsal gürültünün bastırılması için çerçeve ortalaması yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Fakat ortalama almaya dayalı iyileştirme yöntemleri gürültüyü başarı ile bastırırken, aynı zamanda görüntüyü de bulanıklaştırmaktadır. Bu yüzden görüntüde oluşan bulanıklığı ortadan kaldırmak için ek işlemler uygulanması gerekmektedir. Çoklu çerçevelerde ortalama işlemi aşağıda gösterildiği gibi ifade edilebilir;

$$\bar{I}_f(x, y) = \frac{1}{L} \sum_{z=0}^{L-1} f_{xy}(I(x, y, z)) \quad (7.10)$$

Denklemdaki I_z çoklu çerçeve dizisindeki her bir çerçeveyi göstermektedir. Görüntü dizisinin boyu L ile gösterilmiştir, yani dizide L adet çerçeve yer almaktadır. f_{xy} ise her bir I çerçevesine uygulanan uzamsal bulanıklık giderme fonksiyonudur. Çerçeve ortalaması olan görüntü \bar{I} olarak gösterilmiştir. Denklem (7.5)'teki f_{xy} , amaca yönelik olarak Wiener süzgeci, ortanca süzgeçler, difüzyon süzgeçler vb. gibi çok farklı süzgeçler olabilir. En temel yöntemlerden olan çerçeve ortalamasının sonuçları deneysel çalışmalarda tartışılmıştır.

Çerçeve ortalaması görüntülerde yer alan toplamsal gürültüyü bastırırken, Wiener benzeri bulanıklık giderme süzgeci ise noktasal yayılım fonksiyonuna bağlı bulanıklığı gidermeye çalışmaktadır. Benzer şekilde ortanca süzgeç ve difüzyon süzgeçleri gibi doğrusal olmayan gürültü giderme süzgeçleri yardımı ile görüntüdeki detaylar ve

değişimin yüksek olduğu ayrıt benzeri bölgeleri iyileştiren çözümlerde benzer şekilde uygulanabilir.

Görüntüdeki gürültüler bastırılmaya çalışılırken başka bir bozucu etki olan bulanıklaşmanın ortaya çıkması, çerçeve ortalaması benzeri yöntemlerin en önemli zorluklarından biridir. Çok çerçeveli görüntülerde ise bu probleme, hizalama ve karşılıklılandırma hatalarının eklenmesi ile işler çok daha karmaşık hale gelebilmektedir. Hizalama ve bükme hatalarının temel nedenleri arasında, önemli noktaların hatalı bir şekilde belirlenmesi ve bükme işleminde bu noktalar referans alınarak kurulan üçgenlerinde hatalı doku bölgelerini içermesidir. Bunlara ek olarak bükme işlemi bir çeşit geometrik bozmaya karşılık gelmektedir bu ise bükülmüş görüntülerde istenmeyen sentetik geometrik bozuklukların yer alma ihtimalinin olmasıdır. İlerleyen bölümlerde bu problemlere getirilen çözümler ve elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalarla gösterilmektedir.

7.1.3 Üç boyutlu anisotropik yayılım süzgeci

Anisotropic difüzyon süzgeçler gürültüyü bastırırken detayların korunabilmesi yönünde esneklik sağlayan süzgeçlerdendir. Bu özelliği sayesinde gürültüyü yüksek oranda bastırırken ayrıt benzeri yüksek geçişlerin olduğu bölgeleri ise yumuşatmamaktadır. Bu özelliğinden dolayı bu çalışmada hem çoklu çerçevelerde gürültüyü bastırmak hem de hizalamadan kaynaklı hataları düzeltebilecek ön bağımsız yayılım süzgeçlerinin özelleşmiş bir hali gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayan üç boyutlu (3B) yön bağımsız difüzyon süzgeçler aşağıdaki gibi ifade edilebilirler;

$$\frac{\partial}{\partial t}I(x, y, z, t) = \nabla \cdot [\phi(x, y, z, t)] \quad (7.11)$$

buradaki $I(x, y, z, t)$ çoklu çerçeveli görüntü dizisini göstermektedir. İfadede yer alan t çevrim (iterasyon) zamanını göstermektedir.

$$\phi(x, y, z, t) = c(x, y, z, t) \cdot \nabla I(x, y, z, t) \quad (7.12)$$

Denklem (7.12)'teki ϕ gerçekte fiziksel bir işlem olan yayılımın akış fonksiyonunu ifade etmektedir. ϕ akış fonksiyonu c ile gösterilen iletim parametresi ve görüntünün gradyan'ı ∇I ile kontrol edilmektedir. Burada yayılımın nasıl olacağı, κ akış sabiti ile kontrol edilmektedir. Gradyan değeri olan $|\nabla I|$ 'in değişimi ile akış ta değişmektedir. Bu bize akış üzerinde ciddi bir kontrol mekanizması sağlamaktadır. Denklem (7.11)

ve (7.12)'te gösterilen yayılım süzgeçlerinin bu özelliğinden dolayı iyileştirme ve onarma amaçlı bu süzgeçler sıklıkla tercih edilmektedir. Yüksek geçişlerin olmadığı homojen bölgelerde gradyan değeri $|\nabla I| \ll \kappa$ şeklinde olduğu için, o bölgelerde akış hızlanmaktadır. Bunun yanında ayırıt benzeri yüksek geçişlerin olduğu ve gradyan değerinin $|\nabla I| \gg \kappa$ olduğu bölgelerde her hangi bir yumuşama olmamaktadır. Yani κ , burada yumuşatma yapılıp yapılmamasını kontrol eden bir eşik değeri gibi davranmaktadır. Bu eşik değerine bağlı olarak yayılım süzgeci, görüntünün hangi bölgelerinin ne düzeyde yumuşatılacağına karar verir. Gürültü bastırma ve yumuşatma belirli bölgelerde yoğun olarak yapılırken, görüntünün belirli bölgelerinde de daha az uygulanmış olur. Bu yüzden SNR 'da anlamlı bir artış sağlanırken, ayırıtlarda beklenen bozulma gerçekleşmemiş olmaktadır.

Anizotropik süzgeçlerin bazı sorunları da bulunmaktadır. Şöyle ki, yayılım süzgeçlerinin, görüntü üzerindeki komşu benekler arasında bir çeşit kontrollü ortalama işlemine karşılık düştüğünü söyleyebiliriz. Bu özelliğinden dolayı yayılım süzgeçlerinde, denklem (7.11) ve (7.12)'te t ile gösterilen çevirim sayısı arttıkça, çıkan sonuçta giderek bulanıklaşmaktadır.

Bu çalışmanın birincil amacı, hizalama işleminden sonra çoklu çerçevelerdeki bilginin bir araya getirilmesi ile, düşük kaliteli çerçevelerden hem görsel hem de SNR olarak çok daha kaliteli görüntüler elde etmektir. Bu amaçla iyileştirme/onarma yöntemleri ve özelde yayılım süzgeçleri kullanılmıştır. Çalışmanın ana katkısı bu yöntemlerin çoklu çerçevelere uygulanmasını olanaklı hale getirmek olduğu için kullanılan iyileştirme/onarma ile ilgili yöntemler hakkında detaylı teorik açıklamalardan özellikle kaçınılmıştır.

Bu çalışmada bilinen yayılım süzgeçlerinin iyi yanları alınarak çoklu çerçeveler için yeni ve özelleşmiş bir yöntem tanıtılmıştır. Bu amaca yönelik olarak çoklu çerçevelerden (örn: video verisi) elde alınan görüntülerin bir alt kümesi kullanılarak, çerçevelerde yer alan ve iyileştirmeye çalıştığımız nesnelere AGM yardımı ile modellenmiştir. Kurulan model yardımı ile çoklu çerçevelerde modellenen nesnelere önemli noktaları otomatik olarak saptanmıştır. Sonraki aşamada kabaca nesnelere şekilleri bulunduktan sonra el yordamı ile gerek duyulursa şekil noktaları düzeltilmektedir. Tüm bu aşamalardan sonra belirlenen bir referans şekile ve/veya hesaplanan nesneye ait ortalama şekile tüm çerçeve görüntüleri bükülmektedir. Bükme

işleminden sonra şekilden arındırılmış nesneye ait doku verileri üzerinde anizotropik yayılım süzgeçleri uygulanmaktadır. Hizalanmış ve şekilden arındırılmış doku görüntüleri üzerinde çerçeveler arası değişimin tamamen ortadan kaldırıldığı varsayımı altında yayılım süzgeçleme ile gürültülü çerçevelerden, gürültüsü bastırılmış görsel olarak çok daha kaliteli çerçeve veya çerçeveler elde edilmektedir. Bükme işleminden sonra çerçeveler arasındaki tek farklılık hatalı hizalamadan kaynaklanan seğirme (jitter) benzeri bozulmalardır ki bunlarda genellikle ayrıtların yer değiştirmesi durumundan kaynaklanmaktadır. Hem toplamsal gürültü hem de seğirme benzeri hizalama hatalarının varlığı dikkate alınarak üç boyutlu ve ağaç yapılı $3B$ anizotropik yayılım süzgeci önerilmiştir. Önerilen bu yöntemin amacı tüm çerçeveleri onarmak yerine eldeki çerçeveleri nesneye ait birer gözlem olarak kabul edip bu gözlemlerden yararlanarak tek bir onarılmış/iyileştirilmiş çerçeve elde etmektir.

7.2 Ağaç Yapılı Üç Boyutlu Yayılım Süzgeci

Bu bölümde çoklu çerçevelerden alınan aynı nesneye ait görüntülerin hizalanmış görüntüleri kullanılarak iyileştirme işlemi için üç boyutlu yayılım süzgeçlerine dayalı yöntemler önerilmiştir.

Özellikle videodan alınmış görüntü çerçevelerindeki nesnelerin önemli noktaları bulunduğundan sonra referans bir şekile bükülerek elde edilen görüntüler üst üste eklenerek üç boyutlu görüntü verisi oluşturulmuştur. Önemli noktaların saptanması bu çalışmada iki aşamada gerçekleştirilmektedir. Birinci aşamada nesneye ait görüntülerin bir alt kümesinden oluşturulan eğitim verisi ile eğitilen aktif görünüm modeli önemli noktaların saptanması amacıyla kullanılmıştır. Eğitim kümesindeki tüm görüntülerde yer alan nesnenin anatomik ve fiziksel önemli noktaları el marifetiyle işaretlenerek nesnenin şekil bilgisi oluşturulmuştur (Bkz. Şekil 7.11.(a)). Daha sonra önemli noktaları saptanmış eğitim kümesi verileri ile AGM eğitilmektedir. Kurulan aktif görünüm modelinin eğitim kümesinin genelleme gücünün yetersiz kalması gibi nedenlerden dolayı video verilerinden elde edilen test görüntülerinde istenen başarımda hizalama yapılamamaktadır. Bu yüzden nesnelerin önemli noktalarının saptanmasında ikinci aşama olarak adlandırdığımız ve önemli noktaların hassas düzeltilmesi işlemine gerek duyulabilmektedir. Tüm bunlara ek olarak AGM ve hassas düzeltme aşamalarını her ne kadar yüksek doğrulukla önemli noktaları saptıyor

olsa da yüksek gürültülü ve düşük çözünürlüklü videolarda önemli noktaların hassas olarak saptanması oldukça zor bir problemdir. Bu tür görüntülerde annotasyon işlemi el yordamı ile yapılıyor olsa dahi hata olasılığı oldukça yüksektir. Bu yüzden hatalı hizalamadan kaynaklanan bükme bozuklukları sıklıkla ortaya çıkmaktadır.

7.2.1 Ortalama bant yığıt süzgeçleri

Üç boyutlu yayılım süzgeçlerinin başarımını arttırmak için, kurulan üç boyutlu görüntü verisinde çerçevelere ait zaman bilgisine karşılık gelen Z -ekseni üzerinde tanımlı bazı işlemler önerilmiştir. Bunlardan biri de Z -ekseninde aykırı (*outlier*) benek değerlerinin ortaya çıkarılması amaçlı sıralama yöntemidir. Hacim verisi üzerinde Z -ekseni üzerinde yer alan beneklerden oluşan çerçeve sayısı uzunluklu her vektör benek değerlerine göre küçükten büyüğe sıralanmıştır. Bu işlem sıralanmış vektörlerin en baş ve en sonda yer alan ve tüm vektördeki örneklerin yaklaşık %20'sine karşılık gelen aykırı beneklerin atılması olarak tanımlanabilir. Bu yaklaşım, bu çalışmada "Bant Yığıt Süzgeçler" (Medium band stack filters, *MBS*) olarak isimlendirilmiştir. *MBS* şu şekilde ifade edilebilir;

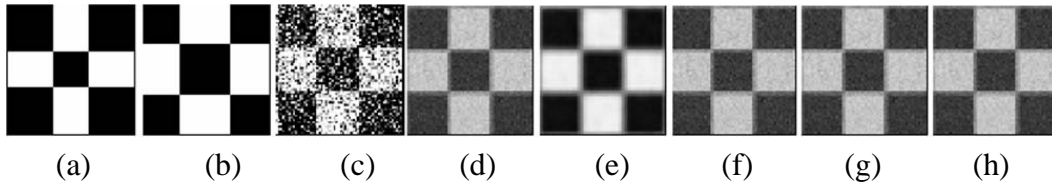
$$\{I_S(x_i, y_j, z'_k)\} = S\{I(x_i, y_j, z_k)\} \quad i = 1, \dots, M; \quad j = 1, \dots, N; \quad k = 1, \dots, L \quad (7.13)$$

Denklem (7.13)'teki S işlemi, küçükten büyüğe doğru sıralama işlemine karşılık gelmektedir. Burada oluşturulan $3B$ görüntünün Z -eksenindeki her bir vektörün gri seviyelerinin sıralanması söz konusudur.

$$I_{MBS}(x_i, y_j, z_l) = \{I_S(x_i, y_j, z'_k)\}, \quad k = \rho L, \dots, (1 - \rho)L \quad (7.14)$$

Bir sonraki adımda ise sıralanmış vektörün sonunda ve başında ρ ile gösterilen dilimlerin atılması işlemi ise denklem (7.14)'da gösterilmektedir. Bu işlemden sonra üç boyutlu I_{MBS} görüntüsünün boyutları Z -ekseninden atılan ρ boyutlu elemanlar kadar azalarak $M \times N \times (1 - 2\rho)$ olur.

MBS'nin en önemli işlevi, $3B$ yayılım öncesi aykırı benek değerlerini attığı için, performansı olumlu yönde etkileyen bir ön işlem olmasıdır. Özellikle çerçeveler arası aykırı gri seviye değişimlerinden kaynaklı darbe (impulsive) şeklindeki gürültüler yoğun olarak bulunuyorsa *MBS* ön işlemi bu gürültüleri, oluşturulacak üç boyutlu görüntüye dahil etmemektedir.



Şekil 7.12. Dama tahtası test görüntü kümesi ve iyileştirme sonuçları: a) ve b) test kümesinden alınan hizalama hatasına sahip, gürültü eklenmemiş ard arda gelen iki çerçeve, c) Gauss gürültü eklenmiş çerçeve. d) Ortalama süzgeç, e) Ortanca süzgeç, f) Wiener süzgeci, g) 2B boyutlu yayılım süzgeci, h) 3B difüzyon süzgeci.

Sıralama işleminden sonra, baştan ve sondan atılan ρ uzunluklu parçalar genellikle çok açık ve çok koyu beneklere ait bilgileri veya önemsiz sayılabilecek, ortalama ve ortanca değerlere göre oldukça farklı doku değişimlerine karşılık gelmektedir. Bu yüzden bağıl olarak daha az bilgi içeren veya daha gürültülü bölgeler sıralanmış Z -ekseninden sonra oluşturulan hacim görüntüsünden kesilip atılmaktadır. Z -eksenindeki gri seviye bilgilerinin sıralandıktan sonra $3B$ hacim görüntüsünü oluşturmanın bir başka avantajı ise, I_{MBS} üzerinde çalıştırılacak $3B$ yayılım süzgeçlerinin ani geçişler ortadan kaldırıldığı ve daha yumuşak bir geçiş sağlandığı için daha çabuk yakınsaması ve daha yüksek performans elde edilmesini sağlamaktadır. Özellikle hatalı hizalamadan kaynaklanan gri seviye farklılıklarından, $3B$ yayılım olumsuz şekilde etkilenmemiş olmaktadır.

7.2.2 Ağaç yapılı yayılım süzgeci

Üç boyutlu yayılım işlemi bir önceki bölümde detayları verilen $3B$ hacim görüntüsü I_{MBS} 'ye uygulanmaktadır. I_{MBS} 'te çoklu çerçeveler sıralanmış ve çerçeveler arasındaki aykırı örneklerden temizlenmiş görüntüler bulunmaktadır. I_{MBS} 'ye doğrudan $3B$ yayılım işlemi uygulamak yerine Z -ekseni boyunca çerçeveler arası değişimi dikkate alarak I_{MBS} 'nin parçalara ayrılması ve her parçaya ayrı ayrı yayılım işlemi uygulanması tercih edilmiştir. Burada amaç birbirleri ile benzer özelliklere sahip çerçevelerin kümelenip, belirlenen her kümeyle yayılım ve benzer diğer işlemler uygulandıktan sonra yapılacak füzyon ile elde edilecek SNR seviyesini attırmaktır. Bahsedilen yayılım süzgeçlerin gösterimleri şu şekildedir;

$$D_i\{I_{(R_j)}^1, \dots, I_{R_j}^L\} = I_{D_i, R_j} \quad (7.15)$$

denklem (7.15)'deki R_j L adet çerçeveden oluşturulmuş j . bölgeyi içermektedir. i indisi ise i . difüzyon işlemini ifade etmektedir.

$$I_{D_3} = D\{I_{D_2,R_1}, I_{D_1,R_2}, I_{D_2,R_3}\} \quad (7.16)$$

Bu çalışmada 3B yayılım denklem çekirdeği olarak $3 \times 3 \times 3$ 'lük bir hacim seçilmiştir. Denklem (7.12)'teki iletim (conduction) katsayısı olan c ise 26 ayrı yönü gösterecek şekilde seçilmiştir. κ ise her ekseninde, κ_{xy} , κ_z gibi farklı olarak tanımlanmıştır. Denklem (7.15)'deki ifadede ağaç yapılı üç boyutlu yayılım ifadesi gösterilmiş ve detaylar aşağıda adım adım gösterilmiştir;

1. Sıralanmış ve budanmış (truncate) görüntü hacim verisi alt bölgelere ayrılır. Bu alt bölgelerin sınırları sıralanmış çerçeveler arası benek değerleri arasındaki varyans ve değişimin ikinci türevleri dikkate alınarak saptanmıştır.
2. Belirlenen her alt bölgeye denklem (7.17)'deki gibi ayrı ayrı edilmektedir.

$$I_{D_1,R_1}, I_{D_1,R_2}, I_{D_1,R_3} \quad (7.17)$$

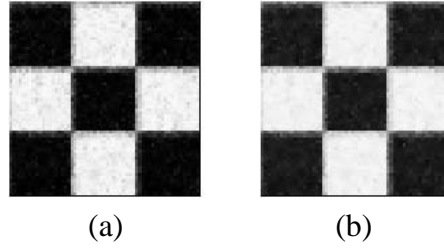
Yöntemin bu aşamasında hacim görüntüsünde çerçevelere karşılık gelen gelen Z -ekseni boyunca daha yüksek yumuşak geçiş elde edebilmek için κ_z yüksek bir değer seçilmektedir.

3. Denklem (7.17)'de R_1 ve R_3 ile gösterilen bölgelerdeki karşılıklı uç benekler denklem (7.18)'de gösterildiği gibi birleştirilerek uç bölgeler R_2 'ye yakınsayacak şekilde ayrıca bir difüzyon işlemi uygulanır. Denklem (7.18)'deki L_1 ve L_3 karşılıklı olarak R_1 ve R_3 bölgelerindeki eleman sayısını göstermektedir. Bu aşamadaki difüzyon işlemi uçlardaki benek değerlerini R_2 bölgesinin içinde yer alan, sıralamada orta bölgede kalan, beneklere yakınsatma amacına yöneliktir. Bu difüzyon işleminden sonra tüm çerçeveleri özgün konumlarına geri getirilir. Yapılan bu difüzyon işlemleri I_{D_2,R_1} ve I_{D_2,R_3} olarak gösterilmektedir.

$$D\{I_{D_1,R_1}^{L_1}, I_{D_1,R_3}^{L_3}, I_{D_1,R_1}^{(L_1-1)}, I_{D_1,R_3}^{L_2}, \dots, I_{D_1,R_1}^1, I_{D_1,R_3}^{L_3}\} \quad (7.18)$$

4. Algoritmanın son aşamasında ise tüm işlenmiş hacim bölgelerindeki çerçeveler hep birlikte difüzyon işlemine tabi tutulur. Denklem (7.16)'da bu işlem gösterilmektedir.

Bu aşamada tüm görüntü çerçeveleri bir araya getirilip difüze edilerek tüm çerçevelerde son bir iyileştirme amaçlanmaktadır. Amacımız çok düşük kaliteli ve yüksek gürültüye sahip görüntü çerçevelerinden, iyileştirme neticesinde daha yüksek *SNR* seviyelerinde bir görüntü çerçevesi elde edebilmek olduğu için, ağaç yapılı difüzyonun en son çıktısı ağacın yapraklarındaki tüm çerçevelerin ortalamasına denk tek bir çerçevedir. Buna ek olarak, önerilen yöntemin bir avantajıda ağaç yapısında yer alan yapraklarını oluşturan bölgeler (örn: R_1 , R_2 , R_3 vb.) difüzyon işleminden geçirildikten sonra, her bölgenin ortalamasından ayrıca sonuç üretilebilmesidir. Elde edilen bu alternatif sonuçlar, üç bölgeli bir ağaç için, denklem (7.19)'da gösterilen listede tek tek ifade edilmiştir.



Şekil 7.13. Ağaç yapılı üç boyutlu yayılım süzgecinin iyileştirme sonuçları: a) Tüm bölgelerin kullanılması ile elde edilen sonuç, b) İkinci bölge'den elde edilen sonuç.

Buradaki ($\bar{\cdot}$) sembolü denklem (7.10)'de gösterilen ortalama işlemi ifade etmektedir. Önerilen bu yöntemin sağlıklı çalışabilmesi için en az 10 çerçvelik bir görünüş kümesine ihtiyaç duyuyor olması, yöntem için bir kısıt olarak verilebilir. Fakat video görüntülerinden hizalanıp kesilerek elde edilen, nesneye ait görüntü sayısı genellikle çok daha fazla sayıda olmaktadır.

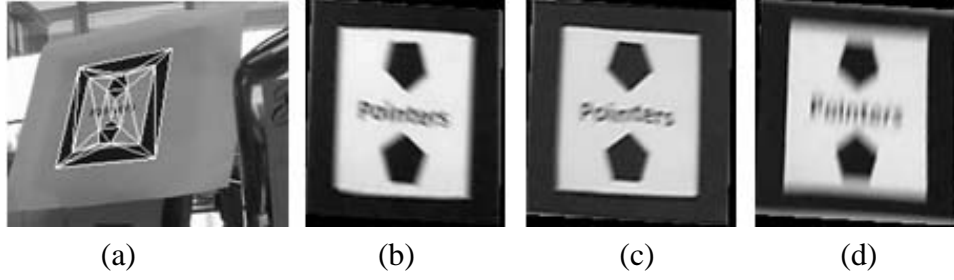
$$\bar{I} \in \{\bar{I}_{D_1, R_1}, \bar{I}_{D_1, R_2}, \bar{I}_{D_1, R_3}, \bar{I}_{D_3}\} \quad (7.19)$$

Eğer elde yeterli sayıda görüntü yoksa, ağaçları oluşturan görüntü bölgesi sayısı azaltılmalıdır. Bunun yanında fazlaca verinin olması durumunda ise bölge sayısını arttırmak yöntemin daha iyi sonuçlar vermesini sağlayacaktır.

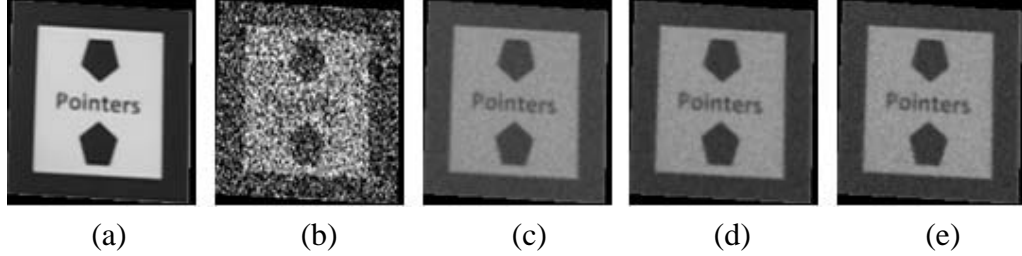
7.3 Deneysel Çalışmalar

Bu bölümde üç farklı özellikteki veri kümesi üzerinde önerilen yöntemler denenmiştir. Bu veri kümeleri "Dama Tahtası", "Pointers" ve "Yüz" video veri kümesinden oluşmuştur. Önerilen yöntemin gürültülü videolardan alınmış çerçeveler üzerindeki

iyileştirme ve özellikle gürültü bastırma yönünden performansı başkaca yöntemlerle karşılaştırmalı olarak kıyaslanmıştır. Bu bağlamda çerçeve ortalaması, ortanca süzgeçleme, Wiener süzgeçleme, $2B/3B$ 'lu difüzyon süzgeçleme gerçekleştirilmiş ve aynı test kümesi üzerinde performansları kıyaslanmıştır.



Şekil 7.14. a) AGM ile saptanmış nesneye ait önemli noktaların üçgenlere ayrılmış hali, b), c) ve d)'de test videolarından elde edilen hizalanmış ve şekilden arındırılmış düşük kaliteli çerçeveler.

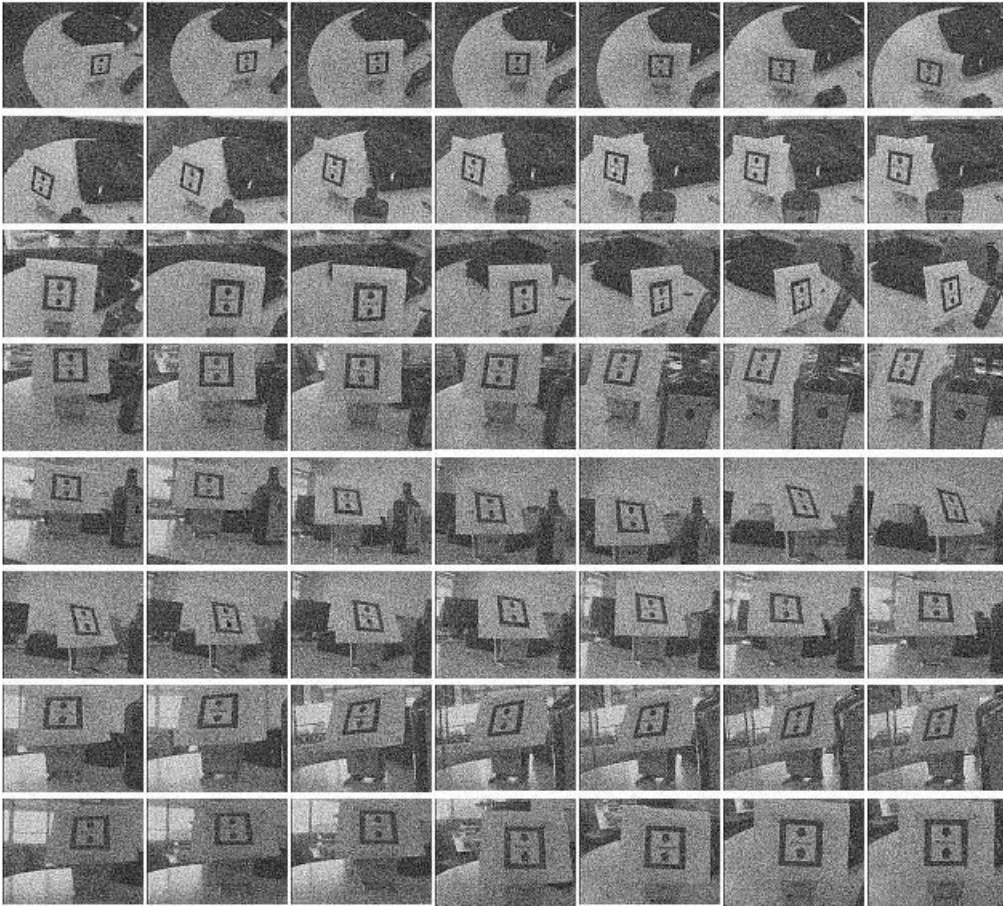


Şekil 7.15. a) Test videosundan kesilen, şekilden arındırılmış ground truth görüntüler, b) Test kümesinden rastgele seçilmiş bir görüntü, c) Klasik 3B difüzyon süzgeci sonucu, d) Önerilen yöntemin sonucu, e) Önerilen yöntemin 2. bölge için ürettiği sonuç.

7.3.1 Test kümeleri

Deneysel çalışmalarda üç ayrı veri kümesi kullanılmıştır. Bunlar; Dama Tahtası veri kümesi, Pointers veri kümesi ve yüz veri kümesidir. Bu veriler çeşitli gürültü seviyelerinde ve çözünürlük seviyelerinde yeniden oluşturularak, yöntemlerin çözünürlük ve gürültü seviyesine göre performansları belirlenip raporlanmıştır.

- **Dama Tahtası Veri Kümesi:** Önerilen yöntemlerin hatalı hizalanarak kesilmiş görüntülerdeki performanslarını test etmek için sentetik olarak üretilen 100 çerçevesiz bir veri kümesidir. Bu veri kümesindeki her dama karesi rastgele sağa/sola ve yukarı/aşağı kaydırılarak farklı ebatlarda dama karesine sahip dama tahtası görüntüleri oluşturulmuştur. Bu görüntülere farklı değintiye sahip gauss



Şekil 7.16. Pointer veri kümesi

gürültü eklenmiş ve her gürültü seviyesi için yöntemlerin başarımları test edilmiştir. Gauss gürültü değışintisi 0.35 olan dama tahtası görüntü kümesine ait örnek görüntü Şekil 7.12.(c)'de gösterilmiştir. Dama tahtası görüntüleri 160×160 çözünürlüğünde ve siyah-beyaz olmak üzere ikili görüntülerden oluşmaktadır. Bu görüntüler üzerinde ayrıca hizalama işlemi yapılmamış, bu görüntülerdeki seçirme benzeri hataların hizalamadan kaynaklandığı varsayılarak, hizalama hataları simule edilmeye çalışılmıştır. Şekil 7.12.(a) ve Şekil 7.12.(b)'de hatalı hizalamadan kaynaklanabilecek seçirme benzeri bozulmaya örnekler gösterilmektedir. Şekil 7.12.(c)'de ise 100 çerçevelik, gürültülü dama tahtası verilerinden rastgele seçilmiş bir çerçeve gösterilmektedir.

- **Pointer Veri Kümesi:** Bu veri kümesi, önerilen yöntemlerin gerçek video görüntülerindeki iyileştirme ve onarma performanslarını saptayabilmek amacıyla oluşturulmuştur. Bu amaca yönelik beyaz artalan üzerinde siyah kare halka ve içerisinde düzgün siyah beşgen ve "pointers" yazısı bulunan basılı test görüntüsü

oluşturulmuştur. Gerçek ortamda çeşitli yerlere yerleştirilen test görüntüsü, düşük kaliteli çekim yapan bir kamera marifetiyle (Casio Z70) çeşitli bakış açılarından ve farklı uzaklıklardan videoya alınmıştır. Oluşturulan onlarca video kliplerinde test nesnesi farklı ebatlarda, açıda ve perspektif bozulmada görünmektedir. Test videolarından alınan pointers veri kümesi Şekil 7.16'de gösterilmektedir. Pointers verisine farklı gürültü seviyelerinde gürültü eklenmiş ve her gürültü seviyesi için tüm yöntemlerin başarımları ayrı ayrı test edilmiştir.

Video görüntülerinden farklı şekil değişimlerini içerecek 12 adet çerçeve nesnelere otomatik sezimi için oluşturulacak *AGM* modelinin kurulumu için seçilmiş ve seçilen bu görüntüler *AGM*'nin eğitimi amaçlı kullanılmıştır. 12 adet görüntü, gerçek dünyada düzlemsel bir nesne olan test görüntüsünün olası tüm şekil ve ölçek değişimlerini içerecek şekilde dikkatle seçilmiştir. Daha fazla sayıda eğitim amaçlı görüntünün seçilmesi, *AGM*'nin hizalama başarımını arttıracak açıktır. Eğitim amaçlı seçilen görüntülerdeki test nesnesinin şekil bilgisi el yordamıyla Şekil 7.15.(b)'de gösterildiği gibi 21 noktadan oluşturulmuştur. Pointers test veri kümesinden elde edilen 90 adet 150×140 çözünürlükteki çerçeveler deneysel çalışmalarda kullanılmış ve sonuçlar ilerleyen bölümlerde sunulmuştur.

- **Yüz Veri Kümesi:** Yüz veri kümesi, önerilen yöntemlerin sentetik olarak oluşturulmayan, gerçek dünyada çekilmiş gürültülü videolardan elde edilen karmaşık nesnelere ait görüntüler üzerindeki performanslarının saptanabilmesi amacıyla oluşturulmuştur. Bu veri kümesinde yer alan videolarda, kafasını sağa/sola ve yukarı/aşağı yaklaşık 45 derece çeviren bir kişi bulunmaktadır. Bu videolardaki yüz görüntülerinde hem düzlem içi hem de düzlem dışı dönmeler yer almaktadır. Yüz veri kümesi videolarına, diğer veri kümelerinde olduğu gibi farklı seviyelerde gürültü eklenmiştir. *AGM* yardımı ile videolardan yüzlerin otomatik ve yarı otomatik olarak saptanması için bir 13 çerçeve seçilmiştir. *AGM*'nin eğitiminde kullanılacak bu yüz verileri, Şekil 7.11.(a)'da gösterildiği gibi 73 nokta ile işaretlenmiştir. Daha sonra belirlenen bu önemli noktalar yardımı ile *AGM* kurulmuştur. Yüz veri kümesi 78×68 çözünürlüğünde görüntülerden oluşmaktadır. Şekil 7.18.(b)'de yüz veri kümesinden alınmış rastgele bir yüz görüntüsü gösterilmektedir. Bu görüntü dikkatle incelendiğinde yüksek oranda bozucu gürültünün olduğu, özellikle yüzün sol tarafının özniteliklerinin tamamen

belirsizleştigi görülmektedir. Ayrıca üçgenleme ve bükmeden kaynaklı olarak, gürültülerin yüz dokusu üzerinde birbirleriyle ilinti oluşacak düzeyde yayıldığı da görülmektedir. Ayrı ayrı bu yüz görüntülerine bakarak, yüz tanınması ve/veya adli amaçlı inceleme yapılamayacağı ortadadır. Önerilen yöntemin Şekil 7.18.(c) ve Şekil 7.18.(d) gösterilen birleştirme sonucu ise, düşük kaliteli bu görüntülerin bir araya getirilmesi ile oldukça iyi sonuçlar alınabileceği görülmektedir.

7.3.2 Başarım ölçütleri

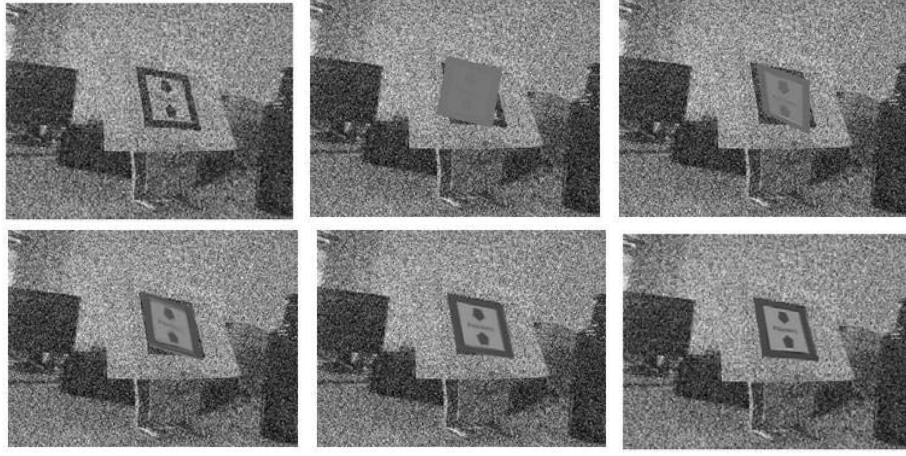
Önerilen yöntemlerin başarımlarının ölçülmesi için sinyal/gürültü oranı olan *SNR* kullanılmıştır. *SNR* şu şekilde ifade edilmektedir;

$$SNR = 10 \log \frac{\sum |x_{gt}|^2}{\sum |x - x_{gt}|^2} \quad (7.20)$$

Denklem (7.20)'deki x giriş görüntüsünü, x_{gt} ise ground truth görüntüyü ifade etmektedir. Test veri kümelerinden dama tahtası için ground truth görüntüsü olarak, hizalama hatası ve gürültü içermeyen ideal dama tahtası kullanılmıştır. Yüz ve pointers veri kümesi için ground truth görüntüsü test görüntülerinde yer almayan, hizalama ve gürültü hatası içermeyecek şekilde hassas şekilde hizalanmış tekil görüntüler kullanılmıştır. Bu görüntüler test verileriyle aynı referans şekile bükülerek aynı ölçek ve şekile dönüştürülmüştür. Şekil 7.15.(a) ve Şekil 7.18.(a)'da pointers ve yüz verilerinin ground truth görüntüleri gösterilmektedir.

7.3.3 Deneysel sonuçlar

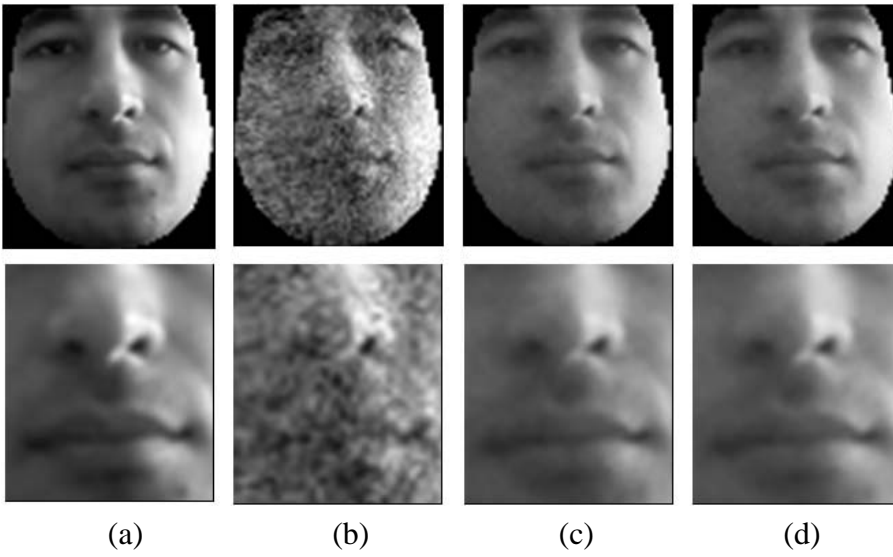
Bir önceki bölümde detayları verilen video çerçevelerinden elde edilen $3B$ veriye, önerilen ağaç yapılı $3B$ difüzyon süzgeci uygulanmadan önce *MBS* (medium band stack) süzgeçleme olarak isimlendirdiğimiz ön işlemden geçirilmektedir. *MBS* kısaca, Z -eksenindeki tüm çerçevelerde aynı indise sahip beneklerin, gri seviye değerlerinin belirli bir kurala göre sıralanması ve sıralama sonucunda oluşan yeni $3B$ hacimde, ağacın yapraklarını oluşturan bölgelerin tanımlanmasına dahalı yöntemdir. Yaprakları oluşturan bu bölgeler arasında, $3B$ hacimin her iki ucunda kalan bölgeler kesilip atılarak gürültülü ve istenmeyen bilgilerden $3B$ veri temizlenmiş olmaktadır. Burada uçlardan ne kadar uzunlukta veri atılacağını kontrol eden, denklem (7.14)'da ρ ile gösterilen parametredir.



Şekil 7.17. AGM arama eniyileme adımları.

Deneyisel çalışmalarda $\rho = 0.2$ olarak seçilmiştir. Bu değer, üzerinde çalışılan test kümeleri için seçilmiş bir değer olup, başkaca test kümeleri için deneysel olarak belirlenmesi gereken bir eşik değeridir.

Gerçek video görüntülerinden alınan çerçeveler üzerinde çalışıldığı için harekete bağlı bozulmaya sıklıkla rastlanmaktadır. Bu tür bozuk çerçevelere örnek Şekil 7.14.(b) - 7.14.(d)'de gösterilmiştir. *AGM* eğitim kümesi için seçilen görüntüler düşük gürültülü ve bu tür bozulmaların olmadığı çerçevelerden seçilmiş olmasına rağmen *AGM* bu tür bozulmuş ve yüksek gürültülü test görüntülerinde oldukça yüksek başarılı sonuçlar verebilmektedir. Şekil 7.17'te *AGM* sonuçları gösterilmektedir. Harekete bağlı bozulmaya ek olarak, yüksek gauss gürültüsü eklenmiş test video kliplerinden *AGM* ile kesilip, bir referans şekile bükülerek şekilden bağımsız görüntüler oluşturulmuştur. Şekil 7.16'de gösterilen görüntüler dikkatle incelendiğinde, test amaçlı oluşturulan görüntünün geometrik büküm noktalarının belirli bir hata ile işaretlenebilecek durumda olduğu fakat içerdeki "pointers" yazısının ise tam okunamaz durumda olduğu görülecektir. Özellikle perspektif ve hareket bozulmaları ve bunlara ek olarak yüksek gürültünün test videosunda var olması nedeniyle, bahsi geçen görüntülerde okunurluk neredeyse tamamen ortadan kalkmış durumdadır. Test görüntülerinin *AGM* yardımı ile önceden belirlenmiş referans bir şekile bükülmesi aşamasında, önemli noktaların saptanması, üçgenleme ve doğrusal bükmeden kaynaklanan bozucu etkilerde bulunmaktadır. Şekil 7.16'de sergilenen test görüntüleri ayrı ayrı incelendiğinde, bu görüntülerin tekil analizlerinden içindeki bilgiyi ortaya çıkaracak herhangi bir iyileştirme/onarma yapılamayacağı görülecektir. Bu yüzden önerdiğimiz

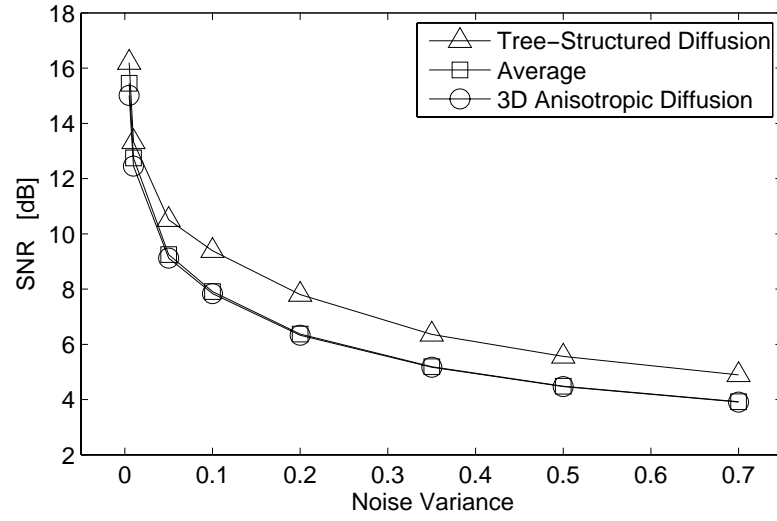


Şekil 7.18. Önerilen yöntemin yüz veri kümesi için iyileştirme sonuçları: a) Ground truth yüz görüntüsü, b) Gürültülü test videolarına ait çerçevelerden kesilen rastgele seçilmiş bir yüz görüntüsü, c) Önerilen ağaç yapılı 3B difüzyon süzgecinin sonucu (\bar{I}_{D_3}), d) (\bar{I}_{D_1, R_2}) sonucu.

yöntem video görüntülerinde yüksek doğruluklu birleştirmeyi (füzyon) olanaklı kılmakta ve kabul edilebilir başarımlar elde edilebilmektedir.

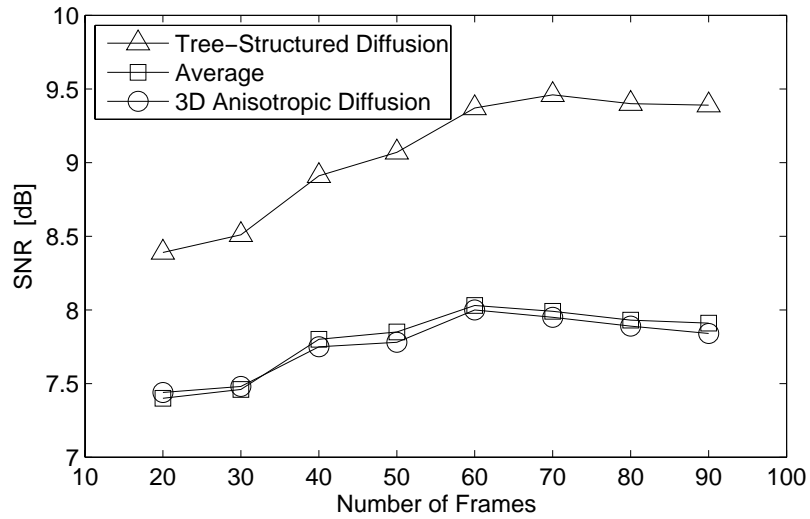
Şekil 7.12.(c)'de gösterilen gürültülü dama tahtası verilerine *MBS* işlemi uygulandığında, elde edilen 3B hacim görüntüsünün ilk çerçeveleri genel olarak koyu renkli bölgeler ve daha büyük siyah dama karelerine sahip olduğu görülmüştür. Bunun yanında sonlarda yer alan çerçevelerde ise açık renkli bölgeler ve görece olarak daha büyük beyaz dama karesine sahip olduğu gözlenmiştir. Ortalara doğru beyaz ve siyah dama karelerinin birbirlerine yaklaştığı gözlemlenmiştir. Genel olarak, *MBS*'nin birbirine benzeyen çerçevelerin komşu olarak düzenlendiği yeni bir hacim oluşturduğunu söylemek mümkündür. Bu ise 3B difüzyon süzgeçlerin performansını arttırmaktadır. Ağaç yapılı 3B difüzyon süzgecinde, hacim görüntüsüne *MBS* uygulandıktan sonra oluşturulan her bölge alt bir yaprak olarak değerlendirilmektedir. 3B difüzyon süzgeci oluşturulan bu ağacın her yaprağına ayrı ayrı uygulanmaktadır. 3B veride difüzyon süzgeci xy ve z gibi farklı yönlerdeki soğumayı kontrol eden farklı κ sabitleri kullanmaktadır. Bu ise Z -eksenindeki difüzyon hızıyla diğer yönlerdeki difüzyonun farklılaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

Önerilen ağaç yapılı 3B difüzyon süzgeci tek bir sonuç üretmemektedir. Her bir bölgenin ortalaması ve tüm ağacın ortalaması gibi ayrı sonuçlar istenirse



Şekil 7.19. Test görüntülerindeki gürültü seviyesi (Gauss gürültü, $\sigma = [0.05, 0.70]$) değişimine bağlı olarak üç yöntemin iyileştirme performanslarının karşılaştırılması.

sunulabilmektedir. Bu sonuçlar arasında en yüksek kalitede olanı tercih etmek ve bu tercihi kullanıcıya bırakmakta mümkündür. Bu tür farklı sonuçların üretilebiliyor olması, adli delil oluşturma ve tıbbi görüntüleme gibi uygulama alanlarında çalışan ve yeterli deneyime sahip konu uzmanı kullanıcılar için oldukça önemlidir.



Şekil 7.20. Test görüntülerindeki çerçeve sayısına bağlı olarak üç yöntemin iyileştirme performanslarının karşılaştırılması .

Gürültülü dama tahtası veri kümesi üzerinde çerçeve ortalama, ortanca süzgeç, Wiener süzgeçleme, ve önerilen yöntem çalıştırılmıştır. Şekil 7.12.(d)'de ortalama süzgecin, Şekil 7.12.(e)'de ortanca süzgecin, Şekil 7.12.(f)'de ise Wiener süzgecinin sonuçları gösterilmektedir. Bu sonuçlardan ortanca süzgecin ürettiği sonuç incelendiğinde,

gürültülü çerçeveler kullanılarak, homojen bölgeler için, dama tahtasının özgün gri-seviye değerlerine (siyah-beyaz) doğru şekilde yakınsandığı görülmektedir. Fakat dama tahtasının tüm ayrıtlarında ortanca süzgeç tamamen hatalı ve/veya yumuşatılmış sonuçlar ürettiği görülmektedir. Bunun nedeni Şekil 7.12.(b)'de gösterilen hatalı hizalamaya karşılık gelen değişimlerdir. Wiener ve çerçeve ortalaması ise özgün dama görüntüsü renklerini koruyamamış ve sadece gürültü çerçevelerin yumuşatılmış hallerini sonuç olarak üretebilmişlerdir (Bkz. Şekil 7.12.(d) ve Şekil 7.12.(f)). Şekil 7.12.(g) ve Şekil 7.12.(h)'da ise $2B$ ve $3B$ klasik difüzyon süzgeçlerinin ortalaması gösterilmektedir. Her iki yöntemin ürettiği sonuçların birbirine oldukça benzer olduğu gözlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmanın detaylı hali, karşılaştırmalı olarak Çizelge 7.2'de sunulmuştur. Çizelgeden görülebileceği gibi uygulanan temel yöntemler ve önerilen yöntemler görüntülerin SNR seviyelerinde önemli artışlar sağlayabilmişlerdir. Dama tahtası veri kümesindeki SNR seviyeleri 0.99 ve 2.21 dB arasında değişmektedir. Pointer veri kümesindeki çerçeveler ise 1.02 ve 3.12 dB arasında değişmektedir. Yüz veri kümesindeki çerçevelerin ise 5.12 ve 12.15 dB seviyelerinde değiştiği ölçülmüştür. Çizelge 7.2'den de görülebileceği gibi uygulanan yöntemler en az 3 dB'lik bir SNR artışı sağlamaktadır. Çizelge de her üç veri kümesi için sonuçlar sergilenmiştir.

Şekil 7.13.(a)'da önerilen ağaç yapılı $3B$ difüzyon süzgecinin tüm yapraklarının ortalamasına karşılık gelen ve denklem (7.16)'da \bar{I}_{D_3} olarak ifade ettiğimiz sonuç gösterilmektedir. Şekil 7.13.(b)'de ise denklem (7.16)'da \bar{I}_{D_1,R_2} olarak ifade ettiğimiz sonuç gösterilmektedir. \bar{I}_{D_3} için hesaplanan SNR değeri 10.08 dB, \bar{I}_{D_1,R_2} için hesaplanan SNR değeri ise 11.43 dB olarak ölçülmüştür. Bu ise çerçeve ortalamaya göre sırasıyla, 4.52 dB ve 5.87 dB'lik iyileşmeye karşılık düşmektedir. Pointer veri kümesi üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda ise önerilen yöntem ile \bar{I}_{D_3} ve \bar{I}_{D_1,R_2} için sırasıyla 7.26 dB ve 7.53 dB'lik bir iyileştirme gözlenmiştir. Aynı veri kümesinde klasik Difüzyon süzgeci ise çerçeve ortalama ile aynı iyileştirme sonucunu verebilmiştir. Ortalama olarak ağaç yapılı yöntem bu veri kümesi için, klasik difüzyona göre 1.23 dB'lik bir iyileştirme sağlamıştır. Pointer veri kümesindeki SNR artışı, dama tahtası veri kümesine oranla düşük kalmıştır. Şekil 7.14.(c), 7.14.(d) ve 7.14.(e) gibi hatalı hizalamadan kaynaklanan bozulmaların çokça olduğu durumlar için düşük SNR değerlerinin elde edilmesi anlaşılabilir bir durumdur. Şekil 7.15.(c)'de ise klasik

Çizelge 7.2. Önerilen ağaç yapılı 3B difüzyon süzgeci ve diğer iyileştirme/onarma yöntemlerinin SNR olarak karşılaştırılması. Dama tahtası, Pointer veri kümesi ve yüz veri kümesi üzerinde tüm yöntemler karşılaştırılmıştır.

Yöntemler	Dama Verisi	Pointer Verisi	Yüz Verisi
En düşük SNR'a sahip çerçeve	0.99 dB	1.02 dB	5.12 dB
En yüksek SNR'a sahip çerçeve	2.21 dB	3.12 dB	12.15 dB
Frame Füzyonu (Ortalama)	5.56 dB	6.16 dB	14.98 dB
Ortanca Süzgeci	7.56 dB	6.27 dB	13.05 dB
Wiener Süzgeci ($\bar{x} = 0, \sigma_x = 0.5$)	5.44 dB	6.37 dB	13.91 dB
Wiener Süzgeci ($\bar{x} = 0, \sigma_x = 0.15$)	5.40 dB	6.42 dB	14.98 dB
2B Difüzyon Süzgeci, 1 çevrim, ($\kappa = 0.2$)	5.56 dB	6.37 dB	14.87 dB
3B Difüzyon Süzgeci, 3 çevrim, ($\kappa = 0.2$)	5.51 dB	6.33 dB	14.69 dB
3B Difüzyon Süzgeci, 5 çevrim, ($\kappa = 0.2$)	5.48 dB	6.30 dB	14.13 dB
Ağaç yapılı 3B Difüzyon Süzgeci	10.08 dB	7.26 dB	16.13 dB
Ağaç yapılı 3B Difüzyon Süzgeci (R_2)	11.43 dB	7.53 dB	16.28 dB

3B difüzyon yönteminin sonucu gösterilmektedir. Şekil 7.15.(d) ve 7.15.(e)'de ise önerilen yöntemden \bar{I}_{D_3} ve \bar{I}_{D_1,R_2} gösterilmektedir. Sonuçlardan da görülebileceği gibi, Şekil 7.15.(b)'de gösterilen giriş görüntüsü ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, görüntülerdeki ayrıtların daha keskin, homojen bölgeler çok daha yumuşatılmış, gürültüden arındırılmış ve pointers yazısı ise okunabilir hale gelmiştir.

Önerilen yöntemin yüz test veri kümesi için ürettiği I_{D_3} ve \bar{I}_{D_1,R_2} sonuçları Şekil 7.18.(c) ve (d)'de sırası ile gösterilmektedir. Her iki görüntünün görsel olarak giriş verilerine göre çok daha iyi olduğu Şekil 7.18'den görülmektedir. Görsel iyileşmenin yanında SNR'larda da iyileşme olmuştur, şöyle ki \bar{I}_{D_3} için SNR değeri 16.13 dB ve \bar{I}_{D_1,R_2} için ise 16.28 dB olarak hesaplanmıştır. Çerçeve ortalaması ile füzyon işleminden elde edilen SNR değeri ise 14.98 dB olarak hesaplanmıştır. Diffüzyon işleminden geçirilmiş her iki görüntü incelendiğinde, hızlı geçişlerin olmadığı bölgelerdeki yoğun gürültülerin yumuşatılarak bastırıldığı fakat ayrıtların olduğu hızlı geçiş bölgelerinde ise detayların mümkün olduğunca korunduğu görülmektedir. Deneysel çalışmaların sonuçları incelendiğinde, yüksek gürültü ve hizalamadan kaynaklı hataların çok çerçeveli görüntülerde olması durumunda, önerilen ağaç yapılı difüzyon süzgeçlerle MBS'nin birlikte kullanılmasının, diğer yöntemlere göre çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Çerçevelerdeki gürültü seviyesinin önerilen yöntemin performansına olan etkisi Şekil 7.19'te gösterilmektedir. Önerilen yöntemle, gürültü seviyesi $\rho > 0.1$ için klasik 3B difüzyon süzgeçleme ve çerçeve ortalaması alma gibi yöntemlere kıyasla SNR'da 2 dB'lik bir iyileşme

sağlanmaktadır. 0.35 varyansın üzerindeki gürültüye sahip görüntülerde önemli noktaların görsel olarak belirlenmesi ve doğru olarak işaretlenmesi oldukça güç hale gelmektedir. Bu durum tüm yöntemler için performansı olumsuz yönde etkilemektedir. Üzerinde çalışılan nesneye ait gözlem sayısına karşılık gelen çerçeve sayısı arttıkça iyileştirmede hem görsel hem de *SNR* anlamında yükselme elde edilmektedir. Çoklu çerçevenin uzunluğuna bağlı önerilen yöntemle diğer yöntemlerin kıyaslamalı performans değişimi Şekil 7.20’de gösterilmektedir. Şekildende görüleceği gibi giriş görüntü veri kümesini oluşturan çerçevelerin sayısı arttıkça performans sürekli olarak artmakta, çerçeve sayısı düştükçe ise iyileştirme performansı azalmaktadır.

7.4 Sonuçlar ve Tartışma

Bu bölümde çoklu çerçeveli iyileştirme için difüzyon süzgeçler ve şekilden bağımsız bükme temelli bir yöntem tanıtılmıştır. Çoklu çerçeveli görüntüler ve özellikle video verileri üzerinde veri füzyonuna bağlı iyileştirme ve onarma yöntemlerini kullanmanın belirli zorlukları bulunmaktadır. Bunların başında ise çerçevelerdeki her bir beneğin karşılıklılandırılmasındaki zorluk gelmektedir. Aktif görünüm modeli yardımı ile çerçevelerdeki nesnenin sınırları ve önemli noktaları belirli bir yakınsama ile bulunabilmektedir. Nesne önemli noktalarının kaba ölçekte bulunması amacıyla kullanılan *AGM*’nin ürettiği sonuç yöntemler uygulanmadan önce ince ölçek olarak isimlendirilen bir düzeltmeden geçirilmektedir. Önemli noktaların mümkün olan en yüksek doğrulukla saptanması, çoklu çerçeve iyileştirme yönteminin başarımı açısından hayati önemdedir.

Karşılıklılandırma sorunu çözüldüğünde bir çok yöntemin video ve çoklu veriler üzerinde başarıyla uygulanabileceğini göstermek amacıyla aktif görünüm modeli ve doğrusal bükmeye dayalı poz doğrultma yardımı ile üzerinde çalışılan nesnenin çerçevelerdeki görüntüsü, şekilden bağımsız doku verisi elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen bu doku verisi *3B*’li bir yapı oluşturacak şekilde bir araya getirilmiş ve bu very üzerinde gürültüyü bastırmak ve aynı zamanda detayları korumak amacıyla *3B* difüzyon süzgeçleri temelli bir yöntem önerilmiştir. Önerilen süzgeç benzer özellikteki bölgelere uygulanmış ve bu bölgelerden elde edilen her sonuç belirli bir kurala göre bir araya getirilerek istenilen bilgi veri füzyonu mantığına uygun olarak güçlendirilmiştir. Önerilen ağaç yapılı bu yöntemin performansını arttırmak amacı

ile *MBS* olarak isimlendirilen ve aykırı gözlemlerin (outlier) sonuca etkisini azaltan bir ön işleme yöntemi de önerilmiş ve bu yöntemlerin başarımı arttırdığı deneylerle gösterilmiştir. Önerilen yöntem özellikle toplamsal gürültü ve hizalama hatalarının olduğu çoklu çerçevelerde oldukça iyi sonuçlar verebilmektedir. Ağaç yapısının nasıl oluşturulduğu yöntemin sonucunu etkileyen etkenlerden biridir. Bu çalışmada kural tabanlı bir yöntem tercih edilmiş fakat verinin genel karakteristiğine göre uyarlamalı olarak ağaç yapraklarını oluşturan çerçeve bölgelerinin saptanmasının, başarımı daha da arttırabileceği düşünülmektedir.

Önerilen yöntem ile çoklu çerçevelerde gürültü ve hizalamadan kaynaklanan görsel bozukluklar giderilmiş ve aynı çözünürlükte fakat görsel olarak çok daha kaliteli bir görüntü elde edilebilmektedir. Gelecek çalışmalar kapsamında bu yönteme süper çözünürlük benzeri bir yetenek kazandırılarak, çözünürlükte de bir iyileştirme sağlanması mümkündür.

8. AKTİF AYDINLATMA ve GÖRÜNÜM MODELİ

Yüz tanıma sistemlerinde karşılaşılan temel zorlukların başında, giriş görüntüsündeki yüzün, başarılı bir şekilde hizalanma problemi gelmektedir. Son zamanlarda, önerilen çözümler arasında, model tabanlı yaklaşımlara dayalı olanlar öne çıkmıştır. Model tabanlı yöntemler arasında, en yüksek başarımlı sonucu Aktif Görünüm Modeli temelli yöntemlerin verdiği bilinmektedir.

Klasik AGM, eğitim kümesindeki doku ve yüz şekil değişimini modellediğinden doğası gereği ancak aynı aydınlanma koşullarında elde edilmiş ve benzer renk dağılımına sahip görüntülerde başarılı sonuçlar verebilmektedir. Eğitim kümesinde yer alan yüz görüntülerinden farklı aydınlanma koşuluna sahip test yüz görüntüsünü ise klasik AGM doğru olarak modelleyememektedir. Giriş olarak verilen yüzün ışık değişimi hariç birebir aynısı eğitim kümesinde yer alsa bile klasik AGM doğru yakınsamayı sağlayamamaktadır.

Klasik AGM’de yüz görünümü (appearance) doku (texture)+ şekil (shape) olarak ele alınmıştır. Bu iki değişimin birlikte modellenmesi ile tüm yüz görünümünün sentezlenebileceği varsayımı yürütülmüştür. Bu çalışmada ise görünüm; doku + şekil + aydınlatma (illumination) olarak tanımlanmaktadır. Daha düzenli bir ifade ile klasik AGM’deki doku bileşeni kimlik ve aydınlatmanın birleşimi olarak ifade edilmiştir. Bu sayede ışık değişimleri de Aktif Görünüm Modelinin içerisine alınarak klasik AGM’ye göre çok daha gülbüz bir yöntem geliştirilmiştir.

Bu çalışmada öncelikle ışığın yüzde ne gibi bir değişikliğe sebep olduğu sorusunun yanıtı aranmıştır. Bu amaca yönelik olarak ideal olarak aydınlatılmış yüz görüntüleri ve bu yüzlerin farklı ışıklandırma altında çekilmiş görüntüleri yardımı ile aydınlatma değişim (illumination deformation) verileri hesaplanmıştır. Çalışmada doğrudan giriş görüntülerini modelleme aşamasında kullanmak yerine eğitim kümesindeki ideal görüntüler ve hesaplanan aydınlatma değişim verileri ayrı ayrı modellenmiş ve elde

edilen iki model tek bir modelde birleştirilerek ışığa karşı gürbüz yeni bir *AGM* yaklaşımı oluşturulmuştur.

8.1 Aktif Aydınlatma ve Görünüm Modeli

Modellenmeye çalışılan giriş verisinde olması muhtemel önemli değişimlerin belirlenip model içine dahil edilmesiyle çok daha etkin bir *AGM* yapısı oluşturulması amacıyla Aktif aydınlatma ve görünüm modeli (*AAGM/AIA*) yaklaşımı önerilmiştir. Çalışmada giriş verileri iki boyutlu yüz görüntüleri olduğundan, öncelikle klasik *AGM*'ye göre daha etkin modelleme yeteneğine sahip yeni bir model oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu çalışmada, yüz tanıma ve hizalamanın bilinen zorluklarından biri olan ışık değişimi problemi üzerinde durulmuştur. Fakat önerdiğimiz yöntem sadece yüz hizalama problemine özel bir yaklaşım değildir. Bu çalışmada benzer bir yaklaşımla birçok probleme uygulanabilecek özgün bir yöntem önerilmiş ve yöntemin testleri yüz hizalamada kimlik, şekil ve değişim verisi olarak aydınlatmanın tek bir modelde bir araya getirilmesi ile birleşik bir model oluşturulmuştur. Yapılan deneysel çalışmalarla önerilen yöntemin öngörülen sonuçları vermesi ve bilinen modelleme yöntemlerine göre uygulanabilirlik ve performans anlamındaki üstünlüğü ile savımız doğrulanmıştır. *AAGM*'de iki boyutlu giriş görüntüsünde yüz görünümü üzerinde etkili değişimler olan: kişinin ideal ortamda görüntülenmiş yüz dokusu, yüz şekli ve yüz görünümünde ışık kaynağının yeri ve şiddetine bağlı olarak oluşabilecek aydınlatma değişimi verileri birbirlerinden mümkün olduğunca ayrıştırılmaya çalışılarak modellenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla her yüz için sadece bir adet ideal ortamda çekilmiş yüz görüntüsü ve bu yüze ait yüz şekil verisi iki ayrı model yardımı ile oluşturulmuştur. Bu şekilde kurulan aktif görünüm modelinin sadece ideal şartlarda çalışabileceği açıktır. *AGM*'nin ideal olmayan şartlar altında da yüksek performans verebilmesi için üzerinde çalışılan ışık değişimi temel alınarak ideal modelin içerisine uygun bir şekilde ışık deformasyon modeli eklenmiştir. Literatürde genellikle model dışında tutulan bu tür değişimlerin, modelin içerisine katılarak çok daha etkin modellemenin yapılabileceği gösterilmeye çalışılmıştır.

Önerilen modelin bir önemli katkısı da, eldeki kısıtlı veriden elde edilen modele, başkaca bir veri kümesinden elde edilmiş deformasyonların birleşik model yapısı kullanarak eklenebilmesidir. Gerçek problemlerde sıkça karşılaşılan veri

azlığının modellenmeye çalışılan değişimler hakkında yeterli bilginin elde edilmesini zorlaştırdığı bilinmektedir. Az veri ile yeterli istatistiksel bilgiler elde etmek olanaksızdır. Çalışmada, bu kısıtın aşılabilmesi için, var olan başkaca ama aynı bağlamdaki veri/görüntü kümesinden elde edilen deformasyon modelinin eldeki kısıtlı veri ile kurulan model üzerine bir çeşit iz-düşüm yapılarak kurulan modelin betimleme gücünün artırılması amaçlanmıştır.

8.2 Kimlik ve Aydınlatma Değişimi Modellerinin Kurulması

Bu çalışmada aydınlatma modelini kurabilmek için eldeki veriden kişinin ideal koşullarda aydınlatılmış görüntüsü K_{id} ve farklı aydınlatma koşulları altındaki görüntüleri K_{il} olmak üzere iki farklı alt veri kümesi oluşturulmuştur. K_{il} kümesindeki veriler, aynı bireyin farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş görüntülerinden ideal görüntüsünün çıkartılması ile elde edilmiş fark görüntüleridir. K_{il} kümesindeki fark görüntüleri, ışık kaynağının yüz görünümü üzerindeki etkisini göstermek amacıyla görüntüdeki kimlik bilgisinin çıkartılarak sadece ışık farklılığının sebep olduğu değişimi göstermektedir. Şekil 8.3'te K_{il} kümesinden ortalama yüze eğilmiş kimlik



Şekil 8.1. Kimlik yüz veri kümesinden (K_{id}) beş farklı yüz.

görüntüleri gösterilmektedir. Herhangi bir yüz görüntüsü x ile ifade edilsin. Aynı yüzün tam karşıdan aydınlatılmış yüz görüntüsü ise x_{id} olsun. Her bir yüze ait x_{id} 'ler kullanarak kimlik yüz uzayı kurulabilir. Çalışmada K_{id} yüz verileri kullanarak oluşturulan bu yüz uzayı kimlik modeli olarak adlandırılmıştır. İlk aşamada sadece 5 adet ideal yüz kullanılarak ilk prototip yüz kimlik modeli oluşturulmuştur. Şekil 8.1'de kullanılan beş adet kimlik yüzleri gösterilmiştir. K_{il} veri kümesini oluşturmak için farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş yüz görüntülerinden, aynı bireye ait x_{id} yüzü çıkartılarak aydınlatma değişim yüz verisi elde edilmiştir. Aydınlatma değişim verisi, her yüz için

$$x_{il} = x_i - x_{id} \quad (8.1)$$

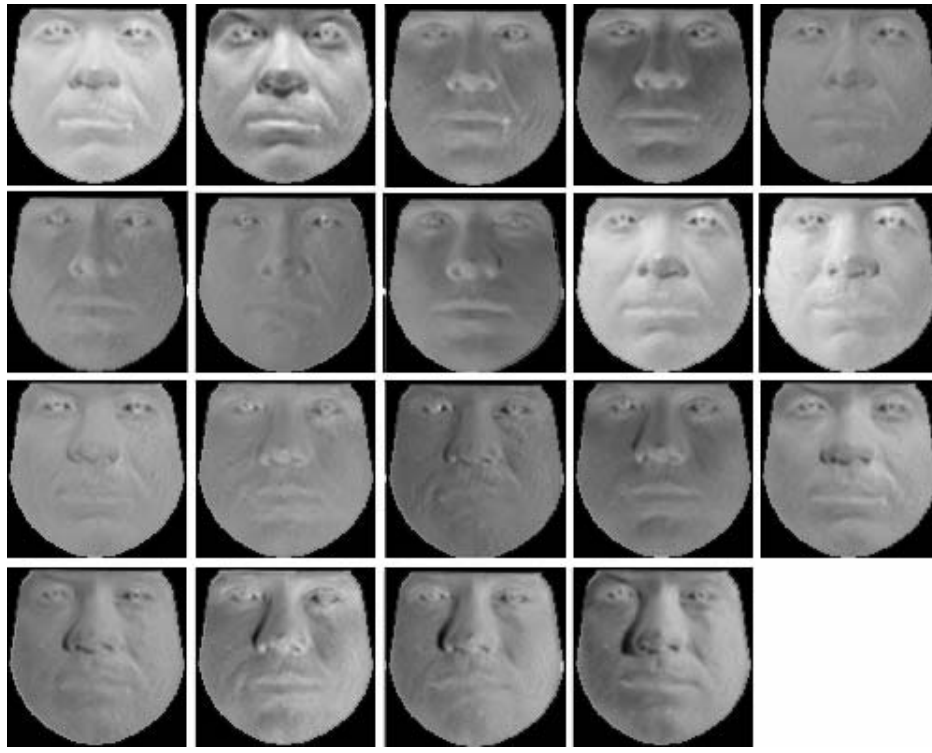


Şekil 8.2. Yale-B yüz veri kümesindeki tek bir kişinin farklı ışıklandırma koşulları altındaki yüz görüntüleri.

biçiminde hesaplanmaktadır. Aydınlatma değişim görüntüleri x_{il} 'ler kullanılarak kimlik modelinden ayrı olarak yeni bir model kurulmuştur. Kurulan bu model aydınlatma modeli olarak isimlendirilmiştir. Kullanılan Yale veri kümesinden sadece 5 farklı birey ve her birey için 20 yüz görüntüsü seçilmiştir. 20 adet görüntüden bir tanesi tam karşıdan aydınlatılmış x_{id} görüntüsü olarak kullanılmış ve geriye kalan 19 adet yüz görüntüsünden x_{id} ideal yüzü çıkartılarak x_{il} görüntüleri hesaplanmıştır. Elde edilen x_{il} fark görüntüleri Şekil 8.3'te gösterilmiştir. Şekil 8.2 ve Şekil 8.3'teki yüz görüntülerine dikkat edilirse yüz görüntülerinin şekilden bağımsız hale getirildiği görülecektir. Yüz için oluşturulan kimlik ve aydınlatma modeli için öncelikle yüzdeki kişiler arası yüz görüntü değişimi ve ışık değişiminden kaynaklanan aydınlatma değişimi dışındaki tüm değişimler ortadan kaldırılmıştır. Aydınlatmadaki değişim yüz doku bilgisini doğrudan etkileyebilirken, yüz şekil bilgisi üzerinde ise hiç bir etkisi yoktur.

Doğru modelin kurulabilmesi için yüz görüntüleri arasındaki ölçek, dönme ve yer değiştirme gibi farklılıklar ortadan kaldırılması gerekmektedir. Çalışmada bu değişimleri ortadan kaldırmak için aşağıdaki işlemler yapılmıştır:

- Eğitim kümesinde yer alan tüm yüz görüntülerinin önemli noktaları el yordamı ile işaretlenmiş.
- Ortalama yüz şekli hesaplanmış.



Şekil 8.3. Eğitim kümesinde yer alan bir kişiye ait aydınlatma (fark) veri kümesi (K_{il}).

- Tüm yüzler ortalama yüz şekline eğilerek, tüm yüzler şekilden bağımsız hale getirilmiştir.

Yüz görüntülerinde istenmeyen bu tür değişimler ortadan kaldırılarak elde edilen maske yüzlere temel bileşen analizi (*TBA*) uygulanarak hem kimlik hem de aydınlatma modeli kurulmuştur. *TBA* sonucu elde edilen temel bileşen skorları bize aydınlatma ve kimlik değişimlerini parametrik olarak ifade etme imkanı vermektedir. Kimlik modeline ait Φ_{id} özvektörleri ve λ_{id} özdeğerlerinin hesaplanmasında, sadece x_{id} ideal yüz görüntüleri ve *TBA* kullanılmaktadır. Elde edilen Φ_{id} özvektörleri Şekil 8.4'te gösterilmiştir. Aydınlatma değişim modeline ait Φ_{il} özvektörleri ve λ_{il} öz-değerlerinin hesaplanmasında sadece x_{il} yüz aydınlatma değişimi görüntüleri ve *TBA* kullanılmaktadır. Elde edilen Φ_{il} öz-vektörleri Şekil 8.5'te gösterilmiştir. Kurulan kimlik ve aydınlatma modellerinin ilgili değişimleri modelleme



Şekil 8.4. Kimlik yüz uzayına ait ilk beş özyüz (Φ_{id}).

yeteneklerinin gösterebilmesi için mod değişimleri hesaplanmıştır. Mod değişimleri hesaplandığında ve bu değişimleri görsel olarak Şekil 8.6 ve Şekil 8.7’de olduğu gibi ortalama yüzden sapmayı gösteren düzenli grafikler haline getirildiğinde her bir temel bileşenin (TB) yüzdeki kimlik ve aydınlatma üzerine etkisi çok daha kolay analiz edilebilmektedir. Kurulan modeller yardımı ile sentezlenen yeni yüz t olsun. Eğitim kümesindeki ortalama yüzü ise \bar{t} ile ifade edelim. Yeni bir yüz, b parametre vektörü yardımı ile şu şekilde sentezlenebilir:

$$t = \bar{t} + \Phi_t b. \quad (8.2)$$

Buradaki Φ_t , eğitim kümesinden TBA yardımı ile hesaplanan öz-vektörler matrisidir.



Şekil 8.5. Aydınlatma modeline ait ilk beş özyüz (Φ_{il}).

Denklem (8.2) sayesinde parametrik olarak yeni yüzlerin sentezlenmesi mümkün hale gelmektedir. Kurulan kimlik modele ait ilk beş mod değişimi aşağıda gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$t_{id} = \bar{t}_{id} + b_{id} \Phi_{id}^i \sqrt{\lambda_{id}^i} \quad (8.3)$$

Dikkat edilirse izdüşüm katsayıları kullanmadan, b_{id} değişim parametreleri $[-3, +3]$ aralığında ± 1.5 'luk adımlarla çizdirildiğinde Şekil 8.6’da kimlik modelinin her bir TB için ortalama yüzü nasıl deforme ettiği gözlenebilmektedir. Aynı şekilde aydınlatma modeline ait mod-değişim grafikleri

$$t_{il} = \bar{t}_{il} + b_{il} \Phi_{il}^i \sqrt{\lambda_{il}^i} \quad (8.4)$$

biçiminde hesaplanabilir. Denklem (8.4)’te ki b_{il} aydınlatma değişim parametrelerini $[-2, +2]$ aralığında ± 1 'lik adımlarla çizdirildiğinde Şekil 8.7’de aydınlatma modelinin her bir TB için ortalama yüzü nasıl deforme ettiği gözlenebilmektedir. Kurulan yüz ve aydınlatma değişimi modelleri ile birlikte yeni yüzler sentezlenebilmektedir. Özellikle belirli bireylerin yüzleri önerilen aydınlatma modeli yardımı ile sanal olarak aydınlatılabilmektedir. Şekil 8.8 ’de K_{id} veri kümesinden elde edilen ortalama yüz aydınlatma modeli kullanılarak tekrar aydınlatılmıştır. Şekil 8.8 dikkatle incelendiğinde birinci temel bileşenin TB_1 ortam ışığını kontrol ettiği

görülecektir. TB_2 'nin ışık kaynağının azimut eksenindeki değişimini, TB_3 'ün ise yükselti (elevation) açısını kontrol eden bileşenler olduğu görülecektir. Aydınlatma



Şekil 8.6. Kimlik yüz modeline ait mod değişimleri.

modeline ait özvektörler belirli ağırlıklarla değiştirildiğinde farklı aydınlatılmış yüz görüntülerine ek olarak, aydınlatılan yüzün kendisi de kimlik modeli yardımı ile değiştirilebilir. Bunun için Şekil 8.8'de gösterildiği gibi ortalama yüz kullanmak yerine her bir sentezlenen kimlik yüze aydınlatma modelini uygulamak yeterlidir. Şekil 8.9'da yüz modeli ile sentezlenen farklı yüzler aydınlatma modeli ile sentetik olarak ve verilen modele göre aydınlatılmıştır. Dikkat edilirse burada yüz ve aydınlatma modelleri tam olarak birleştirilmeden yüzlerin hem sentezlenip hem de farklı şekillerde aydınlatılabileceği gösterilmektedir. Bu sayede kurulan kimlik ve aydınlatma modellerinin başarıyla çalışabileceği gösterilmiştir.

8.3 AAGM: Aydınlatma ve Yüz Modellerinin Birleştirilmesi

Aktif görünüm ve aydınlatma modelinin (AAGM) oluşturulması için eldeki veri kümesinden ideal olarak aydınlatılan yüzlerle kimlik modeli ve eğitim kümesinden elde edilen aydınlatma verisiyle de aydınlatma modeli kurularak bu iki modeli bir araya getirilerek önerilen model kurulmaktadır. AAGM'nin oluşturulma amacı, aydınlatma değişimlerine karşı klasik aktif görünüm modeline göre çok daha gürbüz model oluşturmaktır. Kimlik ve aydınlatma değişimleri ayrı ayrı modellenmekte



Şekil 8.7. Aydınlatma yüz modeline ait mod değişimleri. Her satır aydınlatma modeline ait bir temel bileşeni göstermektedir. Her sütun ise soldan-sağa -2, -1, 0, 1, 2 mod değişimlerini göstermektedir.

ve bu iki model tek bir model haline getirilerek birleşik aktif aydınlatma ve görünüm modeli oluşturulmaktadır. Klasik aktif görünüm modeli sadece ölçek,



Şekil 8.8. Ortalama yüzün kurulan model yardımı ile tekrar aydınlatılması. Kimlik model sabit tutulmuş değişim sadece aydınlatma modelinde uygulanmıştır.

dönme ve yer değiştirme gibi ilgin (affine) değişimleri Genelleştirilmiş Procrustes Analizi (GPA) ve ilgin bükme (affine warping) yardımı ile normalize etmektedir. Eğitim kümesindeki tüm yüzlere ait önemli noktalar el yordamı ile işaretlenerek ve bu noktalara ait konaçlar kullanılarak tüm eğitim kümesi için GPA yardımı

ile ortalama yüz şekli elde edilir. Elde edilen ortalama yüz şekli referans yüz şekli olarak kabul edilerek, eğitim kümesindeki tüm yüzler referans yüze bükülür. Böylece tüm yüz görüntüleri ilgin değişimlerden arındırılmış olur. Dikkat edilirse klasik *AGM*'de yapılan bu normalizasyon ile sadece ilgin değişimler ortadan kaldırılabilir. Aydınlatma değişimlerini normalize edecek herhangi bir normalizasyon işlemi klasik *AGM*'de bulunmamaktadır. Ayrıca kişiler arası yüz doku ve yüz şekil değişimini bir arada modellemeye çalışan klasik *AGM*'de, ışık değişimleri hiç göz önünde bulundurulmadığı için aydınlatma değişimlerinden dolayı yüz dokusunda meydana gelen değişimleri kişiler arası yüz değişimi olarak algılayarak hatalı bir model kurmaktadır. Klasik *AGM*'ye aydınlatma değişimlerini

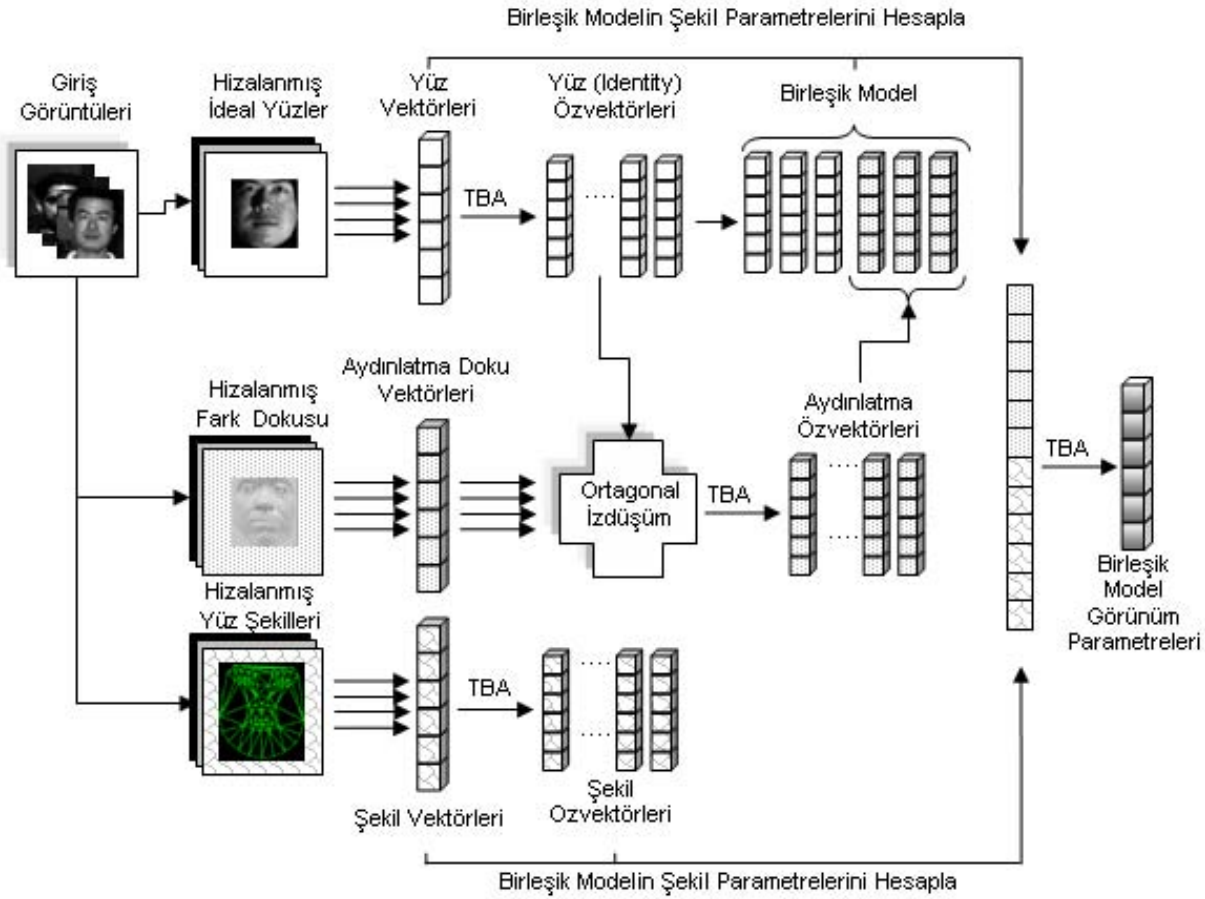


Şekil 8.9. AAGM'nin kimlik model parametreleri ile sentezlenen yüzlerin, aydınlatma model parametreleri değiştirilerek sanal olarak aydınlatılması.

modelleyebilme yeteneği kazandırmak amacı ile ışık değişimlerini *AGM* yapısı altında modelleyebilen yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yeni yöntemde yüz görünümünü oluşturan değişenlerin kişiye ait yüz dokusu, yüz şekli ve yüz aydınlatmasının birleşimiyle oluştuğu varsayılmaktadır. Önerilen *AAGM* şekil, doku ve aydınlatma değişimlerini modelleyebilmektedir. Kurulan birleşik modelin ürettiği yüz parametre vektörü ile farklı kişilere ait yüzleri (eğitim kümesine bağlı olarak) ve bu yüzlerin farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş görüntüleri sentezlenebilmektedir. Ayrıca birleşik model parametreleri uygun bir şekilde değiştirilerek verilen bir yüzü tekrar aydınlatmak mümkün hale gelmektedir. *AAGM*'nin ürettiği parametre vektöründe, kimlik ve aydınlatmayı değişimlerini kontrol eden parametreler ayrılabilirdiği için tanıma ve ışık ortamı hakkında yapılacak analizler çok daha sağlıklı olacaktır.

Bu bölümde birleşik modelin oluşturulması için kullanılan Ortogonal Alt-Uzay izdüşüm (Orthogonal Sub-space Projection) yöntemi [120] kısaca tanıtılacaktır.

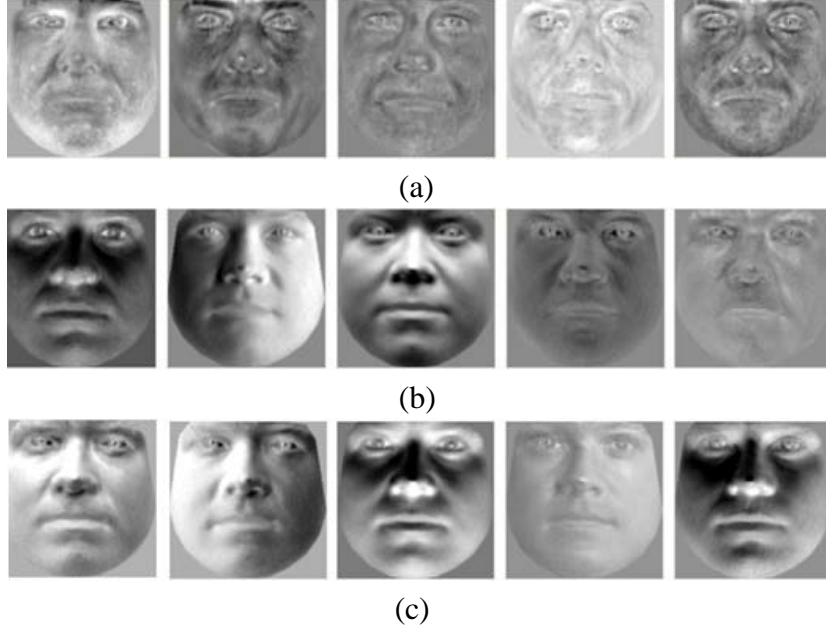
Şekil 8.10'da önerilen birleşik modelin genel yapısı gösterilmektedir. Şekil 8.10'da gösterildiği gibi, annotasyonu el yordamı ile yapılmış yüz veri kümesi giriş olarak kullanılmaktadır. Şekil 8.10'nun ilk satırında, şekil değişimlerinden arındırılmış ve ideal olarak aydınlatılmış yüzlere ait yüz dokusu vektörleri haline dönüştürülmektedir. Tüm yüzlerden elde edilen vektörlere temel bileşen analizi *TBA* uygulanarak kimlik modelini oluşturan özdeğer ve özvektörler elde edilmektedir. Şekil 8.10'daki orta



Şekil 8.10. Önerilen Aktif Aydınlatma ve Görünüm Modelinin (AAGM) genel yapısı.

satırda ise ideal yüzlerle, farklı ışıklandırma koşullarında çekilmiş yüzler arasında fark görüntüleri elde edilmektedir. Fark görüntüleri hesaplanmadan önce tüm yüzler ortalama yüz şekline bükülmektedir. Fark görüntüleri bir üst satırda elde edilen kimlik modeline ait özvektörler yardımıyla ortogonal alt-uzay izdüşümü uygulanır. İzdüşüm sonucunda elde edilen yeni fark görüntülerine *TBA* uygulanarak aydınlatma modelini oluşturan özdeğer ve özvektörler elde edilir. Klasik *AGM*'deki doku modeli yerine elde edilen kimlik ve aydınlatma baz vektörleri bir araya getirilerek oluşturulan yeni birleşik model matrisi kullanılır. Son satırda ise eğitim kümesindeki şekil bilgileri

kullanılarak şekil modeli oluşturulmaktadır. Klasik *AGM*'de olduğu gibi doku ve şekil modellerinden elde edilen parametrelerden *AAGM* parametreleri elde edilir. Bu parametreler yardımıyla klasik *AGM*'den farklı olarak hem şekil hem kimlik hem de aydınlatma değişimleri kontrol edilebilmektedir.



Şekil 8.11. Özyüzler: a) Yüz modeline (Φ_{id}) ait ilk beş özyüz, b) Aydınlatma modeline ait (Φ_{il}) özyüzler, c) Ortogonal alt-uzay izdüşüm yöntemi ile elde edilen aydınlatma modeline (Φ_{il}^*) ait özyüzler.

8.4 Ortogonal alt-uzay izdüşüm yöntemi ile birleşik modelin kurulması

Yüz ve aydınlatma değişimlerini tek model altında birleştirmek için ortogonal alt-uzay izdüşümü yöntemi kullanılmıştır. Amacımız kimlik modeline ait baz vektörleri (Φ_{id}) ile aydınlatma modeline ait baz vektörlerini (Φ_{il}) birleştirerek $[\Phi_{id} \ \Phi_{il}]$ şeklinde birleştirilmiş bir model oluşturmaktır. Fakat Φ_{id} ve Φ_{il} öz vektörlerinin tek bir model haline getirilebilmesi için vektörlerin birbirlerine dik olma koşulunun garantilenmesi gerekir. Bu noktada her iki modele ait vektörlerin birbirlerine dik hale getirilmesi için ortogonal alt-uzay izdüşümü yöntemi kullanılmıştır.

Birleşik modelin kurulmasında kullanılan ilk veri kümesi,

- *Kimlik (identity) veri kümesi:* 5 kişi, önden aydınlatılmış yüz görüntüleri.
- *Aydınlatma (illumination) değişimi veri kümesi:* Her kişinin 19 adet farklı ışık koşullarında aydınlatılmış görüntülerinden elde edilmiş fark görüntüleri

olmak üzere toplam 95 yüz görüntüsünden oluşmaktadır. Yukarıdaki veri kümeleri kullanılarak oluşturulan kimlik modeli Φ_{id} ve aydınlatma değişimi modeli Φ_{il} temel bileşen analizi kullanılarak oluşturulur. Ortogonal alt-uzay izdüşümü yöntemi kullanılarak Φ_{id} ve Φ_{il} birbirlerine dik hale getirecek dönüşüm yapılır. Denklem (8.5)'te gösterilen bu dönüşüm ile yüz uzayına dik Φ_{il}^* elde edilir.

$$\Phi_{il}^* = [I - \Phi_{id}\Phi_{id}^T]\Phi_{il} \quad (8.5)$$

Bu işlemten sonra $\Phi_{id} \perp \Phi_{il}^*$ koşulunun sağlandığını söylenebilir. Birbirlerine dik olan öz-vektörleri tutan Φ_{id} ve Φ_{il}^* kullanılarak

$$\Phi_{aia} = [\Phi_{id} \quad \Phi_{il}^*] \quad (8.6)$$

birleşik model kurulabilir İfadede yer alan Φ_{aia} elde edilen birleşik modeli göstermektedir. Φ_{aia} kullanılarak yeni bir yüz,

$$t_{aia} = \bar{t}_{id} + \Phi_{aia}b_{aia} \quad (8.7)$$

biçiminde sentezlenebilir. Denklem (8.7)'deki t_{aia} sentezlenen yüzü, \bar{t}_{id} ise yüz veri kümesinden elde edilen ortalama yüzü, b_{aia} ise birleşik modeli kontrol eden parametre vektörünü göstermektedir. Şekil 8.11'de kimlik, aydınlatma ve yüz uzayına izdüşürülmüş aydınlatma modeline ait öz yüzler gösterilmektedir.

Ortogonal alt-uzay izdüşüm yöntemini başkaca bir şekilde de uygulamak mümkündür. $\Phi_{id} \perp \Phi_{il}^*$ koşulunu sağlayabilmek için aydınlatma verisi içerisindeki kimlik vektörlere ait yönler kaldırılarak oluşturulan yeni veriyle Φ_{il}^* modeli kurulur. Bunun için öncelikle Φ_{id} modeli elde edilir. Eğitim kümesinden elde edilen aydınlatma fark (difference) verisi d_{il} olsun. Φ_{id}^i yüz modelinin i . öz vektörü olsun, aydınlatma verisi olan d_{il} 'in izdüşüm sonucu elde edilen hali d_{il}^* şu şekilde bulunur;

$$d_{il}^* = d_{il} - \sum_{i=1}^N \frac{d_{il}\Phi_{id}^i\Phi_{id}^{iT}}{\|\Phi_{id}^i\|} \quad (8.8)$$

Elde edilen yeni aydınlatma verisi olan d_{il}^* 'e TBA uygulanarak yüz modeli vektörlerine dik olan Φ_{il}^* vektörleri elde edilir. Bu işlemlerden sonra $\Phi_{id} \perp \Phi_{il}^*$ koşulu sağlanmış olur. Birleşik model Φ_{aia} , denklem (8.10)'daki gibi oluşturulabilir. Bu aşamadan sonra denklem (8.7)'de olduğu gibi yeni yüz görüntüleri sentezlenebilmektedir.

$$\Phi_{aia} = [\Phi_{id}\Phi_{il}^*] \quad (8.9)$$

Şekil 8.12’te yüz, aydınlatma ve denklem (8.8) kullanılarak elde edilmiş aydınlatma modeline ait özyüzler gösterilmektedir. Denklem (8.8)’in gerçekleşmesi, büyük matris çarpımları (örn. 40400×40400) gerektirdiği için zor olmaktadır. Bilgisayarla hesaplama esnasında bellek sınırlamaları nedeniyle denklem (8.8)’deki ifade

$$d_{il}^* = d_{il} - \sum_{i=1}^N \frac{(d_{il}^T \Phi_{id}^i) \Phi_{id}^i}{\|\Phi_{id}^i\|} \quad (8.10)$$

biçiminde yeniden ifade edilebilir. İfade bu haliyle kullanılarak yüz ve aydınlatma değişimleri birbirlerine dik hale getirilebilmektedir. Aydınlatma değişim verileri



Şekil 8.12. AAGM D_1 eğitim kümesi.

önceden hesaplanan yüz uzayına dik olacak şekilde tekrar oluşturulmakta ve elde edilen d_{il}^* verilerine temel bileşen analizi uygulanarak TBA yardımıyla Φ_{il}^* elde edilmektedir.

8.5 AAGM Eniyileme Problemi

AAGM model kurulumu aşamasında *AGM*'den farklılık gösterse de, arama ve eniyileme aşamalarında *AGM* ile bire bir aynıdır. Bu nedenle *AGM* için önerilmiş tüm eniyileme ve arama yaklaşımları *AAGM* içinde kullanılabilir. Bu çalışmada [91]'te kullanılan *AGM* arama yöntemi kullanılmıştır. Bu bölümde Aktif Görünüm Modeli arama algoritması hakkında biraz daha detaylı bilgi verilecektir.

AAGM'de modelin yakınsamasını kontrol eden eniyileme aşamasında klasik *AGM*'de kullanılan çevrimsel algoritma kullanılmıştır. Model çok daha güçlü hale getirilmek istenirse bu eniyileme yöntemi yerine yerel minimumlara karşı gürbüz çok daha güçlü bir yöntem tercih edilebilir. *AGM* ve *AAGM*'yi bir modelleme yöntemi olarak kullanabilmek kurulan modelin giriş görüntüsüne otomatik olarak yakınsamasını sağlayacak eniyileme yönteminin modele eklenmesi gerekir.

En iyileme yönteminin amacı giriş görüntüsüne en yakın görüntüyü sentezlememizi sağlayacak model parametresi olan p_{opt} gibi bir parametre vektörünü kestirmektir. Bu amaca yönelik yöntem p_0 gibi başlangıç parametresi ile başlar ve çevrimsel olarak p_{opt} parametre vektörüne yakınsamaya çalışılır. *AAGM* arama işlemi model tarafından sentezlenen görüntü ile özgün görüntü arasındaki farkı enküçüklemeye çalışan bir eniyileme problemidir. Eniyileme problemini

$$\delta I = I_{image} - I_m \quad (8.11)$$

şeklinde ifade etmek mümkündür. *AAGM* model parametreleri değiştirilerek sentezlenen I_m model görüntüsü olabildiğince I_{image} giriş görüntüsüne yakınlaştırılmaya çalışılır. Bu noktada eniyileme kriteri olarak belirlenen E 'yi en-küçükleyecek poz ve model parametreleri kestirilmeye çalışılır. *AGM* ve *AAGM* arama işlemleri esnasında model ve poz parametreleri sistematik bir şekilde değiştirilerek en uygun noktaya yakınsama sağlanmaya çalışılmaktadır. *AAGM*'ye giriş olarak verilen görüntüye ait doku bilgisi genel bir normalizasyon işleminden geçirilir. Normalizasyondan geçirilmiş görüntüler için denklem (8.11)'teki δI yerine δg kullanılmaktadır. Normalize edilmiş M uzunluklu doku vektörü için hata,

$$E = \sum_{i=1}^M (g_i - g_m)^2 = \sum_{i=1}^M (\delta g_i)^2 = \|\delta g\|^2 \quad (8.12)$$

biçiminde hesaplanmaktadır. Model tarafından sentezlenen doku ile giriş görüntüsüne ait doku arasındaki hata hesabı, referans şekle normalize edilmiş doku vektörleri arasında yapılır. En iyileme çevrimi içinde model tarafından sentezlenen şekil vektörü ile giriş görüntüsüne ait şekil vektörü aynı referans şekile bükülür ve bu sayede normalize doku vektörü elde edilir. Şekil bakımından normalize edilmiş giriş görüntüsüne ait doku vektörü, tezin ikinci bölümünde tanımlanan doku normalizasyonu yöntemi ile normalize edilerek; ortalaması sıfır ve varyansı bir olan normalize doku vektörü elde edilir. Denklem (8.12)'teki ifadeyi eniyileme problemi şeklinde ortaya koymak için

$$r(p) = g_i - g_m \quad (8.13)$$

biçiminde ifade edebiliriz. Buradaki p , *AAGM*'ye ait model parametrelerini göstermektedir. Denklem (8.13)'teki ifadeden anlaşılacağı gibi, dokular arası fark, aslında p 'nin optimum model parametre vektörü olan p_{opt} 'ye ne kadar yakın

olduğunun bir ölçümüdür. Denklem (8.12)'de verilen hata E , klasik AGM 'de

$$E = \|r(p)\|^2 \quad (8.14)$$

biçiminde ifade edilmektedir. Buradan hareketle $r(p)$ 'nin birinci dereceden Taylor açılımından,

$$r(p+\delta p) \cong r(p) + \frac{\partial r}{\partial p} \delta p. \quad (8.15)$$

elde edilebilir. Bu noktada parametre güncelleme vektörü olarak adlandırabileceğimiz δp 'nin kestirilmesi gerekir. $\|r(p+\delta p)\|^2$ 'yi enküçükleyecek δp ,

$$\frac{\partial r}{\partial p} \delta p = -r(p) \quad (8.16)$$

biçiminde ifade edilebilir. Parametre güncelleme yönünün doğru olarak kestirilebilmesi için denklem (8.16)'daki denklemin her çevrimde çözülmesi gerekir. Fakat her $AAGM$ eniyileme çevriminde $\partial r/\partial p$ gradyan matrisinin yeniden hesaplanması oldukça maliyetli bir işlemdir. Klasik AGM teorisinde bu gradyan matrisinin sabit olduğu varsayılmıştır. $AAGM$ 'de benzer şekilde, her çevrimde $\partial r/\partial p$ gradyan matrisini hesaplamak yerine, eğitim kümesinde yer alan her görüntü için optimal p parametresi için bir kez hesaplanır ve daha sonra hesaplanan tüm gradyan matrislerinin ortalaması alınarak sabit gradyan matrisi bulunur. AGM eniyileme aşamasında sabit gradyan matrisleri yerine başkaca yöntemlerde önerilmiştir [87] [88]. Bu yöntemler arasında öne çıkan yöntemlerden biri olarak [88]'i gösterebiliriz. Bu yöntem AGM 'nin yakınsama başarımını artırırken ve model karmaşıklığını da büyük ölçüde azaltmayı başarmıştır. Fakat [88]'de önerilen bu yöntem sadece kişiye özel olarak (örn: tek bir birey için) hazırlanan AGM 'ler için çalışabilmektedir. Bu ise uygulama alanını kısıtlaması bakımından yöntemin olumsuz yönü olarak sayılabilir. Bunun yanında AGM 'nin eniyileme yönteminde farklılıklar yapılmasına dayalı birçok yöntem literatürde raporlanmıştır [72].

$\partial r/\partial p$ 'nin sayısal olarak nasıl hesaplandığından burada kısaca bahsetmekte yarar var. İlk olarak eğitim kümesinden seçilen herhangi bir görüntü için model parametre vektörü p 'nin içindeki parametrelerden bir tanesi optimal değerinden, Δ gibi belirli bir miktarda değiştirilerek p' elde edilir. Bu yapılırken parametre vektöründeki diğer tüm parametreler sabit tutulur. Ardından $r(p')$ hesaplanır. Bu işlem tüm parametreler için tekrarlanır. Her parametre yer değiştirme işleminden sonra $r(p)$ 'nin parametre değişim

miktarı cinsinden kısmı türevi,

$$\frac{(r(p') - r(p))}{\Delta} \quad (8.17)$$

biçiminde bulunur. Bu işlem, her parametre için tekrarlanır ve elde edilen kısmı türevlerin ortalaması alınır. Eniyileme çevrimi esnasında, model tarafından sentezlenen doku ile giriş görüntüsüne ait doku arasındaki hata olan her r için denklem (8.16)'daki ifade çözülerek parametre güncelleme yönü belirlenir. Parametre güncelleme yönü,

$$\delta p = -Rr(p) \quad (8.18)$$

biçiminde ifade edilen matris çarpımı ile bulunur. Bu ifadede yer alan R matrisi,

$$R = \left(\frac{\partial r^T}{\partial p} \frac{\partial r}{\partial p} \right)^{-1} \frac{\partial r^T}{\partial p} \quad (8.19)$$

şeklinde ifade edilir. Güncelleme yönü saptandıktan sonra p parametre vektörü $p + \delta p$ şeklinde güncellenerek yeni E hata hesabı yapılır. Eğer parametre güncellemesinden sonraki hata, önceki hatadan daha küçükse, güncelleme kabul edilir ve aynı yönde güncellemeye devam edilir. Eğer tersi durum geçerliyse, yani parametre güncelleme hatayı arttırdı ise parametre güncellemeye aynı yönde fakat daha küçük adımlarla aşağıdaki gibi devam edilir.

$$p = p + \eta \delta p \quad (8.20)$$

Buradaki η , 0.5, 0.25, 0.125 şeklinde azalarak giden ve parametre güncelleme adımlarını kontrol eden bir katsayıdır. Eniyileme çevrimi, hata eniyileme hatası olan E 'de bir değişme olmayana kadar devam eder ve sonunda yakınsama ilan edilir. En iyileme işlemi sonunda elde edilen doğrusal model basitçe şu şekilde ifade edilebilir,

$$\delta c = R\delta g \quad (8.21)$$

Cootes'un yaptığı çalışmalarda [46] [75] [79] [72] denklem (8.21)'daki doğrusal yaklaşımla oldukça başarılı bir sonuç alındığı raporlanmıştır. Denklem (8.21)'da en uygun R matrisinin hesaplanabilmesi için model ve poz parametreleri sistematik bir şekilde değiştirilmesine dayanan bazı deneyler yapılmaktadır. Elde edilen bilgilere çok-değişkenli doğrusal regresyon analizi uygulanarak R matrisi bulunmaktadır. Model parametreleri c , şekil dönüşüm parametreleri ise t olarak ifade edilsin. Poz parametrelerini şu şekilde ifade etmek mümkündür,

$$t = (s_x, s_y, \Delta_x, \Delta_y)^T \quad (8.22)$$

İfadedeki s_x ve s_y ölçekleme ve dönmeyi aynı anda kontrol eden parametrelerdir ve

$$\begin{aligned} s_x &= s \cos \theta - 1 \\ s_y &= s \sin \theta \end{aligned} \quad (8.23)$$

biçiminde ifade edilirler. Δ_x ve Δ_y ise x ve y yönünde yer değiştirmeyi kontrol eden parametrelerdir. Yukarıda bahsedilen parametre değişim deneyleri aşağıda detaylı olarak verilmiştir:

1. Poz parametresi t 'yi ve model parametresi c 'yi belirlenen miktarda değiştir.
2. Model parametresini güncelle: $c = \delta c + c_0$
3. Poz parametresi t 'yi güncelle.
4. Güncellenmiş parametreleri kullanarak yeni doku vektörü, g_m 'yi ve yeni şekil x 'i sentezle.
5. x şeklinin t 'de verilen poza uygun şekilde hizalanmasıyla görüntü koordinatlarındaki x_{im} 'i elde et.
6. x_{im} 'i kullanarak giriş görüntüsündeki benek değerlerini örnekleyerek g_{im} doku vektörünü oluştur.
7. g_{im} 'i normalize ederek, global normalizasyondan geçmiş g_i doku vektörünü bul.
8. $\delta g = g_i - g_m$ ile doku hatasını hesapla.
9. δt ve δc 'yi deney matrisleri olarak adlandırılan T ve C matrislerinin j . sütunlarına yaz.
10. δg 'yi G matrisinin j . sütununa yaz.

T , C ve G matrisleri arasında şu şekilde bir ilişki vardır;

$$\begin{aligned} C &= R_c G \\ T &= R_t G \end{aligned} \quad (8.24)$$

Çoklu-değişken regresyon analizi ile benek farkları ve şekil dönüşüm/model parametreleri değişimleri arasında aşağıdaki ilişki kurulabilir:

$$\begin{aligned} \delta c &= R_c \delta g \\ \delta t &= R_t \delta g \end{aligned} \quad (8.25)$$

Cootes [79]'deki çalışmasında model parametre sarsımı (perturbation) için eğitim kümesinden elde edilen parametrelerdeki standart sapmanın 0.5 katının kullanımının

en uygun çözüm olduğunu raporlamıştır. Poz parametreleri içinse %10 ölçek, x ve y yer değişimi için ise ± 3 benek değişimini önerilmiştir. Bu çalışmada Stegmann [91]'te önerdiği model/poz sarsım değerleri kullanılmıştır. Poz parametreleri için yapılan parametre değişimleri aşağıda verilmiştir:

- $\Delta_x : \pm 6, \pm 3, \pm 1$
- $\Delta_y : \pm 6, \pm 3, \pm 1$
- $\theta : \pm 5, \pm 3, \pm 1$
- $s : 0.95, 0.97, 0.99, 1.01, 1.03, 1.05.$

Model parametreleri için yapılan parametre değişimleri, her parametre için $\pm 0.5\sigma_i, \pm 0.25\sigma_i$ olarak kullanılmıştır. Parametre değiştirme değerleri her bir parametre için ayrı ayrı yapılmaktadır. Her değişim deneyi sonucunda bu parametrelere karşılık gelen doku farkı ölçülmektedir.

Çok-değişkenli doğrusal regresyon analizi veya başkaca en-iyileme algoritması kullanılarak *AGM*'de doku farkı ve parametre değişimi arasındaki doğrusal ilişkiyi gösteren R matrisleri hesaplanmaktadır. Çok değişkenli regresyonda temel öngörü iki farklı değişken kümesi arasında doğrusal bir bağımlılık olduğudur. *AGM*'de amaç, normalize edilmiş doku farkları δg ile model parametre değişimi arasındaki doğrusal ilişkiyi veren R regresyon matrisini kestirmektir. Normalize edilmiş doku farkları olan δg 'ler G matrisinde, model parametre değişimleri ise V matrisinde tutulmaktadır. Varsayılan doğrusal ilişkiyi bulmak için s adet parametre değişimi deneyi yapılmaktadır. Her bir deneyde t adet model parametresi belirlenen miktarlarda değiştirilerek m adet benek değeri farklarından oluşan doku farkları hesaplanır. Yukarıda ifade edilenleri denklem (8.26)'deki gibi matris gösterimi ile ifade edilebilir,

$$\left[\begin{bmatrix} v_{1_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ v_{1_t} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} v_{s_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ v_{s_t} \end{bmatrix} \right] = R \left[\begin{bmatrix} g_{1_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ g_{1_m} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} g_{s_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ g_{s_m} \end{bmatrix} \right] \quad (8.26)$$

Veya denklem aşağıda gösterildiği gibi ifade edilebilir,

$$V = RG. \quad (8.27)$$

Buradaki V , R ve G sırasıyla $t \times s$, $t \times m$ ve $m \times s$ 'lik matrislerdir. Çok-değişkenli regresyon analizi hakkında detayli bilgi tezimiz kapsamında verilmeyecektir.

AAGM’de modelin yakınsamasını kontrol eden en-iyileme aşamasında klasik AGM’de kullanılan çevrimsel algoritma kullanılmıştır. Model çok daha güçlü hale getirilmek istenirse bu en-iyileme yöntemi yerine yerel minimumlara karşı gürbüz çok daha güçlü bir yöntem tercih edilebilir. Burada anlaşılabilirliği arttırmak için AGM’de de kullanılan en-iyileme yönteminin AAGM’deki kullanımının sözde kodu aşağıda verilmiştir.

1. Sönüm vektörü k 'ya ilk değerini ver: $k = [1.5, 0.5, 0.25, 0.125, 0.0625]$
2. Model parametrelerini parametre değerler aralığını dikkate alarak ilklendir
3. Modeli kullanarak normalize edilmiş g_m doku vektörünü sentezle
4. x_{im} 'in altında kalan görüntüden g_{im} doku vektörünü oluştur.
5. g_{im} 'i normalize ederek g_i 'yi elde et.
6. Hata vektörü $\delta g_0 = g_i - g_m$ 'yi hesapla.
7. Hata vektörünün normunu alarak genel hata E_0 'ı hesapla, $E_0 = |\delta g_0|$
8. Hata vektörü δt ve şekil kestirim matrisi R_t 'yi kullanarak poz parametre güncelleme vektörünü kestir, $\delta t = R_t \delta g_0$
9. Model parametre güncelleme vektörünü kestir, $\delta c = R_c \delta g_0$
10. $i = 1$ yap.
11. Model parametre vektörünü $c = c - k_i \delta c$ ile güncelle.
12. δt 'yi kullanarak şekli dönüştür.
13. Elde edilen şekil için g_{im} doku vektörünü elde et ve yeni hata değeri olan E_i 'yi hesapla.
14. Eğer $E_i > E_0$ ise yap ve 10. adıma git
15. Hesaplanan hatayı kaydet
16. Eğer en son çevrimde hesaplanan hatada hiçbir değişme olmamışsa, yakınsamayı ilan et. Eğer bir değişim varsa 3. adıma git.

8.6 Deneysel Çalışmalar

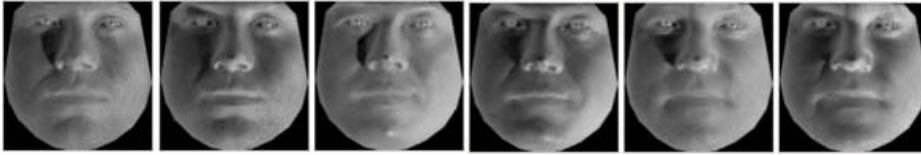
Deneysel Çalışma 1: Bu çalışmada önerilen birleşik görünüm modeli üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Bu deneyde, AAGM eğitimi

için Yale yüz veri kümesinden küçük bir veri kümesi üzerinde çalışılmıştır. Eğitim amaçlı kullanılan D_1 veri kümesi görüntüleri Şekil 8.12’te gösterilmiştir. Eğitim kümesinde üç farklı bireye ait bir adet ideal (tam karşıdan aydınlatılmış) yüz görüntüsü ve aynı iki farklı şekilde aydınlatılmış görüntüleri bulunmaktadır.

Şekil 8.12’teki ilk üç görüntü ideal aydınlatılmış, kimlik yüz olarak, geriye kalan altı görüntü ise aydınlatma değişimi verisi olarak kullanılmıştır. Dikkat edilirse bu deneyde her bir ideal yüz için 2 adet farklı aydınlatılmış yüz görüntüsü kullanılmıştır. Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi aydınlatma verileri üzerinde yapılan ortogonal alt uzay izdüşümü işlemi sonunda elde edilen altı adet yüz görüntüsü Şekil 8.13’te gösterilmektedir.

İdeal olarak aydınlatılmış yüz görüntülerine temel bileşen analizi uygulanarak ideal yüz modelini oluşturacak özyüzler elde edilmiştir. Ayrıca her ideal yüz için ikişer adet farklı aydınlatılmış yüz görüntülerinden elde edilen fark verilerine ortogonal alt-uzay izdüşümü uygulanarak elde edilen izdüşümü görüntülerine *TBA* uygulanarak aydınlatma değişimi modelini oluşturan özvektörler bulunmuştur.

Ortogonal izdüşümü yöntemi sayesinde elde edilen her iki özvektör, bir uzay kuracak şekilde birbirlerine dik hale gelmiştir. Bu yüzden kimlik ve aydınlatma verilerinden elde edilen tüm özvektörleri tek bir birleşik model olarak kullanmak mümkün olacaktır. Bu özvektörler yan yana gelecek şekilde bir araya getirildiğinde klasik *AGM*’de kullanılan doku (texture) modelinin yerine kullanılabilir. Klasik *AGM*’den farklı olarak önerdiğimiz doku modelinde sadece yüz verisi modellenmemiş aynı zamanda aydınlatma değişimi de modellenmiştir. Önerilen yöntemde doku modelinin elde edilmesi dışındaki her şey klasik modelle aynı olduğu için bu aşamadan sonrası bir önceki bölümde anlatılan *AGM* ile aynıdır. Şekil 8.17’de aşırı



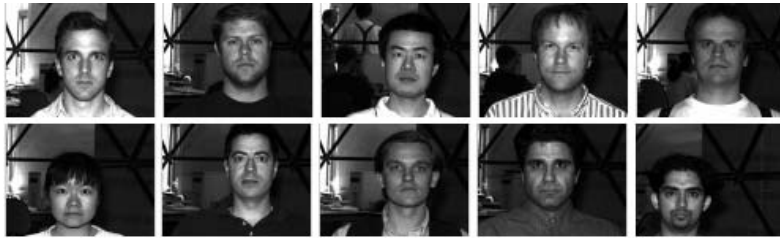
Şekil 8.13. Aydınlatma (fark) verilerine ortogonal alt-uzay izdüşüm yöntemi uygulanarak elde edilen görüntüler.

ışık koşulları altında çekilmiş ve eğitim verileri arasında yer almayan yüzler için önerilen yöntemin sonuçları gösterilmektedir. Şekil 8.17’de gösterilen sonuçlardan da

açıkça görülebileceği gibi klasik *AGM*'nin kabul edilemez sonuçlar ürettiği ve yerel minimumlara takılarak yanlış noktalara yakınsadığı giriş görüntüleri için, önerilen yöntem başarılı sonuçlar üretmiştir. Sadece üç adet şekilden elde edilen yüz şekil modeli ve Şekil 8.13'te gösterilen yüzlerden elde edilen doku ve aydınlatma modelleri ile eğitim kümesinde olmayan (unseen) yüzler için ürettiği sonuçlar, önerilen yöntemin doğruluğunu göstermesi açısından önemlidir. Şekil 8.17'deki en sağ alt ve üstte yer alan yüzlerde, önerilen yönetimin yakınsadığı noktalar, diğerlerine oranla biraz hatalı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, sadece üç adet şekil (shape) verisi ile farklı yüzleri modellemeye çalışılmış olmasıdır. Bu beklenen bir sonuçtur ve model kurulumu için yetersiz eğitim verisi olması durumunda dahi önerilen yöntemin yakınsama yeteneği olduğu sonuçlardan görülebilmektedir. Tüm yüz tipleri için genelleme yapabilmeye olanak sağlayacak bir eğitim kümesi kullanılarak oluşturulacak bir modelin hizamala ve modelleme başarımı çok daha yüksek olacaktır.

DeneySEL Çalışma 2: Bu deneysel çalışmada aydınlatma değişimi modelini tek bir bireyden elde etmek ve bu modeli eğitim kümesinde sadece bir adet ideal yüzleri bulunan diğer bireylerin birleşik model yardımı ile yüksek başarımla sentezlenebileceği gösterilmektedir. Işık kaynağının konum, şiddet ve tipindeki değişim yüz görünümünde oldukça büyük değişimlere sebep olmaktadır. Klasik *AGM* yöntemi bu tür değişimlerin bulunduğu yüzlerde hatalı sonuçlar üretmektedir. Önerilen birleşik modelde her yüz görüntüsünün, o yüze ait ideal aydınlatma ortamında çekilmiş yüz görüntüsü arasındaki fark hesaplanarak, aydınlatma değişimleri elde edilmiştir. Işık kaynağının yüzde oluşturduğu karanlık ve aydınlık bölgelerin oluşma sebebi yüz üç boyut (*3B*) bilgisidir.

Işık kaynağının konumu ve şiddeti aynı olduğunda farklı kişilerde yaklaşık olarak aynı aydınlatma etkisi görülmektedir. Örneğin, ışık kaynağı solda ise, kişiden bağımsız olarak tüm yüz görüntülerinde sağ taraf sola göre daha karanlık ve burnun sağ tarafında buruna ait bir gölge bölgesi oluşmaktadır. Bu benzer etkinin oluşması yüz *3B* bilgisinin tüm yüzler için benzer olmasıdır. Buradaki benzerlikten kasıt; burun tepesi, göz ve ağız çukurları gibi bölgelerin tüm yüzlerde var olmasıdır. Burnun kısa veya uzun olması sadece gölgenin biraz daha uzun ve/veya kısa olmasını sağlarken oluşan gölgenin, karanlık/aydınlık bölgenin yönünü değiştirmemektedir. Farklı yüzler için kullanılacak aydınlatma modelini tek bir yüzün farklı aydınlatılmış yüz görüntülerinden elde ederek



Şekil 8.14. Kimlik yüz veri kümesi.

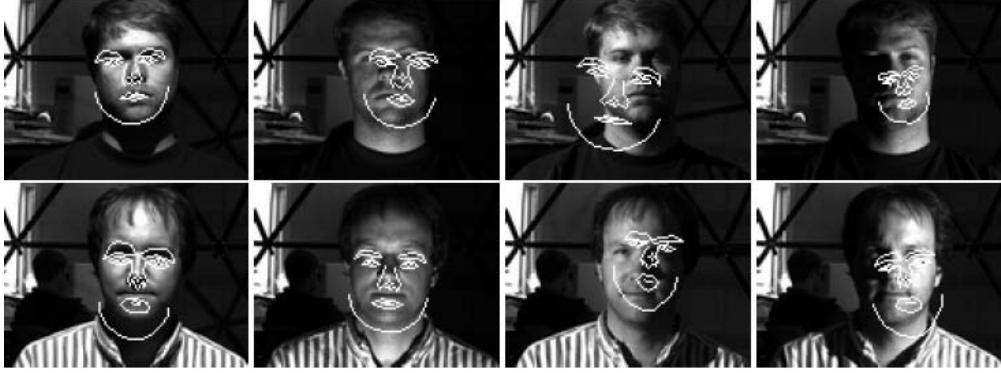


Şekil 8.15. Tek bir bireyin farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş görüntüleri.

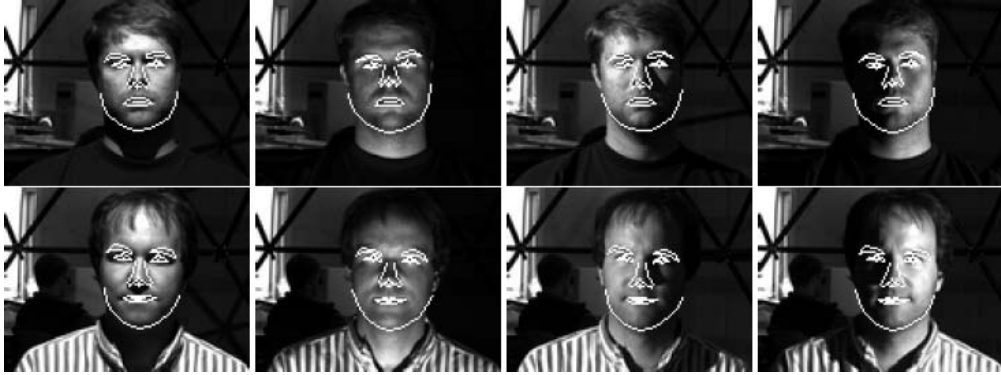
birleşik modelde kullanılmasının sonuçları bu bölümde tartışılacaktır. Bu tür bir yaklaşım birleşik modeli çok daha esnek bir yapıya kavuşturacağı açıktır. Aydınlatma modelinin tek bir yüzden elde edilmesinin yanısıra, *MayaTM* ve benzeri programlarla sentetik olarak aydınlatılmış model yüzlerden elde edilen aydınlatma modellerini gerçek yüzlerde birleşik model sayesinde kullanılabilir. Ayrıca herhangi bir yüz veri kümesinden elde edilen aydınlatma modelini başkaca bir yüz veri kümesi ideal yüzleri için kullanma yolu önerilen yöntem ile mümkün hale gelmektedir. Gerçek hayattaki problemler göz önüne alındığında bu önemli bir katkıdır. Çünkü genellikle gerçek hayatta bir kişinin sadece tek bir yüz görüntüsüne sahip olmaktadır.

İlk olarak *Yale B* veri kümesinde yer alan toplam 10 adet bireye ait tam karşıdan aydınlatılmış yüz görüntüleri kimlik modeli oluşturulmak için kullanılmıştır. Kullanılan ideal yüzler Şekil 8.14'te gösterilmiştir. Aydınlatma modeli için *Yale B* veri kümesinden bir kişinin 24 farklı şekilde aydınlatılmış yüz görüntüsü kullanılmıştır.

Şekil 8.18’da aydınlatma modeli için kullanılacak tüm yüzler gösterilmiştir. Şekil 8.15’deki yüz görüntülerinin ideal yüze olan farkları hesaplanarak aydınlatma modeli kurulmuştur. Kurulan birleşik modelin, aydınlatma modelinde yer almayan aşırı ışık değişimi altında çekilmiş yüz görüntüleri için sentezleme/modelleme başarımını gözlemlemek için bir önceki deneylerden farklı olarak *AdobePhotoshopTM* programı yardımıyla *Yale B* veri kümesindeki yüzlerde, gerçeğe yakın aşırı aydınlatma etkisi oluşturulmuştur. Burada amaç ten rengi bilgisinin tamamen kaybolduğu çok



Şekil 8.16. Test kümesinde yer alan yüzler için klasik AGM hizalama sonuçları.

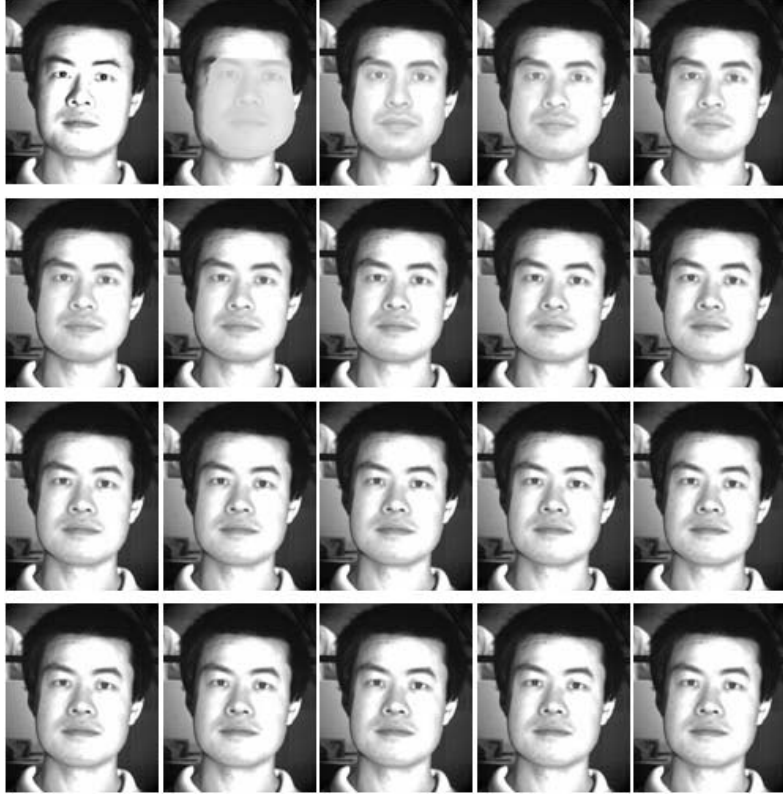


Şekil 8.17. Test kümesinde yer alan yüzler için AAGM hizalama sonuçları.

karanlık veya aşırı aydınlık (doygunluğa girmiş) bölgelerin yüzde oluştuğunda, modelin başarımını ölçmektir. Bu deney bize kurduğumuz birleşik modelin sınırlarını göstermesi açısından oldukça önemlidir. Şekil 8.18’da en üst satırdaki birinci fotoğraf *AdobePhotoshopTM* kullanılarak oluşturulan aşırı aydınlatılmış yüz test görüntüsüdür. Eğitim kümesinde bu düzeyde aşırı ışık altında çekilmiş bir görüntü bulunmamaktadır. Şekil 8.18’deki ikinci görüntü ise giriş test görüntüsünün başlangıç (initialization) dikkate alınarak elde edilen maske görüntüsünün birleşik yüz uzayına izdüşürülmesi sonucu elde edilen ilk yüz görüntüsü gösterilmektedir. Toplam 19

çevrim sonunda (soldan sağa ve yukarıdan aşağıya) sağ alt köşedeki yüzde birleşik modelin sentezlediği yüz elde edilmiştir.

İlk çevrimde giriş görüntüsü ile ortalama yüz arasındaki fark hesaplanmış ve elde edilen fark (residue) kullanılarak, eğitim kümesinden elde edilen fark ile görünüm parametre değişimi arasındaki doğrusal ilişkiyi veren model yardımıyla, parametreler güncellenmiş ve yüz tekrar sentezlenmiştir. Sentezlenen yüz ile giriş görüntüsü her



Şekil 8.18. Önerilen AAGM'nin aşırı aydınlatılmış yüz görüntüsü için çevrimlere göre (soldan sağa, yukarıdan aşağıya) yakınsama sonuçları. İlk görüntü aşırı aydınlatılmış giriş görüntüsü.

zaman referans yüze bükülerek aralarındaki fark minimize edilinceye kadar çevrime devam edilmiştir. Şekil 8.19'de ilk beş çevrimde hem yüz bölgesinin doğru olarak hizalandığı hem de ışık etkisinin hızlı bir şekilde sentezlendiği görülecektir. Şekil 8.18 ve 8.19'de gösterilen birleşik model çevrim sonuçları dikkatle incelendiğinde, önerilen birleşik modelin her çevrimde giriş görüntüsüne daha çok yakınsadığı görülecektir.

Şekil 8.19'de ise eğitim kümesindeki görüntülere göre oldukça karanlık bir yüz görüntüsü için ilk dokuz çevrimde hem yüz bölgesinin doğru olarak hizalandığı hem de ışık etkisinin hızlı bir şekilde sentezlendiği görülecektir. Giriş görüntüsüne ait kimlik bilgisi ise ilk yedi çevrimde yüksek başarımla sentezlenebilmiştir. Bu bilgiler ışığında,

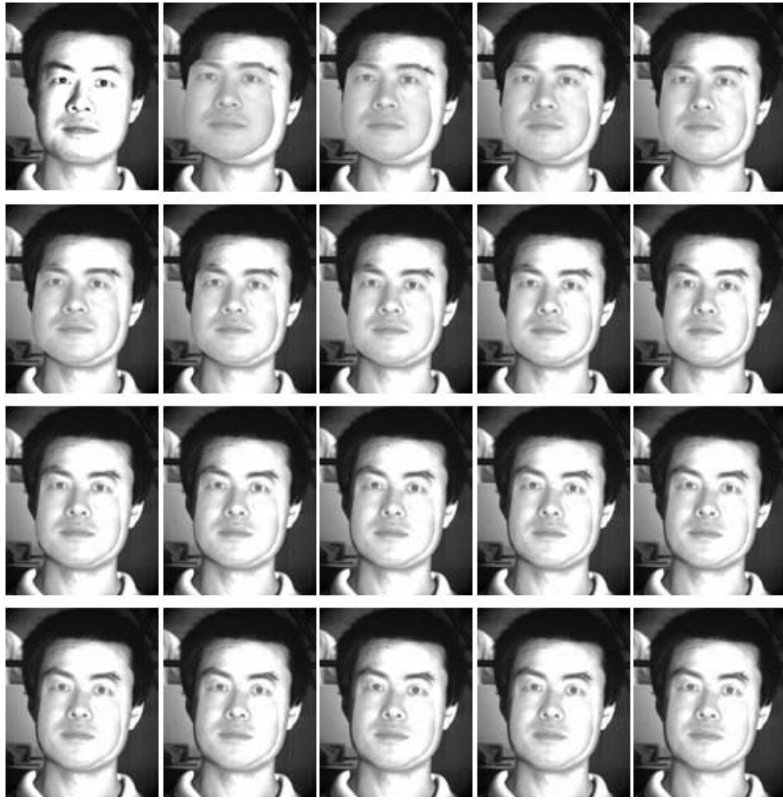


Şekil 8.19. Önerilen AAGM'nin düşük karşıtlığa sahip yüz görüntüsü için çevrimlere göre (soldan sağa, yukarıdan aşağıya) yakınsama sonuçları.

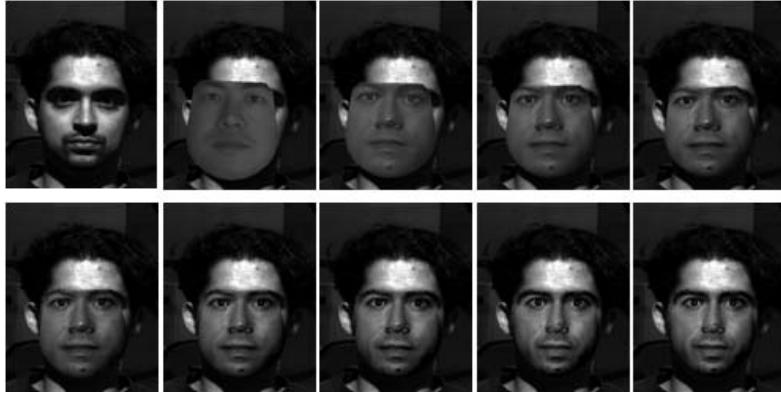
önerdiğimiz birleşik modelin bileşenleri olan kimlik ve aydınlatma parametrelerinin doğru bir şekilde çevrimler içerisinde güncellendiğini ve giriş görüntüsüne yakınsamak için parametrelerin doğru şekilde güncellendiği sonucuna ulaşmaktayız.

Şekil 8.18 ve Şekil 8.20'de ise verilen giriş yüz görüntüsü için farklı bir iklendirme için birleşik modelin çevrimleri gösterilmektedir. Şekil 8.20'de önerilen modelin, giriş görüntüsünü, çevrimler sonucunda hem kişi hem de aydınlatma bakımından doğru olarak sentezlendiği görülecektir. Şekil 8.18'dan farklı olarak sentezlenen yüzün sağ maske sınırları biraz daha belirginleştiği görülecektir.

Şekil 8.18, 8.19 ve 8.20'de eğitim kümesinde yer almayan ve sentetik olarak oluşturulan aşırı ışıklandırma altındaki yüz görüntüleri için yakınsama sonuçları gösterilmiştir. Şekil 8.21, 8.22 ve 8.23'te sadece bir adet ideal ortamda aydınlatılmış yüz görüntülerini kullandığımız ve farklı aydınlatma koşullarındaki görüntülerine sahip olmadığımız yüzler için birleşik modelin sentezleme/modelleme/hizalama başarımı her çevrim için tek tek gösterilmiştir. Şekil 8.21'de ilk altı çevrimde yüz doğru olarak hizalanmış ve devam eden çevrimlerde ışık değişimi doğru

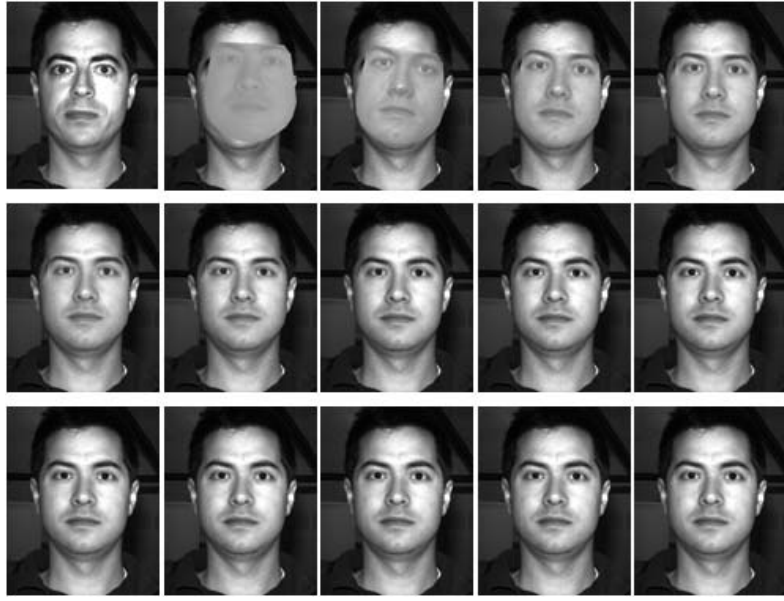


Şekil 8.20. AAGM'nin aşırı aydınlatılmış yüz görüntüsü için çevrimlere göre (soldan sağa, yukarıdan aşağıya) yakınsama sonuçları.



Şekil 8.21. Tam karşıdan aydınlatılmış bir adet yüz görüntüsü kullanılarak eğitilen AAGM'nin aynı kişiye ait farklı aydınlatılmış test görüntüsü için çevrimlere göre (soldan sağa, yukarıdan aşağıya) yakınsama sonuçları. İlk görüntü test giriş görüntüsü.

olarak sentezlenmiştir. Yüz görüntülerini kullandığımız ve farklı aydınlatma koşullarındaki görüntülerine sahip olmadığımız yüzler için birleşik modelin sentezleme/modelleme/hizalama başarımı her çevrim için tek tek gösterilmiştir. Tüm eğitim kümesi içerisinde aynı bireye ait sadece tek bir yüz görüntüsü (ideal) olduğu dikkate alındığında kimlik sentezi yakınsama sonucunun, giriş görüntüsünden



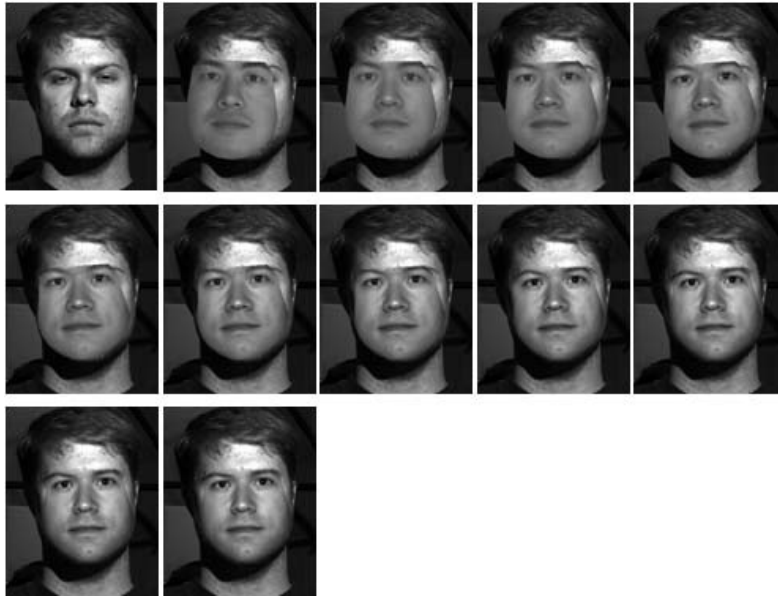
Şekil 8.22. Tam karşıdan aydınlatılmış bir adet yüz görüntüsü kullanılarak eğitilen AAGM'nin aynı kişiye ait farklı aydınlatılmış test görüntüsü için çevrimlere göre (soldan sağa, yukarıdan aşağıya) yakınsama sonuçları. İlk görüntü test giriş görüntüsü.

neden biraz farklı olduğu anlaşılacaktır. Şekil 8.21'deki yüzün şekil bilgisi eğitim kümesindeki diğer yüzlere göre çok daha küçük ve farklı olmasına rağmen yüz şeklinin doğru olarak elde edilmiş olması önemlidir. Çünkü bu şekil bilgisi modele sadece bir adet yüz ve onun şekil bilgisi kullanılarak elde edilmiştir.

Ayrıca bu kişinin ideal (tam karşıdan) aydınlatma koşullarına göre çok farklı olan bu test görüntüsü için her çevrimde sentezlediği yüzler incelendiğinde önerilen yöntemin yakınsadığı noktanın oldukça başarılı olduğu görülecektir. Şekil 8.22 ve 8.23'te ise başkaca kişilere ait, eğitim kümesinden farklı aydınlatma koşullarındaki yüzleri için, elde edilen çevrim sonuçları gösterilmektedir.

8.7 Model Karmaşıklığı

Önerilen Aktif Aydınlatma ve Görünüm modelinin eniyileme çevrimlerindeki karmaşıklığı $O(m \cdot (p_{id} + p_{il}))$ olarak ifade edilebilir. Burada m model doku vektöründeki benek sayısını, p_{id} ve p_{il} ise AAGM uzayını oluşturan kimlik ve aydınlatma bileşenlerine ait model parametre vektörlerindeki eleman sayısını göstermektedir. Model için uygun bir ilklendirme yapılmış ise eniyileme aşaması genellikle 8 – 12 çevrimde yakınsama ile sonuçlanmaktadır. AAGM yakınsama süresi Intel Centrino DuoTM 2 GHz dizüstü bilgisayarda, ilklendirmenin yerine bağlı olarak



Şekil 8.23. Tam karşıdan aydınlatılmış bir adet yüz görüntüsü kullanılarak eğitilen *AAGM*'nin aynı kişiye ait farklı aydınlatılmış test görüntüsü için çevrimlere göre (soldan sağa, yukarıdan aşağıya) yakınsama sonuçları. İlk görüntü test giriş görüntüsü.

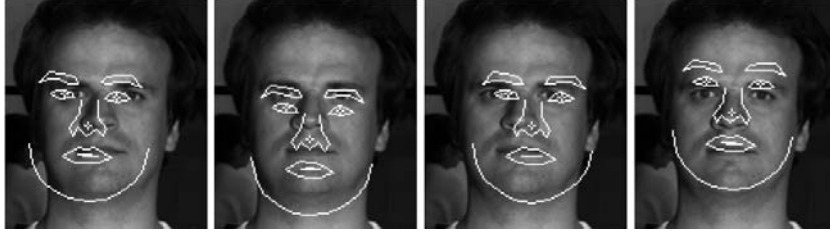
1.2 ile 1.6 saniye arasında değişmektedir. *AAGM*'nin karmaşıklığı *AGM*'ye oldukça yakındır, şöyleki; $(p_{id} + p_{il})$ toplamı *AGM* görünüm parametre vektörü olan c 'nin boyuna eşitse *AGM* ile *AAGM*'nin karmaşıklığı aynı olmaktadır.

8.8 Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

Önerilen *AAGM* yöntemi Yale B [118] veri kümesi üzerinde test edilmiştir. Yale B'nin sadece tam karşıdan bakan pozlarına sahip yüz görüntüleri deneysel çalışmalarda tercih edilmiştir. Veri kümesindeki toplam birey sayısı 10'dur. Bu on kişinin 30 farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş 300 adet yüz görüntüsü rastgele seçki yöntemiyle seçilmiştir. Test veri kümesi oluşturulurken gerçeğe uygun aydınlatma durumlarını da kapsayacak şekilde ± 60 derece azimut ve ± 45 derece yükselti aralığında konumlanmış ışık kaynaklarının kullanıldığı yüz görüntüleri Yale B'den alınmıştır. *AGM* ve *AAGM*'nin yüz hizalama başarımları karşılaştırılırken veri kümesindeki her bireyin 30 görüntüsünden ideal koşullarda aydınlatılmış tek bir görüntü K_{id} kimlik görüntüsü olarak isimlendirilmiş ve geriye kalan 29 adet farklı ışıklandırma altındaki görüntüleri K_{il} olmak üzere iki farklı alt veri küme oluşturulmuştur. K_{il} kümesindeki veriler kişinin farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş görüntülerinden ideal görüntüsünün çıkartılması ile elde edilmiş fark görüntüleridir. K_{il} kümesindeki fark görüntüleri, ışık

kaynağının yüz görünümü üzerindeki etkisini göstermek amacıyla görüntüdeki kimlik bilgisinin çıkartılarak sadece ışık farklılığının sebep olduğu değişimi göstermektedir.

AAGM ve *AGM* için aynı eğitim ve test kümeleri kullanılmıştır. 640×480 'lik 300 adet yüz görüntüsünün yer aldığı veri kümesindeki tüm yüzler el yordamı ile işaretlenerek yüz önemli noktaları oluşturulmuştur. Yüz şekil bilgisi 73 noktadan oluşmaktadır. Bunlar; 16 nokta ağız, 12 nokta burun, 9 nokta sağ göz, 9 nokta sol göz, 8 nokta sol kaş, 8 nokta sağ kaş ve 11 nokta çene yayından oluşmaktadır. Önceki bölümde



Şekil 8.24. *AAGM* ve *AGM*'nin kötü ilklendirmeye karşı gürbüzlüğü test etmek için kullanılan dört farklı ilklendirme.

anlatıldığı gibi *AAGM*'nin kimlik aydınlatma modelleri kurulduktan sonra *AAGM* en-iyileme aşamasına geçilmektedir. Bu aşamada *AAGM*'nin yakınsadığı nokta *AGM* gibi ilklendirmeden etkilenmektedir. İlklendirmenin olabildiğince en uygun noktadan yapılması gerekmektedir. Her iki yöntem için ilklendirme iyi bir şekilde yapılmışsa yöntemlerin doğru noktalara yakınsama olasılığı yükselmektedir. Aksi durumlarda ise yerel minimumlara takıldığı için hatalı yerlere yakınsayabilmektedir. Deneysel çalışmalarda *AAGM* ve *AGM*'ye aynı ilklendirmeler uygulanmıştır. İlklendirme için, el yordamı ile işaretlenmiş yüz şekil bilgilerinin ağırlık merkezleri x ve y -eksenlerinde ± 20 benek uzaklığında sistematik olarak kaydırılmış ve oluşan şekil noktaları her iki yöntem için model ilklendirmesi olarak kullanılmıştır. Sistematik ilklendirmenin nasıl yapıldığı Şekil (8.24)'de gösterilmektedir. Hizalama hataları $pt. - pt.$ ve $pt. - crv.$ olarak,

$$D_{pt.pt.} = \sum \sqrt{(x_i - x_{gt,i})^2 + (y_i - y_{gt,i})^2} \quad (8.28)$$

$$D_{pt.crv.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \min_t \sqrt{(x_i - r_x(t))^2 + (y_i - r_y(t))^2} \quad (8.29)$$

biçiminde hesaplanmaktadır. Denklem 8.29'te hizalama hatası için $r(t) = (r_x(t), r_y(t))$ şeklinde ifade edilen bir eğriye olan uzaklık hesaplanmaktadır. Her ilklendirme için $pt. - pt.$ ve $pt. - crv.$ hizalama hataları hesaplanmış ve bunların ortalaması alınarak

Çizelge 8.1. Test görüntüleri için hesaplanan yüz hizalama hataları. (640 × 480).

	Klasik AGM	Önerilen AAGM
Ortalama pt.-pt. Hata	23.90 ± 0.38	8.85 ± 0.64
Ortalama pt.-crv. Hata	14.70 ± 0.24	5.60 ± 0.46
Ortanca pt.-pt. Hata	21.62	5.53
Ortanca pt.-crv. Hata	14.29	3.54

ortalama hizalama hataları hesaplanmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlar Çizelge 8.1’de verilmiştir.

8.9 Sonuç

Tez kapsamında Aktif Aydınlatma Görünüm Modeli (*AAGM*) olarak isimlendirdiğimiz özgün bir modelleme yöntemi geliştirilmiştir. Bu modelde, klasik *AGM*’de kişinin kimlik ve aydınlatma bilgisini birlikte barındıran doku bileşeni, kimlik ve aydınlatma olarak ayrıştırılmış ve daha sonra şekil bileşeni ile birlikte kullanılarak kimlik, aydınlatma ve şekil bileşenlerinden oluşan birleşik *AGM* modeli önerilmiştir. Bu ayrıştırma sayesinde aydınlatma etkisi, şekil ve kimlik ayrı ayrı model parametreleriyle kontrol edilebilmektedir. Böylece model uydurma büyük ölçüde aydınlatma değişimlerinden bağımsız hale geldiği gibi, bir kişinin farklı yerlerden aydınlatılmış görüntüleri de aydınlatmaya ilişkin model parametresini değiştirerek elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada son yıllarda öne öne çıkan *AGM*’ye alternatif yeni bir model önerilmiştir. *AAGM* olarak adlandırılan bu model ile aydınlatma değişimlerine karşı daha gürbüz yüz saptama ve hizalama yapılabilmektedir. Klasik *AGM*’de şekil ve doku gibi iki ana değişim modellenmeye çalışılırken, *AAGM*’de şekil, kimlik ve aydınlatma değişimleri ayrı ayrı modellenmektedir. Yale B [118]’nin bir alt kümesinden oluşturulan yüz veri kümesi üzerinde yapılan deneysel çalışmalar *AAGM*’nin yüz yer saptama ve önemli noktaları bulmada *AGM*’ye göre daha başarılı olduğu gösterilmiştir. Deneysel çalışmalar *AAGM*’nin en zorlu aydınlatma koşullarında çekilmiş görüntüleri bile yüksek doğrulukla sentezleyebildiğini göstermiştir. *AAGM*’nin yapısı gereği kimlik ve aydınlatma alt modellerinin ayrı ayrı hesaplanması mümkündür. Önerilen yapı sayesinde, eldeki kısıtlı veri ile kimlik alt uzayı kurulurken aydınlatma modelini ise başkaca bir veri kümesinden kurulabilmek mümkündür. Her bireyin onlarca farklı

aydınlatılmış yüz görüntüsünü model kurmada kullanmak yerine *AAGM* her birey için tek görüntü ile kimlik modelini kurabilmektedir. İnsan yüzlerinin üç boyutlu yapısı kabaca benzer olduğu için aydınlatma değişimleri bireyler arasında çok büyük değişintiye sahip olmamaktadır. Bu nedenle genel aydınlatma modelleri kurmak ve bunu *AAGM* çatısı altında kimlik modelleri ile birleştirmek mümkündür.

Tanıma amaçlı uygulamalarda *AAGM*'nin sadece kimlik parametreleri kullanılırken, *AAGM*'nin aydınlatma parametrelerini ise ortam aydınlatma koşullarını analiz etmek için kullanılabilir. *AAGM*'nin kimlik parametreleri kullanılarak eğitim veri kümesindeki bireylerin yüzleri sentezlenebileceği gibi o yüzler aydınlatma parametreleri değiştirilerek sentetik olarak aydınlatılabilir.

AGM için gerekli olan bükme, eniyileme, TBA vb. gibi hesaplama bileşenleri üzerinde fazlaca değişiklik yapmadan *AAGM*'yi gerçeklemek mümkündür. *AAGM* için karmaşık $3B$ 'lu verilere/modellere ve yüzey normallerine ihtiyaç duyulmamaktadır. *AAGM* tamamen iki boyutlu ($2B$) görüntüler üzerinde çalışmaktadır. *AAGM* için en büyük zorluk aydınlatma alt modeli kurulumu için gerekli olan aynı bireye ait farklı şekilde aydınlatılmış yüzlerinden oluşan eğitim kümesinin hazırlanmasıdır. Bu konuda hazırlanmış bir çok veri kümesinin [110] [118] hali hazırda herkesin kullanımına açık olarak sunulmuş olmasında bu zorluğu ortadan kaldırmaktadır. Bu çalışmada Yale B veri kümesi aydınlatma modelinin kurulumu için kullanılmıştır.

9. SONUÇ

Yüz görüntüsüne iki boyutlu şekil ve doku modelinin uydurulmasını amaçlayan *AGM*, özellikle aydınlanma ve poz değişimlerinden olumsuz etkilenmektedir. Tez kapsamında *AGM*'nin bu sorunlarını çözmek amacıyla farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Ayrıtlara dayalı özgün bir *AGM* yöntemi önerilmiştir. Bu çalışmada literatürdeki gradyan ve ayrıtlara dayalı yöntemlerden farklı yeni bir yöntem önerilmiştir. Ayrıtların seçilmesine olanak sağlayan bir yöntem yardımı ile doku değişimleri ve nesnenin fiziksel sınırlarından kaynaklanan ayrıtlar birbirlerinden ayrılarak güçlü ayrıtlar belirlenmiştir. Bu ayrıtlar üzerine kurulan tepe görüntüleri ile çalışan bir *AGM* yapısı önerilmiştir. Klasik yöntemlerden farklı olarak, modelleme aşamasında gri seviye veya *RGB* değerlerini kullanmak yerine çevrit seçimine dayalı tepe görüntülerinin kullanımının aydınlatma değişimlerine karşı oldukça başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca *AGM*'nin kötü iklendirmeden kaynaklanan hatalı yakınsama sorunlarını gidermek amacı ile *AGM*'nin iklendirilmesine yönelik çözümler önerilerek *AGM* hizalama başarımı arttırılmaya çalışılmıştır. *AGM*'de gri seviye giriş görüntüleri kullanmak yerine tepe görüntüleri gibi ışık değişimlerine karşı gürbüz bir gösterimle beraber, ışık değişimlerine karşı daha az hassas olan renk uzaylarının birlikte kullanımının başarımı arttıracığı görülmüştür. Ayrıca Aktif Görünüm Modelini tek bantta çalıştırmak yerine farklı özniteliklere sahip bantlardaki değişimi modelleyebilen ve bunu tek bir parametre uzayında ifade edebilen bir yöntem kullanılmasının başarımı arttıracığı gösterilmiştir. Bu amaca yönelik üç-bantlı yeni bir gösterim geliştirilmiştir. Bu gösterimde oldukça başarılı sonuçlar aldığımız çevrit seçimine dayalı tepelerden oluşturulan gösterime, ışık değişimlerine karşı gürbüz olduğu bilinen *HSV* renk gösterimindeki renk (Hue) bileşeni ve gri seviye bilgisi ayrı renk bantları şeklinde bir araya getirilerek üç-bantlı *HHG* (Hue, Hill, Gray) gösterimi oluşturulmuştur. Bu gösterim, yüz hizalama probleminde kullanılan veri kümelerinde test edilmiş ve oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. *AGM* başarımını arttırmak için global *AGM*'ye göre daha esnek olan bileşen temelli *AGM* (*BAGM*) ismini

verdiğimiz özgün bir yöntem önerilmiştir. Göz, burun ve ağız bileşenlerini ayrı ayrı modellemeye dayanan bu yöntem sayesinde çok daha hassas yüz hizalama sonuçlarının elde edilebileceği deneysel çalışmalarla gösterilmiştir. Ayrıca aydınlatmadan bağımsız üç aşamalı yeni bir yüz hizalama yöntemi de tanıtılmıştır. Önerilen yüz hizalama yönteminin birinci aşamasında yüz saptama yapılmaktadır. İkinci aşamada ise global aktif görünüm modeli (*GAGM*) kullanılarak yüze ait önemli noktalar saptanır. *GAGM*'nin ilklendirilmesi hizalama sonucunu doğrudan etkilemektedir. *GAGM*'nin gerçek yüz öznelik noktalarına yakınsayabilmesi için optimum noktaya oldukça yakın bir yerden *GAGM*'nin ilklendirilmiş olması gerekmektedir. Önerilen yöntemin ikinci aşamasında *HPS*'nin belirlediği yüzü içine alan kutunun ağırlık merkezi ilklendirmede kullanılmıştır. Son aşamada ise bileşen temelli aktif görünüm modeli (*BAGM*) kullanılarak hassas hizalama yapılmaktadır.

Yüz için özelleşmiş aydınlatma normalizasyonu yöntemlerinin kullanılması aydınlatma değişimlerine karşı daha gülbüz modellerin kurulmasını sağlayacaktır. Bu nedenle tez kapsamında, *AGM*'nin histogram uydurma ve oran görüntüleri gibi özgün normalizasyon yöntemleri ile tümleştirilmesine dayanan yeni bir yöntem tanıtılmıştır [50]. Önerilen yöntem giriş olarak verilen farklı aydınlatılmış yüz görüntüsünü hem onarmaya hem de hizalamaya çalışmaktadır. Aydınlatmanın bozucu etkilerini gidermeye yönelik yüz için özelleştirilmiş onarma yöntemleri *AGM* arama ve en-iyileme algoritmasında radikal değişiklikler yapmadan, *AGM* arama algoritmasının içine eklenerek karma bir yöntem geliştirilmiştir. Önerilen yöntemin eğitimi için aynı bireyin birden farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş görüntülerine ihtiyaç duyulmadığı gibi, her birey için sadece bir adet önden çekilmiş görüntüsünün eğitim kümesinde olması yeterlidir. Deneysel çalışmalardan da görüleceği gibi önerilen yöntemin hizalama başarımı, farklı ışık koşulları söz konusu olduğunda bile, klasik *AGM*'ye göre oldukça yüksektir.

Yüzdeki poz değişimi yüz tanıma sistemlerinin başarımını etkileyen en büyük problemlerden biridir. Genellikle yüz tanıma sistemleri ya tam karşıdan çekilmiş yüz görüntülerinde çalışmakta ya da belirli pozlara sahip yüz görüntülerinde çalışabilmektedir. Fakat gerçek hayatta varsayılan yüz pozlarından farklı bir yüz sisteme giriş olarak gelebilmektedir. Yüz tanıma/modelleme problemlerinde genel yaklaşım, eğitim kümesindeki verilerin mümkün olduğunca tüm yüz uzayını

genelleyebilecek özellikte olmasıdır. Buradaki temel zorluk, gerçek hayatta her bir bireyin, tüm yüz değişimlerini gösteren yeter sayıda örnek olmamasıdır. Yeter sayıda gözlemin olmaması kurulan modelin genelleme yeteneğinin yetersiz kalmasına sebep olur. Bu ise tanıma başarımını çok büyük oranda etkilemektedir. Yüz tanıma ve modellemenin temel zorluklarından biri olan poz problemi de tez kapsamında ele alınmıştır. *AGM* çatısı altında, eğitim kümesinde yer alan ve tam karşıdan çekilmiş bir kişiye ait yüzün, önceden belirlenmiş başkaca bir poza dönüştürülmesi (poz doğrultma) ve farklı pozlardaki görüntülerin oluşturulması (poz sentezleme) konuları üzerinde çalışılmıştır. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar sonucunda, modeldeki yüz şekline ait önemli noktaların istenilen şekle bükülmesiyle, düzlem dışı azimut ve yükselti açılarında ± 30 derece aralığıyla sınırlı olmak koşuluyla, farklı poz görüntüleri elde edilebilmiştir. Önerilen yöntem sadece yüz hizalama problemi için özel bir yaklaşım değildir ve başkaca nesnelerin modellenmesinde de kullanılabilir genel bir yaklaşımdır. Önerilen yöntemin ana katkısı; yüz modeli kurulurken, eğitim kümesindeki yüz şekilleri kullanılarak, şekil verilerinin sentetik olarak zenginleştirilmesi ve bu sentetik şekillerden sentetik yüzler oluşturularak poz değişimlerini de içeren gürbüz bir model oluşturulmasıdır. Deneysel çalışmalarda hem kurulan modelin poz değişimi ve yüz modelleme kapasitesi test edilmiş hem de klasik *AGM* yöntemi başarımları olarak karşılaştırılmıştır. Kurulan model ile çok farklı poz ve kimlikteki yüzlerin geri çatılabildiği görülmektedir. Eğitim kümesinde sadece tam karşıdan bakan hali olan yüzlerin bile belirli bir yakınsamayla farklı pozlarının bulunabilmesi önerilen yöntemin genelleme başarımını göstermesi açısından önemlidir.

Poz doğrultma olarak isimlendirdiğimiz bu yöntem temel alınarak video çerçeveleri üzerinde iyileştirme ve onarmaya yönelik özgün bir yaklaşım geliştirilmiştir. Böylelikle çoklu çerçevelerdeki karşılıklılandırma probleminin üstesinden gelinerek, video görüntülerinin iyileştirilmesi ve çok çerçeveli görüntülerden yüksek kaliteli görüntülerin elde edilmesine yönelik özgün bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem sayesinde çok gürültülü video çerçevelerindeki yüz görüntüleri istenilen poza doğrultularak tüm çerçevelerde yer alan yüz görüntülerinde karşılıklılandırma problemi ortadan kaldırılmıştır. Bu sayede çoklu çerçeveler üzerinde görüntü füzyonu yöntemleri kullanılarak iyileştirme gerçekleştirilebilmektedir.

Klasik *AGM*, eğitim kümesindeki doku ve yüz şekil değişimleri modellendiğinden, ancak aynı aydınlanma koşullarında elde edilmiş ve benzer renk dağılımına sahip görüntülerde başarılı sonuçlar verebilmektedir. Eğitim kümesinde yer alan yüz görüntülerinden farklı aydınlanma koşuluna sahip test yüz görüntüsünü ise klasik *AGM* doğru olarak modelleyememektedir.

Giriş olarak verilen yüzün ışık değişimi hariç bire bir aynısı eğitim kümesinde yer alsa bile klasik *AGM* doğru yakınsamayı sağlayamamaktadır. Tez kapsamında öncelikle aydınlatmanın yüz görünümünde ne gibi değişikliklere sebep olduğu sorusunun yanıtı aranmıştır. Bu amaca yönelik olarak ideal olarak aydınlatılmış yüz görüntüleri ve bu yüzlerin farklı ışıklandırma altında çekilmiş görüntüleri yardımı ile aydınlatma değişim verileri hesaplanmıştır. Doğrudan giriş görüntülerini modelleme aşamasında kullanmak yerine eğitim kümesindeki ideal görüntüler ve hesaplanan aydınlatma değişim verileri ayrı ayrı modellenmiş ve elde edilen iki model tek bir modelde birleştirilerek ışığa karşı gürbüz yeni bir model oluşturulmuştur. Modellenmeye çalışılan giriş verisinde olması muhtemel önemli değişimlerin belirlenip model içine dahil edilmesiyle çok daha etkin bir model yapısı oluşturulması amacıyla Aktif Aydınlatma ve Görünüm Modeli (*AAGM*) yaklaşımı önerilmiştir. *AAGM* sadece yüz hizalama problemine özel bir yaklaşım olmayıp birçok probleme uygulanabilecek özgün bir yöntemdir. Yüz görünümü üzerinde etkili olan değişimler: kişinin ideal ortamda görüntülenmiş yüz dokusu, yüz şekli ve yüz görünümünde ışık kaynağının yeri ve şiddetine bağlı olarak oluşabilecek aydınlatma değişimi verileri birbirlerinden mümkün olduğunca ayrıştırılmaya çalıştırılarak modellenmeye çalışılmıştır. Bu ayrıştırma sayesinde aydınlatma etkisi, şekil ve kimlik ayrı ayrı model parametreleriyle kontrol edilebilmektedir. Böylece model uydurma büyük ölçüde aydınlatma değişimlerinden bağımsız hale geldiği gibi, bir kişinin farklı yerlerden aydınlatılmış görüntüleri de, aydınlatmaya ilişkin model parametresini değiştirerek elde edilebilmektedir.

Aktif görünüm ve aydınlatma modelinin (*AAGM*) oluşturulması için elde edilen veri kümesinden ideal olarak aydınlatılan yüzlerle kimlik modeli ve eğitim kümesinden elde edilen aydınlatma verisiyle de aydınlatma modeli kurularak bu iki modeli bir araya getirilerek özgün bir model kurulmaktadır. *AAGM*'nin oluşturulma amacı, aydınlatma değişimlerine karşı klasik aktif görünüm modeline göre çok daha gürbüz

model oluşturmaktır. Kimlik ve aydınlatma değişimleri ayrı ayrı modellenmekte ve bu iki model tek bir model haline getirilerek birleşik aktif aydınlatma ve görünüm modeli oluşturulmaktadır. Klasik aktif görünüm modeli sadece ölçek, dönme ve yer değiştirme gibi ilgin değişimleri Genelleştirilmiş Procrustes Analizi (*GPA*) ve ilgin bükme yardımı ile normalize etmektedir. Böylece tüm yüz görüntüleri ilgin değişimlerden arındırılmış olur. Dikkat edilirse klasik *AGM*'de yapılan bu normalizasyon ile sadece ilgin değişimler ortadan kaldırılabilir. Aydınlatma değişimlerini normalize edecek herhangi bir normalizasyon işlemi klasik *AGM*'de bulunmamaktadır. Ayrıca kişiler arası yüz doku ve yüz şekil değişimini bir arada modellemeye çalışan klasik *AGM*'de, ışık değişimleri hiç göz önünde bulundurulmadığı için aydınlatma değişimlerinden dolayı yüz dokusunda meydana gelen değişimleri kişiler arası yüz değişimi olarak algılayarak hatalı bir model kurmaktadır. Klasik *AGM*'ye aydınlatma değişimlerini modelleyebilme yeteneği kazandırmak amacı ile ışık değişimlerini tek bir model altında modelleyebilen yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yeni yöntemde yüz görünümünü oluşturan değişimlerin kişiye ait yüz dokusu, yüz şekli ve yüz aydınlatmasının birleşimiyle oluştuğu varsayılmaktadır. Önerilen *AAGM* şekil, doku ve aydınlatma değişimlerini bir arada modelleyebilmektedir.

Önerilen modelin bir önemli katkısı da eldeki kısıtlı veriden elde edilen modele başkaca bir veri kümesinden elde edilmiş deformasyonların eklenebilmesini sağlayan bir yapıda olmasıdır. Gerçek problemlerde sıkça karşılaşılan veri azlığının modellenmeye çalışılan değişimler hakkında yeterli bilginin elde edilmesini zorlaştırdığı bilinmektedir. Az veri ile yeterli istatistiksel bilgiler elde etmek olanaksızdır. Çalışmada, bu kısıtın aşılabilmesi için var olan başkaca ama aynı bağlamdaki veri/görüntü kümesinden elde edilen deformasyon modelinin eldeki kısıtlı veri ile kurulan model üzerine bir çeşit iz-düşüm yapılarak kurulan modelin betimleme gücünün artırılması amaçlanmıştır.

AAGM modelinin ürettiği yüz parametre vektörü ile farklı kişilere ait yüzler (eğitim kümesine bağlı olarak) ve bu yüzlerin farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş görüntüleri sentezlenebilmektedir. Ayrıca model parametreleri uygun bir şekilde değiştirilerek verilen bir yüzü sentetik olarak aydınlatmakta mümkün hale gelmektedir. *AAGM*'nin ürettiği öznitelik vektöründe kimlik ve aydınlatma değişimlerini kontrol

eden parametreler ayrılabilirdi için tanıma/sınıflandırma ve aydınlatma ile ilgili yapılacak analizler çok daha sağlıklı olacaktır.

Tezin amacı yüz tanıma/modelleme ve hizalama konularında, $3B$ 'lu yöntemlerin başarımına yakın fakat düşük maliyetli ve yaygın olarak kullanılan $2B$ 'lu veri sağlayan kamera ve fotoğraf makinelerinden elde edilen görüntüler üzerinde çalışacak özgün yöntemler sunmaktır. Ayrıca yüz modelleme ve hizalama konusunda literatürde son yıllarda öne çıkan ve yüksek başarımları raporlanan *AGM*'nin yetersiz kaldığı noktalarda yeni çözümler önerilerek daha güçlü hale getirilmeye çalışılmıştır. Tez kapsamında görünüm modelleme ve nesne hizalama konusunda oluşan literatür biraz daha ileri bir noktaya taşınmış ve kurulan modeli daha güçlü hale getirebilmek için yeni yaklaşımlar sunulmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] **Yılmaz, A. and Gökmen, M.**, 2001: Eigenhill vs. eigenface and eignedge. *Journal of Pattern Recognition*, **34**(1), 181–184.
- [2] **Hallinan, P.**, 1994: A low-dimensional representation of human faces for arbitrary lighting conditions. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, (1), 995–999.
- [3] **Belhumeur, P. N., Hespanha, J. P. and Kriegman, D. J.**, 1997: Eigenfaces vs. Fisherfaces: Recognition using class specific linear projection. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **19**(1), 711–720.
- [4] **Shashua, A.**, 1997: On photometric issue in 3d visual recognition from a single 2D image. *International Journal of Computer Vision*, **21**(1), 99–122.
- [5] **Batur, A. U. and Hayes, M. H.**, 2001: Linear subspaces for illumination robust face recognition. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **2**(1), 296–301.
- [6] **Kanade, T.**, 1973: *Picture Processing System by Computer Complex and Recognition of Human Faces*. Ph.D. thesis, Kyoto University.
- [7] **Yuille, A., Cohen, D. and Hallinan, P.**, 1989: Feature extraction from faces using deformable templates. *Pattern Recognition Letters*, (1), 104–109.
- [8] **Craw, I., Tock, D. and Bennett, A.**, 1992: Finding face features. *Second European Conference on Computer Vision.*, (1), 92–96.
- [9] **Roeder, N. and Li, X.**, 1995: Experiments in analyzing the accuracy of facial feature detection. *Vision Interface*, (1), 8–16.
- [10] **Colombo, C., Del-Bimbo, A. and Magistris, S. D.**, 1995: Human-computer interaction based on eye movement tracking. *Computer Architectures for Machine Perception*, (1), 258–263.
- [11] **Reisfeld, D.**, 1994: *Generalized symmetry transforms: attentional mechanisms and face recognition*. Ph.D. thesis, Tel-Aviv University.
- [12] **Graf, H. P., Chen, T., Petajan, E. and Cosatto, E.**, 1995: Locating faces and facial parts. *International Workshop on Automatic Face- and Gesture-Recognition*, **1**, 41–46.
- [13] **Manjunath, B. S., Chellappa, R. and Malsburg, C. V. D.**, 1992: A feature based approach to face recognition. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **1**, 373–378.

- [14] **Kepenekçi, B., Tek, F. B. and Akar, G. B.**, 2002: Occluded Face Recognition Based On Gabor Wavelets. *IEEE International Conference on Image Processing*, **1**, 293–296.
- [15] **Turk, M. A. and Pentland, A.**, 1991: Face recognition using Eigenfaces. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, (1), 586–591.
- [16] **Pentland, A., Moghaddam, B. and Starner, T.**, 1994: View-based and modular eigenspaces for face recognition. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, (1), 84–91.
- [17] **Estimation, D. P. and for Face Recognition, N.**, 1996: T. Jebara. *Informatics and Mathematical Modelling, Master Thesis*.
- [18] **Xiaoguang, L., Hsu, R. and Jain, A. K.**, 2004: Face Recognition with 3D Model-Based Synthesis. *International Conference on Bioinformatics and its Applications*, **3072**, 1–16.
- [19] **Lee, K. C., Ho, J. and Kriegman, D.**, 2001: Nine points of lights: Acquiring subspaces for face recognition under variable lighting. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **1**, 519–526.
- [20] **Sim, T. and Kanade, T.**, 2001: Combining models and exemplars for face recognition: An illuminating example. *IEEE CVPR 2001 Workshop on Models versus Exemplars in Computer Vision*, **1**, 1–10.
- [21] **Liu, W., Wang, Y., Li, S. Z. and Tan, T.**, 369-374: Null Space-based Kernel Fisher Discriminant Analysis for Face Recognition. *International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, (1), 2004.
- [22] **Basri, R. and Jacobs, D.**, 374-381: Photometric Stereo with General Unknown Lighting. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, (1), 2001.
- [23] **Ramamoorthi, R.**, 1322-1333: Analytic PCA Construction for Theoretical Analysis of Lighting Variability in Images of a Lambertian Object. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **24**, 2002.
- [24] **Zhang, L. and Samaras, D.**, 2006: Face recognition from a single training image under arbitrary unknown lighting using spherical harmonics. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **28**, 351–363.
- [25] **Yue, Z., Zhao, W. and Chellappa, R.**, 229-243: Pose-Encoded Spherical Harmonics for Robust Face Recognition Using a Single Image. *IEEE International Workshop on Analysis and Modeling of Faces and Gestures (AMFG)*, **28**, 2005.
- [26] **Yue, Z., Zhao, W. and Chellappa, R.**, 1-18: Pose-encoded spherical harmonics for face recognition and synthesis using a single image. *EURASIP Journal of Advanced Signal Processing*, **2008**, 2008.

- [27] **Zhao, W. and Chellappa, R.**, 1286: Illumination-insensitive face recognition using symmetric shape from shading. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **1**, 2000.
- [28] **Zhao, W. and Chellappa, R.**, 286-293: Face recognition using symmetric shape from shading. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **1**, 2000.
- [29] **Dovgard, R. and Basri, R.**, 99-113: Statistical symmetric shape from shading for 3D structure recovery of faces. *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, **1**, 2004.
- [30] **Horn, B. and Brooks, M.**, 1989: *Shape from Shading*. The MIT Press.
- [31] **Georghiades, A. S., Belhumeur, P. N. and Kriegman, D. J.**, 2001: From few to many: Illumination cone models for face recognition under variable lighting and pose. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence.*, **23**, 643–660.
- [32] **Basri, R. and Jacobs, D. W.**, 2003: Lambertian reflectance and linear subspaces. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence.*, **25**(2), 218–233.
- [33] **Zhou, S., Aggarwal, G., Chellappa, G. and Jacobs, D.**, 2007: Appearance characterization of linear lambertian objects, generalized photometric stereo and illumination-invariant face recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **29**, 230–245.
- [34] **Shashua, A. and Riklin-Raviv, T.**, 2001: The quotient image: Class-based re-rendering and recognition with varying illuminations. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence.*, **23**(2), 129–139.
- [35] **Wang, H., Li, S. Z. and Wang, Y.**, 2004: Generalized quotient image. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **2**, 498–505.
- [36] **Liu, D., Lam, K. and Shen, L.**, 2005: Illumination invariant face recognition. *Pattern Recognition*, **38**(10), 1705–1716.
- [37] **Zhang, Y., Tian, J., He, X. and Yang, X.**, 2007: MQI Based Face Recognition Under Uneven Illumination. *Advances in Biometrics*, **4642**, 290–298.
- [38] **Nishiyama, M., Kozakaya, T. and Yamaguchi, O.**, 2008: Illumination Normalization using Quotient Image-based Techniques. *Recent Advances in Face Recognition*, **4642**(8), 97 –108.
- [39] **An, G., Wu, J. and Ruan, Q.**, 2008: Kernel TV-Based Quotient Image Employing Gabor Analysis and Its Application to Face Recognition. *IEICE Transactions on Information and Systems*, **91-D**, 1573–1576.
- [40] **Zhao, W. and Chellappa, R.**, 2006: *Face Processing: Advanced Modeling and Methods*. Academic Press, Elsevier.

- [41] **Zou, X., Kittler, J. and Messer, K.**, 2007: Illumination Invariant Face Recognition: A Survey. *IEEE Conference on Biometric: Theory, Application and Systems.*, **1**, 1–8.
- [42] **Ezzat, T. and Poggio, T.**, 1996: Illumination Invariant Face Recognition: A Survey. *International Workshop on Automatic Face and Gesture Recognition*, **1**, 116–121.
- [43] **Edwards, G. J., Taylor, C. J. and Cootes, T.**, 1998: Learning to Identify and Track Faces in Image Sequences. *International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, **1**, 260–265.
- [44] **Nastar, C., Moghaddam, B. and Pentland, A.**, 1996: Generalized Image Matching: Statistical Learning of Physically-Based Deformations. *In European Conference on Computer Vision*, **1**, 589–598.
- [45] **Lanitis, A., Taylor, C. and Taylor, T.**, 1997: Automatic Interpretation and Coding of Face Images Using Flexible Models. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **19**(7), 743–756.
- [46] **Cootes, T. F., Edwards, G. J. and Taylor, C. J.**, 2001: Active appearance models. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **23**(6), 681–685.
- [47] **Beymer, D.**, 1994: Face recognition under varying pose. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **1**, 756–761.
- [48] **Stegmann, M. B.**, 2001: Image Warping. *Informatics and Mathematical Modelling*, **1**.
- [49] **Goodall, C.**, 1991: Procrustes methods in the statistical analysis of shape. *Journal of Royal Statistical Society*, **53-B**, 285–339.
- [50] **Kahraman, F., Kurt, B. and Gökmen, M.**, 2007: Robust Face Alignment for Illumination and Pose Invariant Face Recognition. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **1**, 1–7.
- [51] **Gao, H., Ekenel, H. K. and Stiefelhagen, R.**, 2009: Pose Normalization for Local Appearance-Based Face Recognition. *Third International Conference on Advances in Biometrics (ICB)*, **1**, 32–41.
- [52] **Singh, R., Vatsa, M., Ross, A. and Noore, A.**, 2007: A mosaicing scheme for pose-invariant face recognition. *IEEE Transaction on Systems Man and Cybernetics Part B (Cybernetics)*, **37**, 1212–1225.
- [53] **Beymer, D. and Poggio, T.**, 1995: Face recognition from one example view. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **1**, 500–507.
- [54] **González-Jiménez, D. and Alba-Castro, J. L.**, 2007: Toward pose-invariant 2-D face recognition through point distribution models and facial symmetry. *IEEE Transaction on Information Forensics and Security.*, **2**, 413–429.

- [55] **Cootes, T. F., Walker, K. and Taylor, C. J.**, 2000: View-based active appearance models. *In Proc. Int. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition*, pp. 227–232.
- [56] **Prince, S. J. D., Warrell, J., Elder, J. H. and Felisbertin, F. M.**, 2008: Tied factor analysis for face recognition across large pose differences. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **30**, 970–984.
- [57] **Zhang, X., Gao, Y. and Leung, M. K. H.**, 2006: Automatic texture synthesis for face recognition from single views. *IEEE Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, **3**, 1151–1154.
- [58] **Gao, Y., Leung, M. K. H., Wang, W. and Hui, S. C.**, 2001: Fast face identification under varying pose from a single 2-D model view. *IEE Conference on Vision, Image and Signal Processing*, **148**, 248–253.
- [59] **Ishiyama, R., Hamanaka, M. and Sakamoto, S.**, 2005: An appearance model constructed on 3-D surface for robust face recognition against pose and illumination variations. *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, **35**, 326–334.
- [60] **Zhang, L., Razdan, A., Farin, G., Femiani, J., Bae, M. and Lockwood, C.**, 2006: 3D face authentication and recognition based on bilateral symmetry analysis. *Journal of Visual Computer*, **22**, 43–55.
- [61] **Wang, Y. and Chua, C. S.**, 2006: Robust face recognition from 2D and 3D images using structural Hausdorff distance. *Image and Vision Computing*, **24**, 176–185.
- [62] **Blanz, V. and Vetter, T.**, 2003: Face Recognition Based on Fitting a 3D Morphable Model. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **25**, 1063–1074.
- [63] **Blanz, V., Grother, P., Phillips, P. and Vetter, T.**, 2005: Face Recognition Based on Frontal Views generated from Non-Frontal Images. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **25**, 1063–1074.
- [64] **Wang, L., Ding, L., Ding, X. and Fang, C.**, 2009: Improved 3D assisted pose-invariant face recognition. *IEEE Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, **25**, 889–892.
- [65] **Kim, T. K. and Kittler, J.**, 2006: Design and fusion of pose invariant face identification experts. *IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology*, **16**, 1096–1106.
- [66] **Kwak, N.**, 2008: Feature extraction for classification problems and its application to face recognition. *Pattern Recognition.*, **41**, 1701–1717.
- [67] **Yang, J.**, 2004: Two-dimensional PCA: A new approach to appearance-based face representation and Recognition. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **26**, 131–137.

- [68] **Zhao, W., Chellappa, R. and Krishnaswamy, A.**, 1998: Discriminant analysis of principal components for face recognition. *International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, **1**, 14–16.
- [69] **Hastie, T. and Tibshirani, R.**, 1995: Penalized discriminant analysis. *The Annals of Statistics*, **23**, 73–102.
- [70] **Zhou, S. and Chellappa, R.**, 2004: Multiple-exemplar discriminant analysis for face recognition. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **4**, 191–194.
- [71] **Jolliffe, I. T.**, 1986: *Principal Component Analysis*. Springer Verlag, Second Edition, Germany.
- [72] **Cootes, T. F. and Kittipanya-ngam, P.**, 2002: Comparing Variations on the Active Appearance Model Algorithm. *British Machine Vision Conference*, **2**, 837–846.
- [73] **Craw, I. and Cameron, P.**, 1991: Parameterizing images for recognition and reconstruction. *In European Conference on Computer Vision*, **1**, 589–598.
- [74] **Cootes, T. and Taylor, C. J.**, 2001: On Representing edge structure for model matching. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **1**, 1114–1119.
- [75] **Cootes, T., Cooper, D., Taylor, C. and Graham, J.**, 1995: Active shape models - their training and application. *Computer Vision and Image Understanding*, **61**(1), 38–59.
- [76] **Cootes, T., Taylor, C., Lanitis, A., Cooper, D. and Graham, K.**, 1993: Building and using flexible models incorporating grey-level information. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **1**, 355–365.
- [77] **Isidoro, J. and Sclaroff, S.**, 1998: Active voodoo dolls: a vision based input device for nonrigid control. *IEEE Comput. Soc. Computer Animation*, **13**(5), 137–143.
- [78] **Lanitis, A., Taylor, C. and Cootes, T.**, 1995: Automatic Face Identification system using flexible appearance models. *Image and Vision Computing*, **13**(5), 393–401.
- [79] **Cootes, T., Edwards, G. J. and Taylor, C. J.**, 1998: Active appearance models. *European Conference on Computer Vision*, **2**, 484–498.
- [80] **Pizarro, D., Peyras, J. and Bartoli, A.**, 2008: Light-Invariant Fitting of Active Appearance Models. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **1**, 1–6.
- [81] **Baker, S. and Matthews, I.**, 2001: Equivalence and efficiency of image alignment algorithms. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **1**, 1090–1097.

- [82] **Kahraman, F., Gökmen, M., Darkner, S. and Larsen, R.**, 2007: An Active Illumination and Appearance (AIA) Model for Face Alignment. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **1**, 1–7.
- [83] **Blanz, V., Romdhani, S. and Vetter, T.**, 2002: Face Identification across Different Poses and Illuminations with a 3D Morphable Model. *In Proc. Int. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition*, **1**, 202–207.
- [84] **Blanz, V., Romdhani, S. and Vetter, T.**, 2002: A morphable model for the synthesis of 3d faces. *In Proc. of the 5th IEEE Conf. on AFGR*, **1**.
- [85] **Romdhani, S., Blanz, V., Basso, C. and Vetter, T.**, 2005: *Morphable Models of Faces*. Handbook of Face Recognition:Eds. Li, S., Jain, A., Germany.
- [86] **Xiao, J., Baker, S., Matthews, I. and Kanade, T.**, 2004: Face Realtime combined 2d+3d active appearance models. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **2**, 535–542.
- [87] **Batur, A. U. and Hayes, M. H.**, 2003: A Novel Convergence Scheme for Active Appearance Models. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **1**, 359–368.
- [88] **Gross, R., Matthews, I. and Baker, S.**, 2005: Generic vs. Person Specific Active Appearance Models. *Image and Vision Computing*, **23**, 1080–1093.
- [89] **Lee, S. J., Park, K. R. and Kim, J. H.**, 2009: A comparative study of facial appearance modeling methods for active appearance models. *Pattern Recognition Letters*, **30**, 1335–1346.
- [90] **Matthews, I. and Baker, S.**, 2003: *Active appearance models revisited*. Technical Report, Robotics Institute, Carnegie Mellon University.
- [91] **Stegmann, M. B., Ersbøll, B. K. and R., R. L.**, 2003: FAME - A Flexible Appearance Modelling Environment. *IEEE Transaction Medical Imaging*, **22**(10), 1319–1331.
- [92] **Cootes, T. and Taylor, C. J.**, 2001: *Statistical models of appearance for computer vision*. Technical Report, University of Manchester, Manchester.
- [93] **Bookstein, F. L.**, 1997: Landmark methods for forms without landmarks: Localizing group differences in outline shape. *Medical Image Analysis*, **1**(3), 225–244.
- [94] **Active Appearance Models: Theory, E. and Cases**, 2000: M. B. Stegmann. *Informatics and Mathematical Modelling, Master Thesis*.
- [95] **Cootes, T., Edwards, G. and Taylor, C. J.**, 1998: A comparative evaluation of active appearance model algorithms. *British Machine Vision Conf.*, **2**, 680–689.
- [96] **Ingber, L.**, 1993: Simulated Annealing: Practice Versus Theory. *Mathematical and Computer Modelling*, **18**, 29–57.

- [97] **Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P.**, 1983: Simulated Annealing: Practice Versus Theory. *Science*, **220**, 671–680.
- [98] **Goldberg, D.**, 1988: *Genetic Algorithms*. Addison Wesley.
- [99] **Alander, J. T.**, 1995: An indexed bibliography of genetic algorithms: Years 1957-1993. *Technical Report*, **94**(1).
- [100] **Wiskott, L., Fellous, J. M., Kruger, N. and Malsburg, C.**, 1996: *Face recognition by elastic bunch graph matching*. Tech. Rep. IR-INI 96-08.
- [101] **Lim, R. and Reinders, M. J. T.**, 2000: Facial landmark detection using a Gabor filter representation and a genetic search algorithm. *Sixth annual conference of the Advanced School for Computing and Imaging*.
- [102] **Gökberk, B., Irfanoglu, M. O., Dogu, H., Akarun, L. and Alpaydin, E.**, 2003: Yüz Tanıma için eniyi Gabor parametrelerinin seçimi. *Sinyal İşleme Uygulamaları Konferansı*.
- [103] **Viola, P. and Jones, M. J.**, 2001: Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **1**, 511–518.
- [104] **Stegmann, M. B.**, 2002: *Analysis and segmentation of face images using point annotations and linear subspace techniques*. DTU Technical Report, Denmark.
- [105] **Lienhart, R. and Maydt, J.**, 2002: An Extended Set of Haar-like Features For Rapid Object Detection. *IEEE International Conference on Image Processing*, **1**, 990–903.
- [106] **B., B. K., Gökmen, M. and Jain, A. K.**, 1997: Image Compression Based On Centipede Model. *International Conference On Image Analysis and Processing*, **1**, 303–310.
- [107] **IMM-Database**: <http://www.imm.dtu.dk/-aam/datasets/datasets.html>.
- [108] **Stegmann, M. B. and Larsen, R.**, 2003: Multi-band Modeling of Appearance. *Image and Vision Computing*, **21**(1), 61–67.
- [109] **Gökmen, M. and Jain, A. K.**, 1997: $\lambda \tau$ - Space Representation of Images and Generalized Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **19**(6), 545–563.
- [110] **Sim, T., Baker, S. and Bsat, M.**, 2003: The CMU Pose, Illumination, and Expression Database (PIE). *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **12**, 1615–1618.
- [111] **Heisele, B., Ho, P., Wu, J. and Poggio, T.**, 2003: Face Recognition: Component-based versus Global Approaches. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **9**(1), 6–21.

- [112] **Xie, B., Comaniciu, D., Ramesh, V., Simon, M. and Boulton, T.**, 2003: Component Fusion for Face Detection in the Presence of Heteroscedastic Noise. *Proc. of DAGM'03*, pp. 434–441.
- [113] **Cristinacce, D., Cootes, T. and Scott, I.**, 2004: A Multi-Stage Approach to Facial Feature Detection. *British Machine Vision Conference*, pp. 277–286.
- [114] **Kahraman, F. and Gökmen, M.**, 2005: Illumination Invariant Face Alignment Using Multi-Band Active Appearance Model. *International Conference on Pattern Recognition and Machine Intelligence*, **3776/2005**, 118–127.
- [115] **Shashua, A. and Riklin-Raviv, T.**, 1999: The Quotient image: Class based recognition and synthesis under varying illumination. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **2**, 566–571.
- [116] **Gonzalez, R. C. and Woods, R. E.**, 2002: *Digital Image Processing, Second Edition*. Prentice Hall.
- [117] **Hutchinson, M. F.**, 1993: On thin plate splines and kriging. *Computing and Science in Statistics*, pp. 55–62.
- [118] **Yale-Database**, 1998: <http://cvc.yale.edu/projects/yalefacesB/yalefacesB.html>.
- [119] **Vetter, T. and Poggio, T.**, 1997: Linear object classes and Image Synthesis From a Single Example Image. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **19**, 733–742.
- [120] **Chang, C. I. and Hayes, M. H.**, 2005: Image Synthesis. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **43**, 502–518.
- [121] **Fukunaga, F.**, 1990: *Introduction to statistical pattern recognition*. Academic Press, 2nd edition, Boston.
- [122] **Skurichina, M. and Duin, R.**, 1999: Regularization of linear classifiers by adding redundant features. *Pattern Recognition Letters*, **2**(1), 44–52.
- [123] **Raudys, S. and Duin, R. P. W.**, 1997: On expected classification error of the fisher linear classifier with pseudo-inverse covariance matrix. *Pattern Recognition Letters*, **19**(5), 385–392.

EKLER

EK A: İstatistiksel Öznitelik Çıkartıcılar

Temel Bileşenler Analizi (PCA-TBA)

Karhunen-Loeve dönüşümü olarak da bilinen temel bileşenler analizi, veri gösterimi, boyut indirgeme, imge sıkıştırma ve yüz tanıma uygulamalarında sıklıkla kullanılan klasikleşmiş istatistiksel bir yöntemdir. Yöntemin temeli, giriş verisini daha tıkHz bir gösterim için dik bir alt uzaya iz düşürmeye dayanır. Bu alt uzay verinin içeriğini daha iyi betimlemektedir. Bunu, aralarında ilintili değişkenleri, aralarında ilintisiz daha az sayıda, temel bileşenler olarak adlandırılan değişkene indirgeyen bir dönüşüm ile sağlamaktadır. Burada bahsi geçen dönüşüm doğrusal bir dönüşüme karşılık gelmektedir.

TBA dönüşümü kısaca şu şekilde yapılmaktadır; Veri kümesinde yer alan M adet gözlemin bir araya getirilmesi ile oluşturulan X matrisi ile gösterilsin.

$$X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_M] \quad (\text{A.1})$$

Denklem (A.1)'deki x_i 'ler her bir gözlemin N -boyutlu vektörler şeklinde ifade edilmiş halini ifade etmektedir. İlk olarak X matrisinin ortalamadan çıkartılmış hali olan X' 'in hesaplanması gerekir. Bunun için $N \times M$ -boyutlu X matrisini oluşturan gözlemlerin ortalaması olan \bar{x} , denklem (A.2)'de gösterildiği gibi, X matrisindeki tüm x_i gözlemlerinden çıkartılarak X' hesaplanmaktadır.

$$X' = [(x_1 - \bar{x}), (x_2 - \bar{x}), (x_3 - \bar{x}), \dots, (x_M - \bar{x})] \quad (\text{A.2})$$

X' matrisi hesaplandıktan sonra sıra ortak değişinti matrisinin hesaplanmasına gelir. Denklem (A.3)'te gösterilen değişinti matrisinin nasıl hesaplanabileceği gösterilmektedir.

$$C = X'X'^T \quad (\text{A.3})$$

TBA, denklem (A.3)'te hesaplanan değişinti matrisinden, eğitim verilerini daha iyi betimleyecek $M - 1$ adet ortogonal, e_i vektörü bulmaya çalışır. Temel bileşenleri hesaplanmanın en bilinen yolu denklem (A.3)'te C ile gösterilen değişinti matrisinin özvektörlerini bulmaktır. Dikkat edilirse C değişinti matrisi $N \times N$ boyutundadır. Giriş verilerinin birer görüntü olduğu düşünüldüğünde C değişinti matrisinin çok büyük boyutlarda olduğu görülecektir. Bu büyüklükteki bir matrisin özvektörlerinin bulunması oldukça maliyetli bir işlemdir. C değişinti matrisinin özdeğerleri olan e_i ve özvektörleri olan λ_i denklem (A.4)'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$Ce_i = \lambda_i e_i \quad (\text{A.4})$$

Fakat özvektörler hesaplanacak olursa, bulunan özvektörlere karşılık gelen özdeğerlerin sadece $M - 1$ tanesinin sıfırdan farklı olduğu görülecektir. Hatırlanacak olursa M , C değişinti matrisini oluştururken kullanılan gözlem verisi sayısıdır. Bu durumda $M - 1$ adet özvektörün $M \times M$ özvektör hesabı ile daha az maliyetle bulunabileceği ortadadır. Bu amaca yönelik, D değişinti matrisini denklem (A.5)'de gösterildiği haliyle hesaplanabilir.

$$D = X'^T X' \quad (\text{A.5})$$

D değişinti matrisi $M \times M$ 'lik bir matristir ve C ile karşılaştırıldığında oldukça küçük boyutlardadır. C 'nin özdeğerlerini hesaplamak gibi maliyetli bu işlem yerine, D matrisinin özdeğerleri olan \hat{e}_i ve özvektörleri olan $\hat{\lambda}_i$ 'yi hesaplamak ve hesaplanan bu özdeğer ve özvektörlerden, büyük boyutlu C değişinti matrisinin özdeğer ve özvektörlerini aşağıda gösterildiği gibi dolaylı olarak hesaplamak mümkündür;

$$\begin{aligned} D\hat{e}_i &= \hat{\lambda}_i \hat{e}_i \\ X'^T X' \hat{e}_i &= \hat{\lambda}_i \hat{e}_i \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Denklem (A.6)'daki uzun haliyle yazılmış ifadenin her iki tarafını X' ile çarparsak denklem (A.7)'deki ifadeyi elde ederiz.

$$X' X'^T X' \hat{e}_i = \hat{\lambda}_i X' \hat{e}_i \quad (\text{A.7})$$

Denklem (A.7)'de $X' X'^T$ 'nin yerine C yazabiliriz. Ayrıca $(X' \hat{e}_i)$ yerine ise e_i yazabiliriz. Bu haliyle denklemi yeniden düzenleyecek olursak denklem (A.8)'deki ifadeyi elde edebiliriz.

$$\begin{aligned} C(X' \hat{e}_i) &= \hat{\lambda}_i (X' \hat{e}_i) \\ C e_i &= \hat{\lambda}_i e_i \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Denklem (A.8)'de büyük C matrisinin özvektörünün, $e_i = (X' \hat{e}_i)$ eşitliği ile bulunabileceği görülmektedir. Başka bir ifadeyle küçük D matrisinin özvektörleri bulunup, merkeze çekilmiş X' giriş matrisi ile çarpıldığında, büyük C matrisine ait özvektörlere eşit olmaktadır. Bu noktada $\hat{\lambda}_i$ 'nin λ_i 'ye eşit olduğunu ve zaten büyük C 'nin sadece $M - 1$ tane sıfırdan farklı özdeğeri olduğunu hatırlamakta fayda var.

Tekrar temel bileşenler analizine dönecek olursak, C 'nin özvektörleri bulunduktan sonra tüm özvektörler karşılık gelen özdeğerlerine göre büyükten küçüğe doğru sıraya dizilirler. İlk temel bileşen, veri kümesindeki en büyük değişimi içermektedir. Büyük özdeğer, o özvektörde verinin büyük değişimlerinin kodlandığını ifade eder. Genellikle toplam değişimin büyük bölümünü içerecek şekilde seçilen ilk k adet özvektör ile bir uzay kurulur. Kurulan bu uzaya giriş görüntüleri iz düşürülerek k boyutlu öznitelikler elde edilir. Artık görüntüleri $1 \times N$ 'lik benek değeri yerine, k adet parametre ile göstermek mümkün olacaktır. Tezin ilerleyen bölümlerinde de anlatılacağı gibi bu öznitelik parametrelerinden tekrar giriş görüntüsünü belirli bir hata ile sentezlemekte mümkündür.

Temel Bileşenler Analizi (TBA), yüz tanıma ve modelleme için en çok kullanılan istatistiksel yöntemlerden birisidir. Ancak, izdüşürülen örneklerin saçılımını ençoklamayı amaçlayan bu yöntem, aydınlanma değişimlerinde başarısızdır. Çünkü örnek saçılımlarını ençoklarken, sınıflar arası saçılımlarla birlikte, sınıflandırma

açısından hiç de istenmeyen sınıf içi saçılımları da artırmaktadır. Böylece görüntüler arası değişimlerin çoğu aydınlanma değişimlerine dayanmaktadır. Sonuçta ortaya çıkan izdüşüm uzayında sınıflar iyi öbeklenememektedir. Aydınlanmadan doğan etkileri azaltmak için en yüksek özdeğerlere denk düşen üç temel bileşenin göz ardı edilmesi önerilmektedir. Burada, yüksek özdeğerlere denk düşen bileşenlerin çokça aydınlanma değişimlerinden doğan bilgiyi taşıdığı varsayılmaktadır. Temel Bileşen Analizi temelli "Özyüzler" yöntemi En yaygın görünüm tabanlı yöntem olup, özyüzlere dayalı yöntemler hala kullanılmakta ve başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Bu yaklaşımın önemli sorunlarından arasında aydınlatma ve poz değişimlerine duyarlı olması yer almaktadır.

İki Boyutlu Temel Bileşenler Analizi (2DPCA-2BTBA)

Tek boyutlu klasik TBA'da verilerin tek boyutlu bir sicim biçiminde dizilerek elde edilen tek boyutlu veri üzerinden hesaplanan özdeğişinti matrisinden hesaplanır. Bu dizime işleme nedeni ile ele alınan verinin uzun olması ya da az sayıda veri bulunması durumunda özdeğişinti matrisi verinin içeriğini modellemekte yetersiz kalmaktadır. Bu tür boyut problemlerinin çözümü için İki Boyutlu Temel Bileşenler Analizi önerilmiştir [67]. X n -boyutlu bir sütun vektörü olsun. $m \times n$ boyutlu bir A matrisini doğrusal bir dönüşüm ile X vektörüne $Y = AX$ işlemi ile izdüşürelim. Böylelikle m -boyutlu bir izdüşüm vektörü olan Y 'yi elde etmiş oluruz. Bu vektörü imgenin izdüşürülmüş öznitelik vektörü olarak adlandırıyoruz. Bu izdüşüm en iyi X 'in saçılımının bir ölçütünden elde edilebilir:

$$J(X) = tr(S_x) \quad (\text{A.9})$$

Burada S_x eğitim kümesindeki verilerin özdeğişinti matrisini, $tr(S_x)$ ise bu matrisin izini göstermektedir. Özdeğişinti matrisinin hesabı;

$$\begin{aligned} S_x &= E \left[(Y - E[Y]) (Y - E[Y])^T \right] \\ &= E \left[(AX - E[AX]) (AX - E[AX])^T \right] \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

$$S_x = E \left[(A - E[A]) ((A - E[A]) X)^T \right] \quad (\text{A.11})$$

biçiminde yapılabilir. Denklem (A.11)'teki S_x matrisinin izi,

$$tr(S_x) = X^T E \left[(A - E[A])^T (A - E[A]) \right] X \quad (\text{A.12})$$

olarak hesaplanır. Denklem (A.12)'te köşeli parantezlerle gösterilen ifadeyi G_t olarak adlandıralım. G_t 'yi denklem (A.13)'te gösterildiği gibi tanımlıyoruz:

$$G_t = E \left[(A - E[A])^T (A - E[A]) \right]. \quad (\text{A.13})$$

Elimizde M adet eğitim imgesi olsun ve bu $m \times n$ boyutlu imgeleri A_j ($j = 1, 2, \dots, M$) ile gösterelim. Bu durumda G_t matrisi,

$$G_t = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (A_j - \bar{A})^T (A_j - \bar{A}) \quad (\text{A.14})$$

şeklinde hesaplanır. Denklem (A.9)'de verilen $J(X)$ ölçütü şimdi,

$$J(X) = X^T G_t X \quad (\text{A.15})$$

biçimini alır. X_{opt} , $J(X)$ 'i en iyileyen vektörü gösterebilir. X_{opt} , G_t , matrisinin en büyük özdeğerine karşı düşen özvektördür. Bu şekilde en iyi izdüşüm vektörlerini verecek d adet vektör, G_t matrisinin en büyük d adet özdeğere karşı düşen özvektörlerinden seçilir. Verilen bir imgenin (A) iki boyutlu temel bileşenler analizinde ($2B - TBA$) en iyilenmiş izdüşüm vektörleri kullanılarak öznelik vektörleri,

$$Y_k = AX_k, k = 1, 2, \dots, d \quad (\text{A.16})$$

biçiminde elde edilir.

Doğrusal Ayırtaç Analizi (LDA-DAA)

Her sınıftan N_i adet örneğin $\{x_1^i, x_2^i, \dots, x_{N_i}^i\}$ bulunduğu c sınıflı bir giriş uzayı düşünelim. Burada her örnek d -boyutlu vektörlerle ifade ediliyor olsun. DAA'da amaç giriş uzayını başka bir öznelik uzayına, sınıf içi değişimleri en azlayan ve sınıflar arası değişimleri en çoklayan doğrusal bir izdüşüm bulabilmektir. Bahsedilen izdüşüm matrisini bulabilmek için sınıf içi saçılım matrisi S_W ve sınıflar arası saçılım matrisi S_B hesaplanır (Bkz. denklemler (A.17) ve (A.18));

$$S_W = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^c \sum_{x \in X_i} (x - m_i)(x - m_i)^T \quad (\text{A.17})$$

Burada m_i i . sınıfa ait ortalama vektörü, m ise global ortalama vektörü göstermektedir. DAA da kullanılan maliyet (cost) işlevi J denklem (A.19)'de gösterildiği gibidir.

$$S_B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^c N_i (m_i - m)(m_i - m)^T \quad (\text{A.18})$$

J işlevini en azlayan W temel matrisi $S_W^{-1} S_B$ matrisinin en yüksek $C - 1$ tane özdeğerine denk düşen özvektörlerinden oluşur [121]. S_W sınıf içi saçılım matrisinin tersini almak her zaman mümkün olmayabilir. S_W 'in tekilliğinin sebebi, giriş kümesindeki örnek sayısının (N), giriş örnek vektörü uzunluğundan (d) oldukça küçük olmasıdır.

$$J = \frac{|W^T S_B W|}{|W^T S_W W|} \quad (\text{A.19})$$

Deneyisel çalışmalarımızda, S_W 'nin tekilliği problemini çözmek için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Bunlar;

- **Giriş örnek vektör uzunluğunu düşürme:** Bu yöntem S_W tekilliğini çözmeye en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Giriş örnekleri DAA ya başlamadan önce Temel Bileşen Analizi (TBA) vb. yöntemlerle boyut azaltılır [68]. Böylece giriş örnek vektör uzunlukları toplam örnek sayısına yaklaştırılmış olur.
- **S_W matrisine başka bir ceza matrisi ekleyerek düzgünleştirme:** DAA ndeki izdüşüm vektörleri incelendiğinde yüksek seviyede gürültüye rastlanır. Örnek sayısının azlığından kaynaklanan bu gürültüyü bastırmak için S_W matrisinin köşegenlerine gerçel sayılar eklenebilir [69] [122]. Bu yöntem aşağıda verilen denklemde gösterilmiştir. Denklemdeki I birim matrisi, ρ ise 1 ile 50 arasında değerler alabilen gerçel bir sabiti göstermektedir.

$$S_w = S_W + \rho I \quad (\text{A.20})$$

- S_W matrisinin tersini sözde ters (pseudo inverse) yöntemi ile hesaplama: Örnek sayısının kısıtlı olduğu, bu yüzden de S_W 'nin tekil olduğu durumlarda matrisin direk tersi olan S_W^{-1} 'i kullanmak yerine sözde tersi (pseudo-inverse) olan kullanılabilir [123] [122]. Sözde tersi hesaplamak için S_W 'nin Tekil Değer Ayrıştırması (Singular Value Decomposition) yapılır. Bu işlem aşağıda verilen ifadeyle gerçekleştirilebilir,

$$S_W = Q_1 \Lambda Q_1^T \quad (\text{A.21})$$

Denklemdaki $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k)$ S_W 'nin pozitif özdeğerlerini göstermektedir. Buradaki k , S_W 'nin rankını gösterir ve genellikle örnek sayısı ile sınıf sayısının farkı olan, $N-C$ 'ye eşittir. İfadede yer alan özdeğerlere denk düşen özvektörler ise Q_1 matrisini oluşturur. S_W 'nin sözde tersi ise,

$$S_W^+ = Q_1 \Lambda^{-1} Q_1^T \quad (\text{A.22})$$

şeklinde tanımlanmıştır. Sözde ters kullanan DAA yöntemlerinde, izdüşüm matrisi bulunurken $S_W^{-1} S_B$ yerine $S_W^+ S_B$ 'in özvektörleri hesaplanır.

Çok Örnekli Ayırtaç Analizi (MEDA-ÇÖAA)

Standart DAA yönteminde her sınıfta bulunan yüzler tek bir örnekle (sınıf içi ortalama yüz) temsil edilmektedir. Bu durum özellikle her sınıftan yeterli sayıda örüntünün bulunmadığı durumlarda sorunlar çıkarmaktadır. Bu yüzden Zhou ve Chellappa [70] çok örnekli ayırtaç analizi ÇÖAA (MEDA) yöntemini önermişlerdir. Önerilen yöntemde sınıfları temsil ederken ortalama yüz yerine her sınıftan birden fazla örneğin ya da örneklerin tamamının kullanılması söz konusudur. Sınıf içi ve sınıflar arası saçılım matrisleri denklem (A.23) ve (A.24)'te tekrar tanımlanmıştır;

$$S_W = \sum_{x \in X_i} \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k=1}^{N_i} (x_j - x_k)(x_j - x_k)^T \quad (\text{A.23})$$

ÇÖAA ile hesaplanmış doğrusal izdüşüm matrisi kullanılarak test örüntüsünü sınıflandırırken normal DAA yönteminden farklı bir yol izlenmelidir.

$$S_B = \sum_{i=1}^C \sum_{j=1, i \neq j}^C \frac{1}{N_i N_j} \sum_{k=1}^{N_i} \sum_{l=1}^{N_j} (x_k^i - x_l^j)(x_k^i - x_l^j)^T \quad (\text{A.24})$$

DAA yönteminde bir test örüntüsü verildiğinde, C_y sınıf etiketine karar verilirken, W izdüşüm matrisini, m_i i . sınıfa ait ortalama vektörü göstermek üzere,

$$C_y = \arg \min_{i=1,2,\dots,C} \{|W^T (y - m_i)|\} \quad (\text{A.25})$$

ifadesi kullanılırken, ÇÖAA yönteminde sınıflandırma,

$$C_y = \arg \min_{i=1,2,\dots,C} \left\{ \min_{j=1,2,\dots,C} |W^T (y - x_j^i)| \right\} \quad (\text{A.26})$$

şeklinde yapılmaktadır.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Fatih KAHRAMAN.
Doğum Yeri ve Tarihi : Antakya, 30/11/1976.
Adres : TUBITAK MAM BTE P.K. 21,
Gebze, Kocaeli.
Lisans Üniversitesi : İ.T.Ü., Çukurova Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 1999.

Yayın Listesi :

1. F. Kahraman, B. Kurt, M. Gökmen, Book Chapter: Robust Face Alignment For Illumination and Pose Invariant Face Recognition, "Face Recognition", ISBN 978-953-7619-00-X, In-Tech, (16 pages), January 2010.
2. F. Kahraman, M. Gökmen, S. Darkner, R. Larsen, "Active Illumination and Appearance Model for Face Alignment", Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. (Accepted)
3. F. Kahraman, C.D.Mendi, M. Gökmen, "Image Frame Fusion using 3D Anisotropic Diffusion", IEEE Conf. on Computer and Information Sciences, Istanbul, 2008.
4. F. Kahraman, M. Gökmen, S. Darkner, R. Larsen, "An Active Illumination and Appearance (AIA) Model for Face Alignment", IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2007), Minneapolis 2007.
5. F. Kahraman, B. Kurt, M. Gökmen, "Robust Face Alignment for Illumination and Pose Invariant Face Recognition," IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2007), Minneapolis 2007.
6. F. Kahraman, F. S. Telcean, M. Gökmen, "Illumination Invariant Face Alignment", DTU Vision Days 2006, Lyngby, Denmark, May, 2006.(Winner of the SONY Best Project Award)
7. F. Kahraman, M. Gökmen, "Illumination Invariant Three-Stage Approach For Face Alignment", IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2006), Atlanta, GA USA, October, 2006.
8. F. Kahraman, M. B. Stegmann, "Towards Illumination-invariant Localization of Faces using Active Appearance Models," IEEE 7th Nordic Signal Processing Symposium (NORSIG 2006), Reykjavik, June 2006.
9. F. Kahraman, B. Kurt, M. Gökmen, "Three-Band Modeling Using Prominent Edges for Face Alignment,"(in Turkish) 14th IEEE Conference on Signal Processing and Its Applications, SIU'2006, 2006.
10. F. Kahraman, B. Evrim Demiröz, B. Kurt, M. Gökmen, "View Independent Robust License Plate Recognition System," Journal of Industry and Automation, No. 106, pp. 28-32, January 2006.

11. F. Kahraman, M. Gökmen, "Illumination Invariant Face Alignment Using Multi-Band Active Appearance Model", International Conference on Pattern Recognition and Machine Intelligence, Springer LNCS, India, 2005.
12. M. Gökmen, F. Kahraman, B. Kurt, "Face Alignment and Recognition Using Prominent Facial Edges", BioSec 4th Workshop (Biometrics in a global environment), Brussels, Belgium, November, 2005.
13. M. Gökmen, F. Kahraman, B. Kurt, "Face Alignment and Recognition Using Prominent Facial Edges", BioSec 4th Workshop (Biometrics in a global environment), Brussels, Belgium, 2005.
14. F. Kahraman, B. E. Demiröz, B. Kurt, M. Gökmen, "View Independent Robust License Plate Recognition System," IEEE 13th Conference on Signal Processing and Its Applications, SIU'2005, 2005, Turkey.
15. F. Kahraman, M. Gökmen, "Active Appearance Model Based Face Recognition," IEEE 13th Conference on Signal Processing and Its Applications, SIU'2005, 2005, Turkey.
16. F. Kahraman, A. Çapar, A. Ayvaci H. Demirel, M. Gökmen "Comparison of SVM and ANN Performance for Handwritten Character Classification", IEEE 12th Conference on Signal Processing and Its Applications, pp. 615-619, 2004.
17. A. Çapar, F. Kahraman, A. Ayvaci H. Demirel, M. Gökmen "Linear Dimension Reduction Methods in Character Recognition Systems", IEEE 12th Conference on Signal Processing and Its Applications, pp. 611-615, 2004.
18. F. Kahraman, B. Kurt, M. Gökmen, "License Plate Character Segmentation Based on the Gabor Transform and Vector Quantization," (Springer-LNCS) Lecture Notes in Computer Science, 18. Int. Conf. on Computer and Information Sciences, pp.381-388, 2003.
19. F. Kahraman, M. Gökmen "Gabor filter Based License Plate Segmentation", 11th Conference on Signal Processing and Its Applications, pp. 387-391, 2003.
20. F. Kahraman, M. Gökmen, "Face recognition with the use of principal component analysis based on artificial neural networks", Int. Journal of Perception, Vol. 31, pp. 139, 2002.