

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ İSKELET NOKTALARI İLE VERİMLİ 2B ve 3B
ŞEKİL GERİ GETİRME**

DOKTORA TEZİ
Yahya ŞİRİN

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. M. Fatih DEMİRCİ

Nisan 2016



Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Prof. Dr. Murat ALANYALI
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 08110026 numaralı Doktora öğrencisi **Yahya ŞİRİN**'nin ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **”ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ İSKELET NOKTALARI İLE VERİMLİ 2B ve 3B ŞEKİL GERİ GETİRME”** başlıklı tezi 05.04.2016 tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı: **Doç. Dr. M. Fatih DEMİRCİ**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. Bülent TAVLI (Başkan)**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Doç. Dr. Hasan Şakir BİLGE
Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Murat KOYUNCU
Atılım Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Mehmet TAN
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Yahya ŞİRİN

İMZA

ÖZET

Doktora Tezi

ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ İSKELET NOKTALARI İLE VERİMLİ 2B ve 3B ŞEKİL GERİ GETİRME

Yahya ŞİRİN

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. M. Fatih DEMİRCİ

Tarih: Nisan 2016

Bilgisayar bilimlerinde son zamanlarda yaşanan gelişmeler ile birlikte sayısal görüntüler; çoklu ortam cihazlarında, bilgisayar destekli tasarımlarda, sayısal kütüphanelerde ve elektronik ticaret gibi konularda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. 2B ve 3B görüntülerinin çoğalmasından dolayı etkili ve verimli biçimde şekil geri getirme işlemi, hayati bir önem kazanmıştır. Bu nedenle şekil geri getirme problemi üzerinde, örüntü tanıma, bilgisayarlı grafik, bilgisayarlı görü ve uygulamalı matematik gibi değişik konularda birçok alanda çalışılmaktadır. Bu tezde, iskelet etrafına artan yarıçap değerleri ile 2B şekillerde daire, 3B şekiller içinse küre çizilerek oluşturulan, iskelet tabanlı yeni bir şekil tanıma algoritması sunulmuştur. Her bir iskelet bir maksimum teğet kürenin merkezine karşılık geldiğinden, bu işlem sonunda çizilen küreler kısmen şekil içinde kalmaktadır. Çizilen kürelerin (daire) şeklin içinde kalan ve toplam piksel sayıları arasındaki oran, iskelet benzerliği ve şekil ayırt etmek için kullanılmaktadır. Ayrıca bu tez kapsamında, önceki teknikler ile bir karşılaştırma yapılmış ve çalışmanın etkinliği ile sağlamlığını ortaya koymak için önerilen yaklaşımın deneysel değerlendirilmesi ve çalışmaları sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Şekil tanıma, Şekil tanımlayıcı, Mesafe fonksiyonları, Benzerlik taraması, Şekil geri getirme, Şekil tanımlayıcılar

ABSTRACT

Doctor of Philosophy

EFFICIENT 2D AND 3D IMAGE RETRIEVAL WITH ENHANCED SKELETON POINTS

Yahya ŞİRİN

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Computer Engineering

Supervisor: Doç. Dr. M. Fatih DEMİRÇİ

Date: April 2016

With the latest innovations in computer science, digital images have come to be used in field such as multimedia devices, computer aided design, digital libraries, and electronic commerce. Effective and efficient image recognition has become critically important with the increase in 2D and 3D images. For this reason, studies in fields such as pattern recognition, computer graphics, machine vision, and applied mathematics are being carried out in image recognition. In this thesis, a new shape recognition algorithm proposed by drawing a circle with increasing radii for 2D images, and spheres for 3D shapes is introduced. As every skeleton corresponds to the center of a maximum tangent sphere, the spheres drawn remain partially in the shape after this operation. The ratio between the remaining part of the sphere (circle) in the shape and the total number of pixels, is used to differentiate skeleton similarities and shapes. Also with this study, a comparison has been made with previous techniques and experimental evaluation and operations have been presented to show the effectiveness of the algorithm.

Keywords: Shape recognition, Shape representation, Distance functions, Similarity searching, Image retrieval, Image descriptors

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren kıymetli danışmanım Doç. Dr. M. Fatih DEMİRCİ, yine önemli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Prof. Dr. Bülent TAVLI, Bilgisayar Mühendisliği öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Mehmet TAN'a, değerleri vakitlerini ayıran Doç. Dr. Hasan Şakir BİLGE'ye ve Doç. Dr. Murat KOYUNCU'ya, benden desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen anneme, babama, eşime, çocuklarıma ve dualarıyla hep yanımda olan rahmetli dedeme, ayrıca sağladığı burs için TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xv
SEMBOL LİSTESİ	xvi
1 GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	3
1.2. Çalışmanın Kapsamı	3
1.3. Sınırlılıklar	4
1.4. Varsayımlar	4
1.5. Katkılar	4
2 2B ŞEKİL TANIMLAYICILAR	7
2.1. Tanımlayıcı Değerlendirme Kriterleri	8
2.1.1 İyi Bulma Doğruluğu	9
2.1.2 Kompakt Uygulanabilirlik	9
2.1.3 Genellenebilirlik	9
2.1.4 Düşük Hesaplama Karmaşıklığı	10
2.1.5 Sağlamlık	10
2.1.6 Kabadan İnceye Doğru Hiyerarşik Detay Temsili	10
2.2. Benzeşik Dönüşüm	10
2.2.1 Döndürme	12
2.2.2 Yer Değiştirme	13
2.2.3 Ölçekleme	13
2.3. 2B Şekil Tanımlayıcılar ve Temsil	14
2.4. Sınır Tabanlı Şekil Tanımlayıcılar	15
2.5. Sınır Tabanlı Şekil Tanımlayıcılar İçin Bütünsel Metodlar	15
2.5.1 Basit Şekil Tanımlayıcılar	16
2.5.2 Benzeşme Tabanlı Şekil Eşleme	16
2.5.3 Şekil İmzası	19
2.5.4 Sınır Momentleri	19
2.5.5 Esnek Eşleme	20
2.5.6 Stokastik Yöntem	21
2.5.7 Ölçek Uzayı Metodu	22
2.5.8 Spektral Dönüşüm	24
2.5.9 Değerlendirme	26
2.6. Sınır Tabanlı Şekil Tanımlayıcılar İçin Yapısal Metodlar	27
2.6.1 Zincir Kodu Temsili	27
2.6.2 Çokgen Dekompozisyonu	29

2.6.3 Pürüzsüz Eğri Dekompozisyonu	30
2.6.4 Ölçek Uzayı Metodu	32
2.6.5 Sentetik Analiz	32
2.6.6 Şekil Değişmezleri	34
2.6.7 Değerlendirme	36
2.7. Alan Tabanlı Şekil Tanımlayıcılar	37
2.8. Alan Tabanlı Şekil Tanımlayıcılar İçin Bütünsel Metodlar	37
2.8.1 Geometrik Moment Değişmezleri	37
2.8.2 Cebirsel Moment Değişmezleri	38
2.8.3 Ortogonal Moment	39
2.8.4 Genel Fourier Tanımlayıcı	41
2.8.5 Izgara Tabanlı Yöntem	42
2.8.6 Şekil Matrisi	43
2.8.7 Değerlendirmeler	45
2.9. Alan Tabanlı Şekil Tanımlayıcılar İçin Yapısal Metodlar	45
2.9.1 Dışbükey Gövde	46
2.9.2 Medyal Eksen	46
2.9.3 Değerlendirme	47
2.10. 2B Şekil Tanımlayıcıların Karşılaştırılması	48
3 3B ŞEKİL TANIMLAYICILAR	51
3.1. Şekil Tanıma ve Temsil Teknikleri	52
3.1.1 Şekil Temsili	53
3.1.2 Ölçüm Benzerliği	54
3.1.3 Verimlilik	54
3.1.4 Ayrımın Gücü	54
3.1.5 Kısmi Eşleştirme	54
3.1.6 Sağlamlık ve Hassasiyet	55
3.1.7 Duruş (Pose) Normalizasyonu	55
3.1.8 Başarım Ölçümleri	57
3.2. 3B Şekil Tanıma ve Temsil Teknikleri	57
3.3. Görünüm Tabanlı Şekil Tanımlayıcılar	57
3.3.1 Siluet Tabanlı Şekil Tanımlayıcılar	58
3.3.2 Derin Tampon (Depth Buffer)	59
3.3.3 Dönme (Spin) Görünümleri	60
3.3.4 Ölçek Bağımsız Öznitelik Dönüşümü (Scale Invariant Feature Transform (SIFT))	63
3.3.5 Şekil Histogramları	64
3.3.6 3B Şekil Bağlamı	66
3.4. Geometri Tabanlı Şekil Tanımlayıcılar	66
3.4.1 İskelet Çizgeleri (Skeletal Graphs)	67
3.4.2 Reeb Çizgeleri	71
3.4.3 B-Reeb Çizge Eşlemesi	73
3.4.4 Görüngeşel Çizge Teorisi	74
3.4.5 Hacimsel Hata	75
3.4.6 Ağırlıklı Nokta Kümesi	76
3.4.7 Geometrik Momentler	78
3.4.8 Şekil Görüngeşeli	79

3.4.9 Genişletilmiş Gaussian şekli	80
3.4.10 Standart 3B Biçim Değişimi (İzdüşüm)	82
3.4.11 Isıl Çekirdek İmzası (Heat Kernel Signatures (HKS))	84
3.4.12 şekil Dağılımları	86
3.4.13 Geometrik Hashleme	88
3.4.14 Konumsal Çizelgeler	89
3.5. Hibrit şekil Tanımlayıcılar	92
3.5.1 Işık Alanı (Light Field)	92
3.5.2 Alaka Geri Bildirimi	94
3.5.3 Öznitelikler Torbası	95
3.6. Karşılaştırma	96
4 ZENGİNLEşTİRİLMİş İSKELET TABANLI şEKİL GERİ GETİRME	99
4.1. 2B şekil Tanımlayıcı ve Temsil Yöntemleri	99
4.2. 2B İskelet Tabanlı şekil Geri Getirme	100
4.3. Algoritmanın 2B şekiller İçin Uygulanması	102
4.3.1 2B İskelet Zenginleştirme Değeri e	103
4.3.2 EMD Fonksiyonunun 2B şekiller İçin Önerilen Algoritma İle Kullanımı	104
4.3.3 İskelet Zenginleştirme Değeri e 'nin 2B İskelet Temsiline Katkıları . . .	106
4.4. 3B şekil Tanımlayıcı ve Temsil Yöntemleri	107
4.5. 3B şekillerin 2B Düzleme İndirgeme Problemi	108
4.6. 3B İskelet Tabanlı şekil Geri Getirme	109
4.7. Algoritmanın 3B şekiller İçin Uygulanması	109
4.7.1 3B İskelet Zenginleştirme Değeri e	110
4.7.2 EMD Fonksiyonunun 3B şekiller İçin Önerilen Algoritma İle Kullanımı	111
4.7.3 İskelet Zenginleştirme Değeri e nin 3B İskelet Temsiline Katkıları . . .	112
5 DENEYSSEL ÇALIşMALAR	115
5.1. Deney Değerlendirme Yöntemleri	115
5.1.1 Bull's Eye Yöntemi	115
5.1.2 Precision Recall Yöntemi	116
5.1.3 R-Precision	117
5.1.4 K En Yakın Komşuluk	117
5.2. Deney Sonuçları	118
5.3. 2B şekil Geri Getirme Deneyleri	118
5.3.1 Kimia-99 ve Kimia-216 Veri Setleri Kullanılarak Gerçekteştirilen De-	
neyler	118
5.3.2 MPEG-7 Veri Seti Kullanılarak Gerçekteştirilen Deneyler	121
5.3.3 Swedish Leaf ve Tools Kullanılarak Gerçekteştirilen Deneyler	123
5.3.4 Gürültü Kararlılığı Deneyleri	128
5.3.5 Kapanma Deney Sonuçları	128
5.4. 3B şekil Geri Getirme Deneyleri	129
5.4.1 Princeton Shape Benchmark (PSB) Veri Seti	130
5.4.2 McGill Shape Benchmark (MSB) Veri Seti	131
5.5. PSB ve MSB Veri Setleri İle 3B şekil Geri Getirme Deneyleri	131
5.6. Verimlilik Deneyleri	136
6 2B ve 3B için ZENGİNLEşTİRİLMİş İSKELET NOKTALARI ile UZAK-	
LİK ÖLÇÜM FONKSİYONLARI	137

6.1. Uzaklık	137
6.1.1 Metrik	137
6.2. Uzaklık Hesaplama Fonksiyonları	139
6.2.1 Hausdorff Uzaklığı	139
6.2.2 Hellinger Uzaklığı	140
6.2.3 Kullback Leibler-Jeffrey Uzaklığı	141
6.2.4 Earth Mover's Uzaklığı	142
6.3. Uzaklık Hesaplama Fonksiyonu Deneyleri	143
7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	147
KAYNAKLAR	149
ÖZGEÇMİŞ	167



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: Benzeşik dönüşüm türleri.	11
Şekil 2.2: Benzeşik dönüşümler içeren doğadan bir örnek. Şekil [238]'den alınmıştır.	12
Şekil 2.3: Şekil tanımlayıcı ve temsilcileri sınıflandırması.	15
Şekil 2.4: Şekil eksantrikliği ve daireselliği.	16
Şekil 2.5: (a) Karakter şekli, (b) (a) şeklinin sınırları, (c) p noktasındaki vektörler, (d) vektörlerden üretilen histogram, (e) şeklin şekil bağlam haritaları gösterilmektedir. Şekiller [17]'den alınmıştır.	18
Şekil 2.6: Elma şekli ve merkez uzaklık imzası. Şekil [69]'den alınmıştır.	19
Şekil 2.7: (a) Ölçek olarak şekil sınırının evrimi (σ) artar. Soldan sağa doğru: (σ) = 1, 4, 7, 10, 12, 14. Sınır üzerinde işaretlenmiş noktalar dönüm noktalarıdır. (b) Yumuşatma işlemlerinden sonraki aralıklar ağacı (interval tree) (veya kavis ölçek uzay sınır haritası). (c) Aralıklar ağacının tepe noktaları. Şekil [181]'den alınmıştır.	23
Şekil 2.8: Bir dizi birim-boyutlu çizgi kullanılarak zincir kodu nesne tanımlama. Şekil [78]'den alınmıştır.	28
Şekil 2.9: Zincir vektörleri: (a) orijinal sınır tanımlayıcı (b) normalize edilmiş sınır tanımlayıcı. Şekil [173]'den alınmıştır.	30
Şekil 2.10: Farklı belirteçlere bölünmüş at şekli. Her bir belirteç için verilen rakamlar eğim ve belirteç (token) yönelmesidir. Şekil [20]'den alınmıştır.	31
Şekil 2.11: Kromozom şeklinin yapısal olarak tanımlanması. Şekil [257]'den alınmıştır.	33
Şekil 2.12: Yapısal şekil tanımlama ile oluşan belirsizlik.	37
Şekil 2.13: (a) Kutupsal uzayda orijinal şekil (b) Kutup-ılgara ile örneklenen ve kartezyen uzayda bir şekil. Şekil [294]'den alınmıştır.	41
Şekil 2.14: (a) İki şeklin ılgara gösterimi. (b) İki şekil sınır şeklinin farklı ılgara gösterimi. (c) İki eşit alan gösterimli şeklin ılgara gösterimi. Şekil [166]'den alınmıştır.	43
Şekil 2.15: (a) Kutupsal ılgara ile şeklin örtülmesi (b) çizgilerden oluşturulmuş yıldız (c) dikdörtgensel şekil. Şekil [87]'den alınmıştır.	44
Şekil 2.16: (a) Gövde içbükey ve dışbükey (b) Gövde dışbükey ağaç gösterimi. Şekil [257]'den alınmıştır.	45
Şekil 2.17: Dikdörtgen bir şeklin medyal eksenini. Şekil [183] alınmıştır.	47
Şekil 3.1: 3B şekil tanımlama tekniklerinin kavramsal gösterimi.	53
Şekil 3.2: Birbirlerine benzer simetrik cisimler.	56
Şekil 3.3: Seçilen eksene normalize edilen araba için seçilen yön dikkate alınarak üç düzlemden silüetleri alınmıştır. Şekil [37]'den alınmıştır.	59
Şekil 3.4: Seçilen eksene normalize edilen araba için seçilen yön dikkate alınarak üç düzlemden silüetleri alınmıştır. İkinci satırda ise 6 şekil için 2B Fourier dönüşümleri gösterilmektedir. Şekil [37]'den alınmıştır.	61
Şekil 3.5: Histogram olarak dönme görünümü oluşturmak için seçilen nokta ve meydana gelen açılar. Şekil [117]'den alınmıştır.	62

Şekil 3.6: 3B modelden oluşturulan dönme görünümünden seçilenler.Şekil [116]'den alınmıştır.	62
Şekil 3.7: Kabuklar ve sektörler şekil histogramı için basit olarak gösterilmektedir. Her birisi için iki boyutta temsilleri görülmektedir. Şekil [5]'den alınmıştır.	65
Şekil 3.8: İskelet çizge yaklaşımı görünümü. Şekil [109]'den alınmıştır.	68
Şekil 3.9: İskelet içerisindeki noktaların dereceleri ilgili örnek bir gösterim. Şekil [109]'den alınmıştır.	70
Şekil 3.10: Bazı temel şekillere karşılık gelen indeks değerleri. Şekil [290]'den alınmıştır.	80
Şekil 3.11: Nesne normalleri ile Gaussian Küre arasında eşleme. Şekil [37]'den alınmıştır.	81
Şekil 3.12: Şekillerin birbileri ile olan eşlemelerini göstermektedir. Sıcak renkler düşük değerleri göstermektedir. Şekil [33]'den alınmıştır.	84
Şekil 3.13: (a) Farklı şekiller için tanımlayıcılar (b) Yakın izometrik topolojiler. [33]	85
Şekil 3.14: Siyah renkli çizgiler tankları ve gri renkli çizgiler arabaları göstermektedir. Şekil [200]'den alınmıştır.	87
Şekil 3.15: Ayrık parçaların duruş normalizasyonu olmadığından nesnelere için küresel harmonikler ayırt edici değildir. Şekil [126]'den alınmıştır.	91
Şekil 3.16: Işık alan tanımlayıcısı ile nesnenin tanımlanması. Şekil [245]'den alınmıştır.	93
Şekil 3.17: Sandalyenin farklı açılardan silüetleri. Şekil [43]'den alınmıştır.	93
Şekil 3.18: Geometrik olarak benzer ancak anlamsal olarak benzer olmayan modeller. Şekil [145]'den alınmıştır.	94
Şekil 3.19: 3B Şekil geri getirme tekniklerinin karşılaştırılması.	98
Şekil 4.1: Örnek olarak üst üste bindirilmiş şekiller ve iskeletleri temsili olarak gösterilmektedir.	102
Şekil 4.2: 2B düzlemde yaprak şeklinin iskelet temsili verilmektedir. A,B ve C noktaları iskelet noktaları iken D noktası değildir.	102
Şekil 4.3: Girdi şekli içerisinde bulunan en büyük yarıçap değeri bulunduktan sonra, her bir nokta için artan yarıçaplarda daireler çizilir.	104
Şekil 4.4: Aslında herbir şekil için gösterilen noktalara çizilen dairelerin yarıçapları aynı değerlere sahip iken, yarıçap değerlerinin artırılarak çizilmesi ise elde edilen değer şekillerin daha iyi ayırt edilmesini sağlamaktadır.	107
Şekil 4.5: Siddiği ve ark. tarafından önerilen şekil grafik parçaları. Şekil [252]'den alınmıştır.	107
Şekil 4.6: 3B şekiller 2B düzlemde farklı açılardan farklı cisimler olarak görülebilir.	109
Şekil 4.7: Girdi şekli içerisinde bulunan en büyük yarıçap değeri bulunduktan sonra, herbir nokta için artan yarıçaplarda küreler çizilir.	111
Şekil 4.8: Şekil içerisinde bulunan o noktanın maksimum yarıçap değerine sahip kürenin her bir iskelet için değeri aynıdır. Ancak bu iskeletler için e değerleri farklıdır.	113
Şekil 5.1: Karmaşıklık matrisi.	116

Şekil 5.2: Kimia-99 veri seti, 9 sınıf ve herbir sınıfta 11 şekil içerir. Her bir satır farklı bir sınıfı göstermektedir.	119
Şekil 5.3: Kimia-216 veri seti, 18 sınıf ve herbir sınıfta 12 şekil içerir. Kolonlarda aynı nesnelere ait farklı açılardan görünümüler bulunmaktadır.	120
Şekil 5.4: Kimia 99 ve Kimia 216 veri setleri için birçok metot ve tanıma sonuçları: Height functions [279], SSD [209], Curve Normalization [139], PS+LBP [242], IDSC + LBP [243], SFR [92], Hilbert Curve [67], TSDIZ [4], CPDH+EMD [250], ve Curve Normalization [139].	121
Şekil 5.5: MPEG-7 veri seti içerisinde 10 sınıf ve her sınıfta 10 şekil içeren alt veri seti oluşturulmuştur.	122
Şekil 5.6: Bull's Eye sonuçları MPEG-7 için birçok metot: Height fonksiyonları [279], SSD [209], Curve Normalizasyonu [139], PS+LBP [242], IDSC + LBP [243], AIR [86], AIR+Diffusion işlemi [61], Hilbert Curve [67], TSDIZ [4], CPDH+EMD [250], ve SFR [92].	123
Şekil 5.7: 15 farklı ağaç türüne ait Swedish Leaf veri seti.	124
Şekil 5.8: Swedish leaf veri seti için birçok metoda ait tanıma sonuçları: IDSC+DP [156], SC+DP [156], Fourier tanımlayıcılar [156], Soderkvist [255], sPACT [282], SPTC+DP [157], ve SFR [92].	125
Şekil 5.9: Tools veri seti toplam 35 eklemli şekil içeren 4 sınıftan oluşmaktadır.	126
Şekil 5.10: Tools veri seti için birçok yöntemin Bull's Eye sonuçları: ID [157], SC [18], HF [279], ID+SC [187], ID+SC+HF [187], ve SFR [92].	127
Şekil 5.11: Yükselen gürültü oranlarına karşı yavaş yavaş düşen en yakın komşuluk tanıma değerleri.	128
Şekil 5.12: Kimia-216 veri seti kullanılarak elde edilen sorgu şekilleri farklı sınıflardan seçilerek oluşturulmuştur. En soldaki kolon kapanma olan sorgu şekillerini ve satırlar sağa doğru en yakın komşuluk sonuçlarından dokuz tanesini göstermektedir. Dikdörtgen içerisinde alınan şekil doğru sorgu sonucu olarak işaretlenmiştir. Şekiller farklı sınıflarda olmasına karşın topolojik olarak aynı olabilmektedir. Bu sebeple farklı sonuçlar sıralamalarda önde olabilmektedir.	129
Şekil 5.13: PSB veri setine ait nesnelere örnek görünümüler.	130
Şekil 5.14: MSB veri setine ait katı ve katı olmayan nesnelere örnek görünümüler.	131
Şekil 5.15: PSB ve MSB veri setlerinde R-Precision için birçok metot sonuçları: Jeodezik yapıda Bag of Feature yönteminin çoklu-ölçek versiyonu (BoFoG-M) [123], Bag of Local Geometry Feature (BoLGF) [123], Dense LD-SIFT (DLD-SIFT) [197], Resampled LD-SIFT (RLD-SIFT) [197], Linear Combination Local Statistical Features (BF-LSF) [198], Jeodezik yapıda Bag of Feature yönteminin tekli-ölçek versiyonu (BoFoG-S) [123], (Işık Alan Tanımlayıcısı) Light Field Descriptor (LFD) [43], ve Bag of Local Distance Feature (BoLDF) [123].	133
Şekil 5.16: MSB veri setinin birçok yöntem için Precision-recall sonuç çizimleri: Jeodezik ortamda Bag of Feature Çoklu-ölçek versiyonu (BoFoG-M), Jeodezik ortamda Bag of Feature Tekli-ölçek versiyonu (BoFoG-S) [123], (Işık Alan Tanımlayıcısı) Light Field Descriptor (LFD) [43], D2 [200].	134

Şekil 5.17: PSB veri setinin birçok yöntem için Precision-recall sonuç çizimleri: Jeodezik ortamda Bag of Feature Çoklu-ölçek versiyonu (BoFoG-M), Jeodezik ortamda Bag of Feature Tekli-ölçek versiyonu (BoFoG-S) [123], (Işık Alan Tanımlayıcısı) Light Field Descriptor (LFD) [43], D2 [200].	135
Şekil 6.1: PSB veri seti içerisinde seçilen 96 şekil ile oluşturulmuştur. 12 sınıf ve her sınıfta 8 şekil içermektedir.	144
Şekil 6.2: Uzaklık hesaplama fonksiyonu PSB alt kümesi veri seti deney sonuç- ları gösterilmektedir.	144
Şekil 6.3: Uzaklık hesaplama fonksiyonu Kimia-99 veri seti deney sonuçları gösterilmektedir.	145



KISALTMALAR

2B	: 2 Boyutlu
3B	: 3 Boyutlu
AAD	: Mutlak Açı Mesafesi (Absolute Angle Distance)
AD	: Açı Mesafesi (Angle Distance)
AVC	: Adaptif Görünüm Kümelemesi (Adaptive View Clustering)
BOF	: Öznitelikler Torbası (Bag of Features)
B-Rep	: Sınır Temsili (Boundary Representation)
BSP	: Binary Space Partitioning tree
C3DHTD	: Standart(Canonical) 3B Hough Dönüşüm Tanımlayıcısı
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
CCH	: Zincir Kodu Histogramı (Chain Code Histogram)
CEGI	: Komplike (Complex) Genişletilmiş Gaussian Şekli
CIBR	: İçerik Tabanlı Görüntü Geri Getirme (Content-Based)
CPCA	: Sürekli (Continuous) Parça Analiz Yöntemi
CSG	: Üretilmiş Katı Modeller (Constructive Solid Geometry)
CSS	: Curvature Scale Space (Curvature Scale Space)
EGI	: Genişletilmiş Gaussian Şekli (Extended Gaussian Image)
EMD	: Earth Mover's Distance (Earth Mover's Distance)
FastEMD	: Fast Earth Mover's Distance
FD	: Fourier Tanımlayıcı (Fourier Descriptor)
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşüm (Fast Fourier Transform)
GFD	: Genel Fourier Tanımlayıcı (General Fourier Descriptor)
HKS	: Isıl Çekirdek İmzası (Heat Kernel Signatures)
HT	: Hough Dönüşümü (Hough Transform)
ITV	: Değişmez Topoloji Vektörü (Invariant Topology Vector)
MRG	: Çoklu Çözünürlüklü Reeb Çizgeleri (Multiresolution Reeb)
MSB	: McGill Shape Benchmark (McGill Shape Benchmark)
MSG	: Model İmza Çizgesi (Model Signature Graph)
NCCH	: Normalize edilmiş Zincir Kodu Histogramı
O3DHTD	: Optimize 3B Hough Dönüşüm Tanımlayıcısı
OBTree	: Yönlenmiş Kapsama Kutusu (Oriented Bounding Box)
PCA	: Parça Analiz Yöntemi (Principal Component Analysis)
PSB	: Princeton Shape Benchmark (Princeton Shape Benchmark)
SFD	: Kısa-Zaman Fourier Tanımlayıcı (Short-time Fourier)
SIFT	: Ölçek Bağımsız Öznitelik Dönüşümü (Scale Invariant)
SPS	: Yüzey Pozisyonlama Görüngeseli (Surface Portioning)
SVD	: Tekil Değer Ayrışması (Single Value Decomposition)
VHKS	: Hacimsel Isıl Çekirdek İmzası (Volumetric Heat Kernel)
VRML	: Sanal Gerçeklik Modelleme Dili (Virtual Reality)
WD	: Dalgacık Tanımlayıcı (Wavelet Descriptor)

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler Açıklama

e	Çalışma kapsamında elde edilen iskelet zenginleştirme değeri
r	İskeletlerin içerisine çizilen maksimum dairelerin yarı çap değerleri



1. GİRİŞ

Bilgisayar bilimlerinde son zamanlarda yaşanan gelişmeler ile birlikte sayısal görüntüler; çoklu ortam cihazlarında, bilgisayar destekli tasarımlarda, sayısal kütüphanelerde ve elektronik ticaret gibi konularda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. 2B ve 3B görüntülerinin çoğalması sebebi ile etkili ve verimli biçimde şekil geri getirme işlemi, hayati bir önem kazanmıştır. Bu nedenle şekil geri getirme problemi üzerinde, örüntü tanıma [202, 299], bilgisayarlı grafik [83, 200], bilgisayarlı görü [153, 230] ve uygulamalı matematik [175, 265] gibi değişik alanlar üzerinde birçok araştırmacı tarafından çalışılmaktadır.

Genel olarak 2B ve 3B şekil geri getirme teknikleri incelenirken üç ana grup altında toplandığı kabul edilmektedir. Bunlar; geometri-tabanlı, görünüm-tabanlı ve karma tekniklerdir [265, 299]. Sınıflandırma; şekil geometrisi, şekil görünümü ya da iki gruptan elde edilen öznitelikler temel alınarak yapılmaktadır. Geometri tabanlı geri getirme tekniklerinde şekil geometrisi ve topolojisi dikkate alınmakta, görünüm tabanlı tekniklerde ise uzaysal eşleştirme ve şekil iskeletleri kullanılmaktadır [265]. Ancak bu iki sınıf kesin hatlarla birbirinden ayrılamadığı için karma metotlarda her iki sınıftan elde edilen öznitelikler birlikte kullanılmaktadır [265].

Literatürde, 2B ve 3B şekil geri getirme problemi için yapılan çok sayıda çalışma, bu konuda hala üstesinden gelinmesi gereken büyük problemler olduğunu açıkça göstermektedir. Şekil geri getirme tekniklerindeki yetersiz performans, taşıma, döndürme ve ölçeklendirme işlemlerine karşı bağımlı olması, tam eşlemeye göre daha zor bir problem olarak kabul edilen kısmi eşleme bu sorunlardan sadece birkaçıdır. Eşleştirme algoritmalarının performans yetersizliği, kullanıcıların etkileşimli sorgu istekleri ön planda olan uygulamalarda sıkça karşılaşılan problemlerdendir. Bunun yanında şekil benzerliğinin, uygulama davranışları [152] ve kullanıcı tercihlerine bağlı olarak değiştiği senaryolar da mevcuttur. Bazı uygulamalarda küçük farklılıklar büyük farklılıklardan daha önemli iken, küçük farklılıkların bütünüyle ihmal edildiği uygulamalar

da mevcuttur. Örnek olarak CAD çizimlerinin bulunduğu bir veri setinde arama yapan kullanıcı için şekil üzerindeki delik sayısı önemli bir değişken iken, bir hava alanı görüntüsünde bulunan hava araçları modellerinin tespiti işleminde küçük farklılıklar önemsiz olmalıdır. Bir diğer problem olan kısmi eşleme ise bütün şekiller için eşleştirme işlemine ilave olarak tüm alt parçalarını da önceden hesaplamak zorunda olması sebebi ile yüksek hesaplama karmaşıklığına yol açmaktadır.

Yukarıda temas edilen problemlere ilave olarak 3B şekil geri getirme işlemi için önerilen çalışmaların 2B şekiller için genellenmesi zordur [175, 265]. Buna mukabil 2B şekiller için yapılan çalışmaların da 3B şekiller için genişletilmesi güç bir iştir. 3B şekiller ile işlem yapılırken 2B şekiller için önemli olan görüş açısı, ışıklandırma, görüntü toplama etkileri gibi bazı problemler ortadan kalkarken ilave bir boyutun gelmesi ve doğal olarak artan veri miktarı, hesaplama karmaşıklığını olumsuz yönde etkilemektedir [49]. Gerçek bir nesnenin 3B gösterimi 2B düzleme aktarıldığında, nesnenin fiziki bilgileri yanında bir boyut bilgisi de kaybolur. Buna ilave olarak bazı modellerin yapısal bozukluklarının olması, kesin hatlı olmaması, tarama boşluklarının olması ve çakışan çokgenler olması gibi sorunlar da üstesinden gelinmesi gereken diğer konulardandır.

Son yıllarda 2B ve 3B şekil temsili ve tanımlama teknikleri ile ilgili birçok çalışma yayınlanmıştır. İskelet, 2B ve 3B şekil geri getirme araştırmalarında kullanılan geometri tabanlı şekil temsil tekniğidir [265]. İskelet, *merkez omurga* veya *çubuk figürü* olarak isimlendirilen ve şeklin merkezinden geçen hattır. İskelet, 2B şekillerde medyal aksis ile ilgi iken, 3B şekillerde ise şekil yüzeyleri ile ilgilidir. Her iki şekil uzayı (2B ve 3B) için iskelet noktaları ve bu noktalar için yarıçap değerleri kullanılarak şekil bir bütün halinde yeniden inşa edilebilir [113]. Herhangi bir iskelet çıkartma algoritması şekil sınır görüntüsüne ve değişkenliğine çok duyarlı iken, şekil sınır ön işlemleri ve inceltme teknikleri ile bu etki azaltılmaktadır. İskelet, kompakt temsil gücü nedeni ile karakter tanıma, şekil tanıma ve biyomedikal görüntüleme gibi birçok uygulama alanında kullanılmakta ve şeklin çekirdeği olarak da adlandırılmaktadır [244]. Bu tezde, öznetelikleri zenginleştirilmiş iskelet temsili kullanılarak 2B ve 3B nesnelere için şekil geri getirme işlemi sunulmaktadır. Ayrıca 2B şekil geri getirme işlemi için kullanılan iskelet zenginleştirilmesi yönteminin, 3B şekillere de uygulanabildiği gösterilmekte-

dir. Önerilen yöntem için 3B nesnelere yerel yüzey sınır bilgileri küreler yardımı ile, 2B şekiller için ise yerel bilgiler sınırlar üzerine çizilen daireler yardımı ile toplanmaktadır. Bu tez çalışmasında, birçok çalışmada kullanılan 3B nesnelere ve 2B şekillerden oluşan veri setleri kullanılmıştır. Tez kapsamında geliştirilen algoritma iskelet temsillerinin metrik uzayda karşılıklı dağılım eşleştirmesi kullanarak şekil yakınlıklarını hesaplamaktadır. Önerilen yöntemin çalışma performansı diğer algoritmalar ile karşılaştırıldığı zaman birkaç yönden avantaj sağlamaktadır. İki şekil uzayına birlikte çözüm sunabilmesi, eklemli nesnelere uygulanabilmesi ve kısmi (parçalı) eşlemeye karşı değişmezliği, algoritmanın avantajları arasındadır. Çalışma, tanımlayıcı sınıflandırmaları düşünüldüğünde her iki sınıftan da öznelik değerleri topladığından karma bir metot olarak sınıflandırma yapılabilmektedir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, önceki çalışmalardan farklı olarak, yukarıda bahsi geçen bazı şekil geri getirme problemlerine çözüm sunmaktır. Literatürde sıklıkla kullanılan 2B ve 3B veri setleri kullanılarak yayınlanmış araştırmalar incelenmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Böylece gerçek hayattaki uygulamalarda kullanılacak daha dayanıklı geri getirme, bulma doğruluğu, kompakt uygulanabilirlik, genellenebilirlik, düşük hesaplama karmaşıklığı ve sağlamlık yeteneklerine sahip yeni bir şekil geri getirme algoritması geliştirilmesidir. Bu bağlamda daha önce çalışılmış algoritma stratejilerini ve algoritmaların kullanılabilirliğini analiz etmektir. Çalışma sonucunda, 3B ve 2B şekiller için kullanılabilen zenginleştirilmiş iskelet tabanlı yeni bir yaklaşım sunmaktır.

Yapılan çalışmaların geri getirme işleminde öne çıkan sorunlarına değinilmiş ve mevcut sorunlar için hem 2B hem de 3B nesnelere kullanılacak, düşük hesaplama karmaşıklığına sahip, bulma doğruluğu yüksek, kompakt uygulanabilirliği olan yeni bir yöntem önerilmiştir.

1.2. Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışma kapsamında literatürde var olan 2B ve 3B şekil geri getirme çalışmaları incelenmiştir. 2B şekillerin silüetleri ve 3B şekillerin modellerinden elde edilen iskeletlerin zenginleştirilmesine dayanan, yeni bir şekil geri getirme algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritmanın dayanıklılığı, bulma doğruluğu, kompakt uygulanabilirliği,

genellenebilirliği, hesaplama karmaşıklığı, sağlamlığı özellikleri yapılan deneyler ile değerlendirilmiştir.

1.3. Sınırlılıklar

2B ve 3B uzayda bulunan şekillerin tanınması için önerilen bu çalışma, ortamdan nesne çıkarma (bölütleme), nesne yüzey yapısı, renk ve doku gibi öznitelikler veya işlemler ile ilgilenmemekte olup doğrudan 2B şekillerin silüetlerini veya 3B şekillerin modellerini kullanmaktadır. Bu nedenle önerilen yöntemin gerçek uygulamalar üzerinde çalışması için şekillerin buldukları ortamdan (veya arka plandan) sorunsuz bir biçimde çıkartılmış olması (doğru bir biçimde bölütlenmiş olması) önemlidir. Diğer taraftan sunulan çalışmanın kısmi eşlemeye izin vermesinden dolayı bölütleme sırasında karşılaşılan hatalara karşı önerilen yöntemin doğru tanıma yapabilme yeteneği bulunmaktadır.

1.4. Varsayımlar

Bu çalışma genelinde kabul gören aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

1. Çalışma kapsamında yaygın olarak bilinen veri setleri kullanılmıştır. Bu sayede çalışmada önerilen yöntem ile diğer yöntemlerin kıyaslanması için, bu veri setleri kullanılarak yapılan deney sonuçlarının yeterli olduğu kabul edilmiştir.
2. Sistem genelinde kullanılan şekil iskeletleri oluşturulur iken literatürdeki en uygun yöntem kullanılmış, ve bu yöntemin yeterli olduğu kabul edilmiştir.
3. Yapılan deneylerde bölütleme problemlerinden en az seviyede etkilenecek şekilde işlemler yapıldığı kabul edilmiştir.

1.5. Katkılar

Bu tez çalışması, MPEG-7 tarafından belirtilmiş; bulma doğruluğu, kompakt uygulanabilirliği, genellenebilir olduğu, düşük hesaplama karmaşıklığı ve sağlamlığı ilkelerini karşılayabilen ve karma tabanlı yapısal bir tekniğe sahip yeni bir çalışma sunulmaktadır. Çalışmanın katkıları aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Literatür tarama bölümünde incelenen 3B şekil geri getirme teknikleri için yeni

bir sınıflandırma yapılmıştır.

- 2B ve 3B şekillerin iskelet temsilleri artan yarı çaplara sahip daireler ve küreler çizilerek elde edilen yerel bilgiler ile zenginleştirilmiştir.
- Tez kapsamında yapılan çalışmalarda edinilen bilgiler ışığında literatürde şekil iskelet temsilini zenginleştiren yegane çalışma, önerilen çalışmadır.
- Zenginleştirilmiş şekil iskelet temsilinin verimli bir şekilde benzer veri seti şekillerini nasıl geri getirdiği gösterilmiştir.
- Farklı özellikler ve sayılarda şekillere sahip, çok sayıda 2B ve 3B şekil veri seti kullanılarak yapılan kapsamlı deneyler değerlendirilmiştir.
- Bu veri setleri üzerinde en iyi sonuçları alan yöntemler ile karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmekte ve yapılan çalışmaların bir çoğundan daha üstün sonuçlar elde edilmiştir.
- Kısmi eşleme işlemleri için iskelet tabanlı yöntemlerin sınır tabanlı yöntemlerden daha başarılı olması [239, 283] sebebi ile 2B şekiller için iskelet tabanlı yöntemler üzerinde çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Yapılan katkı sayesinde iskelet temsili kullanan diğer yöntemlerden daha da güçlü hale gelmektedir.
- 2B şekil geri getirme için tezde önerilen algoritma çok kolay kodlanabilen ve düşük karmaşıklığa sahip uygulanabilir bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.
- Önerilen yöntem, 3B koordinatların 2B düzleme yansıması kullanılmadan çalıştığından indirgenme problemleri içermemektedir.

Takip eden bölümler şu şekilde organize edilmiştir; Bölüm 2’de konu ile ilgili 2B şekil tanımlayıcılar, temsil teknikleri ve kavramsal çerçevesi çizilmiş ve kullanılan yöntemler tartışılmıştır. Bölüm 3’te konu ile ilgili 3B şekil tanımlayıcılar, temsil teknikleri ve kavramsal çerçevesi çizilmiş ve kullanılan yöntemler tartışılmıştır. Bölüm 4’te teze konu olan 2B ve 3B nesnelere için kompakt çözüm sunabilen zenginleştirilmiş iskelet ile şekil geri getirme yöntemi tartışılmıştır. Bölüm 5’te bir önceki bölümlerde incelenen modeller ile ilgili deneysel analizler yapılmış, elde edilen bulgular ve bunlara ait değerlendirmeler paylaşılmıştır. Bölüm 6’da zenginleştirilmiş iskelet ile şekil geri

getirme yöntemi ile kullanılan uzaklık fonksiyonları ele alınmıştır. Son olarak,Bölüm 7'de bulunan sonuçlar özetlenmiş ve öneriler sunulmuştur.



2. 2B ŞEKİL TANIMLAYICILAR

Bilgisayar bilimlerinde son zamanlarda yaşanan gelişmeler ile birlikte sayısal görüntüler, çoklu ortam cihazları, bilgisayar destekli tasarım, sayısal kütüphane ve elektronik ticaret gibi konularda yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Son zamanlarda dijital görüntüler için etkili arama teknikleri geliştirilmesi ile ilgili yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Geniş veri setleri veya uzak veritabanlarında benzer bir görüntü (nesne) bulmak yalnızca araştırmacılar, eğitimciler ve profesyoneller tarafından değil, aynı zamanda genel kullanıcılar tarafından kullanılmaya ve araştırılmaya başlamıştır. Şekil, nesnenin 2B düzlemde tanımlı önemli bir görsel özelliğidir ve görüntü içeriğini tanımlamak için kullanılan temel özelliklerinden biridir. Ancak, şekil temsil ve tanımlaması çevresel etkilere açık ve güç bir iştir. Bu işlem gerçek dünyada var olan 3B bir nesnenin, 2B görüntü düzlemi üzerine yansıtılması işlemidir, yapılan indirgeme işlemi sırasında nesnede bir bilgi boyutu kaybolur. Sonuç olarak, nesneden çıkarılan şekil yalnızca kısmen yansıtılan nesneyi temsil eder. Gerçek dünyada şekil genellikle gürültülü, kusurlu, rastgele bozulmalara uğramış ve çevre etkilerinden arınmış halde değildir.

2B şekil tanımlayıcıları genel olarak şeklin sınırları kullanılarak ya da şekil sınırları ve iç öznitelikleri üzerinden elde edilen özellikler ile tanımlanır. Çok sayıda tanımlayıcı, şekil imzası, histogramı, kavisleri, bağlamı, matrisi ve spektral öznitelikler gibi temel öznitelikler üzerine kurgulanmıştır. Bu tanımlayıcılar bir veri tabanından benzer şekilleri belirleme güçlerine göre değerlendirilirler. Önerilen tekniklerin etkinliğini belirlemek için bu tekniğin şekilleri temsil gücünü değerlendirmek yeterli değildir.

Güçlü bir geri getirme doğruluğu için etkili biçimde tanımlanmış bir şekil tanımlayıcı gerekmektedir. Algısal olarak benzer şekiller, genellikle döndürülmüş, çevrilmiş, ölçeklendirilmiş ve küçük değişime uğramış şekiller anlamına gelir. Tanımlayıcılar aynı zamanda şekilleri karşılaştırırken insanlar tarafından tolerans sınırlarında olan gürültüden etkilenmiş şekiller, çeşitli biçimlerde bozulmuş şekiller ve kusurlu şekilleri, bulmayı mümkün kılmalıdır. Yöntemin tolerans sınırlarında, sonuçlarda sağladığı tutarlı-

lık algoritma sağlamlığı olarak bilinir.

Başarılı bir şekil tanımlayıcıdan, bahsedilen özellikler için şekil geri getirme ve indeksleme işlemlerinde doğru sonuçlar beklenir. Bir şekil tanımlayıcısının hiyerarşik olarak kabadan inceye temsil özelliği varsa, bu seviyeli eşleştirme özelliği tanımlayıcıyı yüksek bir verimlilik düzeyine ulaştırabilir. Öncelikle yüksek oranlarda birbirine benzemeyen şekilleri eleyerek büyük miktarlarda işlem yükünden kurtarılmış olur, ikinci olarak ise hassas seviyede şekiller daha detaylı olarak işlem yapılarak sonuca ulaşılır. Şekil tanımlayıcılar için istenen özellik, sadece belirli bir tür şekil için iyi performans göstermesi değil, genel olarak kaynakları bağımsız diğer şekil veri tabanlarında da başarılı sonuçlar vermesidir.

Şekil tanımlayıcılarında istenen önemli bir özellik de düşük hesaplama karmaşıklığına sahip olmasıdır. Bir şekil tanımlayıcısı için düşük hesaplama karmaşıklığı, üretim süreçlerine dahil olan belirsiz veya özel faktörleri en aza indirmesi demektir. Hesaplama süreçlerinde belirsiz faktörlerin azlığı, şekil tanımlayıcıların daha sağlam olmasını sağlamaktadır. Esas olarak, düşük hesaplama karmaşıklığı sağlam ve gürbüz bir tanımlayıcı anlamına gelir.

Şekil geri getirme yöntemleri aşağıdaki gereksinimlere göre değerlendirilmektedir.

1. Şekil temsil gereksinimleri
2. Benzeşmezlik ölçümü özellikleri
3. Verimlilik
4. Ayırt edicilik yetenekleri
5. Kısmi eşleştirmeyi gerçekleştirme yeteneği
6. Sağlamlık
7. Poz normalleşme gerekliliği

2.1. Tanımlayıcı Değerlendirme Kriterleri

MPEG-7, şekil tanımlayıcılarını değerlendirmek için bir takım kriterler belirlemiştir. Tanımlanan değerlendirme kriterleri; bulma doğruluğu, kompakt uygulanabilirlik, ge-

nellenebilirlik, düşük hesaplama karmaşıklığı, sağlamlık ve kabadan inceye doğru hiyerarşik detay temsilidir [130]. Ayrıca MPEG-7 standardı için tanımlayıcıların döndürme, taşıma ve ölçeklendirme işlemlerinden yani benzeşik dönüşümden etkilenmeyen değişmezlik özelliğine sahip olması gerekmektedir.

2.1.1 İyi Bulma Doğruluğu

Algısal benzer şekiller, döndürülmüş, ters çevrilmiş, ölçeklenmiş şekiller setidir. Algısal benzer şekilleri veri tabanından az hata ile bulabilen bir şekil tanımlayıcı için iyi bir bulma doğruluğu vardır denilmektedir. İyi bir tanımlayıcı aynı zamanda gürültü eklenmiş, deformasyona uğramış ve bozulmuş şekilleri de insan algısına yakın bir toleransla tanımlayabilmelidir. Sadece bulma doğruluğunun yüksek olması bir tanımlayıcı değerlendirilirken yeterli değildir. Yüksek bulma doğruluğuna ulaşılabilir, ancak örneğin önerilen algoritmanın hesaplama karmaşıklığı çok yüksek olabilir. Yüksek hesaplama karmaşıklığı olan bir algoritma çalışılan senaryo için uygun olmayabilir. Yapılan çalışmalar, iyi bir bulma doğruluğu için sayılan diğer özelliklerin göz ardı edilmeden değerlendirilmesi gerektiğini ön plana çıkarmaktadır.

2.1.2 Kompakt Uygulanabilirlik

Görsel tanımlayıcılar MPEG-7 tarafından belirlenen standartlara göre kompakt uygulanabilir olmalıdır. Tanımlayıcıların kompakt uygulanabilir olması için; arama uygulamaları ve veri setlerinin birlikte çalışabilmesinin sağlanması, yüksek seviyeli başarımlar için geliştirme standartlarına uygun olması, görsel arama uygulamalarının tasarımının basitleştirilmesi, mobil cihaz desteği için donanım bağımsızlığının sağlanması, donanım ihtiyaçlarının mobil cihaz donanımlarına uygun planlanması ve görsel arama ile ilgili bilgi aktarımlarında yükü azaltacak şekilde tasarlanması gerekmektedir.

2.1.3 Genellenebilirlik

İyi bir şekil tanımlayıcı tüm şekil setleri ve tipleri için genel olarak kullanılabilir ve yüksek performans sunabilecek yapıya sahip olmalıdır. Literatürde yapılan çalışmalar bazı şekil tanımlayıcıların veri setlerini daha önceden bilmeleri gerektiğini, bu sayede başarımlarının arttığını göstermektedir. Ancak, her uygulama için veri setinin önceden bilinmesi mümkün olmamaktadır. Veri seti ile ilgili ön bilgi olmayan durumlarda şekil tanımlayıcısının genele uygulanabilir olmasının önemi daha da belirginleşmektedir.

Adaptif şekil tanımlayıcılar genellenebilirlik açısından daha yüksek başarıma sahiptir.

2.1.4 Düşük Hesaplama Karmaşıklığı

Düşük hesap karmaşıklığı da şekil tanımlayıcılar için çok önemli ve istenilen bir özelliktir. Hesaplamanın kolay ve düşük karmaşıklıkta olması tanımlayıcının sağlam ve güvenilir olması anlamına gelir. Bir şekil tanımlayıcısının düşük hesaplama karmaşıklığına sahip olması demek, o tanımlayıcının geçici etkilerden uzak ve aynı zamanda belirsiz özellik üretimlerinden bağımsız olduğu anlamına gelir. Hesaplama süreçlerindeki belirsiz faktörlerin azlığı, daha sağlam şekil tanımlayıcılar üretilmesi anlamına gelmektedir. Esas itibariyle, düşük hesaplama karmaşıklığı netlik ve kararlılık anlamına gelir.

2.1.5 Sağlamlık

Şekil tanımlayıcı insan toleransı içerisinde kalacak şekilde, gürültüden etkilenmiş şekilleri, çeşitli şekillerde bozulmuş şekilleri ve arızalı şekilleri bulabilecek özellikte olmalıdır. Bu yetenekler sağlamlık özelliği olarak adlandırılır.

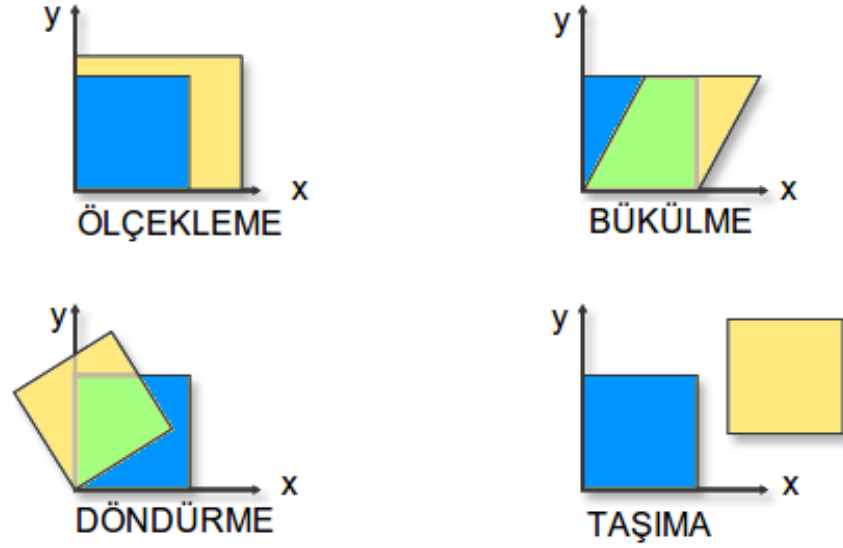
2.1.6 Kabadan İnceye Doğru Hiyerarşik Detay Temsili

Kabadan ayrıntıya doğru tanımlama yapabilen bir tanımlayıcı, kaba olarak benzer şekilleri hızla bularak detaylar üzerinden etkili sonuçlara ulaşabilir. Çünkü kaba olarak veri tabanındaki şekillerin birçoğu elenir ve detaylar için daha uzun bir çalışma süresi kalır. Bu şekilde daha kararlı ve hesaplama karmaşıklığı düşük algoritmalar üretilebilir.

2.2. Benzeşik Dönüşüm

Benzeşik dönüşüm, şeklin bütünselliğini koruduğu ve şekil noktaları arasındaki değişimlerin düzenli olduğu dönüşümlerdir. Dönüşüm olmadan önce bir çizgi üzerinde bulunan noktaların tamamının dönüşümden sonra yine bir hizada olmaları, değişim olan noktaların belirli bir oran ile değişmesi ve değişimden önce orta nokta olan bir noktanın değişimden sonra yine benzer bir yerde olması birer örnek olarak verilebilir. Koordinata bağlı dönme, yer değiştirme ve ölçeklenme eşitlik 2.1 deki gibi benzeşik dönüşümlerin kombinasyonlarının genel adıdır.

Herhangi bir benzeşik dönüşüm, değişim geçiren hatlar üzerindeki oranları korumak-



Şekil 2.1: Benzeşik dönüşüm türleri.

tadır, ancak dönüşüm sırasında açılar ya da uzunluklar mutlaka korunmak zorunda değildir. Herhangi bir üçgen bir benzeşik dönüşümü tarafından başka bir üçgene dönüşebilir, böylece tüm üçgenler benzeşik ve bu anlamda, benzeşik uyumlu ve benzer şekillerdir denebilir. Bu durumda dönüşmüş bir üçgen, dönüşmeden önceki şekle benzemekte ancak aynı gibi olmayabilmektedir. Doğadan bir örnek, Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Mavi, kırmızı ve açık mavi ile seçilen örnekler kendi içinde benzeşik dönüşümler oluşturarak kendilerini tekrar eden yapılarıdır.

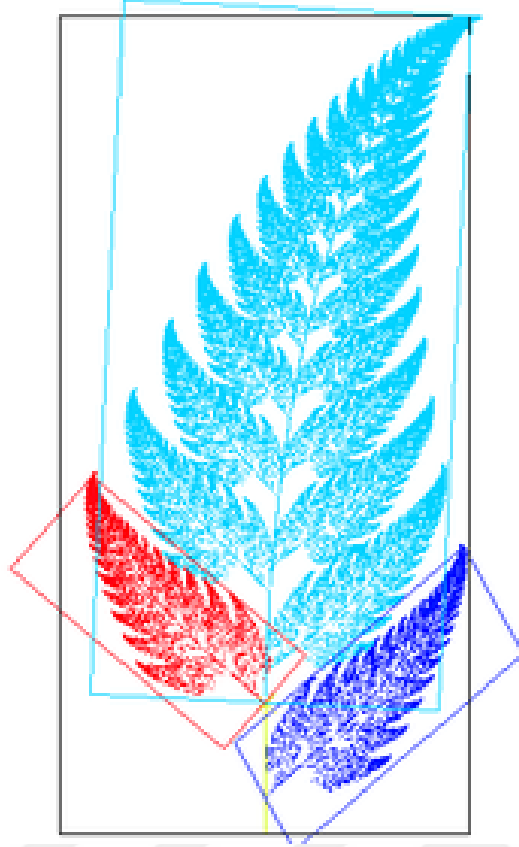
İki boyutta benzeşik dönüşüm aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$y = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = A \times \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + B \quad (2.2.1)$$

Burada A 2×2 , B 2×1 boyutlarında iki matristir ve

$$y = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (2.2.2)$$

Yukarıda gösterilen dönüşümlerin genel ifadesidir. A ve B matrislerinin elemanlarında yapılan değişiklikler ile farklı değerler veya ifadeler yerleştirilerek dönüşümün özel formları elde edilebilir.



Şekil 2.2: Benzeşik dönüşümler içeren doğadan bir örnek. Şekil [238]'den alınmıştır.

2.2.1 Döndürme

Döndürme işleminde asıl olan döndürmenin hangi eksene göre yapılacağıdır. Şekil döndürme eksenini x , y ve z düzleminde olabilmektedir. Şekil, iki boyutlu düzlemde olmasına karşın döndürme üç boyutta yapılabilmektedir. Döndürme işleminde A matrisi, iki boyutlu döndürme matrisidir. A matrisi değerleri döndürme etkisi için trigonometrik fonksiyonlar kullanılarak iki boyutlu uzayda aşağıdaki gibi tarif edilir. Yer değiştirme olmaması için ise eşitlik 2.2.1 deki B matris değerleri sıfır kabul edilir. Bu durumda yukarıdaki ifade şu şekilde döner.

$$y = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.2.3)$$

Döndürme işleminde x' ve y' değerleri yine genişlik ve yükseklik alt veya üst sınırlarından taşmaya neden olabilir. Bu durumda yine aynı sorunlar ile karşılaşılır ve benzer çözümler kullanılır. Her nokta için $\theta = k \times \pi$ ($k = 1, 2, 3, \dots$) iken eski konumları ile aynı

konumda olur. θ açısının diğer değerleri için nokta konumları farklılık arz eder.

2.2.2 Yer Değiştirme

Yer değiştirme işlemi aslında bir koordinat dönüşüm işlemidir. Benzeşik dönüşüm tanımında bulunan A matrisi birim matris olarak alındığında, x ve y koordinatları sırasıyla b_1 ve b_2 kadar ötelenir. Yer değiştirme işlemi sonucunda taşmalar meydana gelir. Bu sorunun çözümünde birkaç yöntem kullanılabilir. Sınırlardan taşan noktalar gözardı edilmemelidir. Böyle bir işlem yapıldığında bilgi kaybı meydana gelir. Bu durumun meydana gelmemesi için yer değiştirme ile doğru orantılı olarak yeni sınırlar belirlenmelidir. Bu durumda taşan her noktanın, $(0,0)$ noktasından taşma miktarları ile orantılı olarak başka bir konuma yerleştirilmesi gereklidir. Taşan noktaların yeni koordinatları şöyle bulunabilir.

$$x'' = x' \pm En, \quad (x < 0 \Rightarrow (+) \quad \text{ve} \quad x > En \Rightarrow (-)) \quad (2.2.4)$$

$$y'' = y' \pm Boy, \quad (y < 0 \Rightarrow (+) \quad \text{ve} \quad y > Boy \Rightarrow (-)) \quad (2.2.5)$$

Yukarıda tarif edilen yöntem sadece artık noktalara uygulanmalıdır. Taşma kontrolüne gerek kalması istenmiyorsa sınır noktalarının ilgili noktalara kadar uzatılması gerekir. Bu durumun farklı bir yöntemi ise şekil noktalarının genişlik modülünde tekrar çizilmesidir. Ancak bu yöntem şekil tanıma uygulamalarında uygun değildir.

Ayrıca bir başka yer değiştirme, şeklide çarpıklık yapabilir. Bu işlem şeklin bir kısmının diğer kısımlarına oranla daha fazla kaydırılması ile oluşmaktadır. Yapılan işlem sonunda oluşan şekil kaynak şeklin benzeşik dönüşüme uygun şekilde kaydırılmasıdır. Bu konuyu ayrı bir başlık altında da gören çalışmalar mevcuttur.

2.2.3 Ölçekleme

Ölçekleme işlemi, yer değiştirme dönüşümünde A matrisinin köşegen elemanlarına 0, diğer elemanlarına ölçek değerleri verilerek yapılır. a_{11} x koordinatını, a_{22} y koordinatını etkiler. Aynı zamanda yer değiştirme yapılması istenmiyorsa B matrisi 0 (sıfır matrisi) olarak alınır. Bu bilgiler ışığında formül aşağıdaki gibi olur.

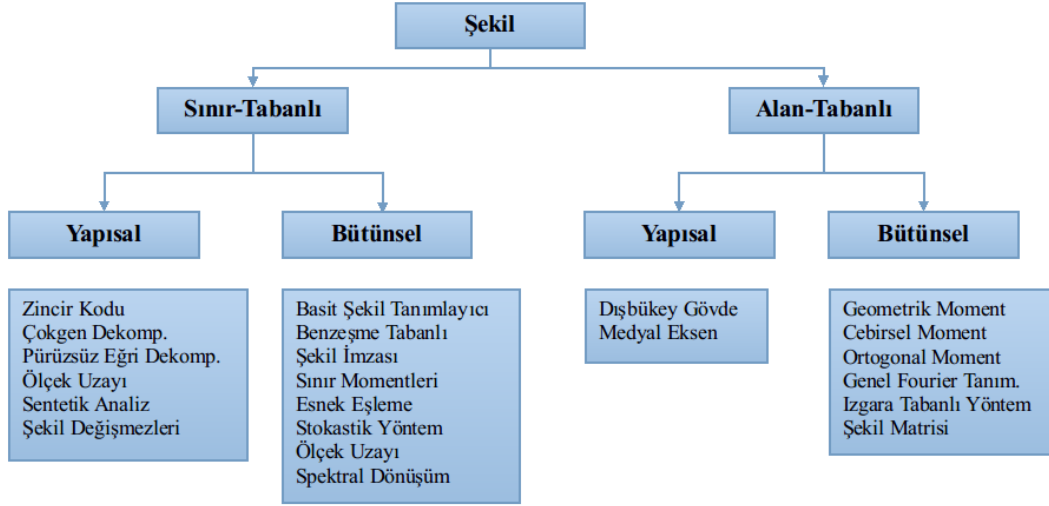
$$x' = x \times a_{11} \quad (2.2.6)$$

$$y' = y \times a_{22} \quad (2.2.7)$$

Dönüşüm esnasında noktaların kaynak görüntü üzerindeki koordinatları kullanılarak hedef görüntüde bulunmaları gereken konum hesaplanır. Bu durumda hedef ve sonuç değerlerinin tam sayı olmasından kaynaklanan bazı sorunlar oluşabilir. Sorunu gidermek için hedef üzerindeki noktaların koordinatları kullanılarak, bu konumlara düşecek kaynak noktalarının koordinatları tespit edilmelidir. Bilinen x' ve y' koordinatlarından bilinmeyen x ve y koordinatlarına ulaşılmalıdır.

2.3. 2B Şekil Tanımlayıcılar ve Temsil

2B şekil temsil ve tanımlayıcıları genel olarak iki sınıfta incelenmektedir: *sınır-tabanlı (contour-based)* yöntemler ve *alan tabanlı (region-based)* yöntemler. Şekil tanıma ve temsil tekniklerinin sınıflandırılması, şekil özelliklerinin yalnızca sınır yapılarından ya da şeklin tamamından elde edilip edilmediğine dayanmaktadır. Her bir sınıf *yapısal (structural)* ve *bütünsel (global)* yaklaşımlar olmak üzere kendi içinde tekrar ikiye ayrılır. Oluşan alt sınıflar şekil temsiline şekli bir bütün olarak mı yoksa kısmi olarak mı tanımladığına göre sınıflandırılmıştır. Bu yaklaşımlar *uzamsal alan (space domain)* ve *dönüşüm alanı (transform domain)* için ayırt edici olduğu gibi, çıkarılan bu özellikler konumsal alan içinde kullanılabilir. Bütün bu sınıflandırma hiyerarşisi Şekil 2.3 de gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Şekil tanımlayıcı ve temsilcileri sınıflandırması.

2.4. Sınır Tabanlı Şekil Tanımlayıcılar

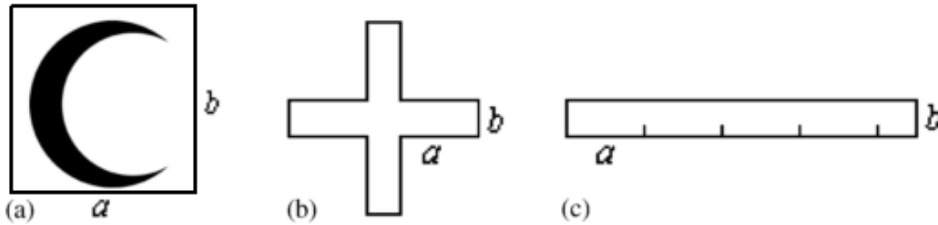
Sınır-tabanlı şekil tanımlayıcı teknikleri sadece şeklin sınır bilgilerinden yararlanır. Sınır-tabanlı şekil tanımlayıcıları ile ilgili çok farklı çalışmalar olduğu halde, elde edilmelerinde kullanılan iki tür yaklaşım vardır: *Sürekli yaklaşım (bütünsel) (Continuous approach (global))* ve *ayrık yaklaşım (yapısal) (Discrete approach (structural))*. Sürekli yaklaşımlar şekli alt parçalara bölemezler, genellikle dahili sınırları kullanarak elde edilen bir öznitelik vektörü ile şekli tanımlarlar. Bu yöntemlerde şekil benzerlik ölçüsü genellikle elde edilen öznitelik vektörleri arasındaki metrik mesafedir. Ayrık yaklaşımlar belirli bir kriter kullanarak şekli çeşitli bölümlere parçalayarak *temel öğeler (primitives)* denilen öznitelikler çıkarırlar. Nihai temsil genellikle bir dizge (string) veya bir çizge (graph) (veya ağaç (tree))'dir, benzerlik ölçümü dizge eşleme veya grafik benzeşmesi ile yapılır.

2.5. Sınır Tabanlı Şekil Tanımlayıcılar İçin Bütünsel Metodlar

Bütünsel sınır şekli temsil teknikleri genellikle şeklin sınır bilgilerden elde edilen çok boyutlu bir sayısal öznitelik vektörü hesaplayarak çalışır. Şekiller arasındaki eşleştirme genellikle Euclidean uzaklığı veya şehir blok (city block) uzaklığı gibi metrik mesafe fonksiyonları kullanılarak yapılan basit bir süreçtir. Nokta (veya nokta öz niteliği) tabanlı eşleştirme gibi özel uygulamalar da kullanılır.

2.5.1 Basit Şekil Tanımlayıcılar

Basit bütünsel tanımlayıcılar; *alan*, *dairesellik* ($cevre^2/alan$), *eksantriklik* (*eccentricity*) (en büyük eksen boyu/en küçük eksen boyu), *en büyük eksen oryantasyonu* (*major axis orientation*), ve *bükülme enerjisi* (*bending energy*) gibi tanımlayıcılarıdır [287]. Bu basit global tanımlayıcılar genellikle büyük farklar bulunan şekilleri ayırt edebilir, bu nedenle genellikle yanlış isabeti ortadan kaldırmak için filtre olarak kullanılabilir veya şekilleri ayırmak için başka bir şekil tanımlayıcı ile birleştirilirler. Bunlar tek başına şekil belirleyici olarak kullanılmak için uygun değildirler. Örneğin, Şekil 2.4'deki (a) şeklinin eksantrik özelliği (b)'e yakın olduğundan şekilleri tam olarak açıklayamaz ve $(a = b)$ olarak algılanır. Bu durumda, dairesellik daha iyi bir tanımlayıcı olarak iş görür. Aynı şekilde Şekil 2.4'de, iki şekil (b) ve (c) aynı daireselliğe sahiptir ($a = 2b$) ancak, çok farklı şekillerdir. Bu durumda, eksantriklik daha iyi bir tanımlayıcı olarak ortaya çıkar. Böylece basit şekil tanımlayıcılar tek başlarına yeterli bir tanımlayıcı olarak kullanılamazlar. Diğer basit bütünsel sınır şekil belirleyicileri Peura ve Iivari-nen [214] tarafından önerilmiştir. Bu tanımlayıcılar *dışbükeylik*, *eksen oranı*, *dairesel varyans* ve *eliptik varyans* özelliklerinden oluşmaktadır.



Şekil 2.4: Şekil eksantrikliği ve daireselliği.

2.5.2 Benzeşme Tabanlı Şekil Eşleme

Benzeşme-tabanlı şekil eşleme uzamsal alanda çalışır. Özellik tabanlı şekil temsil tekniklerinin aksine, benzeşme-tabanlı şekil eşleme teknikleri şekiller arasında noktadan noktaya eşleme yaparak çalışır. Diğer bir deyişle, şekil üzerindeki her nokta bir öznelik noktası olarak kabul edilir ve eşleştirme 2B alanı üzerinde yapılır.

Hausdorff uzaklığı klasik benzeşme-tabanlı şekil eşleştirme yöntemi olup, genellikle nesnelere arasındaki benzerlikleri görüntüsü ve şekilleri arasındaki benzerliği bulmak için kullanılmıştır. Şekil eşleştirme için verilen iki şekli iki nokta kümesi olarak temsil

eder: $A = a_1, a_2, \dots, a_p$ ve $B = b_1, b_2, \dots, b_q$, ve *şekil A* ve *şekil B* arasındaki Hausdorff uzaklığı aşağıdaki şekilde tanımlanır;

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)) \quad (2.5.1)$$

öyle ki,

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\|, \quad (2.5.2)$$

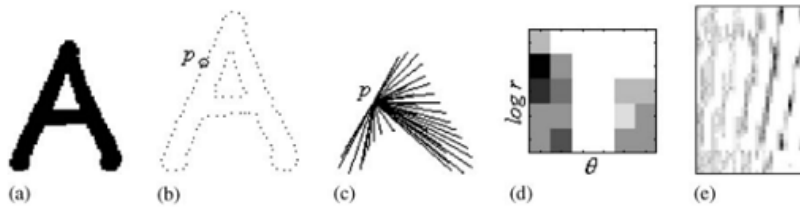
ve A ve B nokta kümeleri için uygulanan kural genellikle Euclidean mesafesidir. Ancak, Hausdorff uzaklığı, şekile bindirilmiş gürültü veya şekil içindeki aykırı değerlere çok duyarlıdır. A nokta kümesi içerisinde B nokta kümesinden çok farklı bir değere sahip nokta $h(A, B)$ arasındaki mesafeyi oldukça artırmaktadır. Bu nedenle, Hausdorff uzaklık fonksiyonunun değiştirilmiş versiyonu Rucklidge ile [229] tanıtılmıştır.

$$h^f(A, B) = f_{a \in A}^{th} \min_{b \in B} \|a - b\|, \quad (2.5.3)$$

öyle ki, $f_{x \in X}^{th} g(x)$, f^{th} 'nin 0 ile 1 arasındaki bazı değerleri için $g(x)$ in X kümesindeki miktarsal değerini gösterir. Örneğin, f^{th} 'lik miktarsal değeri maksimum ve $1/2$ 'lik miktarsal değeri medyan olduğunu gösterir. Pratikte f^{th} değeri genellikle $1/2$ 'ye ayarlanır [44]. Hausdorff uzaklık fonksiyonu kullanılarak şekil eşleştirmenin avantajı şekli kısmi olarak eşleştirebilir olmasıdır. Ancak bu avantajının yanında, Hausdorff uzaklık fonksiyonu taşıma (translation), ölçek (scale) ve rotasyondan bağımsız değildir. Sorgu şekli ve aday şekil eşleştirilmesi için, sorgu şeklinin aday şekil üzerinde farklı pozisyonlarda, farklı oryantasyonlar ile ve farklı ölçeklerde karşılaştırılması gerekir. Bu işlem için ise sadece rotasyon düşünüldüğünde bile her derece için bir eşleştirme yapılması gerekebilir. Sonuç olarak eşleştirme oldukça pahalı olmaktadır. Chetverikov ve Kenokh *chamfer distance transform* [44] isminde bir yöntem önermektedir. N nokta sayısı olmak üzere bu yöntem ile hesaplama çevrimden bağımsız hale gelmekte ve $O(N^2)$ hesaplama karmaşıklığı $O(N)$ 'e düşürmektedir. Geleneksel Hausdorff şekil eşleştirme sadece çevirme, döndürme ve ölçekleme değişikliklerine izin veren şekil olduğunda benzerlik bulmaya imkan sağlar. Rucklidge [229], Hausdorff uzaklık fonksiyonunu benzeşik dönüşüm bağımsız olarak geliştirdiği için karşılaştırılacak modellerin ben-

zeşik dönüşüm model kümeleri oluşturulur. Sorgu şeklinden benzeşik dönüşüm için üretilen şekil sayıları büyük olduğu için, etkin bir eşleştirme uygulaması sadece benzeşik dönüşüm setlerinin bir kısmı için yapılabilir. Bu önerilen sayı azaltma yöntemlerine rağmen, eşleştirme yükü hala kabul edilebilir seviyede değildir.

Hausdorff uzaklık kullanılarak şekil eşleştirme gürültü ve küçük değişikliklerde karşı hassastır. Belongie ve ark., *şekil bağlamı* (shape context) adını verdikleri bir benzeşme tabanlı şekil eşleme metodu önermişlerdir [17]. Şekil bağlamı yöntemi kullanarak şekil eşleştirme, geleneksel Hausdorff uzaklık fonksiyon tabanlı yöntemlerinin geliştirilmiş halidir. Bu yöntemde sorgu şekli ile aday şekil noktalarından karşılıklı gelen her nokta için Shape Context diye anılan bütünsel öznitelik çıkarılır. Bunun üzerine şekillerin karşılıklı gelen noktaları arasındaki benzeşim, şekiller arasındaki benzeşim olarak kabul edilir. Herhangi bir p noktası için, p noktasından diğer tüm sınır noktalarına p noktası için vektörler bulunur (Şekil 2.5 (c)). r uzunlukları ve θ oryantasyonu P noktasının temsili için histogram oluşturmak üzere kullanılmaktadır (Şekil 2.5 (d)). Herbir noktanın histogramı şekil bağlamını oluşturmak için birleştirme ve düzleştirme işlemleri yapılarak (Şekil 2.5 (e)) elde edilmiştir. Histogramı yakın noktalara daha duyarlı yapıp uzak nokta etkilerini azaltmak için vektörler log-polar uzayda değerlendirilir. Örneğin, Şekil 2.5 [17] de, (a) karakter şekli, (b) (a) şeklinin sınırları, (c) p noktasındaki vektörler, (d) vektörler kullanılarak üretilen histogram, (e) şeklin şekil bağlam haritaları gösterilmektedir. İki şeklin eşleştirilmesi bu şekillere ait iki şekil bağlam matrisinin eşleştirilmesi ile yapılmaktadır. Bu yöntem bir şekil bağlam matrisi ile diğer tüm şekil bağlam matrislerinin permütasyonları ile hesap yükünü azaltacak şekilde yapılmaktadır. Eşleştirmenin aşırı yükünü azaltmak için, sınır noktalardan alınan örnekler ile en kısa artık yol (shortest augmenting path) algoritmasını kullanarak matris eşlemesi yapılmaktadır.

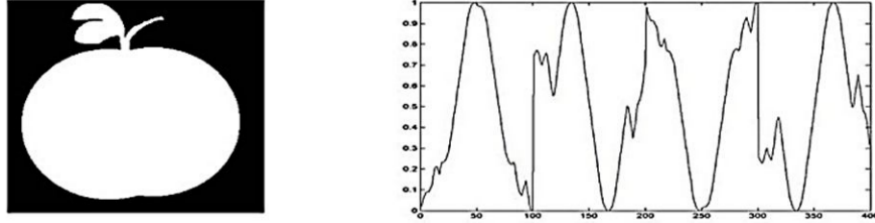


Şekil 2.5: (a) Karakter şekli, (b) (a) şeklinin sınırları, (c) p noktasındaki vektörler, (d) vektörlerden üretilen histogram, (e) şeklin şekil bağlam haritaları gösterilmektedir. Şekiller [17]'den alınmıştır.

2.5.3 Şekil İmzası

Şekil imzası, şeklin sınır noktaları ile elde edilen tek boyutlu bir fonksiyon ile şekli temsil eder. Literatürde, *merkezi profil*, *kompleks koordinatlar*, *merkez uzaklığı*, *teğet açısı*, *toplu açı*, *kavislenme*, *alan ve giriş uzunluğu* (Şekil 2.6) gibi birçok şekil imzası mevcuttur [54, 274, 300]. Şekil imzası genel olarak taşınma (translation) ve ölçekten (scale) bağımsızdır. Oryantasyon değişimlerinden etkilenmemesi için, kaydırmalı eşleme (shift matching) ile en iyi eşleşme tespiti yapılır. Şekil imzalarını birçoğu 1B uzayda normalize edilerek kaydırmalı eşleme (shift matching) yapılırken, *merkezi profil* gibi bir kısmı da 2B uzaydan işlem yapılarak eşleştirilir. Her iki durum içinde hesaplama maliyeti oldukça yüksektir.

Yüksek hesaplama maliyetlerine ilave olarak şekil imzaları gürültüye ve sınırlarındaki küçük değişimlere karşı duyarlı olduklarından büyük eşleşme hataları olmaktadır. Bu nedenle şekil temsili için doğrudan bir şekil imzası kullanmak arzu edilen bir yöntem değildir. Sağlamlığı artırmak ve eşleşen yükü azaltmak için daha fazla işlem gerekmektedir. Örnek olarak imza histogramı kullanılarak şekil imzalarının rotasyonla değişmezliği artırılır.



Şekil 2.6: Elma şekli ve merkez uzaklık imzası. Şekil [69]'den alınmıştır.

2.5.4 Sınır Momentleri

Sınır momentleri, sınır temsillerinin boyutlarını düşürmek için kullanılabilir. Şekil sınırlarının şekil imzası olarak kullanıldıklarını varsayarak $z(i)$, r 'inci moment m_r ve merkezi moment μ_r şu şekilde gösterilir:

$$m_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [z(i)]^r \quad \text{ve} \quad \mu_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [z(i) - m_1]^r, \quad (2.5.4)$$

burada, N şeklin sınır nokta sayısıdır. Normalize edilmiş momentler $\bar{m}_r = m_r / (\mu_2)^{r/2}$

ve $\bar{\mu}_r = \mu_r / (\mu_2)^{r/2}$ şekil dönüşünden, ölçeklenme işleminden ve taşınmasından bağımsızdır. Gürültüye daha az bağımlı tanımlayıcılar $F_1 = (\mu_2)^{1/2} / m_1$, $F_2 = \mu_3 / (\mu_2)^{3/2}$ ve $F_3 = \mu_4 / (\mu_2)^2$ şeklinde elde edilebilir.

Ayrıca yukarıdaki formüller aşağıdaki gibi düzenlendiğinde ve $z(i)$ fonksiyonundan $p(v_i)$ gibi bir histogram çıkarıldığında s 'inci moment aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$\mu_r = \sum_{i=1}^K (v_i - m)^r p(v_i) \quad \text{ve} \quad m_r = \sum_{i=1}^K (v_i) p(v_i), \quad (2.5.5)$$

Yüksek dereceli momentlerin fiziksel yorumlaması zor olmasına rağmen uygulamalar için tanımlayıcıların geliştirilmesi oldukça kolaydır.

2.5.5 Esnek Eşleme

Bimbo ve Pala, şekil tabanlı görüntü geri getirme (image retrieval) için *esnek eşleme* (elastic matching) algoritması önermişlerdir [25]. Bu yaklaşım için şekli temsil eden $\tau(s)$ fonksiyonunu $\theta(s)$ ile toplayarak deforme edilmiş bir şablon üretilir:

$$\varphi(s) = \tau(s) + \theta(s), \quad (2.5.6)$$

öyle ki, $\tau = (\tau_x, \tau_y)$ ikinci dereceden bir eğri (spline) ve $\theta = (\theta_x, \theta_y)$ deformasyon fonksiyonudur. Orijinal şekil, şablon ve nesnenin şekli arasındaki benzerlik aşağıdaki bileşik fonksiyon minimize edilerek bulunur:

$$F = S + B + M$$

$$= \alpha \int_0^1 \left[\left(\frac{d\theta_x}{ds} \right)^2 + \left(\frac{d\theta_y}{ds} \right)^2 \right] ds + \beta \int_0^1 \left[\left(\frac{d^2\theta_x}{ds^2} \right)^2 + \left(\frac{d^2\theta_y}{ds^2} \right)^2 \right] ds + \int_0^1 I_E(\varphi(s)) ds \quad (2.5.7)$$

öyle ki, I_E nesne görüntüsü, sorgu şekli ile aday şekil arasındaki üst üste binme M ölçümü yapılırken, S ve B zorlama ve bükme enerjisidir. N şekil karmaşıklığı (şablon sınırları ile çakışan şekil sınır noktalarındaki sıfır sayısı belirler) ve C *Korelasyon* (şablon sınırları ile çakışan deforme olmuş şekil sınır noktaları ile belirlenir). Bu üç adet

ölçümleme şekil benzerliklerini bulurken yeterli olmamaktadır. Sonuç olarak beş parametrelili (S, B, M, N, C) tanımlayıcılar geriye yayılım (back-propagation) yapay sinir ağı kullanılarak sınıflandırılırlar.

Ağırlıklı olarak hesaplama ve eşleştirme karmaşıklığından dolayı bu yaklaşım çevrim içi (online) görüntü geri getirme için uygun değildir. Yazarlar, bu yaklaşımın hesaplama karmaşıklığını QBIC [188] ve QVE [98] ile karşılaştırmışlar ve hesap karmaşıklığının QBIC ve QVE den daha iyi olduğunu söylemektedirler. Bununla birlikte eşleştirme işlemini tamamlamak için deformasyon işlemi basamaklarının da tamamlanması gerekmektedir. M hesaplanırken en boy oranından yararlanılmasına ve bu durum için ön filtreleme yapılmasına rağmen, bu işlemler eşleştirme işlemini son derece pahalı bir işlem haline getirmektedir. Bu şekilde şekil tanımlayıcısı rasyonel olarak rotasyondan bağımsız değildir. Aynı zamanda şablon deformasyonunda kriterler verilmez. Bu çalışmada verilen örnekler eğrilme kriterlerinin rastgele ya da uygulamaya bağımlı olduğunu göstermektedir.

2.5.6 Stokastik Yöntem

Zaman-serisi modelleri ve özellikle öz bağımlı (*autoregressive* (AR)) modeli, şekil tanımlayıcıları [41, 53, 62, 74, 94, 121, 240] hesaplamak için kullanılmaya başlamıştır. Bu sınıftaki yöntemler, Bölüm 2.5.3'te tarif edildiği gibi şekilden elde edilen bir 1B fonksiyonu olan f' 'in stokastik modellemesine dayanır. Bir doğrusal özbağımlı (AR) modeli önce alınmış olan değerlerin belirli sayıda doğrusal kombinasyonlarından oluşan fonksiyonun değeri ile ifade edilir. Özellikle, sırayla her bir fonksiyon değerinin önceki fonksiyon değerleri ile bazı korelasyonları vardır ve bu nedenle M değerleri bir dizi önceki fonksiyon değerleri ile tahmin edilebilir. Öz bağımlı model, hesaplanan yarıçap için daha önce hesaplanan yarıçapların doğrusal kombinasyonlarını ve bir hata sabiti kullanan basit yapılı bir tahmincisidir. Aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$f_t = \alpha + \sum_{j=1}^m \theta_j f_{t-j} + \sqrt{\beta} \omega_t, \quad (2.5.8)$$

öyle ki; θ_j lar AR-model sabitleri, m kullanılacak hesaplanan değer model sırası, $\sqrt{\beta} \omega_t$ tahminin doğruluğunu yansıtan hata sabiti veya kalan değer, α fonksiyonla-

rın ortalama değerinin nispeti, $\alpha, \theta_1, \dots, \theta_m, \beta$ parametreleri (LS) minimum kareler yöntemi kullanılarak tahmin edilmiş değerlerdir [41, 53, 62]. θ_j tahmin edilen değeri taşınma (translation), ölçek (scale) ve rotasyon işlemlerinden bağımsızdır. Parametreler α ve β ölçekleme (scale) bağımsız değildir, ancak, $\alpha/\sqrt{\beta}$, sinyal gürültü oranı değerlerini yansıtan sınır değerinin bağımsız olduğu kabul edilir. Bu nedenle $[\theta_1, \dots, \theta_m, \alpha/\beta]^T$ ifadesi şeklin tanımlayıcısı olarak tanımlanır.

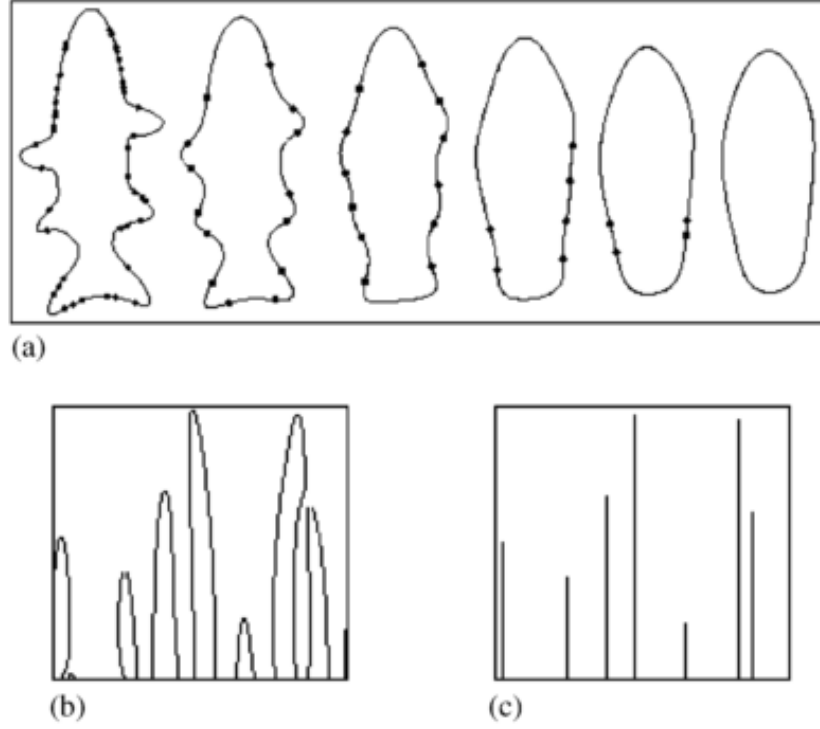
AR yönteminin dezavantajı, karmaşık sınırları söz konusu olduğunda ortaya çıkan, az sayıda AR parametresinin yeterli olmamasıdır. m değerinin seçimi karmaşık bir problemdir ve genellikle ampirik olarak belirlenir. Ayrıca herbir Q_j ile ilgili fiziksel anlam açık değildir.

2.5.7 Ölçek Uzayı Metodu

Gürültü hassasiyeti ve sınır değişikliği sorunlarını çözebilmek için ölçekli uzay analizinin kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Şeklin ölçek uzaydaki gösterimi, şekil sınırlarındaki dönüm noktalarının konumları izlenerek ve genişlikleri düşük-geçiren Gaussian filtresinden geçirilerek elde edilir. Gaussian filtresinin (σ) genişliği arttığında, şekil sınırlarının önemsiz yükselip-alçalmaları elenir ve şekli yumuşak hale gelir (Şekil 2.7 (a)). Geriye kalan dönüm noktalarının şekil temsilinde karakteristik çıkartmak için yeterli olmaktadır. Bu yumuşatma işleminin sonucu *aralıklar ağacı (interval tree)* dir, eğim noktalarından oluşur ve *parmak izi (fingerprint)* olarak anılır (Şekil 2.7 (b)). Bu yaklaşımın en büyük problemi nihai sonucu yorumlarken yaşanan zorluktur.

Asada ve Brady, ilk olarak ölçek uzayından elde edilen aralıklar ağacını yorumlamayı denediler [11]. Elde ettikleri aralıklar ağaçları Gaussian filtresi ve Gaussian filtresinin ikinci türevlerinden elde edilmiştir. Aralıklar ağaçlarının yorumları, ağaçları dallarının düşük ve yüksek ölçekteki tepe noktalarını tespit etmek üzerine kuruludur (Şekil 2.7 (c)). Analiz altında şekiller donanım uygulaması olduğundan, tespit edilen tepe değerlerden daha yüksek seviyeli temel özellikleri yorumlamak mümkündür. Bu uygulamada temel özellikler köşe, düz eklem, uç nokta, krank, yumru/göçük olarak tanımlanmıştır.

Mokhtarian ve Mackworth [182] tarafından, Asada ve Brady'nin yorumlama yöntemi benimsenmiş ve sınır şeridi kayıt için genişletilmiştir. Ölçek uzayı imzası yöntemlerini



Şekil 2.7: (a) Ölçek olarak şekil sınırının evrimi (σ) artar. Soldan sağa doğru: (σ) = 1, 4, 7, 10, 12, 14. Sınır üzerinde işaretlenmiş noktalar dönüm noktalarıdır. (b) Yumuşatma işlemlerinden sonraki aralıklar ağacı (interval tree) (veya kavis ölçek uzay sınır haritası). (c) Aralıklar ağacının tepe noktaları. Şekil [181]'den alınmıştır.

eğim ölçek uzayı şekil sınır (curvature scale space (CSS)) olarak isimlendirilir. Bu yöntemde bağımsız dal tepe noktaları CSS olarak tespit edilir. Ancak, bu temel özellikler yüksek seviyeli tepe noktaları olarak belirlenmek yerine analiz esnasında iki eğrinin eşleşmesi için kullanılmıştır. Bu durumda eşleme çok karmaşık ve pahalı olmaktadır. Yöntem iki aralıklar ağacı içerisindeki sınır dallarının en iyi eşleşmesini sağlayacak şekilde çalıştırılmaktadır. Her bir eşleme için, sorgu sınır dalları hem ölçeklemekte hem de ölçekli kaydırma yapılarak hesaplamalar yapılmaktadır. Her bir bağımsız eşleme işlemi için sorgu eğrisi aday eğrisine benzeştirilerek dönüştürülür. Bu metot daha sonra şekil geri getirme için genişletilmiştir [1, 2, 180, 181]. Eski eşleştirme algoritması şekil geri getirme için çok karmaşık olduğundan, yeni bir yöntem ile iki şeklin sınırlarının yüksek tepe noktalarına dayalı bir eşleme algoritması geliştirilmiştir. Analizler yapılmadan önce tüm şekiller aynı boyuta (eşit sayıda sınır noktası) getirilerek ölçek uzayına uygulanır. Ancak, öznel çıkarma ve eşleştirme süreçlerinde dört temel deneysel parametreden dolayı bu algoritma kararsızlaşır [185].

Daoudi ve Matusiak, yaptıkları çalışma ile ölçekli uzaydan elde ettikleri bir nevi jeodezik topolojiyi yorumlamışlardır [52]. Bu uygulama yöntemi ile birlikte artık iki şeklin eşleştirilmesi, Eberly tarafından önerilen [66] ölçek uzayında jeodezik uzaklık ölçüm yöntemi ile hesaplama problemine dönmektedir. Eşleştirme aslında 2B uzayda iki nokta arasında bir şekil eşleme işlemidir. Bu kompleks şekillerin bulunduğu veri setleri için uygun bir çözüm olmamaktadır ve çok büyük aralıklar ağacı oluşmasına neden olur.

2.5.8 Spektral Dönüşüm

Spektral tanımlayıcılar şekli spektral alanda analiz ederek gürültü hassaslığı ve sınır değişiklikleri problemlerinin üstesinden gelirler. Spektral tanımlayıcılar 1B şekil imzaları üzerinde spektral dönüşümlerden türetilmiş Fourier tanımlayıcı (Fourier Descriptor (FD)) ve dalgacık tanımlayıcı (Wavelet Descriptor (WD)) gibi çalışmaları içerirler.

En geniş kullanıma sahip tanımlayıcı metotlarından birisi Fourier tanımlayıcıdır (FD) [9, 10, 30, 41, 68, 88, 122, 179, 212, 218, 227, 231, 274, 292]. Geleneksel olarak Fourier tanımlayıcı (FD) metotları, sadece kapalı şekiller ile başa çıkabilir.

Mitchell ve ark. Fourier tanımlayıcı (FD) metotları eklemli şekiller için de kullanmışlardır [155, 179, 184]. Benzer şekilde Arbter ve ark. tarafından benzeşim-bağımsız tanımlayıcılar oluşturabilmek için çeşitli çalışmalar [9, 10] yapılmıştır. Granlund ise şekillerin dönüşümlü simetrisi için Fourier değişmezleri üzerine çalışma [88] yapmıştır. Rauber, ayrık veya kısmi sınırlara sahip şekiller için UNL FD ismini verdiği bir yöntem [217, 218] önermiştir. UNL FD dönüştürülen şekil üzerinde 2B Fourier transform uygulanarak elde edilir. Bu şekilde takip edilen öznelik çıkarım süreci ile elde edilen öznelik vektörünün boyutu çok büyük olur. Richard ve Hemami, iki FD kümesi arasındaki benzerliği ölçmek için, doğru mesafe ölçümü ismini verdikleri komplike bir hesaplama üzerinde çalışmışlardır [227]. Doğru mesafe ölçümü yöntemi her bir eşleme için iki Fourier dönüşüme ihtiyaç duymakta ve normal mesafe hesaplama yöntemine göre on beş defa daha fazla hesaplama yapması gerekmektedir. Rui ve ark. tarafından Fourier dönüşüm sabitleri kullanılarak benzerlik sınıflandırması yapan bir mesafe ölçümü önerilmiştir [231]. Bu mesafe ölçümü ile Fourier sabitleri setlerinin arasındaki büyüklük oranları ve faz farkları arasındaki ağırlıklar hesaplanmaktadır. Fourier sa-

bitleri, orijinal sınır değerlerinden ziyade Fourier ile tekrar oluşturulan sınırlardan elde edilmektedir. Bu değerler yumuşatılmış sınırlardan elde edilen FD değerlerinden farklı değildir. Eichmann ve ark., kısa-zaman Fourier (short-time Fourier descriptor (SFD)) tanımlayıcı üzerinde çalışmışlardır [68]. Bununla birlikte Zhang ve Lu. konvansiyonel yöntemler ile yapılan FD metodundan daha iyi olmadığını bulmuşlardır [295]. Bunun nedeni, SFD şeklin bütünsel özniteliklerini alamamakta, bununla birlikte yerel özniteliklerini daha detaylı almaktadır.

Son zamanlarda, bazı araştırmacılar, şekil tanımlayıcı için dalgacık tanımlayıcısı (WD) kullanımı üzerine çalışmaktadır [199, 271, 286]. WD tanımlayıcıların FD tanımlayıcılar üzerinde mekansal alan ve spektral alan için çoklu-çözünürlük üstünlüğü bulunsa da, uzaysal çözünürlük artışı etkili bir şekilde frekans çözünürlüğünden ödün verecektir. Örneğin, [271] çalışmasında sınır değerlerinin sadece düşük frekansa sahip olanları için dalgacık sabitleri kullanılmıştır. En önemlisi ise dalgacık gösteriminin komplike eşleme işlemlerinin çevrimiçi uygulamalarda kullanılabilir olmamasıdır. Yapılan çalışmada [286] benzerlik ölçümü $2^L \times N$ adet her seviyeden kaydırma eşleşmesine ihtiyaç duymaktadır, öyle ki L dalgacık dönüşümünün çözünürlük seviye sayısı ve N ise normalize edilmiş sınır nokta sayısıdır. Diğer bir çalışmada [271] ise benzerlik eşleme ölçümü sadece büyük sayıda olmakla kalmaz aynı zamanda şeklin karmaşıklığına da bağlıdır. Çünkü şekil benzerlik ölçümü bütün sıfır-geçiş noktaları için yapılan bütün eşleme seviyeleridir. Eşleme karmaşıklığının bir parçası da, şekil sınırlarındaki özellik bölümleri için ikili dalgacıkların sık olarak kullanılmamasıdır. Bununla birlikte Bölüm 2.6'da tartışıldığı üzere WD yapısal yaklaşımlarda birincil belirleyiciler için yetersiz kalmaktadır.

FD, iyi geliştirilmiş ve anlaşılmış Fourier teorisi tarafından desteklenmektedir. FD'nin diğer birçok şekil tanımlayıcısından avantajları şunlardır; (1) hesaplanması kolaydır (2) her tanımlayıcı özel fiziksel manaya sahiptir (3) normalizasyonu kolay ve aynı zamanda şekil eşleme basit bir işlemdir (4) bütünsel ve kısmi şekil özniteliklerini ihtiva etmektedir. Yetersiz öznitelik seçimi, yapılan bütünsel tanımlayıcıların zayıflıklarının FD ile üstesinden gelinmesini sağlamaktadır. Ayrıca FD, gürültüden az etkilenmekte ve şekil imzası için yapılan normalizasyon işlemi için hesaplama karmaşıklığına sebep olmamaktadır.

FD tabanlı çalışmaların birçoğu karakter tanıma ve nesne sınıflandırma alanlarında yapılmaktadır. Bu çalışmalarda, FD üretmek için komplike koordinatlar ve birikimli açılı fonksiyonları çoğunlukla kullanılmaktadır. Bununla birlikte, Zhang ve Lu [294, 300], kitle merkezi uzaklık fonksiyonunun FD üretmek için en çok tercih edilen şekil imzası olduğunu bulmuşlardır. FD yönteminde şekli temsil etmek için normal şartlarda yaygın olarak 60 FD öznitelik tercih edilmektedir. Ancak bu çalışma ile 10 adet FD öznitelik değerinin temsil için yeterli olacağını bulmuşlardır. Bu çalışmalarında FD yönteminin CSS yönteminden şekil geri getirme işlemlerinde başarımlık ve sağlamlık açısından daha üstün olduğunu göstermişlerdir.

2.5.9 Değerlendirme

Bütünsel sınır teknikleri tüm şekil sınırlarını şekil gösterimi olarak alır. Şekiller arasındaki eşleşme uzay alanında ya da öznitelik alanında olabilir. Şekil tanımlayıcı için, her zaman doğruluk ve verimlilik arasında bir denge vardır. Bir taraftan, şekil mümkün olduğunca doğru tanımlanmalıdır, diğer taraftan şekil tanımlı basit bir şekilde indekslemek ve geri getirmek için mümkün olduğunca kompakt olmalıdır. Etkin çevrimdışı öznitelik çıkarma aynı zamanda tercih edilmektedir. Basit global şekil tanımlayıcılar kompakt fakat hata oranı yüksek şekil tanımlayıcılarıdır. Kullanışlı bir şekil tanımlayıcı oluşturabilmek için diğer şekil tanımlayıcılar ile kombine tanımlayıcılar kullanmaya ihtiyaç vardır. Örnek olarak benzeşme tabanlı şekil eşleştirme ve imza tabanlı eşleştirme iki şeklin 2B eşleştirilmesini kapsadığından çevrim içi (online) şekil eşleştirme için uygun değildir. Bununla beraber, bölgesel eşleştirme gerekli olduğunda, Hausdorff mesafesine dayalı yöntemler tercih edilebilmektedir. Elastik eşleştirme ve dalgacık yöntemleri, uygulamalarda kullanmak ve eşleştirme yapmak için karmaşıktır. Öz bağlantımlı (Autoregressive (AR)) yöntemler için ise matris işlemleri kullanıldığından hesaplama maliyeti büyüktür ve bu sebeple öz bağlantımlı tanımlayıcıları herhangi bir uygulama alanında kullanmak oldukça zordur.

Eğim ölçek uzayı CSS (Curvature Scale Space) tanımlayıcılarının uygulanması eşleştirilmesi karmaşıktır, fakat algısal anlamı ve kompakt öznitelikleri şekil tanımlama ve çevrimiçi geri getirme için cazip olabilir. Fourier tanımlayıcıların uygulanması kolaydır ve hızlı Fourier dönüşümü (FFT) ya da kesik Fourier dönüşümü hesaplamalarından birinin kullanılmasıyla daha az hesaplama gerektirir, hesaplama karmaşıklığı düşünül-

düğünde tercih edilebilir tanımlayıcılardır. Ayrıca, elde edilen tanımlayıcı kompakt ve eşleştirmesi oldukça basittir. CSS ile kıyaslandığında FD daha basit ve daha güçlüdür. Sınır momenti tanımlayıcıları Fourier tanımlayıcıya benzerdir ve elde etmesi oldukça kolaydır. Bununla birlikte Fourier tanımlayıcıdan farklı olarak sadece bazı düşük değerli moment tanımlayıcıları da fiziksel yorumlamaya sahiptir.

2.6. Sınır Tabanlı Şekil Tanımlayıcılar İçin Yapısal Metodlar

Şekil analiz ailesinde kullanılan bir diğer metot ise yapısal (structural) şekil temsilidir. Yapısal yaklaşımda şekiller sınır bölümlerinden bölünerek temel öğelerine ayrılırlar. Yapısal metotlar temel öğelerin seçimi ve temel öğelerin organizasyonu tercihleri yönünden farklılık gösterirler. Bu konuda yaygın yöntem şekil sınır ayrışmalarının çokgen yaklaşımı, eğrilik ayrışması ve eğri uygunluğudur [207].

Yapılan işlemler sonucunda, genel yapısı aşağıdaki gibi kodlanmış bir karakter dizisi oluşmaktadır:

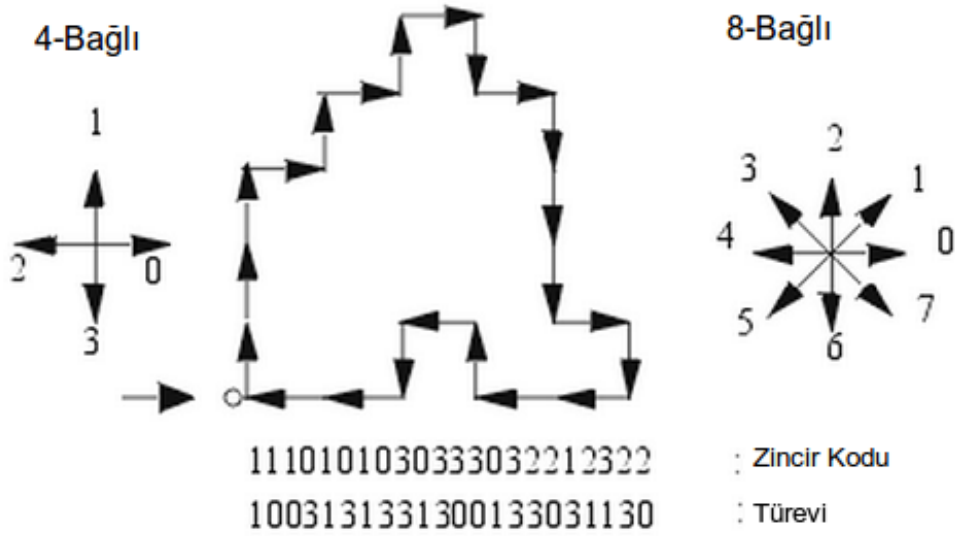
$$S = s_1, s_2, \dots, s_n, \quad (2.6.1)$$

öyle ki, s_i zincir kodunun her bir elemanı, bir çokgenin bir kenarı, bir dörtgen yayı, bir eğri vb. olabilir. s_i ; uzunluk, ortalama eğim, azami eğim, bükülme oranı, yönelim vb. gibi birçok değer olabilir. Karakter dizisi doğrudan tanımlayıcı olarak kullanılabilir gibi söz dizimsel çözümleyicinin bir bölümü olarak da kullanılabilir. Bu bölümün devamında şekil temsili ve tanımlayıcısı olarak S kullanan yöntemler açıklanmaktadır.

2.6.1 Zincir Kodu Temsili

Zincir kodu belirli bir yönelim ile bir dizi birim-boyutlu çizgi kullanarak nesneyi tanımlar (Şekil 2.8). Bu metot 1961 yılında gelişigüzel geometrik düzenlerin kodlanması için Freeman [77] tarafından tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, gelişigüzel bir eğrinin temsili için birim uzunluğa ve sınırlı yönlere sahip bir dizi küçük vektör kullanılarak yapılmakta, böylece bu metot birim-vektör olarak adlandırılmaktadır. Uygulama geliştirme aşamasında üst üste bindirilmiş şekil sayısal sınırları ile ızgara şeklin en yakın ızgara noktaları kullanılarak şekil temsili elde edilir. Bu noktalar için bir başlangıç noktası oluşturularak 4-yönlü ya da 8-yönlü zincir kodu kullanılarak karakter dizisi elde edilmektedir. N -boyutlu ($N > 8$ ve $N = 2^k$) zincir kodu da uygulanabilmektedir. Bu tanıma

uyan yapılar, genel zincir kodu olarak anılır [78].



Şekil 2.8: Bir dizi birim-boyutlu çizgi kullanılarak zincir kodu nesne tanımlama. Şekil [78]'den alınmıştır.

Zincir kodu, eşleme için kullanılacaksa ilk sınır pikselinin seçme işleminden bağımsız olmalıdır. Zincir kod metodunda normalizasyon, sınır pikselleri içinden sonucu minimum sayı yapacak pikseli ilk piksel yapmak için bulmaktır. Alternatif olarak başka bir yöntem ise sınırları göreceli yönelimler ile göstermek yerine yönler arasındaki değişimleri göstererek yapmaktır. Bu işlem her bir zincir kodunun bir öncekinden çıkarılması ile ve sonucun modül n 'si alınarak hesaplanmaktadır. Burada, n bağlanabilirlik sayısıdır. Bu işlemlerden sonra, dairesel permütasyon ile en küçük sayıyı oluşturacak şekilde döndürmeden bağımsız bir zincir kod elde edilir. Böylece normalleştirilmiş ayrımsal zincir kodu şekil numarası olarak isimlendirilir. Bu şekilde elde edilen zincir kodu ölçekleme işleminden bağımsız değildir. Ölçeklenmiş iki benzer şekli aynı büyüklüğe getirerek elde edilen şekil numaralarının basamak sayıları, benzerliği bulamayacak kadar farklı olabilir.

Zincir kod metodu genellikle gürültüye duyarlı ve yüksek boyutludur. Büyük boyutlu analizlerde nadiren kullanılmaktadır. Örnek olarak önemli algısal özellikler olan çokgen yaklaşımı ve sınır eğimlerini bulmak için kullanılmaktadır.

Iivarinen ve Visa, nesne tanıma için bir zincir kodu histogramı (Chain Code Histogram (CCH)) türetmişlerdir [106]. CCH $p(k) = n_k / n$ şeklinde hesaplanır, öyle ki, n_k zincir kod karakter dizisinin içinde k değerine sahip zincir kod sayısı ve n zincir kod bağlantı

sayısıdır. CCH bir sınır içerisinde var olan farklı yönlerin olasılığını da yansıtmaktadır. CCH taşıma ve ölçekle işleminden bağımsızken döndürme için sadece 90 derece için bağımsızdır. Bu nedenle, normalize edilmiş CCH (NCCH) önerilmiştir. $p(k) = l_k n_k / l$ olarak tanımlanmaktadır, öyle ki, n_k CCH' daki ile aynı, l_k , k yönünde uzunluk ve l ise sınır uzunluğudur. CCH zincir kod boyutlarını düşürmekte ancak gürültü hassaslığı probleminde çözüm olamamaktadır.

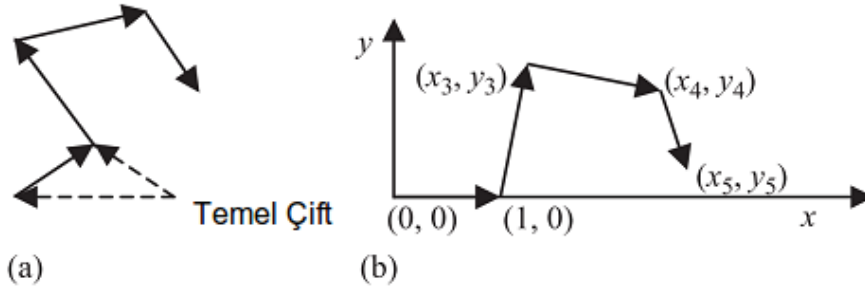
2.6.2 Çokgen Dekompozisyonu

Şekil sınırlarını çokgen yaklaşırma işlemi ile çizgi parçalarına ayıran çalışmalar yapılmıştır [89, 90]. Bu çalışmada, çokgen köşeleri şekil temel ögesi olarak kullanılır. Her bir temel öge iç açı, bir sonraki köşeden uzaklık, o ögenin x ve y koordinatı olarak dört adet bilgi barındıran karakter dizisinden müteşekkildir. Özniteliklerin taşıma, döndürme ve ölçekleme işleminden bağımsız olmadığı açıkça görülmektedir. İki şekil arasındaki benzerlik, o şekilleri temsil eden iki karakter dizisi arasındaki benzerlik ölçülerek belirlenir. Başarım ve sağlamlık ihtiyaçlarından dolayı her bir şekilden sabit sayıda köşe seçilerek işlemler yapılmaktadır. Bu nedenle her modele ait öznitelik koleksiyonları indekslemek için veri tabanında tutulur. Bu öznitelikler veri tabanında ikili ağaç ya da farklı bir veri yapısı ile tutulmaktadır. Şekiller arasındaki eşleme için iki aşamalı bir işlem içermektedir; ilk aşamada öznitelikler birebir karşılaştırılır, ikinci olarak ise modeller birebir karşılaştırılır.

Metot uygulamasının birinci aşamasında, sorgu şeklinin öznitelik verisi ile öznitelik indeks ağacı içerisinde bir arama yapılır, yapılan aramada belirgin bir model için öznitelikler eşleşiyor ise bu öznitelik ile eşleşen şekil listesi geri getirilir. İkinci aşamasında ise eşleşen şekil listesi ile sorgu şekli temel ögeler karakter dizileri arasındaki eşleşmeye bakılır.

Mehrotra ve Gary, nesne şeklini vektör zincirleri olarak temsil eden bir çalışma yapmışlardır [173]. Bir şeklin sınırlarının çokgen yaklaşırma işlemi yapılırken bir dizi önemli nokta yakalanır. Bu yöntem de şekil n adet önemli nokta ile verilir ve bu noktalardan bir çifti temel vektörü biçimlendirmek için seçilir. Temel vektör normalize edilmiş x-ekseni üzerinde bir birim vektördür. Şekildeki diğer bütün önemli noktalar bu koordinat sistemine taşınır. Bu durumda şekil $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ koordinat kümesi

olarak gösterilir, öyle ki, (x_i, y_i) , i 'inci noktanın normalize edilmiş koordinatlarıdır (Şekil 2.9). Dört adet taşıma parametresinin koordinat kümesine eklenmesi ile sonuç öz-nitelik vektörü tanımlanmaktadır, bunlar S , T_x , T_y , θ parametreleri sırası ile ölçek (S), taşıma (T_x , T_y) ve temel vektörün eğimidir (θ). Başlangıç noktası bağımsızlığını sağlamak için seçilen iki komşu nokta temel vektör olarak kullanılmaktadır. İki öz-nitelik arasındaki fark Euclidean mesafesi ile ölçülmektedir. Sınır öz-nitelik vektörleri k boyutlu B -tree veya dB -tree olarak organize edilmektedir. Sorgulama esnasında verilen bir sorgu şeklinin sorgu özelliği için indeks araması yapılır ve sorgu özelliğine benzer öz-nitelikler bir liste halinde oluşturulur. Bir ya da daha fazla sayıda özelliğin eşleşiyor olması şekillerin benzerliğine garanti verememektedir. Ancak şekil benzerliği için yapılan aramalardan elde edilen benzerliklerin benzeşim işlemlerinin sayısı bu konuda fikir vermektedir.



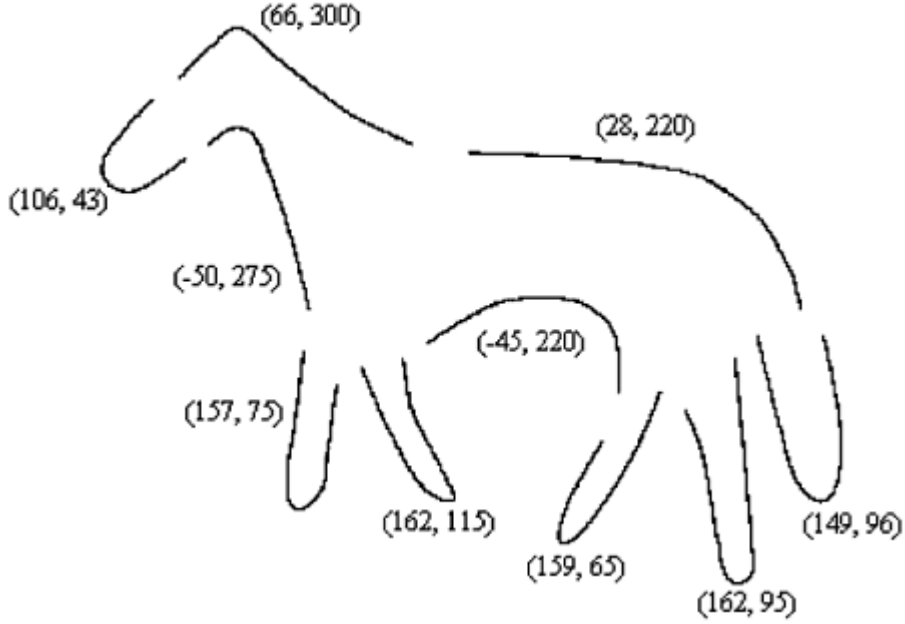
Şekil 2.9: Zincir vektörleri: (a) orijinal sınır tanımlayıcı (b) normalize edilmiş sınır tanımlayıcı. Şekil [173]'den alınmıştır.

Yukarıdaki üç metodun tamamı şekli bir çokgene benzetir ve şekli karakter dizileri olarak tanımlar ve arama ağaçları olacak şekilde veri tabanına aktarır. Bu metodun insan yapımı nesnelere için iyi çalışması beklenmektedir, fakat doğal nesnelere için pratik olmayan bir yöntemdir.

2.6.3 Pürüzsüz Eğri Dekompozisyonu

Berretti ve ark. [89], çalışmasında yapılan araştırmayı genel şekil geri getirme işlemi için genişletmişlerdir [20]. Yapılan çalışmada, Gaussian yumuşatması ile oluşturulan şekil sınır eğimlerinin sıfır-geçiş noktaları temel öğeler olarak elde edilir ve şekil belirteçleri olarak isimlendirilirler (Şekil 2.10). Her bir belirteç için öz-nitelik, belirtecin maksimum eğimi ve yönelimidir ve iki nokta arasındaki benzerlik ise iki belirteç arasındaki ağırlıklı Euclidean mesafesidir. Öz-nitelik eğrisi yön içerdiğinden, rotasyona

karşı bağımlıdır. Yazarlar problemin tespitini yapmışlar ancak çözüm önermemişlerdir. Belirteçlerin öznitelik veri tabanında depolanarak kullanılması için M-Tree den faydalanılmaktadır.



Şekil 2.10: Farklı belirteçlere bölünmüş at şekli. Her bir belirteç için verilen rakamlar eğim ve belirteç (token) yönelmesidir. Şekil [20]'den alınmıştır.

Bir sorgu şekli için veri tabanından benzer şekilleri getirmek iki aşamadan oluşan bir süreçtir. Birinci aşama belirteç geri getirmedir. Sorgu şekli üzerindeki N adet belirteç için, indeks ağacını N kere kat ederek benzer belirteçler bulunmaktadır. Geri getirilmiş belirteçler potansiyel olarak benzer şekiller için aynı değerlere sahiptir. İkinci aşamada ise benzer şekiller için modelleri birebir eşleştirerek en iyi eşleme yapılacak şekilde geri getirme işlemi yapılmakta ve bu işlem $O(MN)$ zamanda yapılmaktadır (M ve N karşılıklı olarak iki şekildeki belirteç sayısıdır). Belirteçlerin eşleşmesi iki aşamada da geçici veya deneysel olarak elde edilir. Niceliksel geri getirme performansı (hassasiyet ve geri getirme) ve geri getirme verimliliği klasik şekillerden türetilmiş veritabanı olarak raporlanır. İndeks ağacının şekil eşleme yaparken tekrar tekrar kat edilerek çalıştırılmasından dolayı, modellerin birebir eşleşmesi mi yoksa belirteçlerin eşleşmesi mi daha iyi tam belirginleşmemiştir. Sadece farklı ağaçlar için indeksleme başarımları raporlanmıştır. Eşleme, ölçeklenmiş şeklin yumuşatılması ve her bir şekildeki belirteç sayıları ile de doğrudan ilişkilidir.

2.6.4 Ölçek Uzayı Metodu

Yapılan çalışmalarda [20, 89, 90, 173], eşleştirme için nesne karşılaştırma işlemini model modele karşılık gelecek şekilde karşılaştırma yapılması önerilmektedir.

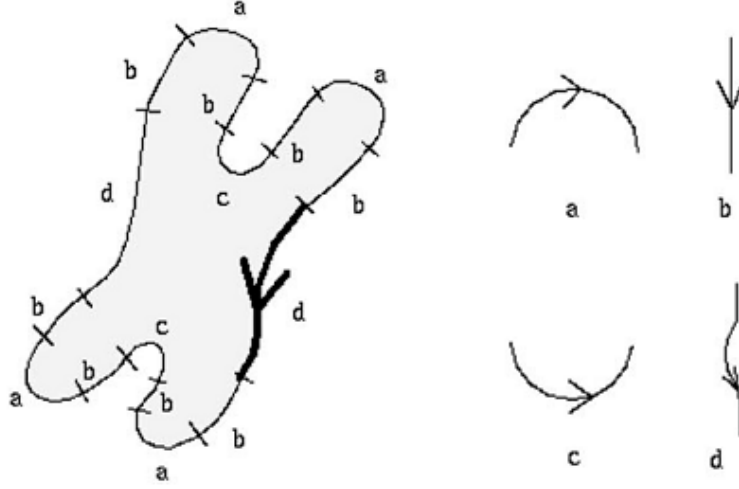
Didek ve Tsotsos [64] ise yaptıkları çalışmada şekli ölçek uzayda analiz edemediği ve model model eşleşecek şekilde düzenlemeyi önermişlerdir. Bu yaklaşımda, tanımlayıcı temel öğeleri eğim ayarlı yumuşatma ile elde edilmektedir. Bölümlü bir tanımlayıcı için temel öge değerleri belirli uzunluktaki bölümlerden, bu bölümlerin sıra sayıları ve eğim ayarlama değeri gibi bilgilerden oluşmaktadır. Bu işlemden sonra şekli temsil etmek üzere tanımlayıcı karakter dizisi oluşturulur. İki şekil A ve B arasındaki benzerlikleri bulabilmek için $A = (s_1^A, s_2^A, \dots, s_N^A)$ ve $B = (s_1^B, s_2^B, \dots, s_M^B)$ şekilde tanımlanmış tanımlayıcı karakter dizilerinin dinamik programlama kullanılarak benzerlik değerleri hesaplanır. Sağlamlığı artırmak ve hesaplama karmaşıklığını azaltmak için şekil öznelikleri eğim ölçek uzayına taşınarak farklı ölçeklere sahip şekillerin de eşleştirilmesi sağlanır. Bununla birlikte şekil bölümlerinin uzunluklarının etkisi ile tanımlayıcılar, ölçek bağımsız değildir. Bu algoritma için sadece 50 şekil içeren bir veri seti üzerinde testler yapılmış ve geri getirme oranlarına ait raporlar hazırlanmıştır. Bu şekilde tanımlayıcı için geçici ve deneysel olmak üzere parametreler ile algoritma temel olarak uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Bu tanımlayıcılar mevcut parametre sayıları ve yapılan deney sayılarının azlığı sebebi ile uygulamalar için yeterli görülmemektedir.

2.6.5 Sentetik Analiz

Sentetik analiz, doğal dil bileşenleri fenomeninden ilham alınarak dizayn edilmiştir. Doğal dil oluşurken cümleler kalıplardan, kalıplar kelimelerden ve kelimelerde harflerden oluştuğu gibi bu yöntemde de bileşenlerin kompozisyonu mevcuttur [272]. Sentetik metodlarda şekil, kendisini oluşturan *önceden tanımlı temel öğeler* kümesi olacak şekilde temsil edilir. Bu şekilde oluşturulan *önceden tanımlı temel öğeler* kümesine *kod kitabı*, bu kitaptaki temel öğelere de *kod kelimesi* adı verilmektedir. Örnek olarak Şekil 2.11'ün sağ tarafında kod kelimeleri, sol tarafında ise kromozom şekli bulunmakta ve bu şekil gramersel olarak aşağıdaki gibi temsil edilmektedir.

$$S = dbabcbabdbabcbab, \quad (2.6.2)$$

İki şekil arasındaki eşleme işlemi ise, iki şekli temsil eden karakter dizileri arasında birisini diğerine çevirme işleminde yapılan en az sayıda işlem sayısı ile yapılmaktadır.



Şekil 2.11: Kromozom şeklinin yapısal olarak tanımlanması. Şekil [257]'den alınmıştır.

Şekil temsilinin daha genel bir yöntemi ise karakter dizisi grameri olarak formüle etmektir. Her bir temel öge her bir ögesine ait söz dizim şekli ve kuralları bulunan bir gramerin harfi olarak tanımlanır. G diye anılan gramer için oluşturulan cümleler o gramerin dili olarak anılır ve $L(G)$ olarak gösterilir. Burada, cümleler karakter dizileri (temsil örüntüleri) ve dil ise örüntü sınıflarıdır. Gramer oluşturulduktan sonra işlemler eşleştirme olarak devam eder. Bilinmeyen bir şeklin temsili için, hangi dilin kullanılacağına tespitine ve hangi geçerli cümleler ile gösterileceğine karar verilir.

Sentetik şekil analizi, biçimsel dil teorisine dayanmaktadır [45]. Yapısal ve aşamalı olarak insan gözü sistemini taklit etmeye çalışmaktadır. Ancak, sadece geçerli örüntüler kullanarak, gramer örüntüsünü çıkarmak için yeterli olmadığından genel uygulamalarda pratik bir yapıya sahip değildir. Buna ilave olarak bu yöntem kod kelimeleri ve alfabetini oluşturabilmek için veritabanı hakkında önceden bilgiye sahip olmak zorundadır. Genellikle yaygın uygulamalarda veri tabanına önceden sahip olmak mümkün değildir.

Sentetik metotlar ve önceki bölümlerde tartışılan yöntemler arasındaki temel fark, bu yöntemde temel öğeler için veritabanının önceden bilinmesinin şart olmasıdır. Önceden tanımlı yaklaşım ancak veri tabanındaki şekil sınır profilleri biliniyorsa anlamlıdır. Bundan dolayı alfabe harfleri de uygulama bağımlıdır. Adaptif yaklaşım yaygın ola-

rak uygulamalarda kullanılmaktadır. Ancak, veritabanı hakkında yeterli bilgiye sahip olmadan temel öge tiplerinin belirlenmesi çok güçtür.

2.6.6 Şekil Değişmezleri

Şekil değişmezleri, şeklin sınır değerleri temeline dayandığından yapısal yöntemler arasında yer almaktadır. Şekil değişmezleri üzerine çalışan tasarımcılar, diğer şekil temsil tekniklerinin de benzeşim dönüşümü (dönme, taşıma ve ölçekleme) altında bağımsız oldukları, görüş açısına da bağımlı oldukları konusunda görüşlere sahiptirler [257]. Bu nedenle, şekil sınır özniteliklerinin temsili için dönüşümlere uygun bir sınıf olan şekil değişmezleri kullanılması denenmiştir.

Yaygın olarak, değişmezler teorisi birleştirilmiş veya ters çevrilmiş dönüşüm işlemlerine dayanmaktadır. Görünürde, bütün görünümleri birer alt küme olarak içeren dönüşümlerin izdüşümsel grupları düşünülmektedir. *Grup* yaklaşımı değişmezleri üretmek için matematiksel bir araç sağlamaktadır. Dönüşümün izdüşümüne bağlı olarak koordinatların değişmesi bir grup işlevidir. *Lie Grup* teorisi, özellikle yeni değişmezlerin tasarımında fayda sağlamaktadır.

Değişmezler, genellikle onu tanımlayan özniteliklerin sayısı ile isimlendirilir. Birinci sıradaki değişmez, birinci sıradaki öznitelik üzerinde tanımlanır ve birincil değişmez olarak adlandırılır, ikinci sıradaki değişmez ikinci sıradaki öznitelik üzerinde tanımlanır ve ikincil değişmez olarak adlandırılır. Benzer olarak üçüncüsü üçüncül olarak adlandırılır, adlandırmalar bu şekilde devam eder. Yüksek sıralı değişmezlerin toplam sayıları daha alt sıralardaki belirli bir grup dönüşümünden daha fazladır [151].

Genel olarak değişmezler; (1) geçiş oranı, uzunluk oranı, mesafe oranı, açı, alan [151], üçgen [257], gibi geometrik değişmezler, aynı düzlemlerli noktalarından değişmezler [259] (2) determinant, özdeğerler [259] ve şekil izi [103] gibi değişmezler, (3) eğim, bükülme ve Gaussian gibi türevsel değişmezler olarak sınıflandırılabilir.

Geometrik değişmezler ve cebirsel değişmezler sınırların eğriler ya da düz çizgiler olarak temsil edilmesi durumuna uygun olmaktadır. Genel uygulamaları, insan yapımı nesnelere oluşan veri tabanıdır. Eğer bir nesnenin sınır değerleri çizgiler ya da eğriler olarak temsil edilemez ise, türevsel değişmezler uygulanabilir. Doğal yapısı gereği türevsel değişmezler yerel ve çok sayıda olabilmektedir.

Şekil temsili için değişmezlerin kullanılmasının bir takım problemleri vardır. Birinci olarak, değişmezler genellikle şeklin sadece geometrik olarak dönüşümü ile türetilmektedir. Gerçekte şekil özellikle el yapımı olmayan nesnelere için nadiren sert geometrik değişikliklere sahiptir. İkinci olarak ise, şekil değişmezleri sınır gürültüsüne ve hatalarına karşı çok hassas bir yapıya sahiptir. Üçüncü olarak, yeni anlamlara sahip değişmezlerin tasarlanması oldukça zordur. Dördüncü olarak ve belkide en zor olanı ise değişmezlerin eşleme sırasındaki durumlarıdır. Eşleme işlemi için genellikle ilke olarak *parçalar ve ilişkileri* tekniği kabul edilmiştir. Bütün bu teknikler NP-tam (NP-complete) [259] olarak bilinen bir problem olan alt grafik eşleme metodlarını kullanmak durumunda kalmaktadır [150, 151]. Bu durumda karşı konulması gereken zorlu problem, makul zamanda çözüm bulabilecek bir algoritma bulunabilmesidir.

Kliot ve Rivlin, şekil tanımlama işlemi olarak *değişmez imzasını* kullanmak için çalışmalar yapmışlardır [132]. Her bir şekil sınır eğrisi için, uzunluk, açı, alan oranı, geçiş oranı, uzunluk oranı ve daha birçok geometrik değişmez *değişmez imza (çoklu değişmez imza* olarak da adlandırılır) türetilmektedir. İki şekil üzerinde karşılıklı iki eğrinin eşleştirilmesi için çoklu değer imza matrisi kullanılır. Eşleştirme başarımını artırmak ve içeriğinde başlangıç eşlemesi için imza histogramı oluşturulur. Daha sonra matrisin içeriği olan eğriler başlangıç eşlemesinden geçer. Geri getirme testleri küçük bir veri seti kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlarda verimlilikten bahsedilmiş ancak başarımları ve etkinliği hakkında bilgi verilmemiştir.

Squire ve Caelli, çalışmalarında şekil tanımlama işlemi için değişmez imza kullanmışlardır [259]. Değişmez imza, şekil sınırlarının kısmi cebirsel eğriler olarak temsil edilmesi ile türetilen bir olasılık yoğunluk fonksiyonudur. Tanımlanan imza, benzeşim dönüşümleri olan döndürme, taşıma ve ölçekleme altında bağımsızdır. Şekil tanımlama ve eşleme işlemlerinde uygulamak üzere nicemlenmiş değişmez imza kullanılarak bir histogram oluşturulur. Daha sonra bu histogram bir yapay sinir ağı kullanılarak sınıflandırma işlemine sokulur. Yapılan deneyler değişmez imza tanımlayıcısının Fourier-Mellin şekil tanımlayıcısından daha az başarımlara sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum imzanın daha güçlü olabilmesi için daha fazla işleme ihtiyacı olduğunu göstermektedir.

Değişmez imza metodları *parçalar ve ilişkiler* yöntemini kullanmalarına rağmen eşleş-

tirme işlemleri çok pahalıdır. Buna ilave olarak, Davies tarafından yapılan birçok çalışma [55] vardır. Ancak şekil tanımlamanın klasik şekil imzası kullanılarak mı yoksa değişmez şekil imzası kullanılarak mı yapılması daha avantajlıdır konusunda bir karara bağlanılamamıştır.

2.6.7 Değerlendirme

Yapısal şekil tanımlama tekniklerinin esası, üst üste oturma ve kısmi eşleme problemlerine çözüm üretmiş olmasıdır. Bununla birlikte bu kazanımlar beraberinde ilave sakıncaları doğurmaktadır.

Yapısal yöntemlerin ilk olarak sayılacak sakıncası, şekil için temel öğelerin ve özneliklerin üretilmesi işlemidir. Çünkü, bir şekli tanımlayabilecek belirlenmiş muntazam bir yöntem bulunmamaktadır. Her bir şekil için temel öge ve öznelik sayıları bile bilinmemektedir. Bu sebeple bu yöntemin uygulanmasında en önemli etken şekil veritabanı hakkında daha önceden bilgi elde edilmiş olmasıdır. Yapısal yöntemlerin belirli varsayımlar altında çalışması beklenirken, bu gibi bilgilerin temininin güçlüğü sebebi ile genel uygulamalarda kullanılması pratik değildir. Örnek olarak herhangi bir sorgu şekli için öznelik temel öğeleri veri setinde bulunmuyorsa bu şekil için geri getirme işlemi yapılamayacaktır.

İkinci olarak sayılabilecek sakıncası ise özellikle karmaşık eşleşmelerde ki hesaplama kompleksliğidir. Diğer bütünsel metotlardan farklı olarak, yapısal şekil tanımlama teknikleri ile yapılan eşleşmenin metrik olmayan ölçümlere izin vermesidir. Çünkü bu yöntemler şekiller arasında alt çizge kullanılarak optimal kısmi eşlemeye izin vermektedir. Bu yöntemlerin bir çoğu en uygun eşlemeyi yapabilmekte, fakat en iyi eşleşme konusunu garanti edememektedir.

Bir diğer problem, şekil temsili için önemli olan bütünsel şekil özneliklerini elde etme esnasında oluşan hatalardır. Örnek olarak bir şehrin sokakları ve bütünü için şekil özellikleri çıkarılırken bütünsel ve yerel özneliklerin eşit öneme sahip olmamasıdır. Şehrin bir bölümü için detaylı görüntü inceleme o şehir hakkında daha önemli bilgiye sahip olmak anlamına gelmez, bilakis uzak görüntüler daha anlamlı olmaktadır. Bir şehri diğer şehirlerden ayıran özellikleri aslen sokak detaylarında olanlar değil daha büyük değişikliklerdir. Örnek olarak Şekil 2.12, gotik bina ile kubbeli bina ve bir muz

şeklini göstermektedir. Yapısal metotlar kullanılarak yapılan eşleme ile algısal olarak birinci şekil üçüncü şekle ikinci şekilden daha yakın görünmektedir. Bu problem bütünsel şekil eşlemede karşılaşılan bir problem değildir.



Şekil 2.12: Yapısal şekil tanımlama ile oluşan belirsizlik.

Son olarak gürültüye olan hassasiyetidir. Çünkü yapısal temsil şeklin topolojik yapısını barındırmaz. Şekil sınırlarında meydana gelen değişiklikler yerel yapılarda büyük değişikliklere sebep olur. Bundan dolayı bütünsel öznitelikler bu durumlarda daha güvenilir özniteliklerdir.

2.7. Alan Tabanlı Şekil Tanımlayıcılar

Alan tabanlı teknikler, sınır tabanlı metotlardan farklı olarak şeklin tüm noktalarını tanımlayıcı özniteliklerinin toplanması için kullanılmaktadır. Bu alanda en yaygın olarak kullanılan tanımlayıcılar, moment tanımlayıcılarıdır. Diğer alan tabanlı yöntemler ızgara metodu, şekil matrisi, gövde dış bükeyliği ve medyal eksen gibi tanımlayıcılar olarak sıralandırılabilir. Sınır tabanlı metotlara benzer olarak alan tabanlı metotlarda da şekil uygulanacak yöntemle göre bütünsel ve yapısal olmak üzere iki ana başlık altında incelenmektedir.

2.8. Alan Tabanlı Şekil Tanımlayıcılar İçin Bütünsel Metodlar

Bütünsel yöntemler şekli bir bütün olarak ele alır, sonuç temsili ise sayısal bir öznitelik vektörü olarak şekil tanımada kullanılmaktadır. Şekiller arasındaki benzerlik öznitelik vektörleri arasındaki metrik uzaklık fonksiyonları ile tespit edilmektedir.

2.8.1 Geometrik Moment Değişmezleri

2B model için görüntü moment değişmezleri kullanımı çalışması ilk olarak Hu tarafından yayınlanmıştır [101]. Tanımladığı yöntem, 19. yüzyılda Boole, Cayley ve Sylves-

ter gibi matematikçilerin cebir teorisi üzerine kurulmuştur.

$$m_{pq} = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x,y) \rightarrow \quad p, q = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.8.1)$$

Bir çeşit küme moment değişmezi (genellikle *geometrik moment* olarak anılır), düşük dereceden momentlerin kombinasyonunu kullanarak bu özelliklerin taşıma, ölçekleme ve döndürmeden bağımsız olarak elde edilmesi sağlanır. Yüksek dereceden moment desenlerinin kullanılması istenmez. Elde edilen moment değişmezleri son derece küçük olduğundan, geliştirme için *zscore normalizasyonu (normalization)* gibi bir normalizasyon işlemine ihtiyaç duyulmaktadır [142].

Geometrik moment değişmezleri büyük ölçüde dikkat çekmiş [85, 112, 154, 257, 269, 270] ve birçok uygulamada kullanılmıştır [16, 63, 174, 216, 234]. Bu yöntemde problem, geometrik momentler kullanılarak türetilen düşük dereceden moment değişimlerinin şekli açıklamak için yeterli olmaması ve yüksek dereceli momentlerin türetilmesinin çok güç olmasıdır.

Zhang ve Lu, geometrik moment değişmezleri yöntemi ile standart bir şekil veri tabanı olan MPEG-7 kullanarak test yapmışlardır [294]. Yaptıkları çalışmada moment değişmezlerinin düzgün sınırları olan şekillerde çok başarılı sonuçlar verdiğini gözlemlenmiştir. Aynı şekilde ızgara tanımlayıcıları da bu tip şekiller üzerinde test edilmiş ve iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bununla beraber bozuk sınırlı şekillerde aldıkları sonuçlar oldukça düşük performanslı olmuştur. İç bölgelerinde problemi olan şekillerde ise sadece döndürülmüş şekillerde tatmin edici sonuçlar alınmıştır. Bununla birlikte ölçeklenmiş, taşınmış ve perspektif şekiller için performans oldukça düşüktür. Bu bulgular, moment değişmezlerinin sadece basit şekillerde iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.

2.8.2 Cebirsel Moment Değişmezleri

Cebirsel moment değişmezleri metodu Taubin ve Cooper tarafından önerilmiş [266, 267] ve QBIC projesinde kullanılmıştır [188, 237]. Cebirsel moment değişmezleri birinci m merkezi momentleri ile hesaplanır ve ön tanımlı matris $M_{[j,k]}$ 'in elemanları olarak ölçeklenmiş özdeğerler olarak elde edilir. Hu'nun geometrik moment değişmezlerinden farklı olarak, cebirsel moment değişimleri istenilen sırada üretilebilmekte ve

benzeşik dönüşümlerden etkilenmemektedir. Ancak, sonuçlar cebirsel moment değişmezleri yönteminin sorgu nesnelere için ya çok iyi ya da çok kötü bir performansa sahip olduğunu göstermektedir. Şeklin üzerinde iyi çalışması için şekil içerisindeki noktaların ve sınır noktalarının düzgün dağılmış olması gerekmektedir. Bu durumda kenar noktalarının önemli olduğu sorgularda, örneğin bir "S" şekli ile yılanın ayırt edilmesinde düşük başarımlar göstermektedir.

2.8.3 Ortogonal Moment

Cebirsel moment dönüşümü 2.8.2 geleneksel dönüşüm çekirdeği $x^p y^q$ formülü $P_p(x)P_q(y)$ formülü ile değiştirilerek ve geliştirilerek genelleştirilmektedir. Teague bu fikri kullanarak Legendre momentlerini ve Zernike momentlerini $x^p y^q$ yer değiştirerek ortogonal moment çalışmalarını yapmıştır [269].

Legendre momentleri şu şekilde verilir:

$$\lambda_{mn} = \frac{(2m+1)(2n+1)}{4} \sum_x \sum_y P_m(x)P_n(y)f(x,y), \quad (2.8.2)$$

öyle ki,

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n, \quad (2.8.3)$$

Zernike momentleri ise şu şekilde verilir:

$$A_{mn} = \frac{(n+1)}{\pi} \sum_x \sum_y V_{nm}^*(x,y)f(x,y), \quad x^2 + y^2 \leq 1, \quad (2.8.4)$$

öyle ki,

$$V_{nm}(x,y) = V_m(\rho \cos \theta, \rho \sin \theta) = R_{nm}(\rho) \exp(jm\theta), \quad (2.8.5)$$

ve

$$R_{nm}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} (-1)^s \frac{(n-s)!}{s!((n+|m|)/2-s)!((n-|m|)/2-s)!} \rho^{n-2s}, \quad (2.8.6)$$

ρ ve θ , sırasıyla, şeklin ağırlık merkezi olan (x, y) noktasının yarıçapı ve açısıdır.

Legendre ve Zernike polinomlarının her ikisi de ortogonal temele sahip tam kümedir ve Legendre ve Zernike momentleri ortogonal momentler olarak anılır. Diğer ortogonal momentler ise Zernike'nin polinomları ile reel değer radyal polinomlarının değiştirilmesi ile elde edilen *pseudo-Zernike* momentleridir. Ortogonal momentler tanımlanan şeklin optimum kullanımı ile doğru şekilde yeniden oluşturulmasına olanak tanır.

Teh ve Chin ortogonal momentler; Legendre momentleri, Zernike momentleri, pseudo-Zernike momentleri, ve non-orthogonal momentler; geometrik momentler, kompleks momentler, rotasyon momentleri üzerine detaylı bir çalışma yapmıştır [270]. Çalışmalarının sonuçları göstermektedir ki, geometrik momentler, kompleks momentler ve pseudo-Zernike momentleri gürültüden çok az etkilenmektedir. Ancak Legendre momentleri gürültüden oldukça fazla etkilenmektedir. Zernike momentleri ve pseudo-Zernike momentlerinin, şekli tekrar oluşturabilme gücü Legendre momentlerine nazaran gürültülü ve gürültüsüz şekillerde çok daha iyi performans göstermektedir. Yine yapılan deneyler göstermektedir ki şekil tekrar oluşturma işleminde şekilden gelen gürültü değeri, moment sayıları arttıkça artmaktadır. Yüksek dereceli moment değerleri gürültüye karşı daha hassas sonuçlar oluşturmaktadır. Moment sayılarına göre sinyal gürültü oranı azalıp artmaktadır. Bu yapısı ile şekil tanımlamada kullanılacak olan moment sayıları için bir ipucu sağlamaktadır. Örneğin $SNR = 30$ gürültü oranı altında Zernike momentleri için moment sayısı 10 iken, 30 veya daha fazla sayıda moment kullanıldığında SNR değeri 200 değerlerine ulaşmaktadır. Bu çalışmalar sonucunda, Zernike ve pseudo-Zernike momentlerinin şekil tanıma için daha çok tercih edilebilir bir tanımlayıcı olduğu sonucuna varılmıştır.

Liao ve Pawlak, Teh ve Chin'in çalışmalarını genişleterek doğruluğunu ve performansını artırmışlardır [154]. Özellikle değişik çözünürlüklerde moment doğruluğu üzerine çalışmalar yapmışlardır. Sonuçlar şeklin kaba olarak kısmi hale getirilmesinin momentlerin doğruluğunu arttırdığını göstermektedir. Ayrıca farklı yöntemler kullanarak

yüksek dereceli momentlerin hesaplanmasını hızlandırmışlardır.

Moment şekil tanımlayıcıları genellikle pratik, sağlam ve eşleme hesaplaması kolay tanımlayıcılardır. Ancak asıl zor olan şekil özelliklerinden yüksek dereceli momentlerin elde edilmesi işlemleridir. Birçok moment şekil tanımlayıcıları arasında, Zernike momentleri en çok tercih edilenidir. Temel olarak yapısında sinüs fonksiyonu kullanıldığından, spektrum özellikleri gibi iyi anlaşılır özelliklere sahiptir. Zernike momentleri kullanan şekil tanımlayıcıları, sıkça kullanılmakta [130, 131] ve MPEG-7 şekil tanımlayıcı standartlarının bir çoğunu karşılayabilmektedir [114].

2.8.4 Genel Fourier Tanımlayıcı

Zernike moment tanımlayıcıların sağlam bir performansa sahip olmasına rağmen, bazı eksiklikleri vardır. İlk olarak çekirdek fonksiyonunun hesaplama karmaşıklığı yüksek ve momentleri alınmadan önce şeklin birim daireye normalize edilmesi gerekmektedir. İkinci olarak ise Zernike momentleri ile elde edilen radyal özellikler ve dairesel özellikler bütün şekiller için tutarlı değildir. Birisi konum uzayında iken diğeri spektrum uzayındadır. Bundan dolayı *çoklu-çözümleme (multi-resolution)*'ye izin vermemektedir. Üçüncü olarak dairesel spektral öznelikler her mertebede eşit elde edilebilir olmadıklarından dolayı şekli temsil edebilecek önemli öznelikler kaybedilir. Bu eksikliklerin göz önüne alınarak bir genel Fourier tanımlayıcı (GFD) da Zhang ve Lu tarafından ileri sürülmüştür. GFD 2B Fourier kutupsal ızgara ile örneklenmiş şekil görüntü dönüşümü uygulanarak elde edilir. (Şekil 2.13)



Şekil 2.13: (a)Kutupsal uzayda orijinal şekil (b) Kutup-ızgara ile örneklenen ve kartezyen uzayda bir şekil. Şekil [294]'den alınmıştır.

$$PF_2(\rho, \phi) = \sum_r \sum_i f(r, \theta_i) \exp[j2\pi(\frac{r}{R}\rho + \frac{2\pi i}{T}\phi)], \quad (2.8.7)$$

öyle ki,

$$0 \leq r < R \text{ ve } \theta = i(2\pi/T) (0 \leq i < T); 0 \leq \rho < R, 0 \leq \phi < T.$$

R ve T sırasıyla yarıçap frekans çözünürlüğü ve açısal frekans çözünürlüğüdür. Normalize edilmiş sabitler ise GFD' dir. İki şekil arasındaki fark şehir bloku (city block) yöntemi kullanılarak GFD' ler arasındaki uzaklık ölçülerek bulunur.

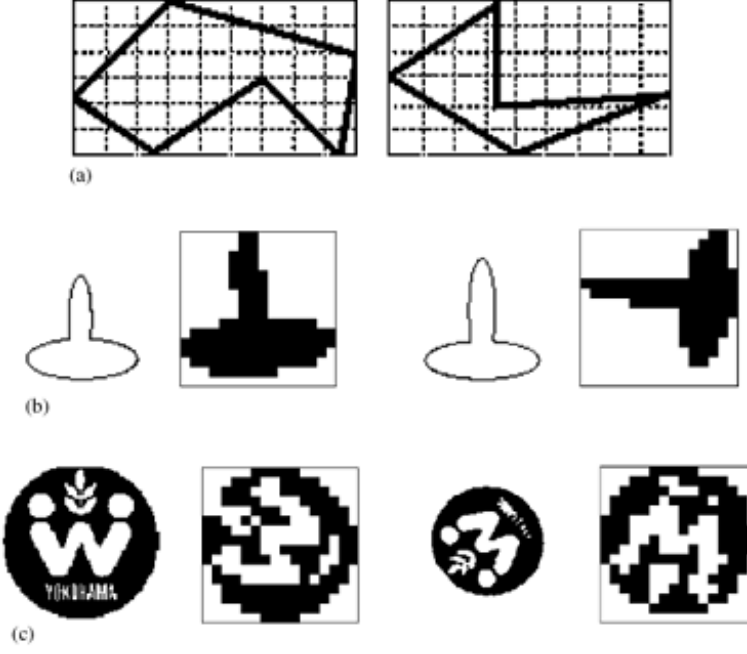
Zernike momentleri ile karşılaştırıldığında, GFD' nin hesaplamaları kolay, özellikler olarak sadece spektrum öznitelikleri ve geri getirme oranı çoklu-çözünürlük metodunda radyal ve dairesel şekil yönüne göre daha yüksektir. GFD metoduna bir takım iyileştirmeler yapılarak geri getirme performansı dönüştürülmüş şekillerde dahi artırılabilir [296]. Zhang ve Lu ayrıca GFD' nin sınır tabanlı şekil tanımlayıcılardan CSS, FD ve alan tabanlı tanımlayıcılar Zernike momentleri, geometrik momentler ve ızgara metodundan daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir [294].

2.8.5 Izgara Tabanlı Yöntem

Izgara tabanlı yöntem Lu ve Sajjanhar tarafından önerilmiş [166] ve [40, 104, 233] birçok çalışmada kullanılmıştır. Basit olarak şeklin üzerine bir ızgara kaplanarak önce soldan sağa sonra yukarıdan aşağıya taranmaktadır. Sonuç bir (BMP) *bitmap*'tir. Tarama esnasında şeklin içerisinde kalan alanlar 1 ve dışında kalan alanlar 0 olarak belirlenir. Bu adımdan sonra şekil ikili bir vektör olarak oluşmuştur. Bu şekil temsilinin ardında iki şekil arasındaki benzerliği bulmak için *ikili Hamming mesafesi* kullanılır. Örneğin Şekil 2.14 (a) 'da iki şeklin ızgara tanımlayıcısı sırasıyla 001111000 011111111 111111111 111111111 111110011 001100011 ve 001100000 011100000 111100000 111100000 011111100 000111000, ayrıca iki küme arasında XOR ile hesaplama mesafe 27 olarak bulunur. Yöntemin dönme, taşınma ve ölçeklemeye değişimlerini karşılayabilmesi için taramadan önce normalleştirilmesi gerekmektedir.

Normalleştirme işlemlerinde şekil sabit bir dikdörtgene ölçeklendikten sonra dikdörtgenin sol üst köşesine kaydırılır ve ana eksen dik olacak şekilde döndürülür. Yansıtılmış ve ters çevrilmiş şekiller ayrı ayrı düşünülmelidir. Chakrabarti ve ark. [40], ızgara tanımlayıcısını *adaptif çözünürlük (Adaptive Resolution (AR))* kullanarak daha da geliştirerek MARS içerisinde ayrı bir çalışma yapmışlardır [104]. AR ızgara tanımlayıcısı şekli bitmap temsili üzerine dördümlü ağaç ayrışma uygulayarak elde edilir.

Izgara tanımlayıcısının avantajı; kolaylığı, sezgisel uygunluğu ve MPEG-4 kodlama



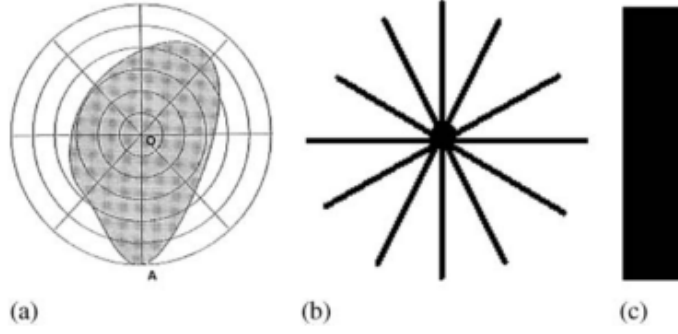
Şekil 2.14: (a) İki şeklin ızgara gösterimi. (b) İki şekil sınır şeklinin farklı ızgara gösterimi. (c) İki eşit alan gösterimli şeklin ızgara gösterimi. Şekil [166]'den alınmıştır.

yöntemine olan uygunluğudur. Bu yöntem de temel sorun ana eksen bazlı rotasyon normalleştirilmesidir. Ana eksen normalizasyonu işlemi gürültüye duyarlı olduğundan güvenilmezdir. Örnek olarak Şekil 2.14 (b) de aynı şeklin gösterimleri farklılık göstermektedir. Bu sonuçlara göre alan tabanlı şekillerin, ızgara temsilleri döndürmeye bağlıdır. Örnek olarak Şekil 2.14 (c) deki benzer iki şeklin ızgara gösterimleri çok farklıdır.

2.8.6 Şekil Matrisi

Olağan şekil tanımlama yöntemleri şekillerden bilgi toplarken dikdörtgenel ızgara örnekleme kullanırlar. Bu yöntem ile geliştirilen şekil tanımlayıcıları genellikle taşıma, dönme ve ölçeklemeye karşı bağımlıdır. Problemin çözülmesi için ekstra normalizasyon yöntemleri kullanmak zorunludur. Goshtasby, şekil tanımlayıcı olarak *şekil matrisi* oluşturan, dairesel ızgara kullanan bir yöntem önermektedir [87]. Aslında fikir diğer ızgara yöntemleri ile aynıdır. Ancak önerilen yöntemde şekil üzerine diğer yöntemlerdeki gibi dikdörtgenel bir ızgara değil dairesel ve merkezden kenarlara doğru genişleyen radyaller ile yapılan bir ızgara kullanılmaktadır. (Şekil 2.15 (a))

Şeklin ikili değerleri dairelerin ve radyal çizgilerin kesişme noktalarından elde edilir.



Şekil 2.15: (a) Kutupsal ızgara ile şeklin örtülmesi (b) çizgilerden oluşturulmuş yıldız (c) dikdörtgensel şekil. Şekil [87]'den alınmıştır.

Şekil matrisi oluşumunda dairelerden elde edilen değerler matris kolonlarına ve radyal çizgilerden elde edilen değerler ise matris satırlarına karşılık gelmektedir. Örneklemeden önce şekil, şeklin en büyük yarıçapına göre ölçeklendirilerek normalize edilir. Bu sayede sonuç matrisi taşıma, dönme ve ölçekleme işleminden bağımsız olarak elde edilir. Örnekleme sıklığı ise kullanılan dairesel ızgaraya göre değişmektedir. Taza ve Suen, şekil tanımlayıcıyı oluşturulurken şeklin dış kenarlarına daha ağırlık verecek bir takım değişiklikler yapmıştır [268].

Şekil matrisi, şeklin seyrek bir şekilde örneklenmesi ile elde edildiğinden dolayı gürültüye karşı hassastır. Bunun yanında matris ile şekil tanımlama ve eşleme çok masraflı bir işlem olmaktadır. Perui ve ark., şekil tanımlama için farklı bir yaklaşım olan şeklin farklılık gösteren bölgelerine yoğunlaşan bir yöntem önermişlerdir [162, 205]. L tanımlanacak şekil S ' nin maksimum yarıçapı olsun. C_k L üzerine çizilecek olan L yarıçaplı ızgaranın n eşit parçaya sahip olan k ' inci dairesi olsun. Bu durumda alan oranı şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$x_i = \frac{A(S \cap C_i)}{A(C_i)}, \quad (2.8.8)$$

öyle ki,

$A(\cdot)$ alan fonksiyonudur. Şekil tanımlayıcının öznelik vektörü $x = [x_1, \dots, x_n]^T$ olarak tanımlıdır. Böylece şekil alan-oranı tanımlayıcısı şekil matrisi tanımlayıcısına göre daha kompakt ve sağlamdır, ölçüm dairesi üzerindeki değişimlerden etkilenmez. Sırası ile Şekil 2.15 (b) ve (c) 'deki iki şekil bu tanımlayıcı altında aynıdır. Bu problem

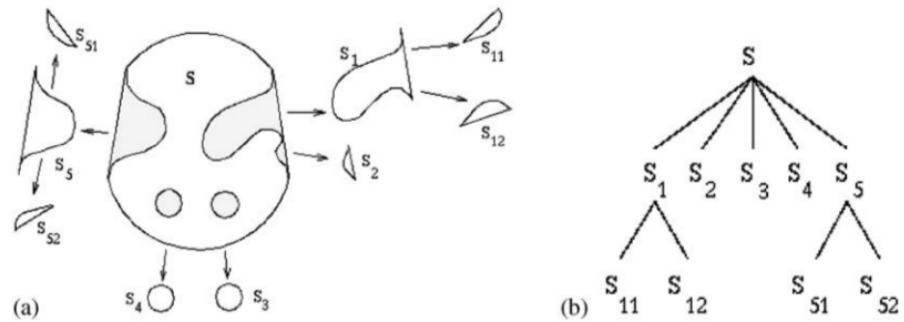
ise Bölüm 2.8.4’de anlatılan spektrum dönüşümü kullanılarak çözülmektedir.

2.8.7 Değerlendirmeler

Bütünsel alan tabanlı yöntemler şeklin tamamını bir bütün olarak alır ve bu alan içerisindeki piksel değerlerini kullanır. Bu yöntemler, gürültü ve diğer bozucu etkilerden etkilenmeyen şekil içerisindeki piksel yoğunluklarını ölçerler. Bu şekilde oluşabilecek değişikliklerle sınır tabanlı yöntemlere oranla daha iyi baş edebilecek yapıdadırlar. Özellikle moment yöntemleri alan tabanlı yöntemlerin en tercih edilenidir. Moment yöntemleri şekil içerisindeki alanları en uygun şekilde yayabilen yöntemlerdir. Düşük dereceli veya normal dereceli momentler şekilde bulunan bilgileri yeterli bir oranda temsil yeteneğine sahiptirler. Ancak yüksek dereceden momentlerin yorumlanması oldukça zordur. Izgara yöntemleri ise ana-eksen normalizasyonuna bağlı olarak gürültüden çok etkilenmektedirler ve alan tabanlı olanlar dönmeye karşı daha duyarlıdırlar. Şekil matris yöntemleri ise seyrek örneklem alındığında güvenilir değildirler. Buna karşın alan oran yöntemi şekil matris yöntemine nazaran çok daha güvenilir bir yöntemdir, şekil değişikliklerinden çok etkilenmez. Yoğun tarama ile yapılan kutupsal tarama örnekleme hem moment hemde şekil matrisi yöntemlerinin avantajlarını taşır. Bu şekilde bahsedilen diğer alan tabanlı şekil tanımlayıcıların problemlerinin üstesinden gelebilmektedir.

2.9. Alan Tabanlı Şekil Tanımlayıcılar İçin Yapısal Metotlar

Sınır tabanlı yapısal metotlara benzer olarak, alan tabanlı yapısal metotlar da şekli bölgelere ayrıştırır ve parçaları şekil temsili ve tanımlanması için kullanırlar.



Şekil 2.16: (a) Gövde içbükey ve dışbükey (b) Gövde dışbükey ağaç gösterimi. Şekil [257]'den alınmıştır.

2.9.1 Dışbükey Gövde

R olarak anılan bir bölge dışbükeydir ancak ve ancak, $x_1, x_2 \in R$ noktalarından geçen x_1x_2 doğrusu bu bölge içerisinde kalır. $R \subset H$ şartını sağlayan H bölgesi ise en küçük dışbükey gövde olarak isimlendirilir. $H - R$ arasındaki fark R 'nin dışbükey eksikliği D olarak adlandırılır. Dışbükey gövde çıkartımı için sınır izleme yöntemi [257] ve morfolojik yöntemlerin [54, 85] her ikisi de kullanılmaktadır. Sayısallaştırma, gürültü ve bölütleme değişimleri nedeniyle şekil sınırları düzensiz olma eğilimindedir. Bu etkiler genellikle sınır boyunca rastgele dağılmış küçük, anlamsız bileşenlere sahip bir dışbükey eksikliğine yol açar. Bu konuda genel yaklaşım, şekli bölümlerine ayırmadan önce yumuşatmaktır. Çokgen yaklaşımı, özellikle tercih edilmektedir, çünkü bu durumda dışbükeylerin çıkarılması işlem karmaşıklığı $O(n^2)$ 'den $O(n)$ 'e düşmektedir (n hesaplama yapılacak şeklin kenar nokta sayısıdır). Dışbükey gövde çıkarma işlemi sırasında şekil sınırları üzerinden dışbükey yetersizliklerde bir işlemle bulunabilir. Şekli daha sonra çukuru bir dize ile temsil edilebilir. Şeklin daha dolgun bir gösterimi özyinelemeli metotla elde edilen dışbükeylik ağacı ile oluşturulabilir.

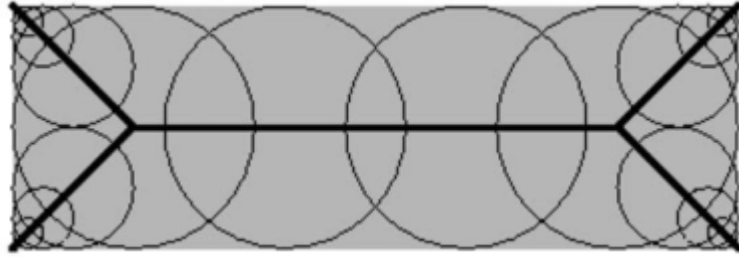
Burada, bir nesnenin dışbükey gövde özellikleri ilk olarak dışbükey eksiklikleri ile elde edilir, daha sonra dışbükey eksikliklerinin dışbükey gövde özellikleri ve eksikleri bulunur, daha sonra bulunan bu eksiklikler ve dışbükey gövdenin eksiklikleri ve dışbükey gövdeleri bulunarak işlem tamamlanana kadar devam eder. Anlatılan işlemler Şekil 2.16 (a)'da gösterilmektedir. Şeklin, Şekil 2.16 (b)'da görüldüğü gibi dışbükey ağacı oluşmaktadır. Her dışbükeylik kendi alanı, köprü (dışbükeylik kesimini birleştiren çizgi) uzunluğu, azami kavis, azami kavis noktasından köprüye olan mesafe ile tanımlanmaktadır. Bu durumda şekil benzerliği bir grafik benzerliği veya silsile benzerliği haline gelmektedir.

2.9.2 Medyal Eksen

Tıpkı dışbükey gövde yöntemi gibi bölgesel bir iskelet de şekil temsili ve tanımlaması için bir yöntem olarak kullanılmaktadır. İskelet bir şeklin uzuvları boyunca medyal hatlarının bağlı bir kümesi olarak tanımlanabilir [54]. Örneğin kalın el yazısı karakterleri için iskelet, kalemin izlediği yol olarak tanımlanmaktadır. Aslında iskelet tanımlayıcısının temel fikri, şekil içerisindeki tekrar bilgilerinden kurtarılarak sadece topolojik

bilgileri ile şekil yapılarının temsilini sağlaması ve tanımlamaya yardımcı olmasıdır.

İskelet yöntemleri, Blum tarafından Medyal Eksen Transform (MAT) önerilmiştir [28]. Medyal eksen şekil içerisindeki azami büyüklükteki dairelerin merkezlerinin birleşmesidir. Bu yapı Şekil 2.17 gösterilmektedir. Şekil içerisinde koyu olarak işaretlenen çizgi dikdörtgenin iskeletini temsil etmektedir. Bu iskelet oluşturulduktan sonra belirli kriterlere bağlı olarak parçalara ayrılarak bir ağaç ya da çizge olarak temsil edilebilir. Bu adımdan sonra iskeletler arasındaki benzerlik çizgeleri arasındaki, benzerlik probleminde dönüştürülmüş olur. Medyal eksen hesaplama oldukça zorlu bir sorundur. Buna ilave olarak medyal eksen gürültüye ve şekil sınırlarının değişimlerine karşı oldukça hassas bir yöntemdir. Bütün bu olumsuzlukların giderilmesi için şekil kenarlarının polinomsal yakınlıklarını bulmak ve ön işlemlerden geçirdikten sonra iskeletinin üretilmesi çözüm olarak uygulanmaktadır. Fakat bu durumda Pavlidis [206] tarafından işaret edildiği üzere, şekil kenarlarında polinomlar üretilmesi, kendi başına şekli temsil etmek için yeterlidir. Elde edilen medyal eksen, Morse tarafından ölçek uzayında hesaplanmıştır. Bu şekilde elde edilen medyal eksen, şeklin çekirdeğini oluşturmaktadır [183].



Şekil 2.17: Dikdörtgen bir şeklin medyal eksenini. Şekil [183] alınmıştır.

2.9.3 Değerlendirme

Alan tabanlı metotlar ile sınır tabanlı metotlar benzer yaklaşımlardır. Hesaplama karmaşıklıkları ve uygulama şekillerinin farklılıklarına rağmen çizge hesaplama ile benzerlikleri bulunmaktadır. İki yöntemde de şeklin kenarlarının bilinmesi gerektiği unutulmamalıdır.

2.10. 2B Şekil Tanımlayıcıların Karşılaştırılması

Genellikle şekil temsili ve tanımlama teknikleri sınır tabanlı ve alan tabanlı olmak üzere iki grupta incelenir. Her grup kendi içerisinde bütünsel ve yapısal olmak üzere tekrar iki ana kısımda değerlendirilmektedir.

Literatürde sınır tabanlı yöntemler, alan tabanlı yöntemlere nazaran daha çok tercih edilmekte ve daha kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır. Bunun sebebi insan algısının şeklin alan özelliklerinden ziyade sınır özellikleri üzerine çalışmasıdır. Bir diğer sebep ise alan tabanlı tekniklerde şeklin iç detayları ile ilgilenilirken, sınır tabanlı tekniklerde şeklin iç özelliklerinden hiç yararlanılmamış olmasıdır. Bununla beraber sınır tabanlı metotların birçok limitleri de mevcuttur. Birinci olarak, sınır tabanlı tanımlayıcılar sadece şeklin sınırları gibi sınırlı şekil bilgisi kullandıklarından dolayı gürültü ve şeklin sınırlarındaki küçük değişikliklerden çok etkilenmektedirler. İkinci olarak ise, şekil sınırları birçok alanda tam olarak belirlenememektedir. Üçüncü olarak ise bazı uygulamalarda şeklin iç yapısı, sınır bilgilerinden çok daha önemli bilgilere sahiptir. Bu yetersizlikler alan tabanlı metotlar sayesinde aşılabilmektedir.

Yapılan araştırmalar incelendiğinde alan tabanlı metotların bazı alanlarda diğerlerine göre daha kabul gördüğü izlenmektedir. Şeklin daha fazla bilgisini kullandıkları için alan tabanlı yöntemler daha güvenilir metotlardır. Genel uygulama alanlarında kullanılabilirler ve genellikle daha doğru bir geri getirme işlemi sağlarlar. İlave olarak alan tabanlı metotlar, sınır tabanlı metotlar için genel bir problem olan şekil kusurları ile daha iyi başa çıkabilmektedirler. Alan tabanlı metotlar şeklin daha fazla özelliğini kullanmalarına rağmen problem olacak kadar büyük karmaşıklığa sahip değildir. Örnek olarak moment yöntemleri ve GFD yöntemi uygulamaları oldukça basittir.

Bütünsel metotlar ile yapısal metotlar karşılaştırıldığında ise bütünsel metotlar çok daha karmaşıktır. Yüksek indeksleme ve eşleştirme karmaşıklığı, bütünsel metotları kararlı olmayan tanımlayıcılar ailesine sokmaktadır. Örnek olarak şeklin tipik bir yapısal temsili oluşturabilmek için en az dört adet geçici parametre oluşturulmakta ve farklı işlemlerden geçirilerek elde edilmektedir: Bu işlemler, yumuşatma işlemi yapılırken eşik değer ile çalıştırma, temel öge işlemlerinde eşik değer uygulama, temel ögelerin şekil içindeki yayılımı için eşik değer belirleme ve iki şekil benzeşimi bu-

lunurken modeller ve temel öğeleri arasında eşleştirme eşiklerinin tespit edilmesidir. Aslında, yapısal yaklaşımların çoğu döndürmeden bağımsız olabilmek için özellikler arasına şekli uygun hale getirmek için açı bilgisini de yerleştirirler. Bu parametreler her bir uygulama için tekrar ayarlanmak durumundadır. Yapısal yaklaşımların avantajlarından biriside kısmi eşleştirme yapılabilmesidir. Bu özellik, şekil sınırlarının kapalı olmadığı nesnelere ve şekil üzerinde bozulmaların büyük olduğu durumlarda büyük avantaj sağlamaktadır. Kısmi eşleme aynı zamanda çok pahalı bir metot olan Hausdorff mesafesi kullanılan yöntemler için de geçerlidir. Bununla birlikte, dağınık yapıya sahip veya bağlı olmayan şekiller için Hausdorff kullanılan yöntemlerde iki şekil kenar haritaları veya farklı yöntemler ile de eşleştirilebilmektedir. Hausdorff mesafesi bir şeklin tamamı için eşleştirme yapabileceği gibi büyük bir şeklin alt resimleri içinde eşleştirmeler yapılmak için kullanılabilir.

Koordinat düzleminde çalışan şekil geri getirme tekniklerinin gürültü hassasiyeti ve yüksek veri boyutu olmak üzere iki temel yetersizliği göze çarpmaktadır. Bu problemler histogram kullanılarak, şekil momentleri yöntemi ile, ölçek uzayında ve spektrum transformlar yardımı ile dört farklı şekilde çözülebilir. Bu dört çözüm şekli arasında spektrum dönüşümleri ve özellikle Fourier dönüşümleri en çok üzerine çalışılan yöntemlerdir. Her ne kadar, histogram ve ölçek uzayı yöntemlerinin kullanımı, şekil tanıma işlemi için gürültüye karşı sağlamlığı ve bütünlüğü artırmakta ise de yüksek hesaplama karmaşıklığı ile pahalı bir işlem haline gelmektedir. Momentler, yüksek dereceli olanlarının elde edilme zorluğu veya fiziksel anlamsızlığı haricinde sağlam ve kompakt yapıdadır. Fourier dönüşüm kullanılarak şekil temsili, 1B uzayda veya 2B uzayda olsa da hesaplaması kolay, sağlam ve kompakt yapıdadır. Fourier tanımlayıcılar rastgele sıra ile oluşturulabilir oldukları halde bütün Fourier tanımlayıcıların fiziksel bir karşılığı bulunmaktadır. Genel Fourier tanımlayıcının (*GFD*) başarımı, sınır öznitelikleri alınıp şekil içi öznitelikler alınmasa veya bütünsel öznitelikler alınıp sınır öznitelikleri alınmasa bile genel şekil temsili açısından bakıldığında arzu edilen seviyelerdedir. Genel Fourier tanımlayıcıların şekli hiyerarşik temsiline başarımı, momentler gibi 1B uzayda çalışan yöntemler, ölçek uzayı veya Fourier tanımlayıcılar ile aynıdır. *GFD* kısmi eşleştirme yapamamasına karşın, bir bölümü problemlerli şekiller veya şekillerin sadece bir bölümü için uygun çözümler sunmaktadır.

Özet olarak, kısmi eşleme gereken uygulamalarda yapısal metotlar faydalı olmaktadır. Ayrıca Hausdorff mesafesi kullanan yöntemler ise kısmi ya da şeklin bir bölümü için eşleme yapılan uygulamalarda verimli olmaktadır. Her iki metot da sınırlı sayıda uygulama alanına sahiptir. Genel şekil uygulamalarında karmaşık momentler, Zernike momentleri ve GFD gibi spektrum dönüşümü olan yöntemler en iyi tercihler olarak görülmektedir. Bu yöntemlerin, MPEG-7 tarafından sunulan değerlendirme kriterleri; bulma doğruluğu, kompakt uygulanabilirlik, genellenebilirlik, düşük hesaplama karmaşıklığı, sağlamlık ve kabadan inceye doğru hiyerarşik detay temsili isteklerini karşılamaktadır. Ancak, depolama alanı bir sınır ise Fourier Tanımlayıcılar da kabul edilebilir tanımlayıcılardır.



3. 3B ŞEKİL TANIMLAYICILAR

Modelleme, sayısallaştırma ve 3B şekiller için görselleştirme tekniklerinin ilerlemesi hem internette hemde etki alanına özgü veritabanlarında 3B modellerin giderek artmasına yol açmıştır. Bu sayede 3B şekiller için ilk deneysel arama motorları geliştirilmeye başlanmış ve aktif olarak kullanılan örneklerin devreye girmesine yol açmıştır (Örnek: Kanada Ulusal Araştırma Konseyi Efes arama motoru [204], Princeton Üniversitesi 3B model arama motoru [178], Ulusal Tayvan Üniversitesi 3B model alma sistemi [245], Japonya Multimedya Milli Eğitim Enstitüsü Ogden IV sistemi [263], Yunanistan Bilişim ve Telematik Enstitüsü 3B arama sistemi, Konstanz Üniversitesi 3B model benzerlik arama motoru [275], Utrecht Üniversitesi 3B arama motoru [264]).

Çok çeşitli alanlarda şekil modellerini içeren arşivlere artık internette kolaylıkla erişilebilmektedir. Lazer tarama, kültürel mirasın kayıt arşivlerini elde etmek için Michelangelo David ve Arezzo Minerva gibi isimler tarafından uygulanmıştır [147]. Ulusal Tasarım Deposu, CAD modellerinin çevrim içi deposu, şekil değiştirici [224], CAD veritabanları için alma sistemi ve Protein Veri Bankası (Biyolojik makro moleküllerin yapısal verilerinin çevrim içi arşivi [19]) birer örnektir.

Son zamanlarda, örgü modelleri (mesh model) için ilk kriterler Princeton Üniversitesi [246], Konstanz Üniversitesi, Utrecht Üniversitesi [264] ve Purdue Üniversitesi [110] tarafından kullanılabilir hale getirilmiştir. 3B modeller için arama, metin dokümanlarının aksine kolayca yapılamamaktadır. 3B modelleri bulmak için metinsel açıklamaları ve geleneksel metin tabanlı arama motorunu kullanmak birçok durumda yeterli olamamaktadır. Kullanıcılar tarafından eklenen açıklamalar dil, kültür, yaş, cinsiyet ve diğer faktörlere bağlıdır. Kullanıcılar tarafından girilen bu bilgiler sınırlı veya belirsiz olabilirler. Benzer modellerin aranmasında 3B modellerin şekil özniteliklerini kullanan, içerik tabanlı 3B şekil alma yöntemleri metin tabanlı modellerden daha iyidir. Eşleme, iki şeklin benzerliklerinin belirlenmesi süreci olup, iki şekil arasındaki benzerlik mesafenin hesaplanmasıyla yapılır. Tamamlayıcı işlemlerini, tümleyen süreç indeksleme-

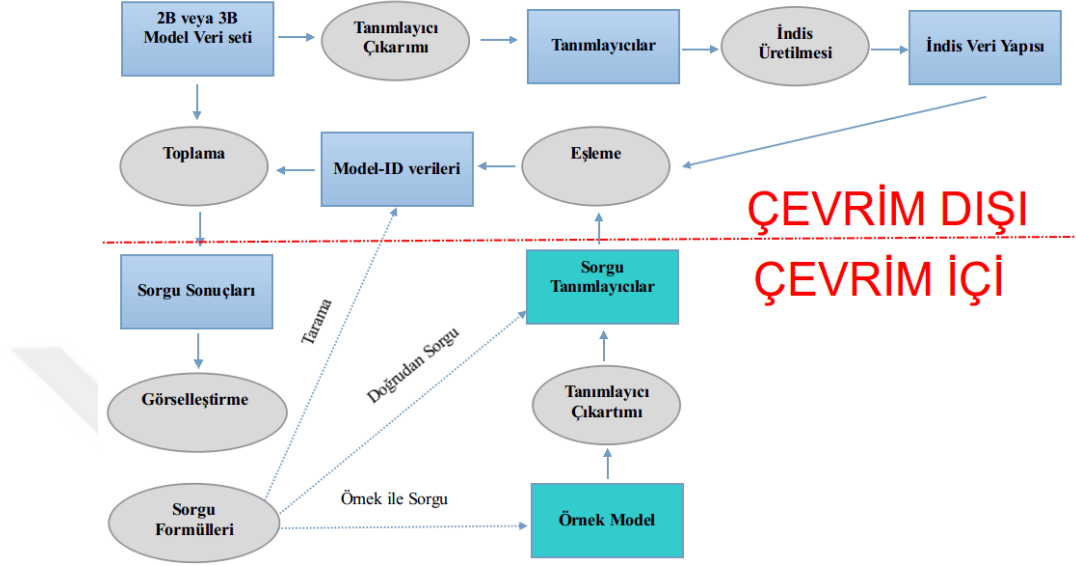
dir, ayrıca indeksleme dokümanın genelinde modelin ya da multimedya dokümanların özelliklerini tanımlama terimi olarak kullanılmıştır. Geri getirme sorgu sonuçlarının araştırılması ve dağıtılması sürecidir. Eşleme ve indeksleme genellikle geri getirme sürecinin bir parçasıdır. Son zamanlarda bazı araştırmacılar tarafından yapılan şekil tabanlı 3B şekil geri getirme ile ilgili olarak bilgisayarlı görü, nesne tanıma, geometrik modelleme, bilgisayar destekli tasarım ve mühendislik konuları ile ilgili geniş miktarda araştırmalar bulunmaktadır. Literatür araştırmaları, Besl ve Jain [21], Loncaric [162], Campbell ve Flynn [38] ve Mamic ve Bennamoun [168] tarafından sağlanmıştır.

Min [176], Kazhdan [124] ve Vrani'c [276] tarafından hazırlanan doktora tezleri 3B model geri getirmeye odaklanmıştır. Çalışmalarında şekil geri getirmenin detaylı tanımını ve 3B şekil eşleme ve sorgulama yöntemlerine bir giriş yapmışlardır. Lyer ve ark. [109], özellikle CAD ve mühendislik ile ilgili 3B şekil arama tekniklerini geniş bir şekilde incelemiştir. Cardone ve ark. [39], tarafından hazırlanan araştırmada öncelikli olarak, şekil tasarım ve üretim uygulamaları bağlamında CAD modelleri ile kıyaslamaya uygun olan şekil benzerlik modellerine odaklanılmıştır. Shilane ve ark., Princeton Şekil veri tabanını kullanarak on iki şekil eşleştirme yöntemini işlem hızı, depolama şartları açısından kıyaslamışlardır. Yukarıda bahsedilen çalışmalar yapılan çalışmalardan birkaçıdır.

3.1. Şekil Tanıma ve Temsil Teknikleri

Kavramsal olarak, 3B şekil geri getirme teknikleri Şekil 3.1'de gösterildiği gibi verinin indekslendiği çevrim dışı bölüm ve sorgunun yapıldığı çevrim içi kısım olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Veri tabanında bulunan her bir şekil için şekil tanımlayıcı ile tam olarak tanımlanmış modeller belirlenmektedir. Etkili bir çevrim içi arama işlemi için önceden tüm veritabanı şekilleri tanımlayıcı tarafından belirlenen parametreler ile indekslenmeli ve arama işlemi için algoritmalar olmalıdır. Çevrim içi hesaplama motoru, sorgu şeklini tanımlayıcı yardımı ile tanımlar ve indekslenmiş veriler içerisinde benzer modelleri eşleştirerek geri çağırılmaktadır. İki tanımlayıcı arasındaki benzerlik, iki şekil tanımlayıcı arasındaki benzemezlik ölçümü ile bulunur. Sorgu nesnesi, üç farklı yaklaşım ile ayırt edilebilmektedir. (1) sorgu nesnesi elde edilen sonuçlar içerisinde taranarak seçilebilmektedir. (2) sorgu tanımlayıcısı tarafından yapılan doğrudan sorgu ile yapılabilmektedir (Örnek: Konstanz Üniversitesi 3B model benzerlik arama

motoru [275]). (3) Herhangi bir 3B araç kullanılarak oluşturulan eskiz model örneğine benzeyen 3B nesnelerin 2B izdüşümleri eşleştirilerek tarama yapılabilir (Örnek: Princeton Üniversitesi 3B model arama motoru [178]). Sonuç olarak ise benzer modellerin listesi geri getirilebilir.



Şekil 3.1: 3B şekil tanımlama tekniklerinin kavramsal gösterimi.

3.1.1 Şekil Temsili

Şekil geri getirme sistemlerinde önemli konulardan bir tanesi şekil temsil olarak kullanılacak şekildir. İnternet üzerinden ulaşılabilen 3B modellerden bir çoğu örgü modeli formatında saklanan görsel nesnelere sahiptir. Bu alanda en çok kullanılan modelleme formatı sanal gerçeklik modelleme dilidir (Virtual Reality Modeling Language (VRML)) [93]. Bu modeller sadece görünüm olarak tasarlandıkları için dosya formatları içerisinde sadece geometrik ve görünüm öznitelikleri bulunmaktadır. Genellikle *poligon çorbaları* ile temsil edilirler ancak bu yığınlar belirli bir dizilime sahip değildir. Aynı zamanda bu modelleri oluşturan poligonlar sıkı yapılı olmadığından nesne üzerinde boşluklar olabilmektedir. Buna karşılık büyük modeller için ihtiyaca göre metotlar uygulanmaktadır.

Yüzey ve alan dolgu modeli nesnelere için birçok temsil teknikleri mevcuttur. Bunlar; belirgin yüzeyler (implicit surfaces), üretilmiş katı modeller (Constructive Solid Geometry (CSG)), ikili alan bölümlenme ağaçları (Binary Space Partitioning tree (BSP)), octrees, sınır temsili (Boundary Representation (B-Rep)), serbest formatlı yüzeyler

(free form surfaces), vb. yöntemler geri getirme metodlarına bağı olarak belirlenmektedir.

3.1.2 Ölçüm Benzerliği

İki nesne arasında benzerlik, ölçüm yapılırken tanımlayıcı çifti arasındaki benzemezlilik değeri ölçülerek yapılmaktadır. Buna rağmen benzerlik kavramı daha fazla kullanılmaktadır: bu durumda ölçümden elde edilen küçük mesafe fazla benzerlik, büyük mesafe az benzerlik anlamına gelmektedir.

3.1.3 Verimlilik

Büyük nesne koleksiyonları için sorgulama nesnesinin, veri tabanındaki tüm nesnelere ile ardışık olarak eşleştirilmesi verimli değildir. Verimli indeksleme sorgulama yapıları, etkin eşleştirme sonucuna ihtiyaç duyduğundan dolayı hızlı olmalıdır. *Örnek ile sorgulama* kavramında şekil tanımlayıcılar çevrim içi hesaplanmaktadır. Bu sebeple, etkileşimli sorgulama için şekil tanımlayıcı hesaplama işleminin yeterince hızlı olması beklenmektedir.

3.1.4 Ayrımın Gücü

Bir şekil tanımlayıcı, nesnelere birbirinden iyi bir şekilde ayıran özellikleri barındırmalıdır. Ancak iki adet üç boyutlu nesnenin şekilsel olarak benzerliklerine karar verilmesi, kullanıcı tercihine veya eldeki uygulamaya bağı olduğu için bu konu farklı bağlamlarda değişiklik göstermektedir. Örneğin CAD modelleri için genellikle bir modeldeki deliklerin sayısı gibi topolojik öznitelikler, şekildeki diğer küçük farklardan daha önemlidir. Buna karşın, genel hatlarıyla birbirine benzeyen modelleri sorgulayan bir kullanıcı için model içerisindeki küçük bir ya da daha çok deliğin varlığı o uygulama için önemli olmayabilmektedir.

3.1.5 Kısmi Eşleştirme

Kısmi eşleştirme, genel şekil eşleştirmenin aksine, bir şeklin parçalara ayrılmış bölümlerinin, belirli bir kural çerçevesinde parçalara ayrılmış diğer bölümleri ile benzer olanların tespit edilmesi şeklinde uygulanmaktadır. Kısmi eşleştirme tam olmayan şekiller için uygulama alanları bulmaktadır. Sadece bir ya da birkaç yüzü lazer ile taranmış modeller ile yapılan eşleştirme uygulamaları örnek olarak verilebilmektedir. Bir başka

örnek ise bir sahne içerisinde bulunan bir nesnenin sorgu nesnesi ile benzerliğinin tespit edilmesidir. Buna ilave olarak, kullanıcı tarafından ilgilenilen nesnenin parçaları seçilebilir veya ağırlıklandırılabilir ise, kullanıcıya eşleştirme problemleri uygulamalarında başkaca esneklikler de sağlayabilmektedir.

3.1.6 Sağlık ve Hassasiyet

Örneğin lazer taramadan elde edilmiş bir şekil için, şekil tanımlayıcının, yüzey gürültüleri ve şekil özelliklerine karşı hassas olmaması ve rastgele topolojik dejenerasyonlara karşı da sağlam olması beklenmektedir. Bu sebeple şekil sınırlarında meydana gelen küçük değişiklikler, her uygulama için tanımlayıcı oluşturma işleminde küçük değişikliklere neden olmalıdır. Öte yandan nesne şekli üzerindeki küçük değişiklikler, bu şeklin tanımlanması esnasında tanımlayıcı için küçük değişikliklere neden oluyorsa, bu tip tanımlayıcılar için hassas olmayan şekil tanımlayıcılar denilmektedir. Böyle bir durumda zayıf hassasiyet, zayıf ayırım yeteneğine sebep olacaktır. Ayrıca bir modelde çeşitli seviyelerde ayrıntı verilmiş olabilmektedir, bu durumda tanımlayıcının ayrı seviyelerde model temsili orijinal nesneden çok farklı sonuçlar oluşturmamalıdır.

3.1.7 Duruş (Pose) Normalizasyonu

Veri tabanı hakkında önceden bilgi sahibi olunmadığı durumlarda, 3B modeller 3B uzayda rastgele ölçek, oryantasyon ve konuma sahiplerdir. Çünkü tüm tanımlayıcılar, iki şekil arasındaki benzerlik ölçümleri yapılırken ölçekleme, döndürme ve taşıma işlemlerine bağımlıdır ve bu ölçümlerin sağlığı için normalizasyon işlemleri gerekebilir. Normalizasyon işlemi, normalizasyon yapılacak cismin kütle merkezine bağlıdır.

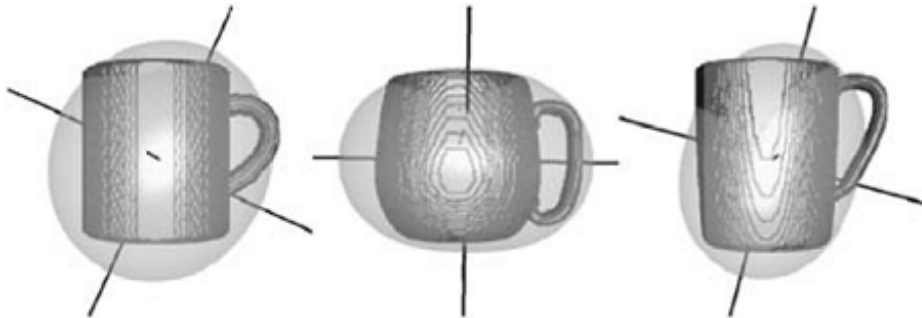
3B modellerde ölçeklendirme işlemi, cismin diğer tüm noktalarının ağırlık merkezine olan uzaklıklarının belirlenen bir sabite göre ölçeklendirilmesi ile gerçekleştirilebilmektedir. Döndürme işlemi ve normalizasyon için ise genellikle parça analizi yöntemi (Principal Component Analysis (PCA)) [213] uygulanmaktadır.

Bu metot yüzey noktalarının bir kümesi ise (Örnek: 3B bir modelin tepe noktalarını içeren bir küme gibi) temel alan bir benzeşik dönüşümü ile doğal koordinat sisteminin (x, y, z) eksenlerini hizalar. Kütle merkezinin orijine çevrilmesi işleminden sonra şekil için döndürme uygulanır. Böylelikle dönüştürülmüş noktaların büyük farklılıkları x -ekseni üzerine gelir. Daha sonra x -ekseni etrafında döndürme, y - z düzlemindeki

maksimal yayılımın y ekseninde oluşacağı şekilde uygulanır. Aynı boyuttaki üçgenlerin dikkate alınması bir problem olarak belirmektedir. Bu problem özdeş olan modeller (modelin bazı parçalarındaki hassaslıktan dolayı olan üçgen çözünürlükleri hariç) için çok farklı sonuçlara sebep olabilmektedir. Bu konuya ışık tutmak için Vranic ve Saupe [276], uygun olarak seçilmiş tepe noktalarının ağırlıklarını dikkate alırken, Paquet ve ark. [204], üçgenlerin merkezini PCA olarak nitelendirmiş ve ağırlıklarını belirlerken bu özelliği dikkate almışlardır. Daha sonra, Vranic ve Saupe [277], PCA yöntemini devamlı (continuous) PCA olarak geliştirmiş. Böylelikle ağ yüzeyindeki (sonsuz sayıda) aynı derecede alakalı tüm noktaları, ana eksenleri doğal bir koordinat sistemine getirmek için hesaplamışlardır. Son olarak, Novotni ve Klein [189], PCA hesaplamak için yüzey özellikleri yerine hacimsel özellikleri kullandılar. Fakat yaklaşımları hacimsel boşluklara sahip modellerde problemler oluşturulabilmektedir.

PCA algoritması için bir başka problem ise ana eksen yönü hakkında bilgi olmamasıdır, pozitif ya da negatif olarak x, y ve z eksenlerinin herhangi birisine taşınabilir olmasıdır. Bu durum her bir koordinat eksenini için düşünüldüğünde içinden çıkılmaz bir hal alabilmektedir. Ancak, Elad ve ark. [73], yaptıkları çalışmada modelin x, y ve z eksenlerini pozitif tarafında kalan bölümünün negatif tarafta kalandan büyük olması durumunda bu yönü pozitif kabul ederek bu sorunun üstesinden gelmişlerdir.

PCA algoritması ve türevleri poz tahmini için oldukça basit ve etkili yöntemlerdir. Ancak model özdeğerleri eşit ise, özdeğerleri etkilemeden ana eksenler arası geçiş yapılabilir. Benzer özdeğerlere sahip cisimlerde (silindirik veya küresel), kütle merkezi veya çevresi etrafında neredeyse simetrik bir kütle dağılıma işaret edebilir. Bahsedilen problem Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2: Birbirlerine benzer simetrik cisimler.

3.1.8 Başarım Ölçümleri

Şekil geri getirme algoritmalarının etkinliği; kesinlik (precision), geri getirme (recall), tam isabet yüzdesi (Bull's Eye percentage), k. aşama (k-th tier), ROC eğrisi (ROC curve), toplam başarımlar ve göreceli hata (relative error) gibi metodlar kullanılarak ölçülebilmektedir. Bu tür ölçümlerin başarımlarını seçilen sorguya, bulunduğu veri tabanına ve seçilen bağlamın doğruluğuna da bağlıdır. Bunlar şekil geri getirme yönteminin gerçek bir özelliği olmadığı için nesnel olarak kesin sonuçlar vermek her zaman mümkün olamamaktadır. Halihazırda 3B cisimler için geri getirme tekniklerinin sınanabileceği MPEG-7 veri seti özelliklerine sahip, tanımlayıcıyı iyi bir şekilde test edebilecek bir veri seti yoktur. Ancak PSB (Princeton Shape Benchmark) [246] ve MSB (McGill Shape Benchmark) [253] gibi bu yönde çeşitli girişimler yapılmıştır.

3.2. 3B Şekil Tanıma ve Temsil Teknikleri

Bu bölümde 3B şekil tanımlama teknikleri kısımları ile incelenmektedir.

3.3. Görünüm Tabanlı Şekil Tanımlayıcılar

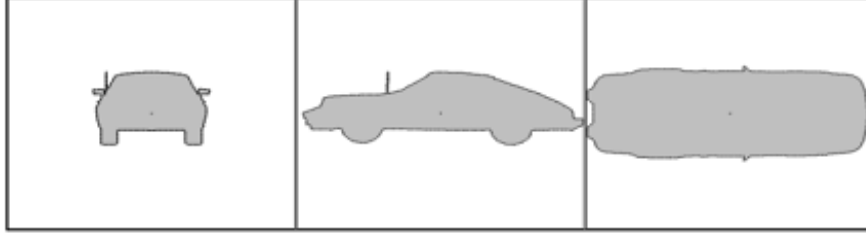
Görünüm Tabanlı yöntemler 3B nesnelerin farklı kameralar kullanılarak ya da farklı açılardan alınan benzer görünümüleri özelliklerini temel alarak çalışmaktadır. Gerçek dünyada 3B nesneler, farklı açılar ile algılanan görünümlerin, insan tarafından fiziksel olarak birleştirilmesi ile tanınmaktadır. Bu nedenle doğal yaklaşım, üç boyutlu nesnelerin izdüşümlerinin 2B olarak alınması şeklinde düşünülebilmektedir. Böylece 3B tanıma problemi iki boyutta şekil tanıma problemleri uygulayacak şekilde indirgenmektedir. Görünüm tabanlı şekil tanımlayıcıların ana fikri, her bir nesne için birçok kamera kullanılarak ya da birden fazla açı ile alınan görüntülerin benzerliğini bulmaktır. Elde edilen görüntüler sayısallaştırılmış temsilleri kullanılarak [161] veya elde edilen sınır değerleri kullanılarak yapılmaktadır [80]. Bu basamaktan sonra eskiz olarak elde bulunan ya da sorgu nesnesi ile yine aynı mantık kullanılarak elde edilen görünümlerin veri tabanında bulunan indirgenmiş nesne görünümüleri ile eşleştirilmesi şeklinde işlem gerçekleştirilmektedir. Görünüm tabanlı teknikler için asıl zorluk, şekli tanımlayabilecek yeteri kadar farklı yönden elde edilen görünümlerin depo alanını da dikkate alacak şekilde tespit edilmesidir.

Birçok açıdan elde edilmiş görünümünün veya eskizlerin aramaları için hazırlanacak yöntemin kolaylığı görünüm tabanlı yaklaşımın bir avantajıdır [80, 161]. Öte yandan görünüm tabanlı şekil geri getirme teknikleri için iki temel problem mevcuttur. Birincisi, farklı açılarda nesnenin kendi bütünlüğünü bozabilecek görüntüler elde edilmesidir. İkinci olarak ise her nesne için üretilecek çok sayıda şekil geri getirme işleminin verimini olumsuz yönde etkilemektedir. Görünüm tabanlı yöntemler için daha detaylı tartışma bölüm içerisinde yapılmaktadır.

3.3.1 Siluet Tabanlı Şekil Tanımlayıcılar

Siluet, bir nesnenin herhangi bir açıdan alınmış temel özelliklerini barındıran genellikle koyu renkli gölgesidir. Böylece siluetler şeklin bir açıdan alınan görünümü için sınır noktalarını ve o açıdan 3B nesnenin iz düşümünde bulunan özneliklerini 2B şekiller olacak şekilde içermektedir. Bu yöntemde 3B bir nesneyi temsil etmek için bir dizi siluet üretilmeli ve depolanmalıdır. Modelin bütünü kullanılarak yapılan depolama yaklaşımlarına bakıldığında bu yöntem oldukça ekonomik bir yöntemdir. Bu temsil şeklinin uygulamalarına bakıldığında nesne sınıflandırmalarında ve veri tabanında birçok siluet ile kayıtlı nesnelerin karşılaştırıldığı görülmektedir. Ancak teorik olarak bu temsil şeklinin temel problemi birçok farklı nesnenin herhangi bir bakış açısı ile alınan siluetlerinin aynı olmasıdır. Heczko ve ark., 3B nesnelere tanımlamak için paralel izdüşümleri ile üretilen siluetleri kullanan Siluet tanımlayıcı adını verdikleri bir yöntem önermişlerdir [95]. İlk olarak PCA (Principal Component Analysis) yöntemi, seçilen ekseninde oluşturulan birim küp içine sığacak şekilde 3B nesnelerin normalizasyonu için uygulanmaktadır. Daha sonra seçilen eksene dik olacak şekilde oluşturulan üç düzlem üzerine paralel izdüşümleri hesaplanacak şekilde ayarlanır. Tanımlayıcılar, üç düzlem için oluşturulan sınırlar için Fourier eklenerek elde edilir. Bu tanımlayıcıların elde edilebilmesi için, kullanılacak olan siluet, siluet üzerinden eşit aralıklarla alınan bir dizi nokta ile örneklenir ve nesne merkezinden alınan ardışık sınır noktaları arasındaki Euclidean mesafesi kullanılarak hesaplanır. Örnekleme ile alınan bu değerler Fourier dönüşümü ile oluşturulmaktadır. Üç düzlem ile oluşturulan şekil sınırının siluet tanımlayıcısı, düşük frekanslı Fourier sabitlerinin birleştirilmesi ile elde edilir. PCA ile yapılan ön işlemler sayesinde, tanımlayıcı duruştan ve ölçekten bağımsızdır.

Şekil 3.3'de bir araba için sınır şekillerini göstermektedir. Bu şekil tanımlayıcının et-



Şekil 3.3: Seçilen eksene normalize edilen araba için seçilen yön dikkate alınarak üç düzlemden silüetleri alınmıştır. Şekil [37]'den alınmıştır.

kinliği farklı deneyler ile de çalışılmıştır [277]. Buna ilave olarak düzlemlerin izdüşümü alınarak elde edilme fikri kullanılarak bu amaçla yapılmış 3B geri getirme yöntemleri birçok mesafe hesaplama fonksiyonu kullanılarak şekil çiftleri arasındaki benzerlik bulunarak da yapılabilmektedir [256]. Mesafe fonksiyonları Fourier dönüşüm yapıldıktan sonra elde edilen vektörler arasındaki mesafe veya izdüşümleri arasında yapılan mesafe ölçümleri ile hesaplanabilmektedir. Bu yöntem farklı geometrik temsillerin kullanıldığı birçok endüstriyel muayene ve geri getirme sisteminde kullanılabilir. Ansary ve ark. karakteristik görünüm benzerliğini temel alan Adaptif Görünüm Kümelemesi (Adaptive Views Clustering (AVC)) ismini verdikleri bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemin amacı optimal bir seçin ile 3B bir modeli en iyi tanımlayabilecek 2B görünüm elde etmektir. Bu yöntem 3B nesne geri getirme işlemi için Bayesian olasılıkları kullanarak yapmaktadır.

3.3.2 Derin Tampon (Depth Buffer)

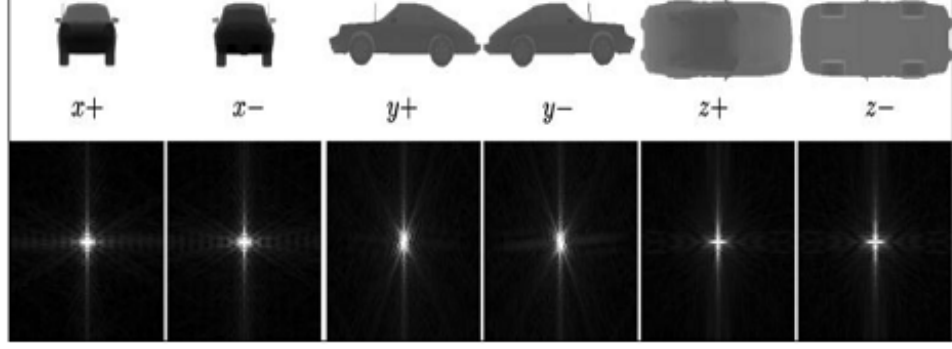
Siluet tanımlayıcı gibi birim küp içerisine ölçeklenen ve yönlendirilen nitelikli bir tanımlayıcı da derin ara bellek (depth buffer) tanımlayıcısıdır [202]. Seçilen ana eksen Siluet yönteminden ayrı olarak üç farklı değil altı farklı izdüşümü için paralel düzlemlerden alınarak gri-ölçekli şekiller elde edilir. Bu yöntem de Siluet tanımlayıcısı gibi tanımlanmaktadır. Görüş açısına dik olacak şekilde şeklin görünümü ana ekseninde oluşturulan küpün kenarlarından alınarak 8-bit seviyeye sahip gri-ölçekli şekiller oluşturulmaktadır. Her altı izdüşümünden oluşturulan şekle 2B Fourier dönüşümü uygulandıktan sonra elde edilen düşük frekanslı ilk sabitler yardımı ile derin ara bellek vektörü oluşturulur. Bu yöntemin gösterimi Şekil 3.4 kullanılarak anlatılmaktadır. Her bir şeklin Fourier dönüşümü ona karşılık gelen gösterim ile temsil edilmektedir. Buna

ilave olarak derin ara bellek ya da z-ara bellek fikri, derin ara bellek uygulamalarında bu altı şekil içinde kullanılabilir. Anlatılan tanımlayıcı [276] çalışmasında detaylı olarak anlatılmaktadır. Bustos ve ark. tarafından yapılan çalışmalarda [36, 247] PSB (Princeton Shape Benchmark) kullanılarak başarımlar testleri yapılmıştır.

Obuchi ve ark. [193], Çoklu Yönelimli Derin Fourier Tanımlayıcı (The Multiple Orientation Depth Fourier Descriptor) ismini verdikleri, çokgen yığınlarından oluşan şekiller için bir şekil tanımlayıcı önermişlerdir. Veri setleri için 42 derin-ara bellek şekli ile hesaplanmış, taşıma ve ölçekten bağımsız 3B modellerden oluşmaktadır. Modellerin hemen hemen tüm görünümünü içeren 42 farklı görüş açısı ile yaklaşık olarak modelin her cephesini kapsayan görüntü kümedir. Daha sonra her bir görüş noktası için bir öznitelik vektörü oluşturulmaktadır. Her bir görünüm için oluşturulan şekil özellikleri döndürmeden bağımsız genel Fourier Tanımlayıcı 2B şekiller için Zhang ve ark. [298], tarafından geliştirilmiştir. 42 özellikten oluşan öznitelikler vektörü 3B modeller için çoklu yönelimli şekil tanımlayıcı içerir. İki nesne arasındaki benzerliğin bulunması bir nesnenin tüm görünümü ile diğer nesnenin tüm görünümünün arasındaki mesafelerin minimum değerlerinin toplanması ile bulunur. Bu tanımlayıcının, yine Obuchi ve ark. tarafından önerilen Mutlak-Açı Mesafesi (Absolute-Angle Distance (AAD)) [192] tanımlayıcısından çok daha iyi bir başarıma sahip olduğu, Tangelder ve Velkamp [265] tarafından 1,213 model içeren bir set ile yaptıkları deneylerde gösterilmiştir. Ancak, D2 şekil dağılım yaklaşımından çok daha iyi geri getirme doğruluğuna sahip olmasına rağmen çok daha yavaş olduğu incelenmiştir [200]. Bustos ve ark. [37], derin-ara bellek yönteminin iyi bir geri getirme performansı olduğunu göstermişler ve kendi veri setlerine nazaran sonuçlarının daha iyi olduğunu göstermişlerdir.

3.3.3 Dönme (Spin) Görünümleri

Johnson ve Hebert [118], bir dizi dönüm görünümü kullanarak 3B nesnelere karakterize edebilen bir 3B tanımlayıcı önermişlerdir. Bu tanımlayıcının tasarımı taşıma ve döndürme dönüşümlerinden bağımsız olarak yapılmıştır. Dönüm görünümü bir model üzerinden seçilen bir noktanın hesaplanmış 2B histogramıdır. Ağlardan oluşan bir modelde, modeli oluşturulan ağların her bir kenarı için bir dönüm görünümü oluşturulmaktadır. Her kenarın orta noktası olarak seçilen noktadan her bir yüzey için bir yüzey normali oluşturulur. Maksimum mesafe D değerine sahip bir nokta kümesi yüzey nor-



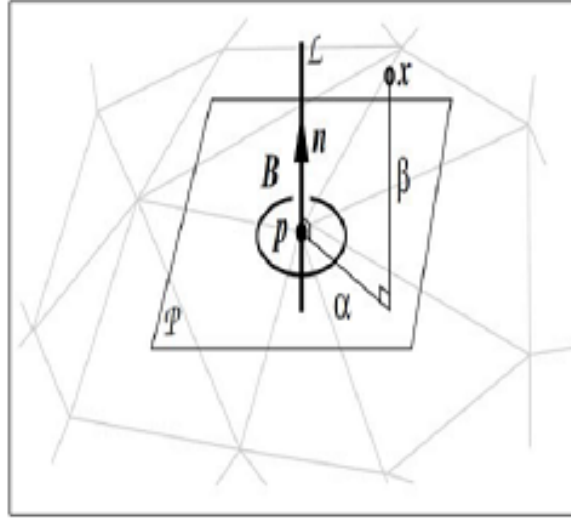
Şekil 3.4: Seçilen eksene normalize edilen araba için seçilen yön dikkate alınarak üç düzlemden silüetleri alınmıştır. İkinci satırda ise 6 şekil için 2B Fourier dönüşümleri gösterilmektedir. Şekil [37]'den alınmıştır.

malleri ile seçilen noktalar arasında oluşturulan çizgilerin açıları ve bu çizgiler tanımlayıcıya katkı yapan değerler olarak tanımlanmaktadır. Daha sonra kenar orta noktaları ve yüzey normalleri arasındaki dikey mesafeler ve orta nokta düzlemlerinin tanjantı hesaplanarak 2B bir histogram oluşturulur. Oluşturulan histogram aynı zamanda bir görünüm olarak da kullanılabilir.

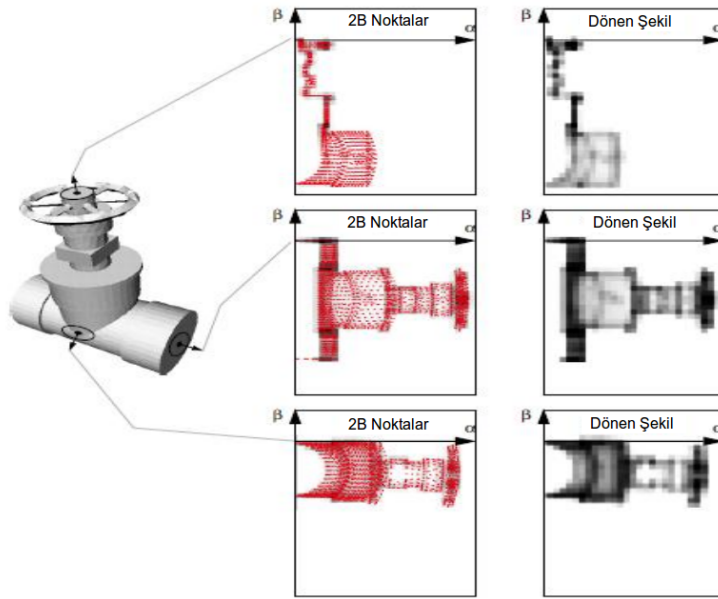
Araştırmacılar histogram üzerindeki etkiyi ve gürültüyü azaltabilmek için bilinear bir filtre uygulamayı önermişlerdir. Ölçekten etkilenmeyi azaltmak için ise mesafeleri birim mesafe olacak şekilde işlemler yapılabilir. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'de dönme görünümlerinin elde edilmelerini anlatmaktadır. İki nesne karşılaştırılırken oluşturulan dönüm görünümlerinin eşleştirilmeleri çok pahalı işlemlerdir. Simetrik ya da asimetrik görünüme yakın nesnelere elde edilen dönme görünümleri ayırt ediciliği azaltmaktadır. Bu problemlerin üstesinden gelmek için Johnson ve Hebert [118], boyut indirgeme için bir dizi sıkıştırma önermişlerdir. Bu yöntem karmaşık üç boyutlu nesnelere de uygulanabilir olmasına karşın hesaplama karmaşıklığı ve temsil karmaşıklığından dolayı uygulanması güçtür.

De Alarcon ve ark. [56], da dönme görünümlerini 3B nesne geri getirme için uygulamışlardır. Çokgen ağ olarak tanımlanmış modeller için çok sayıda dönme görünümleri oluşturularak daha sonra Kendisi Organize Edilmiş Harita (Self Organizing Map (SOM)) algoritması kullanılarak her model için gereken dönme görünüm sayısını düşük sayıya indirgemişlerdir. Buna ilave olarak, indeklemeye veri tabanında kullanmak için oluşturdukları dönüm görünümlerini k-ortalama kümesi kullanarak kümelmişlerdir. Bu teknik ile tanımlayıcı karşılaştırmalarında kullanılacak dönüm görünümleri sayısı

indirgenebilmektedir. Yapılan çalışmada verilen sonuçlar küçük veri setleri üzerinden elde edilen sonuçlar olarak verilmiştir.



Şekil 3.5: Histogram olarak dönme görünümü oluşturmak için seçilen nokta ve meydana gelen açılar. Şekil [117]'den alınmıştır.



Şekil 3.6: 3B modelden oluşturulan dönme görünülerinden seçilenler. Şekil [116]'den alınmıştır.

Ayrıca, Assfalg ve ark. [13], her bir nesneyi temsil eden dönme görünüm sayılarını indirmek için bazı ön işlemler yapmışlardır. Özellikle alan tabanlı tanımlayıcı olan İçerik Tabanlı Görüntü Geri Getirme (Content-Based Image Retrieval (CBIR)) için tarif edildiği gibi dönme görünülerini gri-ölçekli almayı tavsiye etmektedirler. Bulanık kümeleme kullanarak, kümeleme mesafe fonksiyonu ile önerilen şekilde dönme

görünüm sayılarını azaltmışlardır.

3.3.4 Ölçek Bağımsız Öznitelik Dönüşümü (Scale Invariant Feature Transform (SIFT))

Ölçek Bağımsız Öznitelik Dönüşümü (Scale Invariant Feature Transform (SIFT)) [164] bir resmin özelliklerini büyük yerel öznitelik vektörlerine dönüştüren bir öznitelik çıkartım yöntemidir. Yöntem taşıma, ölçekleme ve döndürmeden bağımsız ve aydınlatma etkileri, 3B izdüşümü ve benzeşik etkilerden fazlaca etkilenmeyen özelliktedir. SIFT temel olarak dört basamaktan oluşmaktadır. Bunlar; (1) ölçek uzay tepe noktalarının seçimi, (2) anahtar nokta yerini belirleme, (3) yönelim atama, (4) anahtar nokta tanımlayıcı. Birinci basamakta, yönelimden ve ölçekten bağımsız önemli noktaların tespiti için bütün ölçekler ve görüntü yerleşimleri taranır. İkinci basamakta ise, kararlılık ölçümleri esas alınarak anahtar noktalar seçilir. Üçüncü basamakta, yerel görüntü yönleri esas alınarak anahtar nokta yerleşimlerinin yönelimleri tespit edilir. Son basamakta ise daha sonra tüm şekil temsili için kullanılacak olan her bir anahtar nokta için şekil eğimlerini esas alan yerel şekil tanımlayıcılar oluşturulur. 3B şekillerin, 2B şekiller oluşturularak elde edilen temsilleri ile karşılaştırılmaları için her bir model için binlerce öznitelik üretilebilmekte ve SIFT algoritması kullanılabilir.

Ke ve Sukthankar [127], SIFT algoritması için yerel şekil tanımlayıcılara alternatif bir temsil yöntemi olan PCA-SIFT yöntemi önermişlerdir. SIFT metodunun yumuşatılmış ağırlıklı histogramını kullanmak yerine parça analizi yöntemi (Principal Components Analysis (PCA)) uygulanarak özellik noktalarının komşularının eğimlerinin normalize edilmesi için kullanılmaktadır. Araştırmacılar tarafından yapılan deneylere bağlı olarak PCA esas alınarak elde edilen özellikler yerel tanımlayıcılar için daha ayırt edici, şekil bozukluklarına karşı daha sağlam ve standart SIFT temsiline oranla daha kompakt yapıdadır.

3B şekil geri getirme işlemleri için bir takım çalışmalar SIFT tekniği kullanmaktadır. Li ve ark. [148], altı yönden 2B şekilleri almak için duruş normalizasyonu belirleme işleminde sürekli parça analizi yöntemi (Continuous Principal Component Analysis (CPCA)) kullanarak 3B modelin altı yönden 2B özelliklerini çıkarmışlardır. Elde edilen 2B şekil özniteliklerini içeren vektörün boyutları, özdeğerleri kullanılarak indir-

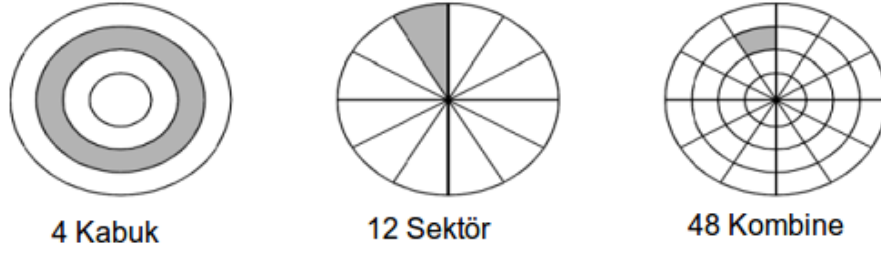
genmektedir. Daha sonra radyal transform ve küresel transform kullanılarak dönüşüm tabanlı öznitelikler çıkarılır. 2B görüntüleri ve dönüşüm tabanlı özniteliklerinin ağırlıklı toplamları ile sorgu şekli ve veri tabanı modelleri karşılaştırılır.

Hua ve ark. [102], 3B model geri getirme işlemi için çoklu-görünüm SIFT özelliklerini kullanmışlardır. İlk olarak, 3B modelin 2B görüntüleri oluşturmak için izdüşümü çoklu yönlerden elde edilmektedir. İkinci olarak, elde edilen 2B görüntülerden SIFT öznitelikleri çıkarılır. Daha sonra k-ortalama kümeleme algoritması ile belirlenen özellikler ve bununla karşılık gelen SIFT özniteliklerinden oluşan kod kitabı üretilmektedir. Son olarak histogramın yapısı ile ilişkili SIFT özniteliklerinin basitleştirilmiş vektörü üretilmektedir. Sorgu modeli ile var olan diğer modelleri karşılaştırmak için basitleştirilmiş vektörler arasındaki mesafe hesaplanır. Ayrıca, Sfikas ve ark. [258], 3B modellerin kısmi görüntülerinin bir takım sorgu temsillerini kullanarak 3B nesnelere geri getirme işlemleri için panoramik görüntülerinin SIFT tanımlayıcılarını kullanmaktadır. Genellikle SIFT tabanlı 3B tanımlayıcılar, kısmi ve bütünsel şekiller için yapılan işlemlerde, nesne geri getirme yöntemleri başarımlarından doyumuna ulaşmış tanımlayıcılardır.

3.3.5 Şekil Histogramları

Ankerst ve ark. [5] tarafından, şekil eşleştirme tekniklerini, protein eşleştirme işlemlerinde kullanmak üzere; kütle merkezinden şekil yüzeyine olan mesafelerin ve küresel açıların hesaplanmasıyla elde edilen 3B modeller için bir yöntem kullanmışlardır. Sadece şekil yüzeyinden mesafeler kullanıldığı durumda kabuk tanımlayıcı olarak toplanır, sadece küresel açıları elde edildiğinde ise sektör tanımlayıcı olarak belirir ancak her ikisi birlikte kullanıldığında ise birleşik tanımlayıcı (spiderweb) olarak tanımlanmaktadır. Şekil histogram teknikleri, 3B model yapılarını parçalama tabanlı tekniklerdir. Şeklin bütün boşlukları, histogram çubuklarını oluşturacak şekilde hacimsel olarak ayrı hücrelere ayrılır. 3B modeller bir ön işlem olarak taşımadan bağımsızlık için merkeze gelecek şekilde taşınır. Şekil 3.7'de hacim parçalama teknikleri gösterilmektedir.

Şekil histogramları, hesaplama farklılığına göre 3 temel grupta incelenmektedir. Bunlar; a) Kabuk Tanımlayıcılar: Şekil hacmi merkez noktasının üzerine eklenecek şe-



Şekil 3.7: Kabuklar ve sektörler şekil histogramı için basit olarak gösterilmektedir. Her birisi için iki boyutta temsilleri görülmektedir. Şekil [5]'den alınmıştır.

kilde tek boyutlu bir histogram oluşturmak üzere kabuklar ilave edilerek doldurulur. Bu temsil şekil taşındığında ya da döndürüldüğünde kütle merkezi değişmediğinden dolayı taşımadan ve döndürme işlemlerinden bağımsızdır. Bununla birlikte ölçekleme için normalizasyona ihtiyaç duymaktadır. Kabuk tanımlayıcısının bu yaklaşımından dolayı, döndürmeden ve taşımadan bağımsız tanımlayıcılar için belirgin bir örnektir. Ayrıca 2B döndürme için de geri getirme performansını arttırmak için kullanılabilir. Ayrıca 2B döndürme için de geri getirme performansını arttırmak için kullanılabilir.

b) Sektör Tanımlayıcı: Şekil hacmi merkez noktasından başlayacak şekilde küresel olarak 3B şekil içerisinde sektörlere ayrılarak küresel bir histogram oluşturulur. Histogram oluşturulması işleminde küresel açılar bir dağılım fonksiyonu için kullanılmaktadır. Bu temsil ile şekil ölçeklendiğinde veya döndürüldüğünde herhangi bir bilgi kaybı olmadan işlem tamamlanmaktadır.

c) Birleşik Tanımlayıcı: Kabuk ve sektör tanımlayıcılarının birleşimi ile 3B modeller için Ankerst ve ark. tarafından küresel fonksiyonlar ve kabukların kesişimi ile elde edilmiştir. Her bir küresel fonksiyon şekil kütle merkez noktasından oluşturulan küresel kabuklar ile sektörleri kesişimleri ile elde edilen bilgiler kullanılacak şekilde temsil edilir. Bu birleştirilmiş tanımlayıcı ayrı ayrı sektör tanımlayıcısı ve kabuk tanımlayıcısına göre, şekil hakkında daha detaylı temsil bilgisi ve daha yüksek boyutlu bilgi içermektedir. İşlemlerde kullanılan bölümlendirme parametresi çözünürlüğü uygulamaların özelliklerine göre ayarlanabilmektedir. Sonuç olarak şekil ile birlikte üç boyutlu olarak hareket edebilen bir tanımlayıcı oluşmaktadır.

Shilane ve ark. [246] tarafından, bu tanımlayıcılar değerlendirilmiş ve birleşik tanımlayıcı diğerlerinden oldukça iyi sonuçlar aldığı ve kabuk tanımlayıcısının bunlardan en zayıf olduğu değerlendirilmektedir. Yine aynı çalışmada sektör tanımlayıcısının bir

sonraki bölümde değinilecek olan D2 şekil dağılımlarından daha iyi sonuçlar verdiği ancak sektör tanımlayıcısından daha iyi olmadığı değerlendirilmiştir. Şekil Histogramının ayrı bir versiyonu olan ve voksel hücrelerinin doluluk oranlarının değerlerini kullanan tanımlayıcılar da yapılmıştır [128, 134, 189]. Benzer olarak teknik çizimler için arama tekniği olarak histogram kullanan yaklaşımlar önerilmektedir [135]. Ön işlem basamağı olarak, modeller standart koordinat sisteminde normalize edilerek vokseli forma çevrilmiştir. 3B şekil hacminin tamamı eksene paralel olacak şekilde parçalara ayrılmaktadır. Bu parçalardan her birisi benzerlik modelinde histogram çubuklarını oluşturacak şekilde kullanılmaktadırlar. Şekil parçalarının sayılarını ölçeklendirerek, öznitelik vektörünün boyutsal büyüklüğü kontrol edilmektedir. Ayrıca, vektör boyutları ve doğruluk başarımı ile boyutlar arasında bir denge bulunmaktadır.

3.3.6 3B Şekil Bağlamı

Körtgen ve ark. [133], Şekil Histogramı [6] ile Şekil Bağlamı [18] konularında yapılan çalışmaları birleştirerek, 3B şekil tanımlayıcı olarak kullanılabilen 3B Şekil Bağlamı olarak anılan bir geri getirme ve eşleştirme çalışması yapmışlardır. Bir noktanın yüzey noktaları koordinatlarına izafiyeti, şekil bağlamı olarak adlandırılmaktadır. Histogram çubukları, model merkezinden çizilen kabukların, model ile örtüşmeleri ve merkezden beliren sektörler olarak tanımlanmaktadır. Tanımlanan bu histogram, şekil bağlamı olarak bilinmektedir. Eşleştirme işlemi bir yerel eşleştirme ve bir de bütünsel eşleştirmeden oluşmaktadır. Yerel eşleştirme basamağında, bütün p noktaları için diğer şekilde en iyi eşleştirme noktası q noktası bulunur. Bütünsel eşleştirme basamağında ise karşılıklı olarak eşleşen noktaları bulma işlemi yapılmaktadır. Bu çalışmada karşılaştırılan yöntemlere göre, 3B şekil bağlamı yöntemi az etkili bir yöntem olup, etkili indeksleme başarımı düşük ve eşleştirme ölçüm sonuçları üçgen eşitsizliğine aykırıdır.

3.4. Geometri Tabanlı Şekil Tanımlayıcılar

Geometri tabanlı metotlar, 3B şekil tanımlayıcı tasarımında birçok geometrik belirleyici parametre ve değeri kullanmaktadır. Hacim, yüzey alanı, şekil eğrilikleri veya şekilden çıkarılabilecek diğer sayısal değerler gibi bilgiler geometrik olarak kullanılan özniteliklerdir. Yüzey alanının hacme oranı, bütünlük (cisim hacminin hacim küpüne

oranı gibi), buruşukluk (cisim yüzey alanının aynı hacme sahip küre yüzey alanına oranı), gövde dışbükeylik öznitelikleri, kasama kutusu oranı ve Euler sayıları gibi öznitelikleri ise cisimden elde edilen belirleyici oran değerlerine örneklerdir. Bütün bu parametreler ve oranlar cismin karakteristiğini belirleyen yerel ve bütünsel değerlerdir. Genel olarak bütünsel yöntemler, hesaplama karmaşıklığı açısından başarılıdır ancak kısmi eşleme yapılmasına olanak tanımamaktadır. Buna karşın yerel öznitelikler kullanan metotlar hesaplama karmaşıklığı bakımından zor ancak kısmi eşleme için uygun olarak değerlendirilmektedir. Bütünsel tanımlayıcılar 3B nesnelerin karakteristiğini bir bütün olarak tanımlar. Şeklin genel yapısını anlatan yaklaşımlar ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır.

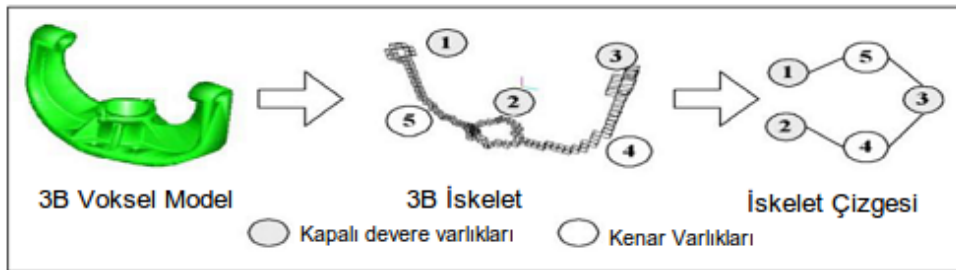
Yerel öznitelikler kullanan metotlar, yüzey üzerindeki noktaların komşulukları ve 3B nesnenin o bölgedeki özellikleri ile ilgilenirler. Şeklin eğimliliği bütünsel parametreler ile kullanılabilen yerel bir özelliğidir. Bu bağlamda incelendiği zaman yerel özellikler bir grup bütünsel özellikler de başka bir grup olarak nesneyi tanımlamak üzere birlikte kullanılabilir. Bazı yöntemler kısmi eşlemede kullanılabilirliği için yerel özelliklere sahip iken bütünsel öznitelikler ile birleştirilmeden kullanılmalıdır. Hesaplama karmaşıklığına rağmen yerel öznitelikler kullanılarak tasarlanan tanımlayıcılar nesne ile ilgili detaylı bilgiler toplamakta ve çok başarılı sonuçlar vermektedir. Bu tip metotlar çoğunlukla dağınık ortamlar ve yüzey eşleştirme işlemlerinde kullanılmaktadır. Bazıları ise 3B nesne tanıma ve geri getirme problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. Bu metotlar modeller ile ilgili ön bilgiye ihtiyaç duymadan ve poz normalizasyonu yapılmadan çalışmaktadırlar. Bu bölümde, literatürde bulunan 3B nesne geri getirme işlemleri için tanımlanan geometrik tabanlı yöntemler incelenecektir.

3.4.1 İskelet Çizgiler (Skeletal Graphs)

Nesnelerden elde edilen iskeletlerin, nesnenin yapısı ile alakalı bütün temel bilgileri varoluştan içerdiği kabul edilmektedir. Bu yöntem nesne analizi, sıkıştırma teknikleri ve animasyon teknikleri için sıklıkla kullanılmaktadır. İskelet çizge tabanlı teknikler, bir modelin iskeletini oluşturarak çizgeye dönüştürürler ve dönüştürülen bu çizgeyi ise şekil tanımlayıcısı olarak kullanırlar. İskelet kavramı ilk olarak Blum [27] tarafından ortaya atılmıştır. İskelet 2B için şekil sınırlarının orta noktaları iken 3B nesneler için şekil yüzeylerinin orta noktalarıdır. 3B nesne geri getirme işlemlerinde iskelet kul-

lanmak için, uygun iskeletlendirme algoritmaları ve iskelet benzerlik fonksiyonlarının tanımlanması gereklidir. İskeletlendirme işlemlerinin, mesafe dönüşümü [29], inceltme [140], veya Voronoi tabanlı yöntemler [191] gibi yöntemler önerilmiştir. İlave olarak, eğri iskeletlendirme teknikleri ile 3B modellerin medyal eksen temsillerini yapmak için de çalışmalar yapılmıştır [60]. İskelet çizgesi, iskeletlendirme işleminden elde edilen birçok bilgiyi çizge veri yapısında depolamaktadır. İskelet çizge tabanlı metotların, B-Rep çizge modellerine göre topolojik bilgiyi daha küçük boyutta depolayabilmeleri büyük bir avantaj olarak değerlendirilebilir. Bundan dolayı çok küçük bir hesaplama karmaşıklığı ile alt çizge eş yapılığın kullanılabilirliği artmaktadır. İlave olarak daha ileri düzey bir karşılaştırma için yerel öznitelikler de kullanılabilir. İnceltme kullanılarak yapılan iskeletlendirme teknikleri, 3B mühendislik modelleri için uygun olmayabilir. 3B modellerin topolojik ve geometrik özniteliklerini birlikte içeren iskelet şekil tanımlayıcı, Sundar ve ark. tarafından önerilmiştir [262]. İlk olarak, 3B nesne voksellendikten sonra mesafe dönüşüm tabanlı bir inceltme algoritması ile iskeleti çıkarılmaktadır [82]. Sonra, minimum yayılan ağaç algoritması uygulanarak iskelet noktaları yönsüz çevrimsiz şekil çizgesine dönüştürülür.

Son olarak, orijinal iskelet şeklindeki her bir bölümün bir düğüm noktası olarak temsil edildiği bu çizgede inceltme parametrelerinin farklı genlikte olanları gibi yapılar kullanılarak hiyerarşik bir çizge yapısı elde edilir. Her düğümde iki imza vektörü taşınır. Birincisi, geometrik iskelet bölümü üzerindeki radyal dağılımları içeren imza vektörü iken, ikincisi etkili bir indeks olanağı da sağlayan alt çizgelerin kökten dağılım hiyerarşisini içeren topolojik imza vektörüdür. İskelet çizge yaklaşımı Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3.8: İskelet çizge yaklaşımı görünümü. Şekil [109]’den alınmıştır.

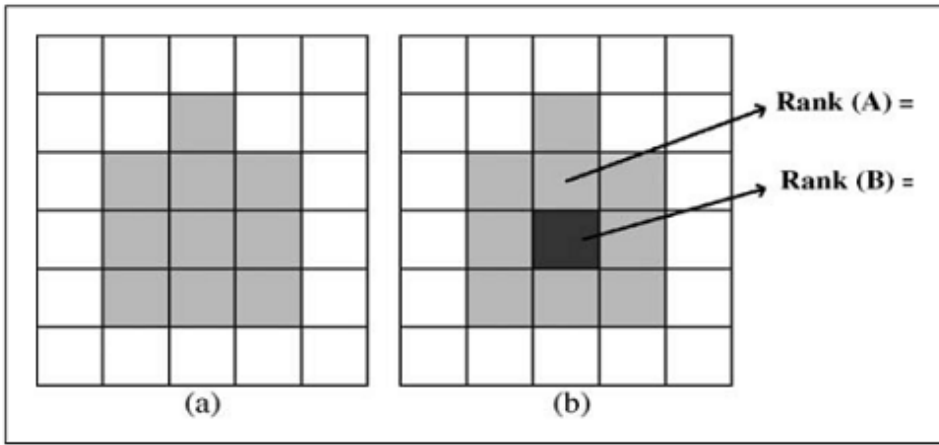
Bu yaklaşımda verilen iki 3B model arasındaki benzerliğin ölçülebilmesi için, bu iki modeli temsil eden hiyerarşik iskelet çizgelerinin eşleştirilmesi yapılmaktadır. Ayrıca,

bu yöntemin ana avantajı kısmi eşleme ve kısmi 3B şekillerin eşleştirilmesindeki başarımıdır.

Iyer ve ark. [111] ve Lou ve ark. [163] iskeletlendirme yöntemi olarak inceltme kullanmışlardır. 3B model öncelikle vokselli yapıya dönüştürülür ve sonra inceltilerek iskeletlendirilir. İnceltilecek oluşturulan şekil iskelet çizge yapısına çevrilmiştir. İskeletin çizge yapısı; düğümler, kenarlar ve döngülerden oluşmaktadır. İskelet içerisindeki her kenar ayrı bir geometrik özelliği dönüştürmektedir. Buna göre her bir döngü, şekildeki bir deliğe böylece tamamı bütün şeklin tamamını temsil eder. İskeletsel çizgeler modelin geometrisini ve topolojisini içermekte ve B-Rep çizgeleri ve hassas olunamayacak küçük detayları da kayıp olmamaktadır. İlave olarak, moment değişmezleri, geometri ve voksel parametreler, öznitelik vektörleri çizge parametreleri olarak veri tabanında depolanmaktadır. Sorgulama işlemi çizge tabanlı bir sorgulama kullanılarak öznitelikler vektörü uygulanarak yapılmaktadır. Veritabanları, 150 model barındırmaktadır ve benzerlik testlerini bu veri seti üzerinde yapmaktadır. Bununla birlikte inceltme yapılarak oluşturulan iskelet özellikle teknik çizimler için çok uygulanabilir değildir. Bu nedenle çok katmanlı sorgulama yaklaşımları kullanılarak bu tip dezavantajların üstesinden gelinmektedir. Farklı basamaklarda bütünsel öznitelikler ve yerel öznitelikler kullanılarak yapılmaktadır.

Kim ve ark. [129], 3B modellerin iskeletlerinin dönüşümü için medyal eksen dönüşümü yaparak bir yöntem kullanmışlardır. Sabit bir çözünürlük standardı kullanılarak üçgenler şeklinde tasvir edilen nesnelere derecelendirilen vokselleştirilerek oluşturulmaktadır. Voksellerin derecelerini o derece vokselleri saran diğer voksel katları belirler. Örnek olarak, Şekil 3.9 A noktasının derecesi 0 iken B noktasının derecesi 1'dir. Böylece, şekil iskeletleri A ve B noktasını içermektedir. Bu noktalar düğüm olarak isimlendirilir. İskelet içindeki her bir nokta için, k derecesine sahip bir nokta etrafında en büyük derecesi K olan k adet genişleme seviyesi vardır. Genişleme noktaları tüm noktalar için uygulandığında iskeletten nesne tekrar oluşturulabilmektedir. Bununla beraber düşük dereceli tüm noktalar için, zaten yüksek dereceli seviyelerin elemanı olan noktaların alınmaması için dikkat edilmelidir. Bu metot doğrudan voksellemiş 3B modellerden yapılabilmektedir. Nihayetinde genişlemelerden elde edilen birleştirilmiş düğümler ile çizge oluşturulur. Bu durumda her düğüm genişleme esnasında

kendi derecesinde olan tüm vokseller hakkında bilgi içermektedir. İki düğümde aynı voksellerin olması durumunda birleştirme işlemi esnasında bu vokseller bir üst dereceye yükseltirler. Çizgenin boyutunu azaltmak için birleştirilecek düğümlerin belirlenmesi için bir eşik değer belirlenerek düğüm boyutları seçilir. Yapılan deneyler eşik değer tercih edilerek yapılan işlemlerin dikkate değer oranda çizge boyutunda azaltma yaptığını ortaya koymaktadır. Bu yöntem vokselleme çözünürlüğü problemlerini ortaya çıkarabilmektedir. Vokselizasyon esnasındaki çözünürlük farkları değişen çizgelerin oluşmasına neden olabilmektedir. Bu problemi çözmek için bütün modeller için sabit çözünürlük değerleri uygulanmaktadır ve üretilen çizgeler kullanıcı algısını tam olarak yansıtmayabilmektedir.



Şekil 3.9: İskelet içerisindeki noktaların dereceleri ilgili örnek bir gösterim. Şekil [109]'den alınmıştır.

Nagasaka ve ark. [186], 3B modelleri öncelikle voksel modele çeviren daha sonra mesafe dönüşümü kullanarak çizgi iskeleti oluşturan bir metot önermişlerdir. Modellerin iskeletlerini oluştururken voksellerin yüzey ile mesafelerini ölçmek için her bir voksel için tanımlanmış D_s mesafe ölçümü fonksiyonu kullanmışlardır. Maksimum D_s değerine sahip vokseller model iskeletini oluştururlar ve çizgi, dairesel halkalar ve üçgenlerden oluşan üç tip olarak tanımlanırlar. Oluşan bu iskeletler bir mesafe değeri ile karşılıklı olarak birbirlerine bağlı olabilir ya da bağlı olmayabilir. Her iskelet D_s dağılımı, değer ve bağlantı değeri ile bağlı dokuz adet öznitelik içermektedir. 36 adet benzerlik değeri ile parçalar iskeletleri üzerinden karşılaştırılır, öyle ki her bir iskelet 126 yapraktan oluşan bir ağaç yapısındadır. Bu öznitelikleri kullanarak ana bilgilerin yer aldığı üç ayrık grup özelliğine sahip nesnelere sınıflandırmak için geriye yayılım

tabanlı yapay sinir ağı kullanılmaktadır. Veritabanı içerisindeki diğer tüm modelleri bu üç grup içerisine sınıflandırılırlar. Yapılan işlemler sonunda bazı benzerlikler kabul edilebilir düzeyde iken, bazıları kabul edilebilir seviyede değildir.

3.4.2 Reeb Çizgeleri

Reeb [223], *Reeb Çizgesi* ismini verdiği içten bağlanmış düğümlere sahip ve nesneyi sürekli sayısal bir fonksiyon olarak tanımlayabilen bir iskelet yapısı tanımlamıştır. *Yükseklik Fonksiyonu*, *Eğrilik Fonksiyonu* ve *Jeodezik Uzaklık* isimleri verilen üç tip sayısal fonksiyon kullanılmıştır. Döndürme ve küçük gürültü etkilerine karşı dayanıklı olduğundan dolayı Jeodezik uzaklık birçok uygulamada kullanılmıştır. Fonksiyon, nesnenin başlangıç noktasından bağımsız olması ve ölçekten normalize edilerek bağımsız olabilmesi için şeklin bütünü ile ilişkilidir. Matematiksel olarak, Reeb çizgesi S şeklinin bölüm uzayında f bölüm fonksiyonudur. Biasotti ve ark. [24], farklı f bölüm fonksiyonları kullanarak deneyler yapmışlar ve hangi f fonksiyonun seçilmesinin eşleştirme sonuçlarına etkisini gözlemlemişlerdir. Örneğin, integral jeodezik uzaklık fonksiyonunun bölüm fonksiyonu olarak kullanılması eklemli yapılara özellikle uyumlu iken, eklemli cisimleri farklı pozları için uzaklık merkezi cismin ağırlık merkezi olacak şekilde seçilmelidir. Reeb çizgesi ilk olarak Shinagawa ve ark. tarafından bilgisayar grafiklerine uygulanmış [248] ve Morse haritalama fonksiyonu kullanılarak başlamışlardır. Buna ilave olarak, hesaplamalar için nesnenin cinsi, sınıfı ile ilgili bilgilere önceden erişilmiş olması gerekmektedir. Reeb çizgeleri, yüzey analizi ve anlamlandırma işlemleri, basitleştirme, benzerlik değerlendirme ve 3B nesne geri getirme işlemlerinde çok verimli bir şekilde kullanılmaktadır.

Hilega ve ark. [97], çoklu çözünürlüklü Reeb Çizgeleri (Reeb Graphs (MRGs)) kullanarak 3B şekillerin topolojik yapılarını orijinal Reeb Çizgelerine bir geliştirme olarak kullanmışlar ve 3B nesnelerin karşılaştırılması için kullanmışlardır. 3B bir model jeodezik mesafe dağılımı kullanılarak sayısal fonksiyonunun değerine göre sayıda seviyelere ayrılarak parçalara bölünmektedir. Reeb çizgesinin bir düğümü belli bir bölge için bağlantılı bir bileşeni temsil eder ve bitişiğindeki düğümler o nesne için bileşenlerin birbirleri ile bağlı olduğunu göstermektedir. Topolojik karşılaştırma için, düğümler arasındaki benzerlik düğüm niteliklerinin kıyaslanması ile yapılırken, kabadan inceye doğru stratejisi ile de topolojik karşılaştırma yapılmaktadır. Kabadan inceye doğru st-

rateji karışıklıkları elimine edecek şekilde eşleştirme yapılmasına yardımcı olur. Deneyler 230 model bulunan bir deney setinde test edilmiştir bu şekilde benzeşim ölçümlerinde eklemli şekiller için oldukça iyi çalışmaktadır.

Chen ve Ouhyoungn [42], Heliga ve ark. tarafından önerilen MRG yaklaşımını daha farklı modeller için genişletmişlerdir. Sorgu anahtarına bağlı olarak orijinal MRG tabanlı metodun geliştirilmeye ihtiyacı olduğundan, çalışmada yazarlar çok sayıda üçgenlerden oluşan 3B modellerin tekrar örneklemelerini alarak daha az sayıda üçgen kullanarak oluşturan ön işlemler ile ikinci bir tanımlama yapmışlardır. Bu yaklaşımın testi için 445 model kullanılmıştır. Ancak, önerilen yöntemde kullanılan ön işlemlerin yapılması için ilave zamana ihtiyaç duyulmaktadır.

Bespalov ve ark. [22], çok sayıda teknik çizim bulunan veri tabanı için Hilaga'nın metodunu katı cisimler için çalıştırmış ve üzerinde inceleme yapmışlardır. Çalışmaların katı modeller için topolojilerindeki küçük değişikliklerin benzerlikte büyük sonuçlara sebep olacağı sonucuna ulaşmışlardır. Katı modellerde topolojik bağımsızlık önemli olduğundan Reeb çizgelerinin üstün bir iyileştirmeye ihtiyaç duyduğunu ortaya koymuşlardır. Bespalov ve ark. [23], Haliga'nın metodu ile ilgili olarak şeklin ölçek uzayda analiz hesaplamalarını yapan başlangıç seviyesinde bir araştırma yapmışlar ve Reeb çizgelerinden farklı olarak yönsüz ağaç kullanmışlardır. Bu işlem 3B modellerin karşılaştırılması işlemini ağaçların karşılaştırılması işlemine çevirmektedir.

Tung ve Schmitt [273] Reeb çizgelerini hacim, yüzey hatları ve yüzey alanının eğriliği ilişkili çoklu çözünürlüğe sahip geometrik nitelikleri kullanarak bir araştırma yapmışlardır. İnsan şeklini düşündüğümüzde eğer geometrik öznitelikler dikkate alınmaz ise kol ile bacak eşleşebilmektedir. Bundan dolayı yaklaşımları aynı zamanda kısmi eşlemeyi de desteklemektedir.

Özetlenecek olursa, MRG tabanlı yaklaşımların avantajları şunlardır; (1) yönlendirilmemiş, kapalı olmayan ve dallanması olmayan yüzeylerde çalışır, (2) konumdan, yönelimden ve ölçekten bağımsızdır, (3) 3B şekillerin karşılaştırılmasında yerel ve topolojik benzerlikleri dikkate alır, (4) farklı seviyeli çözünürlüklerde sorgulama alanını azaltmak için hiyerarşik olarak çalışır. MRG tabanlı yaklaşımların başlıca sınırlamaları şunlardır; (1) yüzey bağıllığından etkilenmektedir, (2) şeklin topolojisinden ziyade

geometrisinden etkilenmektedir, (3) alt çizge eşlemeye cevap veremez, (4) her zaman iskelet olarak temsil edilmez, (5) farklı yoğunluklarda noktalardan oluşmaktadır. Chen ve Ouhyoung [42] hiyerarşik medyal tabanlı bir yöntem kullanmanın, yukarıda anlatılan problemlerin birçoğunun etkisini azalttığı sonucuna varmışlar, Bespalov ve ark. [22] ise sayısal fonksiyonlar kullanmanın nesne topolojisine daha faydalı olduğunu söylemişlerdir.

3.4.3 B-Reeb Çizge Eşlemesi

Teknik çizim alanında, 3B modeller sıklıkla çizge tabanlı Sınır Temsili (*Boundary Representation* (B-Reps)) olarak gösterilirler. B-Rep yapısı modeli kenarlar, yüzeyler ve köşeler olarak tanımlayarak sınırlanmış B-Spline yüzeyler cinsinden çizge olarak temsil eder. Ağların içindeki unsurların aksine B-Rep içerisindeki unsurlar yüzeylerden bağımsızdır. Çizgenin düğümleri yüzeylerin sınırlarını temsil etmekte iken, çizge kenarları karşılıklı yüzeyler arasındaki eğrilerin kesişimlerini temsil etmektedir. Basit şekiller hariç bu şekilde temsiller hacimli ve karmaşıktır. Bundan dolayı çizge eşleştirme algoritmaları için çözülmesi gereken bir problemdir. Çizgeler için en iyi eşleştirme sonuçlarının bulunması için ampirik yaklaşım algoritmaları ve rastgele olarak yapılan yaklaşım algoritmaları kullanılmaktadır. Bu modellerden bir tanesi temel olarak B-Rep çizgesinin haritası olan çizgeyi Model İmza Çizgesine dönüştürmektedir. Ancak bu dönüşümde çizge düğümleri geometrik öznitelikleri ve karşılıklı yüzeylerin özelliklerini de içermektedir.

El-Mehalawi ve Miller [70], teknik parçaların STEP formatında CAD modellerinin kıyaslanması için niteliklendirilmiş çizge yaklaşımı kullanmışlardır. STEP formatında bulunan teknik çizim modellerini karşılaştırmak için, STEP modellerinin yüzeylerini ve geometrik niteliklerini içeren düğümlerden oluşan çizgelere dönüştürmüşlerdir. Çizge eşleştirme işlemi ve deneysel sonuçları El-Mehalawi ve Miller [71] tarafından çalışmalarında açıklanmaktadır. Çalışmada tam eşleme ile bağlantılı tümleşik çizge eşleştirme hatalarını ortadan kaldıran bir yaklaşım önerilmektedir. Benzerlik ölçümleri çizgeler arasındaki benzemezlikleri ölçen sayısal tabanlı problem ile yapılmaktadır. Çalışmalarda testler için kullanılan modeller küçük boyutlu ve orta karmaşıklıkta modellerdir. Yüzeyleri karşılıklı olarak karşılaştırarak başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Bununla birlikte çalışmalarında karşılaştırma zamanları da verilmiştir. B-Rep çizge tabanlı yak-

laşım lar özellikle CAD/CAM yapıları ile uyumludur. Fakat insan veya hayvan gibi doğal cisimlerin modellerine uygulamak zordur. Literatürde bilinen sadece Zuckerberger ve ark. [301] tarafından yapılan çalışma, doğal şekiller için uygulanabilir bir çalışma sunmuşlardır. Model yüzeylerini, yüzeyin o parçalarına benzeyen küre, silindir, koni ve düzlemlere çevirerek çizge modelleri olarak temsil etmişlerdir.

3.4.4 Görünge sel Çizge Teorisi

Görünge sel çizge teorisi, çizgelerin diğer geometrik öznitelikleri ile birlikte bitişiklik matrisinin özdeğerler görünge si ile ilgili matematik biliminin bir parçasıdır [51]. Chung ise [46] bitişiklik matrisi yerine, çizgenin de ğişmezlerini kullanarak çizgenin Laplacian matrisi tabanlı çizge görünge selinin işlenmiş sürümü üzerinde çalışma yapmıştır. Farklı çizgelerden toplanan çizge görünge seli çeşitli uzaklık fonksiyonları kullanılarak karşılaştırılmıştır. Ölçümler genellikle karşılaştırılan nesnelere aynı nesnelere çizgeleri ise uygunluk göstermektedir. Ancak, çizge boyutları aynı olmadığı durumlarda, farklı büyüklüklerin çizgeleri de farklı büyüklükte olduğu için karşılaştırılmaları çok zordur. McWherter ve Regli [172], bu problemin üstesinden gelmek için aynı uzunlukta olmayan iki çizgenin karşılaştırılması için çizgeyi küçük parçalara ayırarak karşılaştırmışlardır.

McWherter ve ark. [170] B-Rep temsili üzerine kurulu Model İmza Çizgesi (Model Signature Graph (MSG)) ismini verdikleri özelleştirilmiş yapıya sahip bir çizge önermişlerdir [261]. MGS çizgeleri genel olarak model yüzeylerini ağaç kenarları ve kenar niteliklerini ise ağaç köşeleri temsil etmektedir. Ağaçta bulunan öznitelikler yüzey tipleri (düz, eğimli, vb.), boyutları, yüzeylerin topolojik belirleyicileri (planar, conical, vb.), yüzeyin geometrik fonksiyonu (fonksiyon tipleri), yüzey alanı ve yüzey normaleri gibi bilgilerden oluşmaktadır. Yüzeyleri arasındaki benzerlik o yüzeylerin bükümlülük, geometrik temsil ve uzunluk gibi değerler gibi topolojik belirleyicileri ile ölçülmektedir.

Peabody ve ark. [208] ise iki modelin karşılaştırılması için yukarıda anlatılan niteliklerin sıklık histogramını kullanmışlardır. Herhangi katı bir model on üç farklı tipte yüzey nitelik histogramı ve sekiz farklı tip eğim sıklık histogramı ile temsil edilmektedir. MSG çizgeleri aslında B-Rep yapısı gibi karmaşık bir topolojik yapıya sahiptir.

Kenar ve köşe sayıları, minimum, maksimum, ortalama değerler, kenar derecelerinin standart sapmaları gibi birçok öznelik MSG çizgeleri tarafından modeller arasındaki benzerlikleri tespit etmek için kullanılmaktadır. Bunlara ilave olarak McWherter ve ark. [172], MSG çizgelerinin topolojisini belirlemek amacı ile görüngenel çizge teorisi üzerine çalışmışlardır. Çizge görüngenelleri arasındaki mesafe Eigen mesafesi olarak isimlendirilmektedir. Otuz üç farklı nitelik içeren, çizge değışmezleri ve tip histogramları ile birlikte tüm nitelikleri içeren vektöre Değişmez Topoloji Vektörü (Invariant Topology Vector (ITV)) adı verilmektedir. Benzeşen modellerin ITV bilgileri de benzeşik olduğundan, modeller arasındaki benzerlik ITV bilgileri arasındaki benzerlik ile ölçülebilir duruma gelmektedir. Bu ölçümlerde mesafeler L_2 normları temel alınarak ölçülmektedir. Bütün modellerin temsilinde özdeğerler dizisini aynı boyutlu diziler haline getirmek için sabit değerler ile (0.0, 1.0 veya 2.0) *kesme* ve *doldurma* işlemleri yapılarak eşit boyutlarda dizilere çevirmektedir. Ancak, MSG çizgeleri komşuluk matrisi belirli özellikler temsil ettiğinden dolayı özdeğerler ile tam anlamı ile ifade edilememektedir. Bu yöntem NP-zor bölgede olmayan çizge eşleştirme algoritmaları gibi karmaşık çizge yapıları için uygun olarak değerlendirilmektedir.

McWherter ve ark. [171] tarafından, katı modellerin altyapılarını karşılaştıran bir çalışma önerilmiştir. Sıkıca birbirine bağlı bileşenleri birbirlerinden ayıracak şekilde modelleri temsil eden MSG çizgelerini bir ya da daha fazla alt çizgelere parçalayarak karşılaştıran bir yaklaşım içermektedir. Her bir basamakta özdeğerlere ulaşana kadar öz yinelemeli olarak çizge parçalama işlemi devam etmektedir. Bu işlem herhangi bir modeli o modelin yerel özneliklerini tespit edene kadar bu şekilde yapılmaktadır. Bu işlem için yapılacak olan optimal çözüm yine NP-zor bölgede bir problemdir. Yapılan bu çalışmada önerilen yaklaşımlar büyük veri setlerinin karşılaştırması için hesaplama karmaşıklığı yönünden basit ve hızlı olarak nitelendirilmekte ve 3B modellerinin sınıflandırılması işlemleri için de uygundur.

3.4.5 Hacimsel Hata

Bu yöntemler cisimlerin farklı durumlarda farklı hacim kaplamaları üzerine kurulmaktadır. Bahsedilen hacimsel farklar basit farklardan müteşekkil değildir. İki nesne benzer olmamalarına karşın toplamda aynı hacim değerine sahip olabilmektedir. Karşılaştırma işlemlerinin genel yapısı gereği cisimlerin karşılaştırma işlemleri yapılmadan önce poz

normalizasyonu yapmak gerekmektedir. Bu yöntemlerden birkaçı bu bölümde incelenmiştir. Kaku ve ark. [119], Gottschalk tarafından öne sürülen Yönelmiş Kapsama Kutusu (Oriented Bounding Box (OBBTree)) yöntemi üzerine bir çalışma yapmışlardır. İlk önce işlem yapılacak 3B veri setinde bulunan tüm nesnelere poz normalizasyonu yapılmaktadır. Sonra her bir model ağaçtaki her düğüm noktası OBB yapısının merkezini temsil edecek şekilde bir ikili ağaç olacak şekilde temsil edilmektedir. Son olarak ise iki 3B model arasındaki benzerlik iki benzerlik ölçümünün ağırlıklı kombinasyonu şeklinde hesaplanır. İlk olarak hesaplanan benzerlik ölçümü, ağacın karşılıklı düğümleri arasındaki farkların toplamı olarak hesaplanmaktadır. İkinci olarak ise orijinal modellerin görünüm oranları üzerinden yapılmaktadır. Bu yöntemin *D2* şekil dağılım fonksiyonundan [200] daha iyi olduğu yapılan çalışmada araştırmacılar tarafından deneysel olarak gösterilmektedir.

Ichida ve ark. [105], Aktif Küp (Active Cube) olarak isimlendirdikleri interaktif kullanıcı arayüzüne sahip bir sistem üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında kullandıkları bütün modeller vokselenmiş yapıda 3B modellerdir. 5cm büyüklüğünde yan küpler kullanılarak elde edilen sorgu modelleri, ise gerçek zamanda otomatik olarak tanıma işlemi yapan bir sistem olarak geliştirilmiştir. Bu sistemde iki 3B model arasındaki benzerlik ölçümleri, karşılaştırılan modellerin voksel temsilleri üzerinden yapılmaktadır. Sánchez-Cruz ve Bribiesca [235], yaptıkları çalışmada bir 3B model ile diğer bir 3B model arasındaki benzerlikleri kullanarak dönüştüren ve dönüşüm işleminde her iki modelin vokselenmiş temsillerini kullanan bir yöntem önermişlerdir. Bu metod iki nesne arasındaki hacimsel hatayı bulacak şekilde bir modeli diğerine çevirmek için taşınması gereken hacim farklılıklarını, voksellerin sayıları ile hesaplamaktadır. Sonuç, bir modelin diğerine olan hacimsel uzaklığı hesaplanacak şekilde yapılmaktadır. Yapılan çalışmanın en önemli dezavantajı iki vokselenmiş model arasındaki hacimsel farkların hesaplanmasının hesaplama yüküdür. Bu yaklaşımın temel dezavantajı ise iki model arasındaki farklılıkların bulunması için yapılan hesaplama işlemlerinde üçgen eşitsizliği ve simetriklik kuralına uygun olmayan işlemlerin yapılmasıdır.

3.4.6 Ağırlıklı Nokta Kümesi

Bu yöntemler 3B nesne üzerinden 3B noktalar kümesi üretirler. Bu noktalar belirli bir mantığa göre ağırlıklandırılırlar. Fark hesaplamaları bu nokta kümeleri arasındaki

benzerlikleri bulacak şekilde kurgulanır. Ağırlıklı noktalar kümesi [264] metodu iki 3B nesneyi çok düzlemlî ağ yapıları kullanarak karşılaştırırlar. 3B nesneyi tanımlayacak olan şekil imzası, şeklin belirgin özelliklerini içeren ağırlıklandırılmış noktalar kümesi kullanılmayacak yapıdadır. Yazarlar, ağırlıklı noktalar kümesini elde etmek için üç farklı yol üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada poz normalizasyonu yapılmış 3B çokgen modelinin 3B bir ızgara yapısına yerleştirilmesi ile elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. Bu ızgarada boş olmayan her bir hücre o cisim için anlamlı bir noktadır. Nokta seçimi ve ağırlık tercihi farklı yollar ile yapılmaktadır. Bunlar; (1) En yüksek Gaussian eğimi olan her bir nokta kümeyle alınır ve eğim değeri ağırlık olarak alınır, (2) köşelerin alan ağırlıklı ortalama değeri noktaları alınır ve ağırlık olarak 1 değeri verilir, (3) köşelerin kütle merkezleri hesaplanır ve nokta olarak seçilir ağırlık olarak ise 1 değeri verilir. Benzerlik ölçümü olarak Earth Mover's Distance mesafe ölçüm fonksiyonu kullanılarak hesaplamalarda üçgen eşitsizliği de dikkate alınmaktadır. Yazarlar, Osada ve ark. [200] tarafından yapılan şekil dağılımları metotlarından daha başarılı sonuçlar aldıklarını raporlamışlardır.

Shamir ve ark. [241], 3B modellerin bileşenlerini en iyi uyumlu kürelere bölerek kabadan inceye çalışan hiyerarşik ağırlıklı nokta kümeleri kullanarak bir şekil tanımlayıcı ileri sürmüşlerdir. Nokta kümeleri, kürelerin yarıçap değerleri ilişkili oldukları küre merkez noktaları ve çizge benzeşim algoritmaları kullanılarak yapılmaktadır. Seviyelendirilmiş benzeşim teknikleri kullanılarak farklı çözünürlüklerde çalışan başarımlı yüksek temsiller elde etmişlerdir. Dey ve ark. [59], 3B nesne tanımlayıcı olarak ağırlıklandırılmış 3B noktalar kullanmışlardır. İlk olarak 3B model verilen bir örneğe göre bileşenlerine ayrılarak şekillendirilir. Daha sonra her bir bileşen bir nokta kümesi olarak ele alınır ve nokta ağırlıkları olarak ise karşılıklı bileşen değerleri alınır. Son olarak ise ağırlıklı nokta kümeleri üçgen eşitsizliğini dikkate almadan benzerlik ölçümleri yapılır.

Aslında Funkhouser ve ark. [79], aynı koordinat sisteminde bulunan hizalanmış cisimler arasındaki mesafeyi karesel uzaklıklarını hesaplayarak bulmuşlardır. Modellerin karesel Euclidean mesafesi dönüşümleri karesel uzaklıkların ölçümünde hesaplamaya yardımcı olmaktadır, ancak Tekil Değer Ayrışması (Singular Value Decomposition (SVD)) tekniği kullanılarak şekillerin dönüştürülmesi hesaplamalarda kolaylık

sağlayacak şekilde alt parçalara bölerek boyut indirgemesi yapmaktadır. Bu yöntemim esas avantajı ise tanımlayıcının kısmi eşleme yapacak şekilde seçilen parça ile ilişkili ağırlıkları kullanarak işlem yapılabilmesidir. Princeton Benchmark [246] veri seti kullanılarak yapılan deneyler göstermiştir ki, önerilen bu tanımlayıcı 3B harmonikleri yaklaşımından [177] ve buna ilave olarak dairesel derece fonksiyonundan [275] daha başarılı sonuçlar üretmektedir.

3.4.7 Geometrik Momentler

Şekil tanımlayıcılar arasında 3B momentleri, birçok araştırmacı tarafından incelenmekte ve araştırılmaktadır. Şekil tanıma ve sınıflandırma işlemlerinde şekil momentleri tanımlayıcılar için araç olarak kullanılmaktadır. Bundan dolayı, 3B şekil geri getirme işlemleri için tanımlanan öznitelik vektöründe öncelikli olarak momentler bulunur. İstatistiksel momentler f dağılımı olarak tanımlanan sayılar ile ifade edilen değerlerdir. Sıralamalarına göre parametreler üreten ve kabadan inceye olacak şekilde dağılımı temsil eden bir görüneseldirler [204]. 3B nesnelere için bir model $f(x, y, z) \in R^3$ dağılımı olmak üzere, $n = i + j + k$ sıralaması için moment $\mu_{i,j,k}$ olarak tanımlanmakta ve aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\mu_{i,j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y, z) x^i y^j z^k dx dy dz, \quad (3.4.1)$$

Moment eşitsizliğinin tam (sonsuz) bir kümesinin bir dağılımı ve bir dağılımında moment eşitsizliği kümesini gösterdiği çok bilinen bir denkluktur. Bu yapının ayrık formunda nesnelere sonlu nokta kümeleri olarak 3B düzlemde P dağılımı şeklinde tanımlanmaktadır, bu şekilde moment formülü $\mu_{i,j,k} = \sum_{p=1}^{|P|} x_p^i y_p^j z_p^k$ haline dönüşmektedir. Çünkü momentler; taşıma, döndürme ve ölçeklemeden bağımsız değildir. Bu yüzden ilgili hesaplamalar yapılmadan önce uygun bir normalizasyon uygulanmalıdır. Model bir çokgen ağ yapısında verildiğinde, momentler için hesaplama ağ köşelerinden, ağ üzerindeki üçgenlerin kütle merkezlerinden veya nesne noktaları kullanılarak yapılmaktadır. Bir öznitelik vektörü birçok momentin birbirine eklenmesi ile elde edilmektedir.

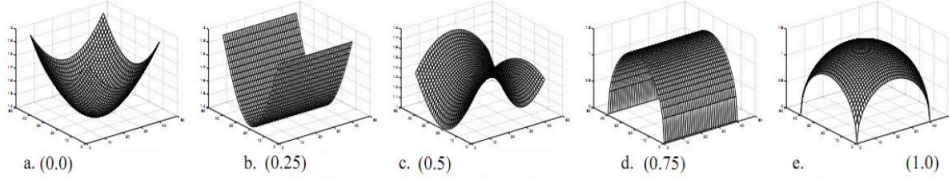
Tıpkı Vranic ve Saupe [236], nesne üzerinden eşit dağılımlı olacak şekilde aldıkları noktalara yapılan hesaplama gibi şekil ağı üzerindeki üçgenlerin kütle merkezleri kullanılarak, Paquet ve Rioux [203] tarafından bir tanımlayıcı yapılmıştır. Paquet ve ark. [204] tarafından ise nesne yüzeylerinin kütle merkezleri alınarak çalışmalar yapılmıştır. Vranic ve Saupe doğru tabanlı ve merkez tabanlı yaklaşımları karşılaştırarak raporlamışlardır. Buna ilave olarak, Zhang ve Chen [293] yaptıkları çalışmada 3B nesnelerin çokgen ağ modelleri için etkili bir hesaplama yöntemi ileri sürmüşlerdir. 3B nesne geri getirme ile ilgili moment tabanlı diğer bir çalışma ise Elad ve ark. [73] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada araştırmacılar nesne yüzeyinden belirli sayıda noktayı homojen bir seçim ile alarak moment hesaplamalarını yapmışlardır. Analizlerinde kullandıkları özel yöntem uzaklık fonksiyonu ile yapacakları hesaplamalar için komşuları ile ilgili bir geri besleme kullanmış olmalarıdır.

Birçok çalışmada önceden tercih edilmiş uzaklık fonksiyonu kullanılırken, bu çalışmada etkileşimli olarak değişen nitelikte uzaklık fonksiyonu kullanılmaktadır. Kullanıcı birkaç moment içeren öznitelik vektörü kullanan başlangıç sorgusunu yapar. Daha sonra alakalı ve alakasız nesnelere tam sıralama için seçer, daha sonra basamaklı optimizasyon için aldığı geri beslemeleri kullanarak ağırlıkları hesap eder ve yeni ağırlıklandırılmış Euclidean mesafesi kullanarak yeni nesnelere geri alır. Kullanıcı geri bildirimine bağlı olarak alınan sonuçlardan bir benzerlik eşik değeri üretilir. Kullanıcı yeterli sonuç alıncaya kadar bu tekrarlamayı sürdürebilir. Yaptıkları çalışma ile yazarlar bu işlem kullanılarak arama başarımını geliştirebileceklerini ortaya koymuşlardır.

3.4.8 Şekil Görüngeseli

Zaharia ve Prêteux [290], MPEG-7 için çoklu ortam içerikli bir 3B nesne geri getirme tanımlayıcısı önermişlerdir. Önerilen bu tanımlayıcı nesnelere eğim özellikleri ile tanımlanmaktadır. Şekil görüngeseli tanımlayıcısı, şeklin yüzeyi üzerindeki noktaların iki adet ana fonksiyona göre yerleşmesinin indekslerinden elde edilen dağılımdır. Şekil indeksi ise ana eğim vektörünün açısız koordinatlardaki kutupsal temsilinin ölçeklendirilmiş versiyonu olup, döndürme, taşıma ve ölçekleme işlemlerinden bağımsızdır. 3B yüzeylerin yerel geometrik özellikleridir. Şekil 3.10'de bazı temel şekillere karşılık gelen indeks değerleri gösterilmektedir. 3B şekil görüngeseli tanımlayıcısı bir sürekli fonksiyondur ve çokgen modelleri kullanılarak belirlenmektedir. Bu tanımlayıcı topo-

lojik değişikliklere duyarlı bir tanımlayıcıdır ve bazı şekil tipleri için (kolları görünen ve görünmeyen insan gibi) farklı davranışlar gösterebilmektedir. Yazarlar tarafından birçok 3B veri tabanı kullanılarak yapılan testler sonucunda tanımlayıcının başarımının yüksek olduğu gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Bazı temel şekillere karşılık gelen indeks değerleri. Şekil [290]'den alınmıştır.

Shum ve ark. [251], 3B modeller için yüzey eğimleri ile tanımlayıcı yapılması konusunda bir çalışma yapmışlardır. İlk olarak şeklin bilinen ağ yapısı kullanılarak homojen bir şekilde küresel ağ temsili gibi mozaiklenmiş halde oluşturulmuştur. Sonra, oluşturulan ağın her bir düğümü için komşu düğümler ile olan eğim bilgisi hesap edilir. Son olarak ise yaklaşımlar ile elde edilen ağın dağılımları üretilmiş eğim değerleri kullanılarak 3B modellerin karşılaştırılması yapılır. Gürültü altında kararlı olduğu ispatlanmış mesafe fonksiyonlarını bir ölçüm olarak kullanarak hesaplamalar yapılır. Bu yöntemin bilinen en önemli avantajı döndürmeye karşı değişmezliği olmasına karşın, çok yüzeyli yapılar veya serbest yapılar kullanılarak elde edilen yapının yaklaşım kalitesinin düşük olmasıdır. Yazarlar tarafından yapılan deneylerin sonuçları çalışılan yöntemin uygun mozaik sayısı seçildiğinde kararlı ve yeterli sonuçlar üretmeye uygun olduğunu göstermiştir.

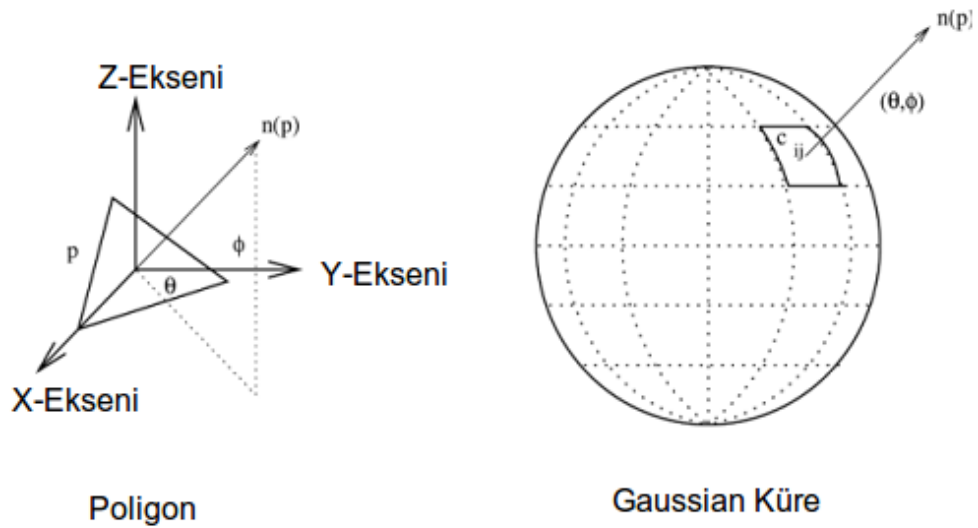
3.4.9 Genişletilmiş Gaussian Şekli

3B nesnenin bütünsel şeklini tanımlamak için, nesneyi oluşturan çokgenlerin normallerinin dağılımları kullanılmaktadır. Bu dağılımların temsili için bir yöntem Genişletilmiş Gaussian Şekli (Extended Gaussian Image (EGI))'dir [99, 108]. EGI 3B nesneyi Gaussian küreler şeklinde 3B modeli oluşturan küresel fonksiyonlar olarak ifade edebilmektedir (Şekil 3.11). 3B modelin EGI değerinin hesaplaması için, 3B nesnelerin tüm çokgenlerin normal vektörleri aynı çokgenlerin Gaussian kürelerine karşılık gelen normalleri ile karşılıklı olarak eşleştirilir. Bu eşleştirmeden bir tanımlayıcı oluşturmak için, Gaussian küresi her biri bulunduğu bölgenin normali olan $R \times C$ (R adet boy-

lam ve C adet enlemden oluşur) adet hücreye ayrılacak şekilde parçalanır. Parçalanmış hücreler üzerinde bulunan eşleştirilmiş normallerin sayısı bu hücrenin sayısını verir. $R \times C$ matrisi ile eşleştirilen bütün hücrelerin değerleri o 3B nesnenin imzası olarak adlandırılır. İki nesne imzası arasındaki benzer a ve b şu şekilde verilmektedir [108].

$$bysim(a,b) = \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^C (|a_{ij} - b_{ij}| / |a_{ij} + b_{ij}|), \quad (3.4.2)$$

Geri getirme başarımı ise Kazhdan ve ark. [125] ve Funkhouser ve ark. [80] tarafından yapılmıştır. Başarım ölçümleri, Ip ve Wong insan kafa modelleri ile yapılmaktadır [108]. Genişletilmiş Gaussian şekli metodu şekil analizi ve eşleştirilmesi için birçok önemli özelliklere sahiptir. İlk olarak taşımadan bağımsızdır. İkinci olarak, EGI uzayda 3B model için ölçekleme ve döndürme yapabilmektedir. Üçüncü olarak ise EGI için dışbükey şekle sahip modellerin ters temsilleri vardır. Dördüncü olarak EGI yönteminin insan yapımı modeller ile doğal modeller arasında ayrımı çok iyi yapabildiği rapor edilmiştir [246].



Şekil 3.11: Nesne normalleri ile Gaussian Küre arasında eşleme. Şekil [37]'den alınmıştır.

Komplike Genişletilmiş Gaussian Şekil (Complex Extended Gaussian Image (GEGI)) EGI yönteminin Kang ve ark [120] tarafından önerilen genelleştirilmiş bir şeklidir. Sadece yüzeyden elde edilen üçgenin alanı ile yetinmeyip, hem bu alanı hemde yüzey

normali ile merkez arasındaki mesafe kullanılmaktadır. Bu yaklaşım kullanılarak elde edilen sonuçlar, 3B modelin dönmeye ve ölçeklemeye karşı 3B yapıda temsili ve taşımaya karşı faz kaydırmasını dikkate almaktadır. Bundan dolayı, özellikle iki farklı modelin farklı konumlarda bulunması gibi durumların olduğu uygulamalar da döndürme ve taşıma işlemleri için CEGI kullanılmaktadır. Ayrıca 6B optimizasyon probleminin iki adet 3B problemine dönüştürülmesi ile bağımsız olarak iki duruma çözüm üretilebilmektedir.

3.4.10 Standart 3B Biçim Değişimi (İzdüşüm)

İzdüşüm tabanlı metotların arkasındaki ana fikir, 3B iki nesnenin benzerliklerini ölçmek için bir takım biçimlendirme ve dönüşümlere uğratılmasıdır. 3B nesne geri getirme bağlamında her bir model veri tabanına kayıt edilirken standart uzay veya şekle (Örnek: küreler) biçimlendirilir ve benzeşim ve karşılaştırmalarda kullanılmak üzere yapılan biçimlendirme işlemi için bir hayli faaliyet yapılmaktadır. Bu faaliyeti belirlemenin farklı yolları bulunmakta olup, bu yollardan birkaç tanesi bu bölüm içerisinde incelenecektir. Zaharia ve Preteux, Hough Dönüşümün birçok başarılı versiyonunu geliştirmişlerdir. İlk olarak yapılan çalışmada [291] Optimize 3B Hough Dönüşüm Tanımlayıcısı (Optimised 3D Hough Transform Descriptor (O3DHTD)) türetilmiş, daha sonraki çalışmada [289] ise Standart 3B Hough Dönüşüm Tanımlayıcısı (Canonical 3D Hough Transform Descriptor (C3DHTD)) geliştirilmiştir. Hough dönüşümü ile bir nesneyi karşılaştırabilmek için kullanılacak sorgu referanslarını temin etmek için Hough Uzayına bir biriktirici vasıtası ile biçimlendirilmektedir. Karşılaştırma işlemlerini her bir nesne için bir karşılaştırma tablosu üretilerek yapılır. Benzerlik karşılaştırmaları bu çizelgeler kullanılarak tıpkı histogram karşılaştırması gibi yapılır. 3B Hough Dönüşüm bir nesnenin dönüşümünü yapabilmek için x, y ve z eksenlerine dik olacak şekilde şeklin tüm yönlerinden iz düşümlerini Hough Dönüşümü (Hough Transform (HT)) yaparak elde etmektedir. Ancak yapılan dönüşüm sayısı bazı yönelimlerde eşitlik olması halinde diğer yönelimlerden dönüşüm yapılarak düşürülebilmektedir. Bu şekilde diğer görünüm basit geometrik dönüşümler ile yapılabilmektedir. Bu işlem O3DHTD tabanlı yöntem ile üç görünüm ile sonuca ulaşmaktadır. C3DHTD tabanlı yöntem ise nesneyi her yönün eşit olması ile tek bir HT işlemine indirgeyerek tamamlar. Önerilen tanımlayıcı için geri getirme deneyleri, şekil görünceseli ve Genişletilmiş

Gaussian Şekil tanımlayıcı ile C3DHT yöntemine iyi bir başarımla elde edilmek üzere yapılmıştır. Hough Dönüşümünün en büyük dezavantajı hesaplama karmaşıklığından ziyade yapılacak dönüşüm hesaplamalarının karmaşıklığının çok fazla olması ve bu işlemlerin ön hesaplama ile yapılamamasıdır. Ayrıca döndürme, ölçekleme ve taşıma etkilerine karşı normalizasyona da ihtiyaç duyulmaktadır.

Leifman ve ark. [144], küresel izdüşüm algoritması önermişlerdir. İlk olarak benzeşik dönüşümlerin etkisini azaltmak için veri tabanlarındaki modellerin duruşları için normalizasyon uygulamışlardır. İşlem yapılacak olan modeli, R yarıçapına sahip şeklin etrafını kaplayan bir küre için biçimlendirme işlemi yapılmaktadır. R yarıçap değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$R = \int \vec{F} d\vec{r}, \quad (3.4.3)$$

öyle ki, \vec{F} şekli kapsayan küre ile şekil yüzeyi arasında kalan mesafe ve kuvvet olarak tanımlanmaktadır. Bu kuvvet bütün yüzey noktaları için uygulandığı mesafeye bağlı olarak sabit değerde kabul edilmektedir. Bu nedenle, yapılan işlem yüzey ve kapsayan küre arasındaki mesafe ile orantılı olmaktadır. Bu çalışmada yapılan deneyler internetten rastgele seçilmiş 1068 adet model üzerinde yapılmıştır. 258 nesne tercih edilerek insan, füze, araba vb. gibi 17 sınıfa ayrılmıştır. Yapılan deneyler önerilen sistemin şekil momentleri [72] ve şekil dağılımları [200] metodlarına göre daha başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ancak önerilen yöntem bütünsel olarak değerlendirme yaptığı için genellenmesinde problemler olabilmektedir.

Yu ve ark. [288], çalışmalarında kapsama küresi fikrini temel olarak alan bir yöntem önermişlerdir. Kapsayan küre ile model arasındaki mesafeleri içeren bir çizelge üretilir. Hesaplanacak olan bu çizelgeden önce standart koordinatlarda duruş normalizasyonu yapılmaktadır. Duruş normalizasyonu yapıldıktan sonra muhtemel olan yanlış hizalamaların kontrol altına alınması için Hızlı Fourier Dönüşüm (Fast Fourier Transform (FFT)) yapılmaktadır. Benzerlik ölçümleri Fourier dönüşümü çizelgeleri için ağırlıklı Euclidean mesafe fonksiyonu kullanılmaktadır. Araştırmacılar deneysel sonuçlar için 52 model 34 kategoriye sahip veri tabanı kullanmışlar ancak diğer metotlar ile karşıla-

tırma yapmamışlardır.

3.4.11 Isıl Çekirdek İmzası (Heat Kernel Signatures (HKS))

Son zamanlarda, yayılım geometrisi 3B şekil geri getirme yöntemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır [34, 167, 169, 201, 219, 232]. Yayılım geometrisi X yüzeyindeki u ısısının iletim yönetimi ile ısı yayılım eşitliğine bağlıdır:

$$(\Delta X + \frac{\partial}{\partial t}) = u, \quad (3.4.4)$$

öyle ki, ΔX yarı belirli Laplace Beltrami operatörünü göstermekte olup, a ise Laplacian Riemannian denkliğidir. $u(x, 0) = u_0(x)$ başlangıç değerleri için ısı eşitliği $u(x, t)$ X yüzeyindeki x noktası için (aynı şekilde X sınıra sahip bir yüzey ise sınır değerlerini) t zamanda ortaya çıkan ısı miktarını tanımlamaktadır. Temel çözüm olarak formül 3.4.4'de ısı dağılım $u_{0,x} = \delta_x - z$ şeklinde tanımlanmakta ve başlangıç koşulları için çekirdek olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3.12'de anlatıldığı gibi $k_{X,t} = (x, z)$ formülü ile tanımlanmaktadır. Isıl çekirdek izometrik dönüşümlerde değişmezliğe sahiptir ve izometrik olarak küçük bozunumlar için kararlıdır. İlave olarak ısı çekirdek 3B nesneler için tam olarak karakterize edilmiş ve 3B nesnelerin bütünsel özelliklerini giderek tanımlamak için kullanılmaktadır [48, 100, 138].



Şekil 3.12: Şekillerin birbirleri ile olan eşlemelerini göstermektedir. Sıcak renkler düşük değerleri göstermektedir. Şekil [33]'den alınmıştır.

Sun ve ark. [260], ısı çekirdek köşegenlerini ısı çekirdek imzası (Heat Kernel Signatures (HKS)) gibi yerel tanımlayıcı olarak kullanmayı önermişlerdir. Şekil üzerindeki her x noktası için n -boyutlu tanımlayıcı vektörü aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$P(x) = c(x)(K_{t1}(x;x), \dots, K_{tn}(x;x)), \quad (3.4.5)$$

öyle ki, $c(x)$ değeri $\|p(x)\|_2 = 1$ olacak şekilde seçilir.

SHREC kıyaslaması [32] HKS için teknoloji harikası bir tanımlayıcı olduğunu doğrulamıştır. HKS tanımlayıcısı 3B nesne geri getirme uygulamaları için uygun çözümler sunabilen birçok avantaja sahiptir. İlk olarak HKS bozulmaya karşı dayanıklıdır (Şekil 3.13 (b), sol taraf). İkinci olarak ise, t ile tanımlı bir ölçekleme altında şekil üzerindeki bir x noktası için komşulukları hakkında bilgi toplamaktadır. x noktasının küçük bir komşuluğunun t ölçeklemesi altında toplanan bilgileri ile bütünsel olarak şekil hakkında büyük t değerleri için bilgilere de sahip olmaktadır. Böylece, n-boyutlu özellik tanımlayıcı vektör $p(x)$, bilgisayarlı görü alanında çoklu ölçekli analog özellik tanımlayıcıları için kullanılabilir. Üçüncü olarak, küçük ölçeklemelerde HKS tanımlayıcısı yerel olarak bilgi toplarken sadece topolojik gürültüden etkilenmektedir. (Şekil 3.13 (b), sağ taraf) Son olarak, HKS tanımlayıcısı için hesaplama karmaşıklığı Laplace-Beltrami operatörünün özdeğerler ve öz fonksiyonlarıdır ve farklı şekil temsilleri için etkili bir şekilde çalışmaktadır.

Diğer taraftan ise HKS tanımlayıcısının bir dezavantajı, bütünsel olarak şekil ölçeklemesine bağımlı olmasıdır. Bu sebeple ölçek bağımsız HKS sürümüne Scale-Invariant HKS (SI-HKS) verilmektedir. Fourier dönüşümü yerel ölçek normalizasyonu tabanlı özellikler için kullanarak [35] SI-HKS önerilmiştir. Buna ek olarak yine ısı çekirdek imzasının genişletilmiş şekli olan Hacimsel Isıl Çekirdek İmzası (Volumetric Heat Kernel Signature (VHKS)) [220] tarafından önerilmiştir. HKS ve SI-HKS yaklaşımlarının her ikisi de ayırt edebilirlik ve etkili hesaplama özellikleri ile ön plana çıkmaktadır.



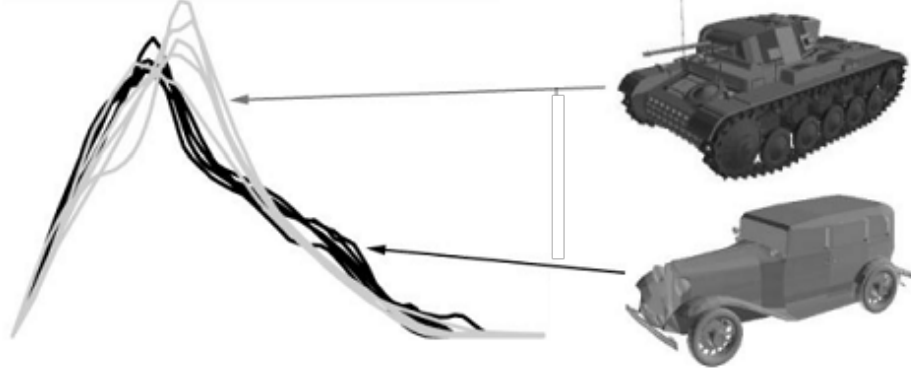
Şekil 3.13: (a) Farklı şekiller için tanımlayıcılar (b) Yakın izometrik topolojiler. [33]

HKS ile ilintili olan bir diğerk yaklaşımd ise Schrödinger eşitliğı kullanılarak yüzeyi parçacıklara ayıran bir yöntem olan Dalga Çekirdek İmzasıdır [15]. Laplace-Beltrami operatörü kullanılmakta ve nesnenin fiziksel özellikleri temsil edilmektedir. HKS yöntemi ile kıyaslandığında, WKS net olarak frekans farklılıklarının etkilerini, ısı çekirdek yönteminin özelliklerin tespitinde eşit dağılımla oluşan tüm problemlerine çözüm olmaktadır. Uygun parametreler ile yöntemin kararlılığı teorik olarak şeklin izometrik olmayan bozulmaları için daha yüksek bilgiye sahip bölümlerden belirlenir. Deneysel olarak WKS yönteminin HKS yaklaşımına göre farklı ölçeklendirmede de daha doğru özellik eşleştirmeleri yaptığı gösterilmiştir. Hatta problemleri veriler kullanıldığında, WKS yine de doğru özellik benzerliklerini algılayabilir.

3.4.12 Şekil Dağılımları

Şekil Dağılımları teknikleri 3B modeller üzerinden doğrudan ölçüm yapılmasına ve bu ölçümlerin dağılımına dayanmaktadır. Bu bölümde şekil dağılımı tekniklerinin bazıları incelenecektir. Osada ve ark. [200] tarafından, şekil dağılımları ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve 3B şeklin olasılık dağılımı olarak temsili ile şekil histogramı çıkarılarak sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu teknik için ön işlem olarak şekil fonksiyonunun seçimi çok önemlidir. 3B nesne yüzeyinden seçilen rastgele üç nokta arasındaki dağılımlar, bazı açı kullanan şekil fonksiyonları ile incelenmiştir. Nesne yüzey merkezleri ve yüzey üzerinden seçilen rastgele noktalar arasında alan ve hacim ölçümü gibi özellikler kullanılarak Euclidean mesafe dağılımı hesaplamaları yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda iki nesne arasındaki benzerlik şekil dağılımları arasındaki mesafe ölçümleri ile yapılmaktadır (Örnek: Minkowski mesafe fonksiyonu ile). Yapılan geri getirme deneyleri iki histogramın normalize edilerek karşılaştırılması için en uygun mesafe fonksiyonunun D2 mesafe fonksiyonu olduğunu (yüzey üzerindeki nokta çiftleri arasındaki mesafe Şekil 3.14) ve en uygun dağılım fonksiyonunun da L1 normu olduğunu göstermiştir.

Obhuchi ve ark. [195], 3B modeller için ana eksenleri kullanılarak oluşturulan bir takım istatistiksel değerler kullanan bir yöntem önermişlerdir. Yapılan çalışmada önerilen metod çokgen ağırları ile tanımlı modeller kullanılmaktadır. İlk olarak, modelleri kendi ana eksenlerine uygun şekilde hızlandırmak ve her birinin eksenini için histogramlar aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır; (1) eksen etrafında atalet momenti, (2) yüzeylerden



Şekil 3.14: Siyah renkli çizgiler tankları ve gri renkli çizgiler arabaları göstermektedir. Şekil [200]'den alınmıştır.

merkez eksene olan ortalama uzaklık, (3) yüzeyden merkez eksene olan mesafe değışiklikleri. Bu işlem her bir model için birbirine eklemlenmiş şekilde dokuz öznelik vektörü üretmektedir. Benzerlik ölçümleri için esnek-eşleme mesafesi ve Euclidean mesafesi kullanılmıştır. Çalışma için yapılan deneyler sadece dönele simetrik modeller için yüksek başarıma sahiptir.

3B CAD modellerinin karşılaştırılması için, Ip ve ark. [107] tarafından yapılan çalışmada D2 şekil fonksiyonunu [200] şekil dağılımları üretmek için kullanan D2 tanımlayıcısı genişletilmiştir. Bir modeli temsil edebilmek için üç farklı dağılım kullanılmaktadır. İlk dağılım (IN) nokta çiftlerini birbirine bağlayan model içerisindeki bir çizgi için bulunur. İkinci dağılım ise (OUT) nokta çiftlerinin model dışında bir çizgi ile birbirine bağlayan dağılımdır. Üçüncü dağılım ise (MIXED) hem modelin içerisinde hemde model dışından geçen çizgi ile birbirlerine bağlanan nokta çiftleri için hesaplanan dağılımdır. 3B iki model arasında tanımlı benzerlik değeri bu iki model için IN, OUT ve MIXED D2 dağılımları için hesaplanmaktadır. Bu metod sadece hacimli modeller ile içerideki ve dışarıdaki noktaları ayırt etmek için uygulanabilir bir modeldir. Bu yaklaşım, Ip ve ark. [225] tarafından örneği verilmiş bir set ile daha geniş ölçekli veritabanlarını sınıflandırmak için genişletilmiştir.

Rea ve ark. [221], içbükey karaktere sahip 3B modeller için nesne şekil farklılıklarının ve içbükeylik özelliklerinin farklı dağılımlar ile tanımlandığı bir tanımlayıcı geliştirmişlerdir. Ohbuchi ve ark. [192], D2 şekil dağılım fonksiyonunun farklı bir versiyonunu önermişlerdir. Açık Mesafesi (Angle-Distance (AD)) ve Mutlak Açık Mesafesi (Absolute Angle-Distance (AAD)) olmak üzere yüzeylerin yönelimleri ayarlanarak 2D

histogramlar üretilir. AD histogramı şekil yüzeyinde rastgele seçilmiş nokta çifti arasındaki mesafe ve açı hesaplanarak bulunur. Diğer taraftan AAD histogramı yüzey normal vektörleri kullanılarak üretilir ve yöntemin sağlamlığı artırılır. AD histogramları tam olarak yönlendirilmiş olabilen modeller için uygun iken, AAD histogramı ise yönelimi düzgün olmayan modeller için uygundur. Çalışmayı yapan araştırmacılar tarafından yapılan deneylere göre bu yaklaşım D2 şekil dağılımından yaklaşık iki kat daha az hesaplama karmaşıklığına sahiptir. Ohbuchi ve ark. [196], bu çalışmaya ilave olarak şeklin farklı ölçeklerde alfa şekilleri için çoklu çözünürlük yaklaşımı kullanarak Mutlak Açı Mesafesi tanımlayıcısı hesaplayan yeni bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Bu yaklaşım, açı mesafesi (AD) [192] tanımlayıcısından, yazarları tarafından yapılan deneyler neticesinde daha üstün bir başarıya sahiptir. Bununla birlikte Liu ve ark. [159], D2 dağılım fonksiyonu için şeklin kalınlıklarını tahmin ederek farklı bir genişletme çalışması yapmışlardır.

Rea ve ark. [222], yüzey pozisyonlama görüngenel (Surface Portioning Spectrum (SPS)) dağılımı olarak adlandırdıkları 3B CAD modellerin indekslemesi ve geri getirme işlemleri için bir yöntem önermişlerdir. Bu çalışmada 3B modellerin geometrik ve topolojik özelliklerin her ikisi de basit 2B bir çizge (SPS) ile kodlanır. Bağlı alanların açı değerleri kabul edilebilir ölçüler içerisinde ise, bu yüzeyle güçlü olarak bağlı kabul edilir. 3B modellerin benzerliklerinin değerlendirilmesi SPS kullanılarak yapay sinir ağları ile yapılır. Pu ve ark. [115], 3B modelleri birbiri ardına aynı yönde olacak şekilde dilimlere ayırarak bu dilimler üzerinden 2B eşleştirmeler yaparak benzerlik ölçümü yöntemini önermişlerdir. Bu yöntemde 2B, D2 şekil dağılımı kullanılarak dilimler arasındaki benzerlik ölçülmektedir. 3B şekil geri getirme işlemlerinde şekil dağılımları kullanılmasının temel avantajı 3B modellerin hangi kategoriye ayrıldığına başarılı bir şekilde tespit edebilmesi iken, en büyük dezavantajı ise kaba olarak birbirine benzeyen 3B şekillerin farklılıklarının detaylarında olduğu durumlarıdır.

3.4.13 Geometrik Hashleme

Bu teknik, Lamdam ve Wolfson [141] tarafından, 3B nesnelere basit geometrik yapılara parçalama temeline dayanarak yapılan bir çalışmadır. Şeklin noktalar kümesinden temel özelliklere sahip olan noktalar ve bu noktalara karşılık gelen temel özelliklerin histogramı oluşturulacak şekilde seçilir. Bu işlem şeklin tüm temel noktaları

için tekrarlanarak yapılır ve sonuç histogramı bir hash tablosuna kayıt edilir. Bu işleme geometrik hashleme adı verilmektedir. Nesnelere hash tabanlı olarak indekslenir ve sorgu modelinde eşleme için kullanılmaktadır. Histogram çubuklarının en yüksek değere ulaşmış olması, karşılaştırılan model ile sorgu modelinin benzerliğinin yüksek olması anlamına gelmektedir. Leibowitz ve ark. [143], geometrik hashleme yöntemini, protein moleküllerinin farklı yönelimlerde ve çekirdek tespiti işlemlerinde karşılaştırılması için kullanmışlardır. 3B nesnelere bu işlemlerde atomik koordinatlara sahip nokta verileri içermektedir. Geometrik hashleme uygulamasının yoğun olarak bellek kullandığı gözlemlenmiştir. Wolfson ve Rigoustos [281] yaptıkları çalışmada, 3B uygulama yaklaşımlarını açıklamışlardır. Gueziec ve ark. [91] ise geometrik hashleme işleminin 3B medikal nesne belirlemede krest çizgilerini hashleme işlemi ile ilgili çalışma yapmışlardır.

3.4.14 Konumsal Çizelgeler

Bazı geometrik istatistik yaklaşımlarının temel handikabı, şeklin yerel özelliklerinin şekle nasıl dağıldığı ve hangi konumlara sahip olduğu ile ilgili bilgileri barındırmamasıdır. Bu amaçla konumsal çizelgeler, tanımlayıcıyı şeklin uzaysal konumu hakkında bilgi edinmek için yapmıştır. Çizelgede yer alan değerler nesnenin fiziksel konumları veya sektörlerine karşılık gelen girdilerdir. Nesne içerisindeki özelliklerin göreceli konumlarını dikkate alan bir mantık örgüsü ile sıralanmışlardır. Konumsal haritalar, özel olarak düzenlenenler hariç olmak üzere normalde döndürmeden bağımsız değerlerdir. Bu nedenle normalde ilk olarak duruş normalizasyonu yapılmaktadır. Vranic ve ark. [277] yaptıkları çalışmada, kütle merkezinden yüzeye doğru gönderilen ışının cismi son kestiği noktalar alınarak çalışan ışın tabanlı bir tanımlayıcı üzerinde çalışmışlardır. Küresel bir genişleme hesabı içeren bu çalışma Fourier tabanlı sinüs ve kosinüs fonksiyonlarına benzeyen sonuçlar veren bir küresel hesaplama sistemidir. Döndürme etkisinden kurtulabilmek için önerdikleri sistem çalıştırılmadan önce duruş normalizasyonu yapılmalıdır. Assfalg [12] tarafından yapılan çalışmada yüzeyi tam olarak bağlantılı 3B nesnelere için bir tanımlayıcı üzerine çalışılmıştır. 3B nesne, küreye evrilmeye kadar deforme edilmektedir. Daha sonra, yüzey üzerinde oluşan 2B bükülmeler, 2B bir çizelgeye toplanmakta ve nesne tanımlayıcısı olarak bu çizelge kullanılmaktadır. Buna ilave olarak başka bir araştırmada [7] da yüzey eğimlerinin konumsal dağılımları

kullanılarak bir tanımlayıcı üzerine çalışılmıştır.

Kazhdan ve ark. [126], küresel harmoniklerin kullanıldığı döndürme bağımlı bir tanımlayıcıyı, döndürme işlemine göre bağımsız bir tanımlayıcıya çeviren bir çalışma yapmışlardır. Önerdikleri yöntemleri, küresel fonksiyonlar seti veya voksel ızgarası kullanan şekil tanımlayıcılar için uygulanabilir bir çözüm önermektedir. Bu işlemlerden sonra küresel fonksiyonlar seti, eş merkezli kürelerden oluşan voksel gridleri yardımı ile çalışan bir yapıya dönüşmektedir. Küresel fonksiyonlar kullanarak döndürme bağımsız bir tanımlayıcı hesaplanmaktadır; (1) fonksiyonu küresel harmoniklerine ayırma (2) her bir frekans için harmonikleri toplama ve her bir frekans bileşeni için L2-norm değerini hesaplama. Sonuç olarak şekil tanımlayıcı yarıçap ve frekans değerleri ile indekslenen 2B bir histograma dönüşmekte ve şekil kütle merkezine göre döndürmeden bağımsız bir tanımlayıcı olmaktadır. Bu yaklaşım, döndürme işlemine göre bağımsız bir yapı sunduğu için duruş normalizasyonuna bir alternatif önermektedir. Yapılan çalışmaların deneysel sonuçları, elde edilen döndürmeden bağımsız şekil tanımlayıcı performanslarının geleneksel olarak PCA yapılan yaklaşımlardan daha üstün olduğunu ortaya koymaktadır. Yaptıkları deneylerde Vranic ve ark. [277] tarafından yapılan çalışmalara da yer vermişlerdir. Son olarak voksel ızgarasını Funkhouser ve ark. [80] tarafından yapılan voksel tabanlı küresel harmoniklerin kullanıldığı, ikili fonksiyon ile birlikte uygulanan bir çalışma için genelleştirmişlerdir. Kazhdan ve ark. [126] çalışmalarında, Euclidean mesafe fonksiyonu kullanarak 3B modellerin voksel ızgaralarını oluşturmuşlardır.

Novotni ve Klein [190], 3B voksellenen modeller için önerdikleri metot ile küresel harmonik tabanlı tanımlayıcıların doğal bir genişletilmiş modeli olan 3B Zernike tanımlayıcısı üzerinde çalışmışlardır. 3B Zernike tanımlayıcısı nesnelerin yapısal durumunu bir küre boyunca dairesel yönelimle elde etmektedirler. Sonuçta 3B Zernike ve küresel harmonik tabanlı tanımlayıcılar döndürme işlemine göre bağımsız bir yapıya kavuşmaktadır. Ancak, elde edilecek tanımlayıcılar için sadece dairesel olarak örnekler almak nesne durum bilgisi için yeterli olmamaktadır (Şekil 3.15). Novotni ve Klein tarafından yapılan sınırlı sayıda deney, 3D Zernike moment tanımlayıcılarının ve küresel harmonik tabanlı tanımlayıcılar ile bazı sınıflar için benzer sonuçlar verirken bazı sınıflar içinde daha başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir.



Şekil 3.15: Ayrık parçaların duruş normalizasyonu olmadığından nesnelere için küresel harmonikler ayırt edici değildir. Şekil [126]'den alınmıştır.

Vranic [275], voksellemenin şeklin birçok detay bilgisini kaybettiği için iyi bir yöntem olmadığını ileri sürmüştür. Bu nedenle, 3B model merkezinden dışarı doğru kabuklar halinde genişleyerek sarılan ve küresel harmonik şekil tabanlı tanımlayıcıya benzeyen dairesel tabanlı bir fonksiyon kullanılmıştır. Bu tanımlayıcıyı, Funkhouser ve ark. [80] tarafından önerilen voksel tabanlı küresel harmonik şekil tanımlayıcısı ile kıyaslanmıştır. Ayrıca, Vranic ve ark., duruş normalizasyonunu başarılı bir şekilde yapabilen ve sürekli PCA [277] olarak adlandırdıkları bir yöntem kullanmışlardır. Bu yöntem için, geleneksel PCA dan ayrı olarak şekil ağı üzerindeki bütün üçgenlerin integralini alarak hesaplama yapmışlardır. Yapılan çalışmada elde edilen deney sonuçları, sürekli PCA modelinin geleneksel PCA modelinden ve ağırlıklı PCA modelinden daha yüksek başarımlar sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca kabuk tabanlı küresel harmonik tanımlayıcının, Funkhouser ve ark. [80], Liu ve ark. [158] tarafından önerilen ve Vranic'in yönteminin genişletilmiş hali olan voksel tabanlı harmonik tanımlayıcıdan daha üstün başarımlara sahip olduğunu göstermektedir. Çünkü şekil üzerine gelen gürültü şeklin kütle merkezini değiştirebilmektedir. Buna alternatif olarak Delta fonksiyonları kullanarak farklı bir küresel harmonik tabanlı merkezden mesafe ölçen fonksiyon önermişlerdir. Kendi veri setlerini kullanarak yaptıkları deneylerde önerdikleri metodun Vranic [275] tarafından önerilen metottan daha başarılı olduğunu göstermişlerdir.

Ricard ve ark. [226], 3B Açısız Dairesel Dönüşüm (Angular Radial Transform (ART)) şekil tanımlayıcı önermişlerdir. Açısız dairesel dönüşüm 3B nesneyi küresel koordinatlar içinde dairesel yörünge fonksiyonlarını temel alarak göstermektedir. Bu yöntemde

içerisinde ART katsayılarının bulunduğu bir diziyi temel fonksiyonlar için kullanılmaktadır. ART katsayıları z-eksenine göre döndürme işlemlerinden bağımsızdır. Dolayısıyla önerilen yöntem için sadece z-eksenine göre PCA ile hizalama yapılması yeterli olmaktadır. Princeton Shape Benchmark kullanarak yaptıkları deneylerin sonuçları, küresel harmonikleri taban olarak kullanan yöntemlerin daha başarılı olduğunu ve Renault tarafından sağlanan 5000 şekilden oluşan veri seti için ise iki yöntemin sonuçlarının aynı olduğunu göstermektedir. Konumsal çizelge tabanlı yaklaşımlar geri getirme doğruluğu yüksek olan yöntemlerdir. Fakat bu yöntemler için önemli bir problem kısmi eşleştirme için uygun olmamalarıdır. Çünkü bu yöntemler kullanılarak cisim üzerinde bulunan parçalar arası ilişkiler ve parça özellikleri ile ilgili ayırt edici bilgilere ulaşılamaz. Buna ilave olarak bu metotlar kullanıcıya bir geri besleme de yapmamaktadır.

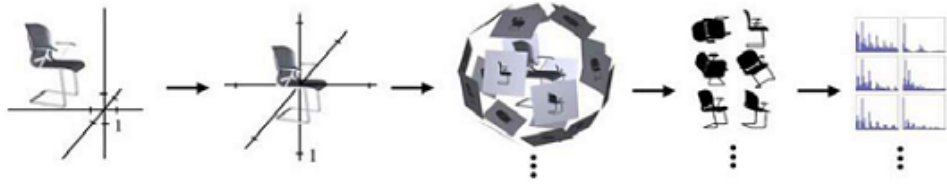
3.5. Hibrit Şekil Tanımlayıcılar

Hibrit şekil tanımlayıcılar hem görünüm hem de geometri tabanlı özelliklerin birlikte kullanılması ile tasarlanan tanımlayıcılardır. Bu özellikleri ile hibrit tanımlayıcılar uygun olarak tasarlandıkları zaman hem kısmi eşleme hemde bütünsel eşleme için kullanılabilirler. Taşıma, döndürme ve ölçeklemeden bağımsız olarak tasarlanabilirler.

3.5.1 Işık Alanı (Light Field)

Işık alanı tanımlayıcısı, Chen ve ark. [43] tarafından önerilmiştir. Çalışma esası, "iki model bütün bakış açılarından birbirine benziyorsa bu iki model benzerdir" ilkesine dayanmaktadır. Verilen 3B model ilk olarak, ölçekten ve taşımadan bağımsız hale getirilir, daha sonra 3B nesnenin paralel izdüşümleri için silüetleri oluşturularak ışık alan tanımlayıcısı için set oluşturulmaktadır. Nesnenin bütününe sardığı düşünülen kübik cismin on iki kenarından görüntü alacak şekilde, cismin merkezini merkez olarak alan bir kamera yardımı ile model etrafından 20 adet görünüm alınır (Şekil 3.16). Bu kamera sistemi kusursuz bir şekilde on iki kenarın kenarlarının tam orta noktasından tekil olarak görünüm alacak şekilde tasarlanmaktadır. Her bir görünüm renkli veya gri-ölçekli cisim yüzeylerini ihmal eden birer resim olarak elde edilir. On iki kenarın karşılıklı kenarlarından alınan görüntüler aynı olduğundan 3B nesnenin temsili için alınan 20 görünümünden 10 tanesi yeterli olmaktadır (Şekil 3.17). Her bir görünüm 35 adet Zer-

nik momentinin [297] kombinasyonu ve 10 adet Fourier tanımlayıcı [300] olarak temsil edilmektedir. Bu şekilde her bir ışık alan tanımlayıcısı 45 boyutlu bir öznelikler vektörü olarak tanımlanmakta ve böylece iki boyutlu bilgi tek boyutlu bilgi olarak vektör haline dönüştürülmektedir. İki 3B model arasındaki benzerliği ölçmek için kamera sistemi önünde her iki cisim birbirlerine bağlı bir şekilde döndürülerek toplamda 60 adet çift görünüm oluşturulmaktadır. Bu adımdan sonra, alınan tüm görüntüler arasındaki mesafelerin minimum değerlerinin toplamı ile bu iki model arasındaki mesafe hesaplanabilmektedir.



Şekil 3.16: Işık alan tanımlayıcısı ile nesnenin tanımlanması. Şekil [245]'den alınmıştır.



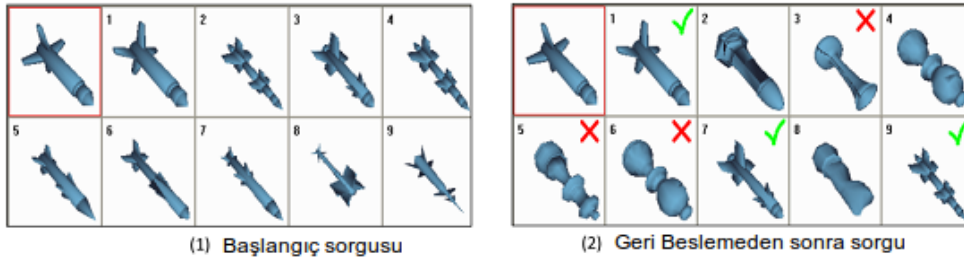
Şekil 3.17: Sandalyenin farklı açılardan silüetleri. Şekil [43]'den alınmıştır.

Çevrim içi uygulamalarda *ışık alan* algoritmasını hızlandırmak için çok seviyeli filtreleme ve arıtma işlemi uygulanabilmektedir. Bu uygulamada sorgu modeli ile karşılaştırılan cisimler, veri seti için ortalama benzerlik değerlerinin çok uzağında ise algoritmanın daha erken evrelerinde reddedilerek işlemler hızlandırmaktadır. Shilane ve ark.

[246], ışık alan tanımlayıcısı için başarımının yüksek ve diğer metotlara kıyasla daha iyi, ancak yüksek işlem yüküne sahip bir tanımlayıcı olduğunu söylemişlerdir.

3.5.2 Alaka Geri Bildirimi

Alaka Geri Bildirimi (RF), arama işlemi esnasında kullanıcıdan aldığı algısal geri bildirimleri uygun biçimde anlamsal olarak kullanarak 3B nesne geri getirme işlemlerinin yapılmasını sağlamaktadır. Önerilen yöntem kullanıcı tarafından kullanılan yüksek seviyeli planlar ve alt seviyeli veri gösterimi aşağıda gösterilen üç şekilde yenileyerek yapılmaktadır. İlk olarak 3B nesnelerin benzer olanları geri alınır ve çok benzer olandan az benzer olana olacak şekilde kullanıcıya gösterilir. İkinci olarak kullanıcı, gösterilen ilişkilere ait geri bildirimlerini iletir. Son olarak ise, geri bildirimlerden elde edilen verilere göre öğrenme/yenilenme süreci başlatılarak, bir sonraki 3B nesne geri getirme işlemlerine yardımcı olmak üzere kullanılır. Yapılan işlem Şekil 3.18’de gösterilmektedir.



Şekil 3.18: Geometrik olarak benzer ancak anlamsal olarak benzer olmayan modeller. Şekil [145]’den alınmıştır.

Denetimli ve denetimli olmayan özellik çıkartımı teknikleri kullanılarak yapılan bir alaka geri bildirim algoritması [145] çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışmada iyi bilinen bilgi geri getirme teknikleri ve yeni bir teknik ile bunların karşılaştırılması tam otomatik olarak diğer yöntemleri geride bırakacak şekilde yapılmıştır. Atmosukarto ve ark., önerdikleri metot için alaka geri bildirim metodu [14] ile birden fazla özellik tipini birlikte kullanarak 3B geri getirme sistemi geliştirmişlerdir. Bu yöntem, sorgu işlemi sırasında bilinen alakalı ve bilinmeyen alakalı nesnelere sonuçlar arasında geri getirecek, nesnelere arasındaki benzerlikleri ön hesaplamalı sıralama ve yüksek boyutlarda hesaplama yapmadan belirlemektedir. Deneysel sonuçlar, tekil olarak belirli özellikler kullanmanın, birden fazla özellik çıkartım yöntemi kullanılarak yapılanlardan daha düşük performans sağladığını göstermektedir.

Leng ve Qin, bir alaka geri getirme mekanizması [146] için güçlü öznitelik vektörlerine sahip farklı yöntemleri başarılı bir şekilde birleştiren ve asimetrik şekillerin de çözümüne yardımcı olan bir yöntem önermişlerdir. Yapılan başka bir çalışmada [84] ise şekil benzerliklerinin şeklin dikkate alınan özellikleri içerisindeki farklarının azlığından kaynaklandığı görüşü ileri sürülerek bir çözüm yöntemi ileri sürülmüştür. Bu şekilde kullanıcı, çok farklı tanımlayıcılar kullanarak çeşitli analiz teknikleri ile karşılaştırma yapabilmektedir. Bu aşamadan sonra kullanıcı, çok seviyeli benzerlik kararları vererek, geri alınan nesnelere arasında kendi fikrini ortaya koyabilmektedir. Sonuç olarak sistem, şekil özelliklerini kullanıcının benzerlik fikirlerini kullanmak için ayarlayabilmektedir. Geri bildirim tekniği herhangi bir ön öğrenme ya da parametre optimizasyonuna dayanmayan basit bir ölçekleme işlemine dayanmaktadır. Ana fikir olarak Alaka Geri Bildirim tekniği öznel olarak duruma bağlı benzerlik ile ilgili bilgilerin sisteme bildirilmesi ve sistemin bir insan gözü belirlemesi gibi nesnelere anlamsal olarak da sadece geometrik özelliklerine bakmadan ayırt etmesini sağlamaktadır.

3.5.3 Öznitelikler Torbası

Özellikler torbası (Bag of Features (BoF)) yaklaşımı, temel olarak metin geri getirme işlemlerinden esinlenilerek geliştirilmiştir. Metin geri getirme işlemlerinde kelime sıklıkları ile kelime histogramları oluşturularak bu yaklaşım kullanılmaktadır. Liu ve ark. [160] tarafından yapılan çalışma ile 3B modellerin kısmi eşleşmesi için BoF özellikler torbası yaklaşımı kullanılmaya başlanmıştır. BoF yaklaşımı birçok yerel özellik ve tanımlayıcıyı tek bir öznitelik vektörü içerisine entegre ettiğinden, sadece bir özelliğin durumuna bağımlı değildir. Bahsedilen yöntem tekil çözünürlükte yerel özellikler kullandığında modellerin diğer bütünsel geometrik özelliklerini kaçırmaktadır. BoF yaklaşımı kümeler arasındaki mesafeyi ölçebilen en çok kullanılan ve güçlü olan 2B şekil tanımlamada kullanılan bir yöntemdir [50, 76, 254, 280]. Genellikle bu yaklaşım yerel özellikleri görsel bir kod kitabı kullanarak yüzlerce kelimelik bir yapı oluşturulmaktadır. Kod kitabı genellikle k-ortalama kümelemesi kullanılarak k değerini kelime sayısı kadar çizecek şekilde yapılır. Daha sonra her bir şekil için kelime hazinesindeki her bir kelimenin şekilde geçişi ile bir histogram oluşturulur. Histogram daha sonra her bir şekil için öznitelikler vektörü haline gelir. Bu durumda yerel özelliklerin şekil üzerindeki konumları dikkate alınmaz. Ancak, bir bisiklet onu oluşturan şekillerin yerleri,

dizilimleri ve ölçekleri ile bisiklettir.

Ohbuchi ve ark. [194], önerdikleri metot için Özellikler Torbası (BoF) kullanmışlardır. Lowe [165] SIFT BoF SIFT olarak isimlendirilen (BF-SIFT), Ölçekten Bağımsız Özellik Dönüşümü (Scale Invariant Feature Transform (SIFT)) SIFT algoritması 3B modelden elde edilen bir set şekil üzerinde derinlemesine uygulanır ve her bir model için binlerce adet özellik toplanır. Anlatılan yöntem BoF yöntemini kullanarak tüm yerel özelliklerin tek bir vektör içerisinde toplandığı bir yöntemdir. BoF yaklaşımı öznelikler vektörü içerisindeki özellikleri ayırarak görsel kelimeler çevirir ve kelimelerin geçiş sıklığını histograma dönüştürür. Ayırıcı veya kod kitabı, yerel özelliklerin çok geniş bir kümesini kullanarak modellerin geri alınması için öncelik sırasını belirler. Binlerce yerel özelliğin birleştirilmesi ile öznelikler vektörü sayesinde özellik karşılaştırılması ve hesaplama karmaşıklığı düşürülür. Geliştirilen algoritma Furuya ve Ohbuchi [81] tarafından rastgele bir sıklıkla seçilen örnekler kullanılarak yapılmaktadır. Bu yöntem GPU ve SIFT yöntemlerine uygulanarak karar ağacı ve SIFT kodlaması ile görsel kelimelere dönüştürülür. Bu metot çok eklemli ve geometrik detayları çok olan modeller için daha başarımlı yüksek sonuçlar vermektedir. Yapılan bir çalışmada [33] HKS-Tabanlı BoF yaklaşımı Şekil Google ile Isıl Çekirdek İmzası metotları birleştirilerek tek bir metot olarak uygulanmıştır. Bu yaklaşım deforme olmuş şekil geri getirme için üstün sonuçlar verileceğini göstermektedir.

3.6. Karşılaştırma

Açıklıkla söylenebilir ki her 3B geri getirme metodunun kendisine göre avantajları ve zayıflıkları vardır. Her biri belirli bir uygulama alanı için diğerlerinden daha uygundur. Bütün durumlar için en iyi başarımlı gösterebilecek bir tanımlayıcı yoktur. Bazıları tüm uygulamalar için bütün durumlarda daha üstün başarımlı gösterirken, özel durumlarda bu tanımlayıcılardan üstün başarımlı gösteren yöntemler olabilir. Literatür tarama çalışmalarında 3B model geri getirme yöntemlerinin bilinen veri tabanlarında çalıştırılması ile elde edilen deney sonuçları değerlendirilmiştir [26, 246, 276]. Yapılan çalışmalarda en çok kullanılan veri tabanı Princeton Shape Benchmark veri setidir. 3B modellerin, yazılım araçlarında ve standartlaşmış deneyler için hazırlanan setlerde yapılacak karşılaştırmalar için uygundur. Bu veri seti internet sayfalarından toplanmış ve insanlar tarafından işlevlerine ve yapılarına göre sınıflandırılan 1814 modelden oluşan

bir settir. Shilane ve ark. [246] yaptıkları çalışmada, 12 şekil tanımlayıcıyı kıyaslamışlardır. Sonuç olarak en yüksek başarıya sahip tanımlayıcıyı ışık alanı (lightfield) tanımlayıcısı olarak belirlemişlerdir. Ancak bu tanımlayıcının çok yüksek hesaplama karmaşıklığına sahip olduğu tespit edilmiştir. Vranic [276] yaptığı çalışmada küresel harmonikler yaklaşımının Euclidean mesafesini tersine genişleterek yaptığı çalışmanın diğer bütün metotların başarısını geçtiğini göstermiştir. Diğer yandan, Bronstein ve ark. [32] yaptıkları çalışmada ise ısı tabanlı bir yaklaşım ile (HKS) özellikler tanımlayıcı algoritmalar içerisinde üstün olduğunu doğrulamaktadır. Literatürde, verilen deney sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için standart veri setleri kullanılması gerekmektedir. Farklı veri setleri kullanmalarından dolayı bağımsız olarak teknik değerlendirme yapılabilmesi çok güçtür. Bu çalışmada elde edilebilen 3B modeller için geri getirme yöntemleri analitik olarak deneysel değerlendirmeler ile incelenmiştir. Deneysel olarak yapılabilecek karşılaştırmalar yerine, teknik olarak detaylı ve kaliteli yöntemler seçilmiştir. Bu yöntemlerin tanımları kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışmada yapılan karşılaştırmalarda literatürde teknik olarak detaylı anlatılmayan yöntemler atlanmıştır. Tablo 3.19 içerisinde tez çalışması kapsamında karşılaştırılan yöntemler için yapılan incelemeler gösterilmektedir. Bu yöntemler altı farklı özellik için incelenmiştir. (1) Şekil temsil gereklilikleri, (2) yeteneklilik, (3) ayırabilme kabiliyetleri, (4) kısmi eşleştirmeye uygunluğu, (5) sağlamlık ve (6) duruş normalizasyonu gerekliliği. Sonuç olarak 3B nesne tanımlama ve geri getirme tekniklerinin avantajları ve limitleri tabloda gösterildiği şekilde özetlenebilir.

Sınıf	Metot	Şekil Modeli	Verimlilik	Ayırt Etme Gücü	Parçalı Eşleme	Gürbüzlük	Normalizasyon İhtiyacı
Görünüm Tabanlı	Siluet Tabanlı	Hacim	Orta	Orta	Hayır	Orta	Evet
	Dönme Görünümü	Nokta Kümesi	Orta	Orta	Evet	Orta	Hayır
	3B Şekil Bağlam	Nokta Kümesi	Yavaş	Düşük	Evet	Düşük	Evet
Geometri Tabanlı	İskelet Çizgeleri	Hacim	Orta	Orta	Evet	Orta	Hayır
	Reeb Çizgeleri	Hacim	Orta	Orta	Evet	Orta	Hayır
	Hacimsel Hata	Hacim	Hızlı	Orta	Hayır	Yüksek	Evet
	Ağırlıklı Nokta	Ağ	Hızlı	Yüksek	Hayır	Yüksek	Evet
	Genişletilmiş Gaussian	Tüm Model	Hızlı	Düşük	Hayır	Hayır	Evet
	Isıl Çekirdek İmzası	Tüm Model	Hızlı	Yüksek	Evet	Yüksek	Hayır
	Konumsal Çizgeler	Tüm Model	Hızlı	Yüksek	Hayır	Yüksek	Evet
Hibrit	Işık Alanı	Ağ	Yavaş	Yüksek	Hayır	Yüksek	Evet
	Alaka Geri Bildirimi	Tüm Model	Yavaş	Yüksek	Evet	Orta	Hayır
	Özellikler Torbası	Tüm Model	Hızlı	Yüksek	Hayır	Yüksek	Evet

Şekil 3.19: 3B Şekil geri getirme tekniklerinin karşılaştırılması.

4. ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ İSKELET TABANLI ŞEKİL GERİ GETİRME

Tez çalışmasının bu bölümünde önce 2B şekil tanımlayıcı ve temsil yöntemlerinin kısa bir özeti tartışılmış ardından, iskelet temsil yönteminin şekil geri getirme algoritmalarında kullanımı hakkında bilgi verilmiştir. Önerilen algoritmanın 2B şekiller için uygulaması yöntemi anlatıldıktan sonra 3B şekiller için uyumu ilgili bölümde detaylı olarak anlatılmış ve formal olarak sunulmuştur. Daha sonra EMD uzaklık fonksiyonun kullanımına değinilerek, algoritmanın çalışması detaylı bir anlatım ile tamamlanmıştır.

4.1. 2B Şekil Tanımlayıcı ve Temsil Yöntemleri

Tezin önceki bölümlerinde detaylı olarak değinilen 2B şekil geri getirme yaklaşımları, şekil özniteliklerinin elde edilme yöntemlerine bağlı olarak sınır tabanlı ve alan tabanlı olmak üzere iki sınıf altında incelenmiştir. Sınır-tabanlı şekil tanımlayıcılar, sadece şekil sınır bilgilerinden yararlanarak elde edilen öznitelikleri kullanmakta iken alan-tabanlı şekil tanımlayıcılar şeklin tüm noktalarını tanımlayıcı özniteliklerinin toplanması için kullanmaktadır.

Sınır tabanlı teknikler sınır inceleme yöntemine göre bütünsel ve yapısal olmak üzere iki alt grupta incelenmektedir. Her iki alt sınıfta elde edilen öznitelikler, vektörel olarak şekli tanımlama işleminde kullanılmaktadır. Yapısal yaklaşımlar, şekil topolojisi ve kısmi yapısını da göz önüne alarak çözüm üretirken, bütünsel yaklaşımlar şeklin geneli üzerinden elde edilen öznitelikleri kullanarak işlem yapmaktadır. Şekiller arasında benzerlik bulma işlemleri için kullanılan birçok yöntem vardır. Elde edilen vektörler arasındaki mesafelerin metrik ölçümleri, dizge (string) veya çizge (graph) benzeşim fonksiyonları gibi birçok şekilde yapılabilmektedir.

Alan tabanlı yöntemler şeklin tüm noktalarını tanımlayıcı özniteliklerinin toplanması için kullanılmaktadır. Şekli ızgaralar kullanarak bölgelere ayırıp daha sonra öznitelikler çıkarılması, şeklin gövde yapısına göre özellikler oluşturulması ve şekil iskelet temsili gibi yöntemler alan tabanlı tanımlayıcılar örnek olarak gösterilebilir. Sınır tabanlı

metotlara benzer olarak alan tabanlı metodlarda da şekil uygulanacak yöntemlere göre bütünsel ve yapısal öznitelikleri ile alt sınıf düzeyinde dallanmaktadır. Alan tabanlı tanımlayıcılar öznitelik boyutunun büyük olmasından dolayı hesaplama karmaşıklığı yüksek tanımlayıcılar olarak bilinmektedir.

Alan tabanlı metotlar ile sınır tabanlı metotlar benzer yaklaşımlardır. İki yöntemde de şeklin kenarlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu açıdan bakıldığında iki yöntem arasında benzerlikler dikkat çekmektedir. Sınır tabanlı yöntemler, alan tabanlı yöntemlere nazaran daha çok tercih edilmekte ve üzerinde daha kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır. Alan tabanlı yöntemlerde şeklin yüzey ve iç özellikleri bilinirken, sınır tabanlı yaklaşımlar insan algısında yakın bir şekilde şeklin sınırları ve topolojisi ile ilgilenir. Ancak alan tabanlı yöntemler, sınır tabanlı yöntemler gibi şekil sınırları ve topolojisinde olan değişikliklerden fazla etkilenmezler. Özellikle iç kısmı ve sınırlarında problem olan şekiller için alan tabanlı yaklaşımların başarımı daha yüksektir. Diğer bir açıdan bakıldığında şeklin iç yapısı ve topolojik bilgileri sınır bilgilerinden çok daha tutarlı ve benzeşim dönüşümlerinden daha az etkilenen yapıdadır. Genel olarak bütün uygulama alanlarında kullanılabilirler ve daha doğru bir geri getirme başarımı sağlarlar. İlave olarak alan tabanlı metotlar, sınır tabanlı metotlar için genel bir problem olan şekil kusurları ile daha iyi başa çıkabilmektedir.

Bu çalışmada önerilen yöntem alan tabanlı ve yapısal bir yöntem olarak sınıflandırılmaktadır. Ancak alan tabanlı yöntemlerin özellik boyut problemlerini taşımamaktadır. Zenginleştirilmiş iskelet temsili şekli düşük yoğunluklu bir vektör yardımı ile tekrar oluşturabilecek kadar güçlü bir tanımlayıcıdır.

4.2. 2B İskelet Tabanlı Şekil Geri Getirme

İskelet, şeklin genel ve topolojik özniteliklerini barındırmakta ve 2B şekiller için şekil temsili olarak kullanılmaktadır [265]. Bu nitelikleri ile iskelet temsili, karakter tanıma, görüntü analizi, sayısal görüntü işleme, parmak izi tanıma, bilgisayarlı görü ve ikili görüntü sıkıştırma gibi birçok 2B görüntü tanıma alanında önemli bir yere sahiptir.

Şekil iskelet temsiline ana fikri, 2B şeklin yüzeyinde bulunan detaylardan bağımsız, şeklin çekirdeği olarak anılabilecek bir temsil ile şekli tanımlamaktır. Bu temsil yöntemi şekli düşük veri yoğunluğunda tanımlama yeteneğine sahiptir, bu sebeple "şeklin

çekirdeği" olarak anılmaktadır.

Şeklin medyal eksenini olarak da adlandırılan iskelet temsili, şekil içerisine çizilebilen en büyük yarıçapa sahip dairelerin merkezlerini birleştiren eğriden oluşmaktadır. İskelet noktaları şeklinde ifade edilebilen eğri noktaları, şekil kenarlarına en az iki ayırık noktada dokunan ve bütünüyle şekil içerisinde kalan maksimum dairelerin merkezlerinden oluşmaktadır. Buna göre iskeletlendirme işlemi sırasında, Şekil 4.2'de gösterilen A,B ve C noktaları iskelet noktaları olarak kabul edilirken D noktası iskelet noktası olarak kabul edilmemektedir. Kabul edilen iskelet noktaları aşağıdaki eşitlikte gösterilmektedir:

$$p_i = \{x_i, y_i, r_i\} \quad (4.2.1)$$

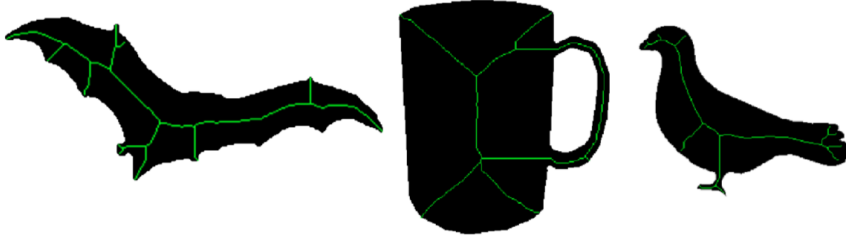
burada, p_i her bir iskelet noktasını, (x_i, y_i) koordinat noktalarını ve r_i ise o nokta için yarıçap değerini temsil etmektedir.

İskeletlendirme işlemleri şekil sınırları ve sınır karakteristiğine bağlı olarak değişikliklere karşı hassasiyete sahiptir. Fakat bu hassasiyet, şekil sınırları için iskelet çıkarılmadan şekil üzerinde filtreleme işlemleri yapılarak ya da iskelet oluşturulduktan sonra iskelet üzerinde yapılan işlemler sayesinde azaltılmaktadır [244].

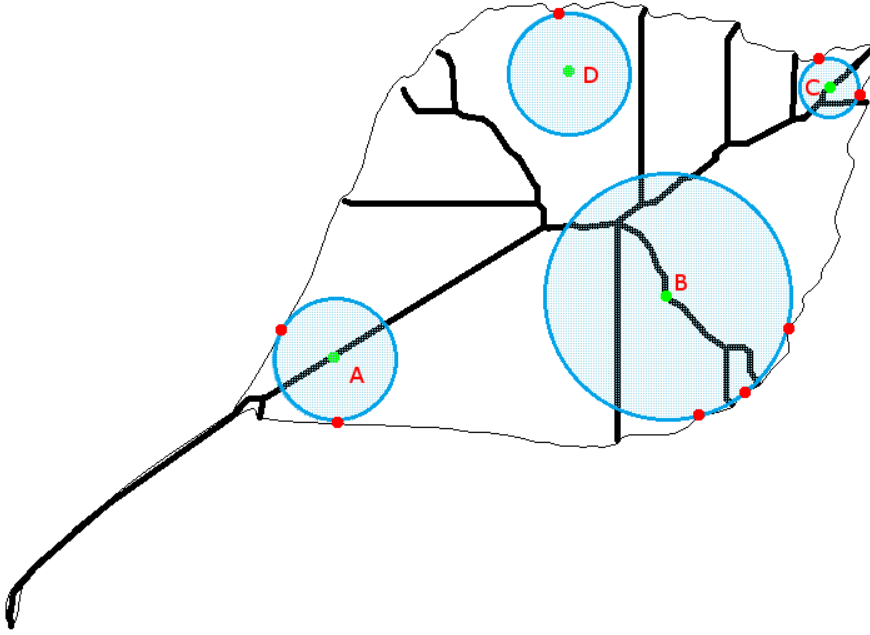
İskelet şekil sınır detaylarını barındıran ve insan göz algısına hitap eden yapıdadır. Şekil sınırları, iskeletleri ile uyumlu bir yapıda olduğundan şekil parçalara ayrıldığında her parça temel şekilleri temsil edebilir. Örneğin daire şeklinin iskelet karakteri ile dikdörtgen şeklin karakteri farklıdır. Şekiller arasındaki bu tür farklılıkları Şekil 4.1'de yarasa, bardak ve kuş için ayrı ayrı gösterilmektedir.

İskelet noktaları için dairelerin yarıçap değerleri ile birlikte koordinat değerleri kullanılarak, çok küçük kayıplar ile şekiller kolayca yeniden teşkil edilebilmektedir.

Tez kapsamında yapılan çalışmada kullanılan şekil iskelet çıkarma yöntemleri içinden, literatür taranarak, algoritmaya en uygun olanı seçilmiş, ancak iskeletlendirme işlemleri konuları değerlendirilmemiştir.



Şekil 4.1: Örnek olarak üst üste bindirilmiş şekiller ve iskeletleri temsili olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.2: 2B düzlemde yaprak şeklinin iskelet temsili verilmektedir. A,B ve C noktaları iskelet noktaları iken D noktası değildir.

4.3. Algoritmanın 2B Şekiller İçin Uygulanması

Tez çalışmasında 2B şekil geri getirme kapsamında önerilen algoritma iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda; sorgu yapılacak şekle ait iskelet noktaları Bölüm 4.2’de bahsedildiği gibi oluşturulmakta ve bu iskelet noktaları, Bölüm 4.3.1’de anlatılan iskelet zenginleştirme işlemine tabi tutulmaktadır. Zenginleştirme işlemi neticesinde sorgu yapılacak şekile ait zenginleştirilmiş iskelet vektörü elde edilmiş olup, bu vektör Q dağılımı olarak adlandırılmaktadır. Sorgulanacak veri seti içerisinde bulunan şekiller için şekil temsili ise P dağılımı olarak tanımlanmaktadır. Şekil dağılımlarının formal ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
P &= \{(x_1, y_1, r_1, e_1), \dots, (x_n, y_n, r_n, e_n)\} \\
Q &= \{(x_1, y_1, r_1, e_1), \dots, (x_m, y_m, r_m, e_m)\}
\end{aligned}
\tag{4.3.1}$$

Önerilen algoritmanın ikinci kısmında ise; veri seti içerisinde bulunan şekil temsilleri (P Dağılımı) ve sorgu şekline ait zenginleştirilmiş vektör (Q Dağılımı) arasındaki mesafe Bölüm 4.3.2’te anlatılan yöntemler ile hesaplanmaktadır. Q ve P dağılımları arasındaki hesaplanan mesafeler değerlendirilerek benzerlik oranları (durumları) ortaya konmaktadır.

4.3.1 2B İskelet Zenginleştirme Değeri e

Bölüm 4.2’de anlatılan şekil iskeleti üzerine çizilen dairelerin yarı çaplarından en büyük olanı hesaplamalarda kullanılmak üzere saklanmaktadır. Böylece her bir iskelet noktası için kendi yarıçapından, saklanan maksimum yarıçap değerine kadar yarı çapı artırılarak daireler çizilir. Bu şekilde çizilen dairelerin bir kısmı şekil içinde kalırken bazı kısımları da şekil sınırları dışına taşmaktadır. 2B iskelet zenginleştirme değeri e , iskelet üzerindeki o noktaya çizilen dairenin alanında bulunan toplam piksel sayısı ile şekil içerisinde kalan kısımlarına ait piksel sayıları oranı olarak hesaplanmakta ve formal olarak aşağıda gösterilmektedir:

$$e_i = \sum_{k=r_i}^{R+\varepsilon} \frac{n_i^k}{N_i^k},
\tag{4.3.2}$$

öyle ki, n_i^k şekil içerisinde bulunan piksellerin sayısı, N_i^k ise k yarıçaplı dairesi oluşturan piksellerin toplam sayısı, R değeri P şekline ait iskelet içerisinde bulunan en büyük yarıçap değeri ve ε küçük pozitif bir sabittir.

Sonuç olarak, P şeklinin iskelet noktaları içerisine e_i bileşen değerlerini eklenerek, P şekil iskeleti zenginleştirilmiş ve güçlendirmiş olunur. Şekil 4.3’de adım adım gösterilmektedir.



Şekil 4.3: Girdi şekli içerisinde bulunan en büyük yarıçap değeri bulunduktan sonra, her bir nokta için artan yarıçaplarda daireler çizilir.

4.3.2 EMD Fonksiyonunun 2B Şekiller İçin Önerilen Algoritma İle Kullanımı

Görüntü geri getirme çalışmalarında, uzaklık mesafe ölçüm fonksiyonunun hem insan sezgisine yakın özellikte hem de kısmi eşlemeye uygun yapıda olması gerekmektedir. Bu özellik, uzaklık hesaplama fonksiyonunun bir dağılım ile alt kümesi olan diğer dağılım arasında eşleştirme yapılabilmesi anlamına gelmektedir. Earth Mover's Distance (EMD), kısmi eşleştirme ve bütünsel eşleştirme işlemlerinin her ikisini birlikte karşılayabilen yapısıyla öne çıkmaktadır. Birçok şekil geri getirme uygulaması tarafından [3, 57, 58, 75, 149, 278, 285] başarı ile kullanılan EMD fonksiyonu [228] tez çalışması kapsamında uzaklık fonksiyonu olarak tercih edilmiştir. Önerilen algoritma için, literatürde sık kullanılan diğer hesaplama fonksiyonları ile karşılaştırmalar yapılmış ve sonuçlar deneyler bölümünde tartışılmıştır.

Şekil farklılıkları nedeni ile şekil geri getirme uygulamalarının bir çoğunda aynı sayıda dağılım elemanı garanti edilemez. İskelet temsilinin Bölüm 4.3'de anlatıldığı şekilde elde edilen, e değerleri eklenerek oluşturulan zenginleştirilmiş yeni temsil dağılımları da bu şekildedir. Bu problem EMD'nin, dağılımların aynı sayıda eleman sayısına sahip olmasını önemsemeyen bir yapıya sahip olması ile aşılmaktadır. Bir dağılımdan diğer dağılıma olan mesafeyi bunu gerektirecek minimum işi bularak yapmaktadır. Dolayısıyla, EMD kullanımı yukarıda anlatılan sorunlara çözüm olabilmektedir.

Formal olarak anlatmak gerekirse, daha önce tanımlandığı gibi P ve Q dağılımları m ve n elemana sahip iki şekil temsili olsun. $D = [d_{ij}]$ mesafe fark matrisi, öyle ki, d_{ij} fark değerleri, $p_i \in P$ ve $q_j \in Q$ noktaları için şekil mesafe değerleri olarak tanımlanmaktadır. EMD uzaklık fonksiyonu mesafe hesaplama işlemlerinde, konum fark fonksiyonu olarak Eberly [65] tarafından yapılan çalışma temel alınmıştır. Konum fark fonksiyonu,

2B için $d_{2B}(p_i, q_j)$ olacak şekilde aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$d_{2B}(p_i, q_j) = \sqrt{\alpha_1(x_i - x_j)^2 + \alpha_1(y_i - y_j)^2 + \alpha_2(e_i - e_j)^2}, \quad (4.3.3)$$

öyle ki, α_1 ve α_2 nokta koordinatları ve ağırlıkları ile ilişkilendirilmiş iki parametredir. Taşıma ve döndürme etkisi iskelet noktalarının konumlarında değişikliklere neden olmakta ancak, çalışma kapsamında bulunarak oluşturulan ağırlık değerlerinde bir değişikliğe yol açmamaktadır. Yapılan deneylerde α_1 ve α_2 değerleri sırası ile 0.1 ve 0.9 olarak alınmıştır. EMD fonksiyonu ile hedeflenen, $F = [f_{ij}]$, ile f_{ij} değerlerini p_i ve q_j arasındaki akışı minimize edecek bütün akışın minimum değerini bulmaktır. Amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi kullanılmıştır.

$$\text{Work}(P, Q, F) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} d_{ij} \quad (4.3.4)$$

Bölüm 6.2.4' de anlatılan EMD amaç fonksiyonunda kullanılan w değerler fonksiyonun ağırlık değerleridir. Tez çalışmasında w ağırlık değerleri olarak, üretilen e değeri kullanılmaktadır. Bu kısıtlar P' den Q' ya doğru olan akışın negatif olmadığını ve çift yönlü olduğunu garanti etmektedir. P dağılımının her elemanından çıkan toplam akış değeri ile, Q dağılımının her elemanına ulaşan toplam akış değeri, bu ağırlık değerleri ile sınırlıdır. Bu şekilde P' den Q' ya akış değeri maksimum olacak şekilde hesaplamalar tamamlanır.

Şekil geri getirme işleminin büyük veri setleri ile kullanılması sırasında yüksek boyutta veri kritik bir sorun oluşturmaktadır. EMD fonksiyonu kullanılarak yapılan hesaplamalarda kullanılan özellik sayılarının ve çeşitlerinin artması, hesaplama karmaşıklığını üssel olarak artmasına sebep olmaktadır. Aynı sorun şekil temsillerinde tanımlayıcılar çok boyutlu olduğu durumlarda da ortaya çıkmaktadır.

Pele ve Werman [210] tarafından yapılan çalışma ile FastEMD olarak adlandırdıkları optimize edilmiş EMD olarak da tanımlayabileceğimiz yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. FastEMD, orijinal EMD yöntemi hesaplamaları yapılırken hesap edilen konumsal mesafe işlem sayısını bir eşik değeri kullanarak azaltmaktadır. Yazarlar tarafından ya-

yınlanan deney sonuçları, önerilen yöntemin gürültü ve nicemleme etkileri altındaki kayıplarının kabul edilebilir oranlarda olduğunu göstermiştir. İnsan algı hassasiyetinin altında kalan benzerlikleri, belirledikleri eşik değer ile aşıklarından dolayı hesaplama karmaşıklığını yüksek oranda düşürmüş, ancak algoritma kararlılığı kabul edilebilir seviyede kalmıştır. Çalışmada EMD fonksiyonunun geliştirilen FastEMD versiyonu kullanılmıştır.

Buna ilave olarak, orijinal EMD tanımı yapılan [47] çalışmada, taşıma benzeşimi için genişletilmiştir. T taşıma işlemi ikinci kümeye uygulandığında, mesafeler d_{ij}^T , $d_{ij}^T = d(p_i, T(q_j))$ olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda EMD hedef fonksiyonu aşağıdaki hale gelmektedir:

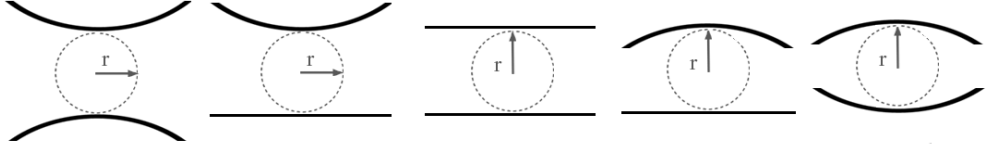
$$\text{Work}(P, Q, F, T) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} d_{ij}^T \quad (4.3.5)$$

öyle ki, T taşıma benzeşimi etkisidir. Genişletilmiş EMD kullanılması, önerilen yöntemin taşıma benzeşimi altında uygulanabilir olmasını sağlamıştır.

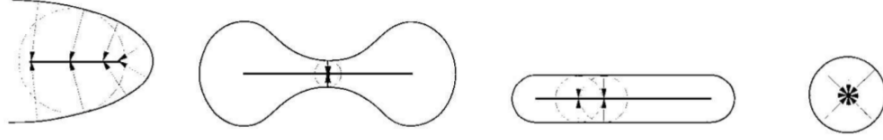
4.3.3 İskelet Zenginleştirme Değeri e 'nin 2B İskelet Temsiline Katkıları

Zenginleştirilen 2B iskeletler, 4-boyutlu (x, y, r, e) vektörler olarak temsil edilebilmekte ve orijinal iskelet temsilinden çok daha güçlü, ayırt edici yeteneğe sahip olmaktadır. Bu temsil gösterimi iskeletler ile ilişkilendirilen şekiller için aynı yarıçap değerlerine sahip alanların farklı e değerleri ile ayırt edilmesinde yardımcı olmaktadır. Şekil 4.4, 2B şekiller için bir örnek teşkil etmektedir. Yarıçap değeri aynı olan iskelet noktalarının e değerleri tüm iskeletler için aynı olmayabilir. Şekil içerisine maksimum değerli yarıçap için daireler çizildiğinde her bir şekil için farklı miktarda noktanın şeklin içinde kaldığı gözükmemektedir.

Yapılan bu katkı ile iskelet temsili üzerine şekil sınır bilgileri ilave edilmektedir. İskelet temsilinin orijinal yapısı ile şeklin her bölgesinin kalınlık ve inceliği bilinirken, e değeri katkısı ile şeklin o noktadaki büyüklük karakteri bilinmektedir. Şekil 4.5'de iskelet grameri, Siddiqi ve ark. [252] tarafından önerilen iskelet tabanlı bir tanımlayıcıya ait şekil parça tipleri görülmektedir. Yapılan çalışmada iskelet koordinat değerleri ve yarıçap değerleri kullanılarak dört farklı tür parça önerilmiştir. Bu ve benzeri çalışmalar için e değeri yeni yaklaşımlar getirmektedir.



Şekil 4.4: Aslında herbir şekil için gösterilen noktalara çizilen dairelerin yarıçapları aynı değerlere sahip iken, yarıçap değerlerinin artırılarak çizilmesi ise elde edilen değer şekillerin daha iyi ayırt edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.5: Siddiqi ve ark. tarafından önerilen şekil grafik parçaları. Şekil [252]'den alınmıştır.

4.4. 3B Şekil Tanımlayıcı ve Temsil Yöntemleri

3B nesne geri getirme yöntemleri için her 3B model, nesneyi belirleyen bir şekil tanımlayıcı tarafından temsil edilir. Nesnenin basitleştirilmiş temsili modelin birçok önemli özelliğini birlikte taşımaktadır. Bu hali ile tanımlayıcı, elde edilmesi basit olmamasına karşın depolanması kolay ve nesneyi doğrudan karşılaştırmadan çok daha etkin bir çözüm sunmaktadır. Modelin bir çok özelliğini barındıran basit yapı, modeli yeni baştan oluşturabiliyor ise tam anlamıyla bir şekil tanımlayıcı olarak kabul edilir.

Önceki bölümlerde değinildiği gibi tez kapsamında 3B şekil tanımlayıcılar üç ana grupta incelenmektedir. Şeklin farklı açılardan alınan fotoğraf görüntüleri kullanılarak elde edilen temsil yöntemleri *görünüm tabanlı*, şeklin geometrik özelliklerini kullanılarak elde edilen temsil yöntemleri *geometrik tabanlı* ve her iki özelliği kullanarak elde edilen temsil yöntemleri *hibrit* yapılı olarak sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma işlemi, yöntemlerin kullandıkları özelliklerin çoğunlukla girdikleri sınıf dikkate alınarak yapılmıştır.

İnsan algısı cisimleri tanıırken, farklı açılardan aldığı görüntüleri birleştirerek tanımaktadır. Bu yaklaşım ile cisimlerin farklı açılardan alınan görüntüleri kullanılarak oluşturulan şekil tanımlayıcılar görünüm tabanlı yöntemleri oluşturmaktadır. Daha çok 3B cisimlerin 2B düzleme yansımaları ile elde edilen şekiller kullanılır. 2B görüntüler kullanılarak elde edilen şekil sınırları, yüzey detayları gibi birçok özellik herbir

görünüm için hesaplanır. Bu şekilde her bir görünüm için oluşturulan temsiller tek tek eşleştirilerek modeller karşılaştırılır.

Geometri tabanlı metotlar, hacim, yüzey alanı, şekil eğrilikleri, cisim hacim oranları, cisim yüzey oranları, gövde özellikleri gibi cisimden elde edilen belirleyici değerleri kullanmaktadır. Bu parametreler ve oranlar cismin özelliğini belirleyen bütünsel değerlerdir ve kısmi eşleme yapılması uygun değildir. Cismin yerel geometrik özelliklerini kullanan metotlar ise hesaplama karmaşıklığı bakımından zor ancak kısmi eşleme için uygun olarak değerlendirilmektedir. Geometrik metotlar çoğunlukla dağınık ortamlar ve yüzey eşleştirme işlemlerinde kullanılmaktadır. Bu metotların veri setleri ile ilgili ön bilgiye ve poz normalizasyonuna ihtiyacı yoktur.

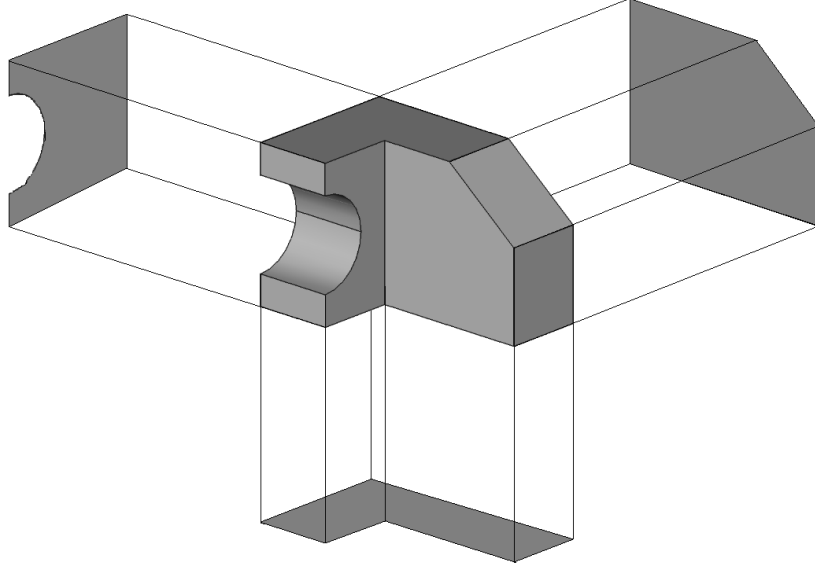
Hibrit şekil tanımlayıcılar modellerin tüm özelliklerinin birlikte kullanılmasına imkan veren tanımlayıcılardır. Bu özellikleri ile hibrit tanımlayıcılar hem kısmi eşleme hemde bütünsel eşleme için kullanılabilir. Taşıma, döndürme ve ölçeklemeden bağımsız olarak çalışabilmeleri mümkündür.

Tanımlayıcıların tasarlanma kriterlerine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Bütün durumlar için en iyi sonucu veren bir tanımlayıcı yoktur, ancak bazıları her koşul altında diğerlerinden daha iyi başarıma sahip olabilir. 2B şekil tanımlayıcılar için geçerli olduğu gibi MPEG-7 kriterleri 3B şekil tanımlayıcılar içinde geçerlidir.

Bu çalışmada önerilen yöntem şeklin iskelet tabanlı temsiline, hem 2B hem de 3B şekiller için zenginleştirilmesi ile oluşmaktadır. İskeleti zenginleştirerek modelin yerel ve bütünsel özellikleri temsil gücüne eklenmiştir. Yöntemin temel avantajı, kısmi eşleme ve bütünsel eşleme işlemlerinde göstermiş olduğu yüksek başarıyı ve 3B düzlemde 2B düzleme indirgenme ihtiyacı olmayan bir tanımlayıcı olmasıdır.

4.5. 3B Şekillerin 2B Düzleme İndirgeme Problemi

3B nesne, 2B düzleme çevrilmek istendiği zaman nesne bilgilerini içeren bir boyut kaybolduğundan şekil ile ilgili önemli fiziksel özelliklerde kaybolmaktadır. Şekil 4.6'de örneklendiği gibi bu durum 3B şekillerin görüntülenme açılarına göre farklı şekilde 2B görünümüne ortaya çıkarmaktadır. Özellikle görünüm tabanlı 3B geri getirme yaklaşımları geliştirme çalışmalarında bu problem üstesinden gelinmesi gereken bir konudur.



Şekil 4.6: 3B şekiller 2B düzlemde farklı açılardan farklı cisimler olarak görülebilir.

4.6. 3B İskelet Tabanlı Şekil Geri Getirme

3B iskelet tabanlı şekil geri getirme işlemi, Bölüm 4.2’de tarif edilen yöntemi temel almaktadır. Ancak eklenen eksen 2B iskelet tabanlı şekil geri getirme işlemlerini değiştirmektedir.

Buna göre, 3B iskelet temsili (medyal eksen), şekil içerisine çizilebilen en büyük yarıçapa sahip kürelerin merkezlerini birleştiren eğriden oluşmaktadır. 3B şekil iskeletine ait iskelet noktaları aşağıdaki eşitlikte gösterilmektedir:

$$p_i = \{x_i, y_i, z_i, r_i\} \quad (4.6.1)$$

burada p_i , 3B şekil iskeletinin her bir iskelet noktasını, (x_i, y_i, z_i) koordinat noktalarını ve r_i ise o nokta için yarıçap değerini temsil etmektedir.

Bölüm 4.2’te 2B şekil iskeletleri için bahsedilen hassasiyet ve iskelet kullanılarak şeklin tekrar oluşturması özellikleri 3B şekil iskeletleri için de geçerli olmaktadır.

4.7. Algoritmanın 3B Şekiller İçin Uygulanması

Tez çalışmasının temel özelliklerinden bir tanesi 2B ve 3B şekil geri getirme işlemini ortak bir algoritma ile yapmasıdır. Bundan dolayı Bölüm 4.3’de önerilen algoritma ile

3B şekil için kullanılacak algoritma arasında işlem adımları olarak herhangi bir fark bulunmamaktadır. Aralarındaki fark, Bölüm 4.6'de bahsedilen iskelet noktaları oluşturma ve Bölüm 4.7.1'da anlatılan iskelet zenginleştirme işleminden kaynaklanmaktadır.

Zenginleştirme işlemi neticesinde sorgu yapılacak şekile ait zenginleştirilmiş iskelet vektörü elde edilmiş olup, bu vektör Q dağılımı olarak adlandırılmaktadır. Sorgulanan veri seti içerisinde bulunan şekiller için şekil temsili ise P dağılımı olarak tanımlanmaktadır. Şekil dağılımlarının formal ifadesi aşağıdaki gibidir:

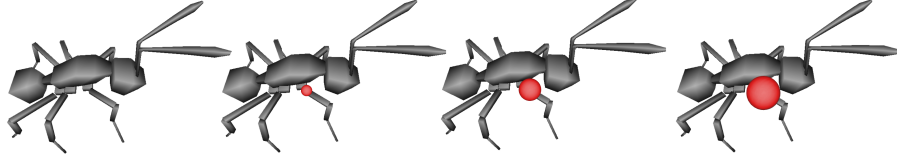
$$\begin{aligned} P &= \{(x_1, y_1, z_1, r_1, e_1), \dots, (x_n, y_n, z_n, r_n, e_n)\} \\ Q &= \{(x_1, y_1, z_1, r_1, e_1), \dots, (x_m, y_m, z_m, r_m, e_m)\} \end{aligned} \quad (4.7.1)$$

Önerilen algoritmanın ikinci kısmında ise; veri seti içerisinde bulunan şekil temsilleri (P Dağılımı) ve sorgu şekline ait zenginleştirilmiş vektör (Q Dağılımı) arasındaki mesafe üçüncü boyut dikkate alınarak, Bölüm 4.7.2'de anlatılan yöntemler ile hesaplanmaktadır. Q ve P dağılımları arasındaki hesaplanan mesafeler değerlendirilerek benzerlik oranları (durumları) ortaya konmaktadır.

4.7.1 3B İskelet Zenginleştirme Değeri e

Bölüm 4.6'da anlatılan şekil iskeleti üzerine çizilen kürelerin yarı çaplarından en büyük olanı hesaplamalarda kullanılmak üzere saklanmaktadır. Böylece her bir iskelet noktası için kendi yarıçapından, saklanan maksimum yarıçap değerine kadar yarı çapı artırılarak küreler çizilir. Bu şekilde çizilen kürelerin bir kısmı şekil içinde kalırken bazı kısımları da şekil sınırları dışına taşmaktadır. 3B iskelet zenginleştirme değeri e , iskelet üzerindeki o noktaya çizilen kürenin hacminde bulunan toplam piksel sayısı ile şekil içerisinde kalan kısımlarına ait piksel sayıları oranı olarak hesaplanmakta ve formal olarak aşağıda gösterilmektedir:

$$e_i = \sum_{k=r_i}^{R+\varepsilon} \frac{n_i^k}{N_i^k}, r \leq R \quad (4.7.2)$$



Şekil 4.7: Girdi şekli içerisinde bulunan en büyük yarıçap değeri bulunduktan sonra, herbir nokta için artan yarıçaplarda küreler çizilir.

öyle ki, n_i^k şekil içerisinde bulunan piksellerin sayısı, N_i^k ise k yarıçaplı küreyi oluşturan piksellerin toplam sayısı, R değeri P şekline ait iskelet içerisinde bulunan en büyük yarıçap değeri ve ε küçük pozitif bir sabittir.

Sonuç olarak, P şeklinin iskelet noktaları içerisinde e_i bileşen değerlerini eklenerek, P şekil iskeleti zenginleştirilmiş ve güçlendirmiş olunur. Şekil 4.7’de en soldaki şekil orijinal şekli göstermekte sağa doğru gidildikçe yarıçap artışları gözükmektedir.

4.7.2 EMD Fonksiyonunun 3B Şekiller İçin Önerilen Algoritma İle Kullanımı

Bütünsel ve kısmi eşleştirme işlemlerinin her ikisini birden karşılayabilen yapısından dolayı Bölüm 4.3.2’de detayları bahsedilen EMD fonksiyonu, 3B şekil karşılaştırma işlemlerinde de kullanılmıştır.

Bölüm 4.3.2’de bahsedilen EMD fonksiyonuna ait formülasyon üç boyutlu düzlemde farklılık göstermektedir. Bu farklılıkları formal olarak anlatmak gerekirse, daha önce tanımlandığı gibi P ve Q dağılımları m ve n elemana sahip iki şekil temsili olsun. $D = [d_{ij}]$ mesafe fark matrisi, öyle ki, d_{ij} fark değerleri, $p_i \in P$ ve $q_j \in Q$ noktaları için şekil mesafe değerleri olarak tanımlanmaktadır. Bölüm 4.3.2’de anlatılan konum fark fonksiyonu 3B için $d_{3B}(p_i, q_j)$ olacak şekilde aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$d_{3B}(p_i, q_j) = \sqrt{\alpha_1(x_i - x_j)^2 + \alpha_1(y_i - y_j)^2 + \alpha_1(z_i - z_j)^2 + \alpha_2(e_i - e_j)^2}, \quad (4.7.3)$$

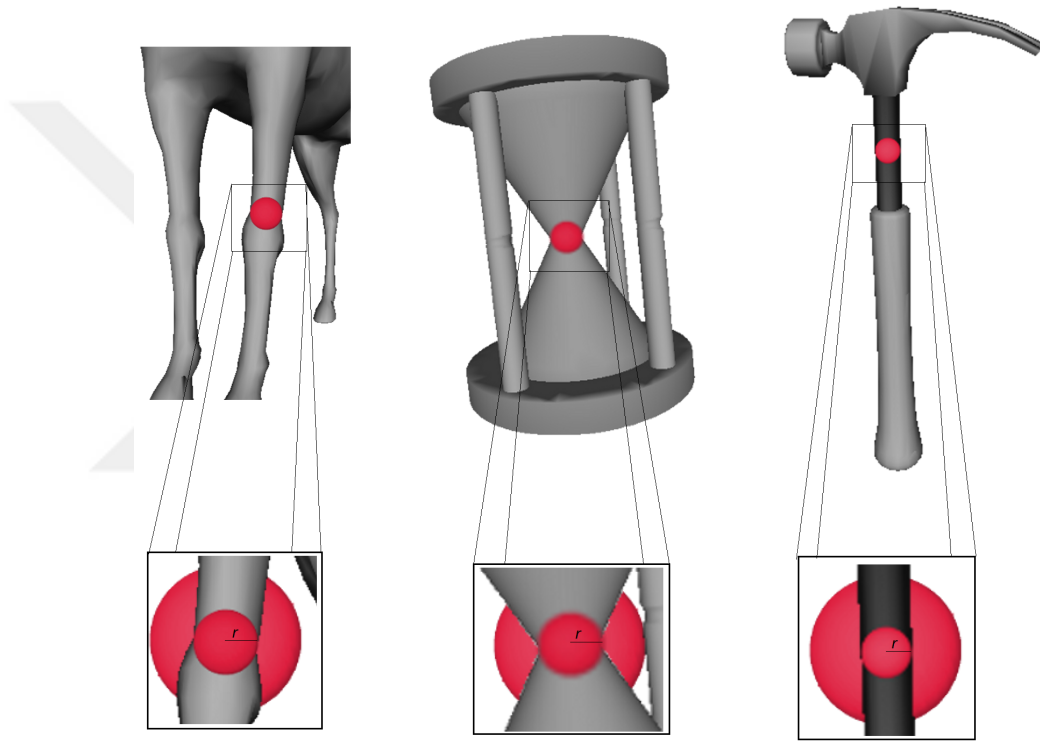
öyle ki, α_1 ve α_2 nokta koordinatları ve ağırlıkları ile ilişkilendirilmiş parametreler olup yapılan deneylerde α_1 ve α_2 değerleri sırası ile 0.1, 0.9 olarak alınmıştır.

Bölüm 4.3.2’de anlatılan; w ağırlık değerleri olarak, üretilen e değeri kullanılması, EMD fonksiyonunun hesaplama karmaşıklığının üssel olarak artması nedeni ile FastEMD fonksiyonunun tercih edilmesi ve benzeri durumlar, 3B şekil karşılaştırması sırasında da dikkate alınmaktadır.

Genişletilmiş EMD kullanılması, önerilen yöntemin taşıma benzeşimi altında uygulanabilir olmasını sağlamıştır.

4.7.3 İskelet Zenginleştirme Değeri e nin 3B İskelet Temsiline Katkıları

Önerilen algoritma kullanılarak elde edilen zenginleştirilmiş iskeletler, vektörel olarak 5-boyutlu (x, y, z, r, e) temsil edilebilmekte ve orijinal iskelet temsilinden çok daha güçlü, ayırt edici güce sahip olmaktadır. Bu temsil gösterimi iskeletler ile ilişkilendirilen şekiller için aynı yarıçap değerlerine sahip alanların farklı e değerleri ile ayırt edilmesinde yardımcı olmaktadır. Şekil 4.8, şekiller için bir örnek teşkil etmektedir. Yarıçap değerleri aynı olan iskeletlerin e değerleri tüm iskeletler için aynı olmayabilir. At bacağı, kum saati ve çekiç için tüm yarıçap değerleri eşittir. Ancak şekile ait maksimum değerli yarıçap için küreler bu noktalar çizildiğinde her bir şekil için farklı miktarda noktanın şeklin içinde kaldığı gözükmemekte bu durum ise güçlü bir temsil olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.8: Şekil içerisinde bulunan o noktanın maksimum yarıçap değerine sahip kürenin her bir iskelet için değeri aynıdır. Ancak bu iskeletler için e değerleri farklıdır.



5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2B şekillerin iskeletlerini ya da medyal akslarını ve 3B şekillerin yüzey veya eğri iskeletlerini elde etmek için son on yılda hatta daha fazla bir zamanda farklı algoritmalar yayınlamıştır. Ancak günümüzde bu yöntemlerin kalitesini kıyaslamak için çok az sayıda karşılaştırma testleri mevcuttur. Hatta zatında hangi iskeletlendirme metodunun kullanılacağına karar verilmesi pratikte çok güçtür. Bu bağlamda bölüm içerisinde deney sonuçlarına ait değerlendirmeler ve bu değerlendirmelere ilişkin yöntemlerden bahsedilmektedir.

5.1. Deney Değerlendirme Yöntemleri

Şekil geri getirme çalışmalarında önerilen yöntemlerin standart veri setleri kullanarak test edilmesi, yarıştıkları diğer yöntemler ile karşılaştırılmalarını kolay kılar. Ancak, standart veri setleri kullanılması tek başına yeterli olmamaktadır. Literatürde, üzerinde çalışılan diğer yöntemler ile kıyaslama yapılabilmesi için genel olarak kabul görmüş deney değerlendirme yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Şekil geri getirme işlemlerinde sıklıkla kullanılan deney değerlendirme yöntemleri; Bull's Eye yöntemi, K En Yakın Komşuluk, Precision Recall, R-Precision yöntemleri olarak sıralanabilmektedir.

5.1.1 Bull's Eye Yöntemi

Bull's Eye yöntemi, "tam isabet" veya "hedef merkezi" olarak da dilimize çevrilebilecek bir yöntemdir. Şekil geri getirme algoritmaları test edilirken deney setlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Literatürde birçok çalışma, deney sonuçlarını Bull's Eye yöntemi kullanarak yayınlamıştır.

Yöntem, çalışma yapılan algoritmanın deney hesaplamaları yapıldıktan sonra elde edilen sonuçların anlamlandırılması işlemi için kullanılmaktadır. Sorgu yapılan şekil ile veri seti şekilleri arasındaki benzerlik oranı çok benzeyenden az benzeyene doğru sıralanır. Sıralanan sonuçlardan, deney setinde sorgu yapılan şeklin ait olduğu sınıftaki

eleman sayısının iki katı kadar sonuç alınır. Alınan sonuçlar arasında sorgu şeklinin üyesi olduğu sınıfa ait şekillerin sayısı ile sınıftaki eleman sayıları arasındaki oran Bull's Eye değerini vermektedir. Yani p elemanı olan bir sınıfa ait bir şekil için yapılan sorgu sonucunda $2 \times p$ kadar sonucuna bakılır. Bu sonuçlar içerisindeki doğru sayısının p değerine bölümü Bull's Eye değeri vermektedir.

5.1.2 Precision Recall Yöntemi

Tez çalışması kapsamında yapılan deneylere ait sonuçların değerlendirilmesinde kullanılan yöntemlerden bir tanesi Precision Recall yöntemidir. Bu yöntem, sorgulama sonuçlarına göre elde edilen iki ölçümün birlikte değerlendirilmesinden oluşmaktadır.

Precision Recall yöntemi ile ilgili hesaplamalar yapılırken, sorgu sonuçlarını ve veri setini değerlendirmekte kullanılan bir karmaşıklık matrisi (Confusion Matrix/Contingency Table) bulunmaktadır. Bu matris, sorgulama sonucunun veri setine üzerindeki alakalı durumuna göre belirlenmektedir. Şekil 5.1 belirtilen karmaşıklık matrisinde sütunlar "alakalı" durumunu, satırlar ise "sorgu sonuç" durumunu göstermektedir. Buna göre TP, FP, FN ve TN değerleri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

		Tahmini Sınıf	
		Evet (Yes)	Hayır (No)
Esas Sınıf	Evet (Yes)	TP	FN
	Hayır (No)	FP	TN

Şekil 5.1: Karmaşıklık matrisi.

- *TP* (True Positive): Sorgulama yapılan şekil ile alakalı (sınıfsal olarak) olan ve sorgu sonuçları arasında bulunan şekil sayısıdır.
- *FP* (False Positive): Sorgulama yapılan şekil ile alakalı (sınıfsal olarak) olmayan ve sorgu sonuçları arasında bulunan şekil sayısıdır.
- *FN* (False Negative): Sorgulama yapılan şekil ile alakalı (sınıfsal olarak) olan fakat sorgu sonuçları arasında bulunmayan şekillerin sayısıdır.
- *TN* (True Negative): Sorgulama yapılan şekil ile alakalı (sınıfsal olarak) olmayan ve aynı zamanda sorgu sonuçları arasında bulunmayan şekillerin sayısıdır.

Yukarıda detayları verilen karmaşıklık matrisine göre;

- Precision (Kesinlik): Sorgulama yapılan şekil ile alakalı (sınıfsal olarak) olan ve sorgu sonuçları arasında bulunan şekil sayılarının (TP), sorgu sonuçları toplamına oranıdır. $P = TP / (TP + FP)$
- Recall (Duyarlılık): Sorgulama yapılan şekil ile alakalı (sınıfsal olarak) olan ve sorgu sonuçları arasında bulunan şekil sayılarının (TP), veri setinde bulunan, alakalı şekillerin toplamına oranıdır. $R = TP / (TP + FN)$

Yukarıda anlatıldığı gibi hesaplanan Precision ve Recall değerleri ile Precision Recall eğrisi oluşturularak sonuçlar daha anlaşılır şekilde değerlendirilebilmektedir. Çalışılan yöntemlerin eğrisinin Recall eksenini boyunca "1" değerine yakın olması istenen sonuçtur.

5.1.3 R-Precision

Tez çalışması kapsamında yapılan deneylere ait sonuçların değerlendirilmesinde kullanılan yöntemlerden diğer bir tanesi de R-Precision yöntemidir. Bu yöntem, bir önceki kısımda anlatılan Precision Recall yönteminin bir fraksiyonu olarak değerlendirilmektedir. R-Precision yöntemi, Precision Recall yönteminden farklı olarak, sorgu şeklinin ait olduğu sınıftan, veri seti üzerinde toplam şekil sayısını ön koşul olarak kabul etmekte ve bu değeri R olarak tanımlamaktadır.

Veri seti üzerinde sorgulama yapılan şekil ile alakalı (sınıfsal olarak) şekil sayısına göre sorgu sonuç sayısı ölçeklendirilir. Buna göre; R-Precision, sorgulama yapılan şekil ile alakalı (sınıfsal olarak) şekil sayısının (r), ölçeklendirilmiş sorgu sonuç sayısına (R) oranı olarak tanımlanmaktadır. $P = r / R$

5.1.4 K En Yakın Komşuluk

K En yakın komşuluk yöntemi şekil sınıflandırma ve şekil geri getirme işlemlerinde sıklıkla kullanılan deney değerlendirme yöntemlerinden bir tanesidir. Yöntemin isminde bulunan K değeri komşuluk yakınlık derecesi anlamına gelmektedir. Örnek olarak $k = 3$ olarak yapılan bir deneyde sorgu yapılan şekle en yakın üç komşu şekle bakılır. İstenen, komşu şekillerden tamamının sorgu yapılan şekil ile aynı sınıfta olmasıdır.

Şekil geri getirme işlemlerinde geri getirilen k adet komşuluğun oranı o komşuluk için algoritma başarımı olarak nitelendirilir. Bu yöntem için diğer yöntemlerde geçerli olan "alaka" durumlarına göre sonuçlar etkilenmekte ve değerlendirmelerde göz önünde tutulmaktadır.

5.2. Deney Sonuçları

Bu bölümde, önerilen algoritma için yapılan deneylerin sonuçları ve sonuçlara ilişkin değerlendirmeler yer almaktadır. İlk olarak 2B şekiller için geri getirme performansları ve algoritmanın gürültü ve çakışmaya olan dayanıklılığı ile ilgili olan deneyler gösterilmektedir. Daha sonraki kısımda ise 3B geri getirme deneyleri ile önerilen yöntemin bu düzlemde yakaladığı performanslar açısından deneyler incelenecektir. Bir sonraki deney ise uzaklık hesaplama fonksiyonlarının çalışma kapsamında değerlendirilmesini içermektedir. Son olarak ise bir çift şekil için algoritma hesaplama zaman değerlendirmeleri 2B ve 3B nesnelere için yapılmıştır. Bütün deneyler Matlab Builder JA ve Java kullanılarak Windows-7 de test edilmiştir.

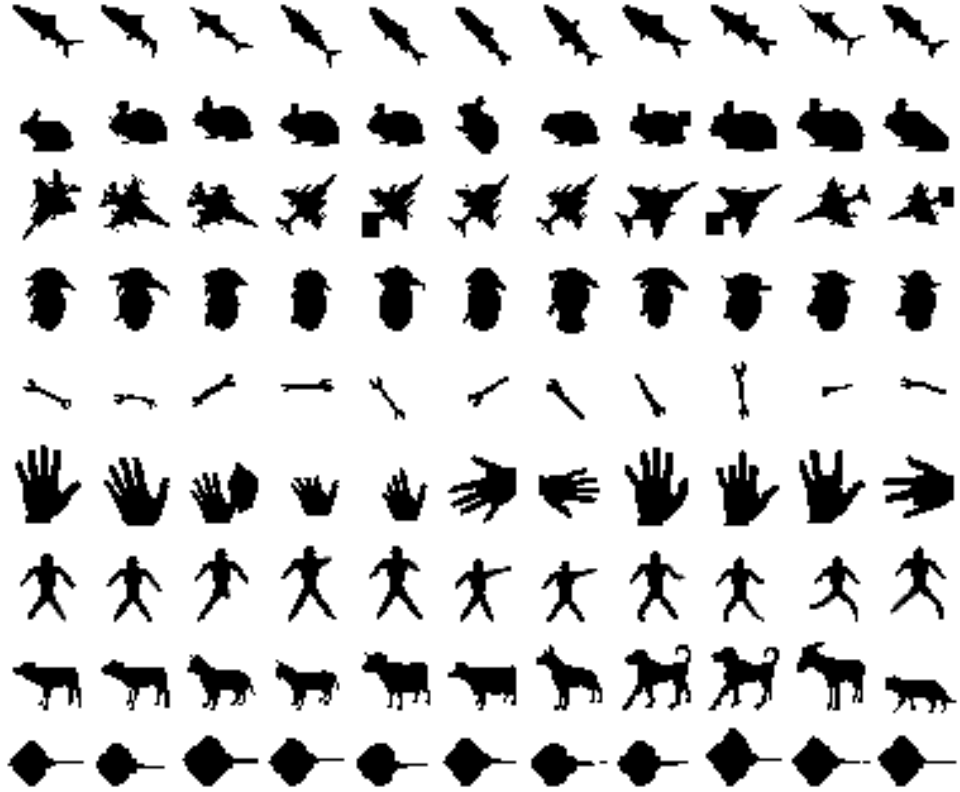
5.3. 2B Şekil Geri Getirme Deneyleri

Birçok 2B veri seti ve farklı performans ölçümleri, geri getirme tekniği ile alternatif teknikler arasında değerlendirme yapmak için kullanılmıştır. 2B şekil geri getirme işlemleri için deneyler, Kimia-99, Kimia-216, MPEG-7, Tools ve Swedish Leaf veri setleri ve bu kapsamda oluşturulan alt kümeleri kullanılarak yapılmıştır. Yapılan çalışma, kullanılan veri setleri ve deney sonuçları sayesinde diğer yöntemler ile karşılaştırma imkanına sahip olmuştur.

5.3.1 Kimia-99 ve Kimia-216 Veri Setleri Kullanılarak Gerçekleştirilen Deneyler

İlk olarak 2B şekil geri getirme için Kimia-99 ve Kimia-216 standart veri setleri tercih edilmiştir. Kimia-99 veri seti, 99 şekilden oluşmakta ve 9 sınıf ve herbir sınıfta 11 şekil ihtiva etmektedir. Benzer bir yapıda Kimia-216 veri seti ise 18 sınıf ve herbir sınıfta 12 şekilden oluşan toplam 216 şekil içermektedir. Sırası ile Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 Kimia-99 ve Kimia-216 veri setlerini göstermektedir.

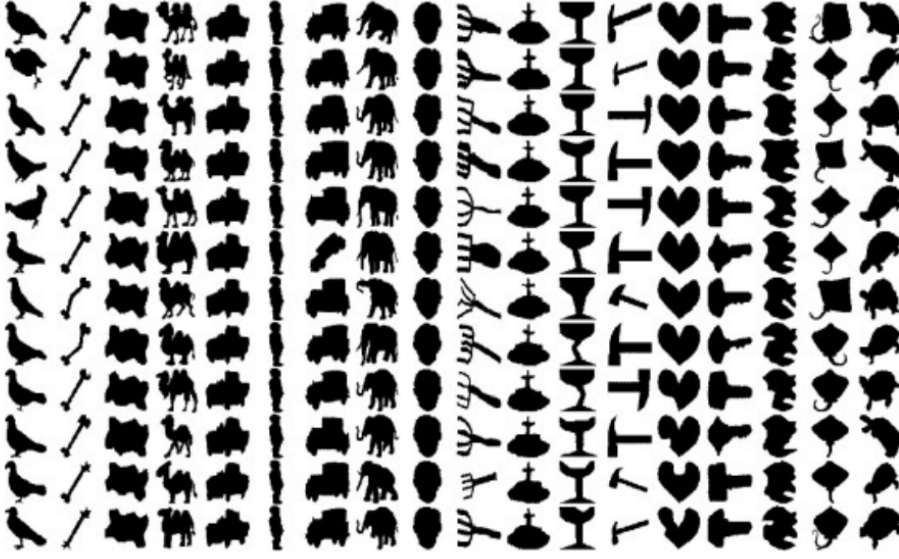
Bu veri setleri için "birini dışarıda bırak" yöntemi ile doğrulama yapılmıştır. İsim sıralı olarak veri tabanında, ilk sırada olan şekil dışarıda bırakılarak diğer kalan tüm veri seti



Şekil 5.2: Kimia-99 veri seti, 9 sınıf ve her bir sınıfta 11 şekil içerir. Her bir satır farklı bir sınıfı göstermektedir.

şekilleri üzerinde sorgu işlemi çalıştırılmıştır. Sorgulanan şekil veri setine tekrar dahil edilmiş ve bu işlem bir sonraki sorgu şekli için veri setinde bulunan bütün şekiller için tekrarlanmıştır. Bir nesne sınıftan sorgu olarak bir şekil alındığı vakit, nesne tanıma algoritması tarafından seçilen şekil aynı sınıfa ait ise bu durumda algoritma doğru çalışıyor olarak nitelendirilmekte ve en yakın bulunan şekil ise En Yakın Komşuluk olarak adlandırılmaktadır.

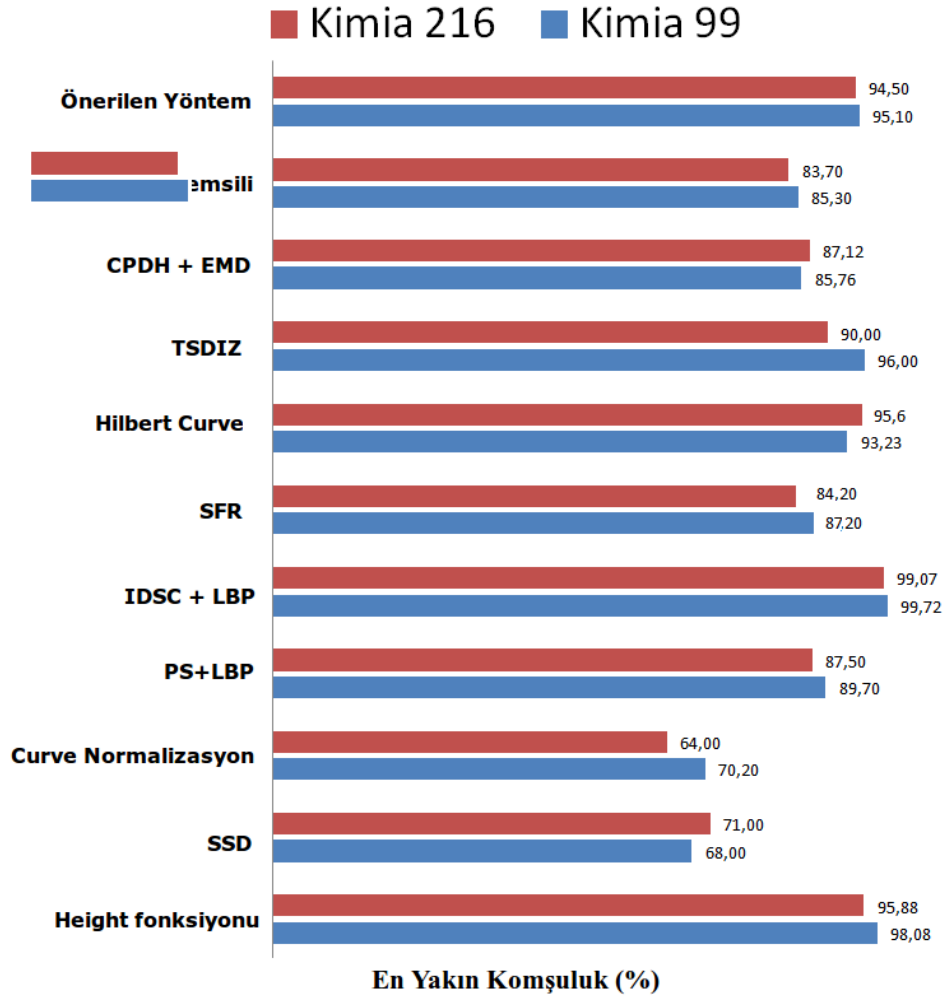
Önerilen algoritmanın performansı, koordinat noktaları ve o noktalardaki yarıçap değerlerine sahip orijinal iskelet temsili ile karşılaştırılmıştır. EMD algoritmasının çalıştırıldığı adımda önerilen algoritma için e değeri olarak alınan ağırlık değeri, her bir nokta için o noktadaki dairenin yarı çapı olarak belirlenmiştir. Buna ilave olarak SFR yaklaşımı [92] da yine bu çalışma kapsamında yazarların tariflerine uygun olarak kodlanmıştır. Tüm eşleştirme istatistikleri temel olarak alındığında, orijinal iskelet temsili, SFR ve önerilen algoritma ile elde edilen sonuçlar, Kimia-99 veri seti için sırası ile %85,3, %87,2 ve %95,1 olmuştur.



Şekil 5.3: Kimia-216 veri seti, 18 sınıf ve herbir sınıfta 12 şekil içerir. Kolonlarda aynı nesnelere ait farklı açılardan görünümeler bulunmaktadır.

Aynı deney Kimia-216 için çalıştırıldığında, önerilen algoritma %94,5 iken orijinal iskelet temsili ve SFR algoritmalarının sonuçları sırası ile %83,7 ve %84,2 olarak elde edilmiştir. Bu veri setleri ile daha önceki çalışmalarda önerilen yöntemlere ait tanıma sonuçları Şekil 5.4 'de raporlanmaktadır. Görüldüğü gibi önerilen algoritma ile, iskelet ve SFR metotlarını geride bırakılmış ve bu veri setlerinde en iyi sonuçları elde eden diğer yöntemler ile de karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmiştir.

SFR yönteminin asıl limitleri bu algoritmanın veri setinde bulunan bütün şekiller için aynı sayıda sınır noktalarına ihtiyacı olmasıdır. Basit şekiller için alınan sınır noktaları yeterli olurken daha kompleks şekiller için zayıf bir şekilde temsil edilmekte ve geri getirme oranını dramatik olarak düşürmektedir.



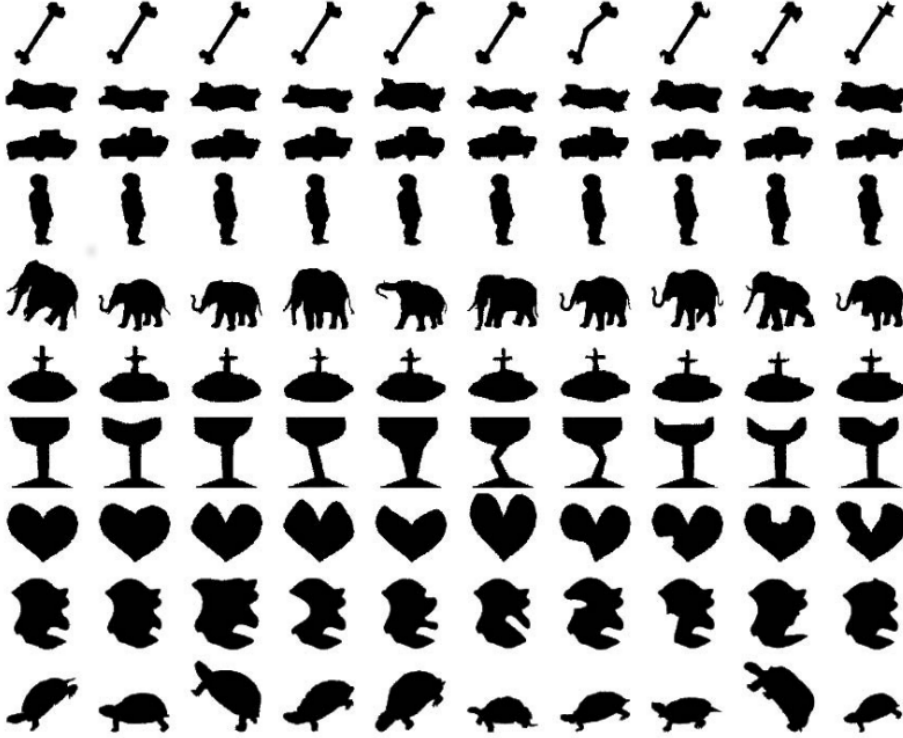
Şekil 5.4: Kimia 99 ve Kimia 216 veri setleri için birçok metot ve tanıma sonuçları: Height functions [279], SSD [209], Curve Normalization [139], PS+LBP [242], IDSC + LBP [243], SFR [92], Hilbert Curve [67], TSDIZ [4], CPDH+EMD [250], ve Curve Normalization [139].

5.3.2 MPEG-7 Veri Seti Kullanılarak Gerçekleştirilen Deneyler

Bunu daha açık olarak göstermek için, 1400 şekil 70 sınıf ve her bir sınıfta 20 şekil içeren MPEG-7 veri setine ait olan şekiller ile bir alt veri seti bu çalışma kapsamında oluşturulmuştur. Oluşturulan alt veri seti 10 sınıf ve her sınıf için 10 şekil içerecek şekilde tespit edilmiştir (Şekil 5.5).

Bu veri seti kullanılarak yapılan deneyler neticesinde tanımlama sonuçları, orijinal iskelet temsili ve SFR metotları için sırası ile %87.0 ve %79.0 olarak bulunurken, önerilen metot %96.0 tanıma sonucuna sahiptir. Bu noktada SFR yöntemi için değerlendirme yaparken inceleme yapılan çalışmaların yazarlarının kendi yöntemlerini, şekil bağlamı ve dinamik programlama gibi bazı yöntemler ile kombine ederek performan-

sını artırdıklarını da not etmek gerekmektedir. Çalışma kapsamında SFR algoritması için bu şekilde farklı metotlar ile kombinasyon yapılmamış, yazarların tariflerine uygun olarak kodlama yapılarak denenmiştir. Ancak, orijinal iskelet algoritması ve önerilen yöntem ile diğer yöntemler birlikte kullanıldığında performansın artacağı konusunda beklentiler oldukça yüksektir.

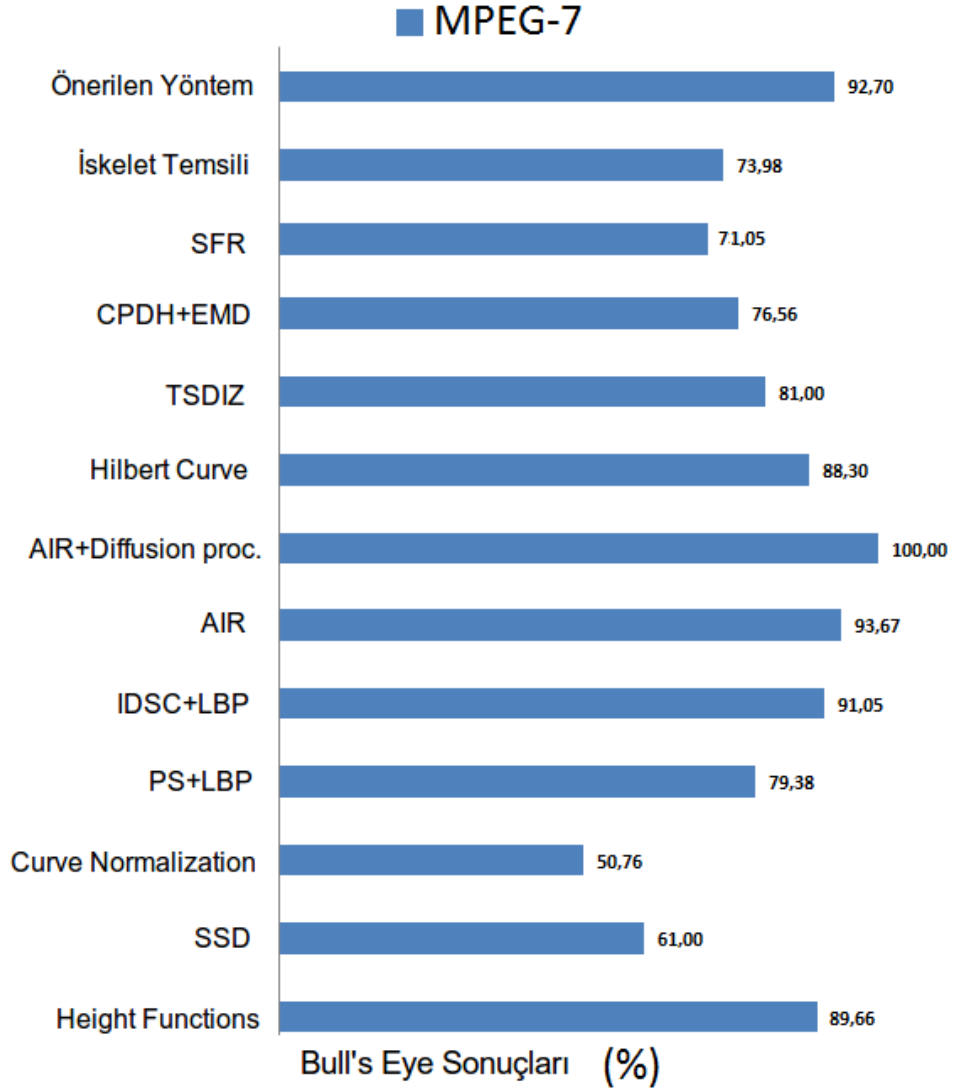


Şekil 5.5: MPEG-7 veri seti içerisinde 10 sınıf ve her sınıfta 10 şekil içeren alt veri seti oluşturulmuştur.

Bir sonraki deneyde MPEG-7 veri seti bütün olarak kullanılmış, yaygın olarak kullanılan şekil geri getirme algoritmaları ile performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Daha önce birçok çalışma tarafından da benimsenen Bull's Eye sonuçları, bu çalışma kapsamında da kullanılmıştır. Bu yöntem de 20 şekil içeren sınıflardan oluşan bir veri setinde geri getirilen 40 şekil kıyaslanarak değerlendirme yapılmaktadır. Önerilen yöntem ve diğer yaklaşımlar ile ilgili sonuçlar Şekil 5.6 'de gösterilmektedir. Bu sonuçlar dikkate alındığında, birçok yöntemin sonuçlarından daha iyi sonuca sahip olduğu ve birçok bilinen metot ile kıyaslanabilir durumda olduğu gözler önüne serilmektedir.

Yapılan bir çalışmada [61] en iyi Bull's Eye sonucu diğer yöntemler ile birleştirilerek elde edilmiştir. Ancak, iyi bir sonuç elde edebilmek için gerçekçi değerler seçmek çok önemlidir ve pratik kullanımını olumsuz yönde etkilemektedir [136]. Diğer taraftan,

önerilen yöntemin basitçe uygulanabilir olması, birçok uygulama tarafından kullanılabilmesine olanak tanımakta ve bu şekilde veri setleri basit iskelet vektörleri olarak tanımlanabilmektedir.



Şekil 5.6: Bull's Eye sonuçları MPEG-7 için birçok metot: Height fonksiyonları [279], SSD [209], Curve Normalizasyonu [139], PS+LBP [242], IDSC + LBP [243], AIR [86], AIR+Diffusion işlemi [61], Hilbert Curve [67], TSDIZ [4], CPDH+EMD [250], ve SFR [92].

5.3.3 Swedish Leaf ve Tools Kullanılarak Gerçekleştirilen Deneyler

Kimia ve MPEG-7 veri setlerine ilave olarak gerçek görüntülere sahip Swedish Leaf [255] ve Tools [31] veri setleri ile de 2B için deneyler yapılmıştır. Swedish Leaf veri seti 15 farklı tür İsveç ağaç türüne ait yapraklardan, her tür için 75 adet yaprak alınarak oluşturulan gerçek fotoğraflardan oluşmaktadır. Şekil 5.7 'da 15 ağaç türüne ait yapraklardan örnekler içermektedir. Önerilen yöntem için birini dışarıda bırak yöntemi ile

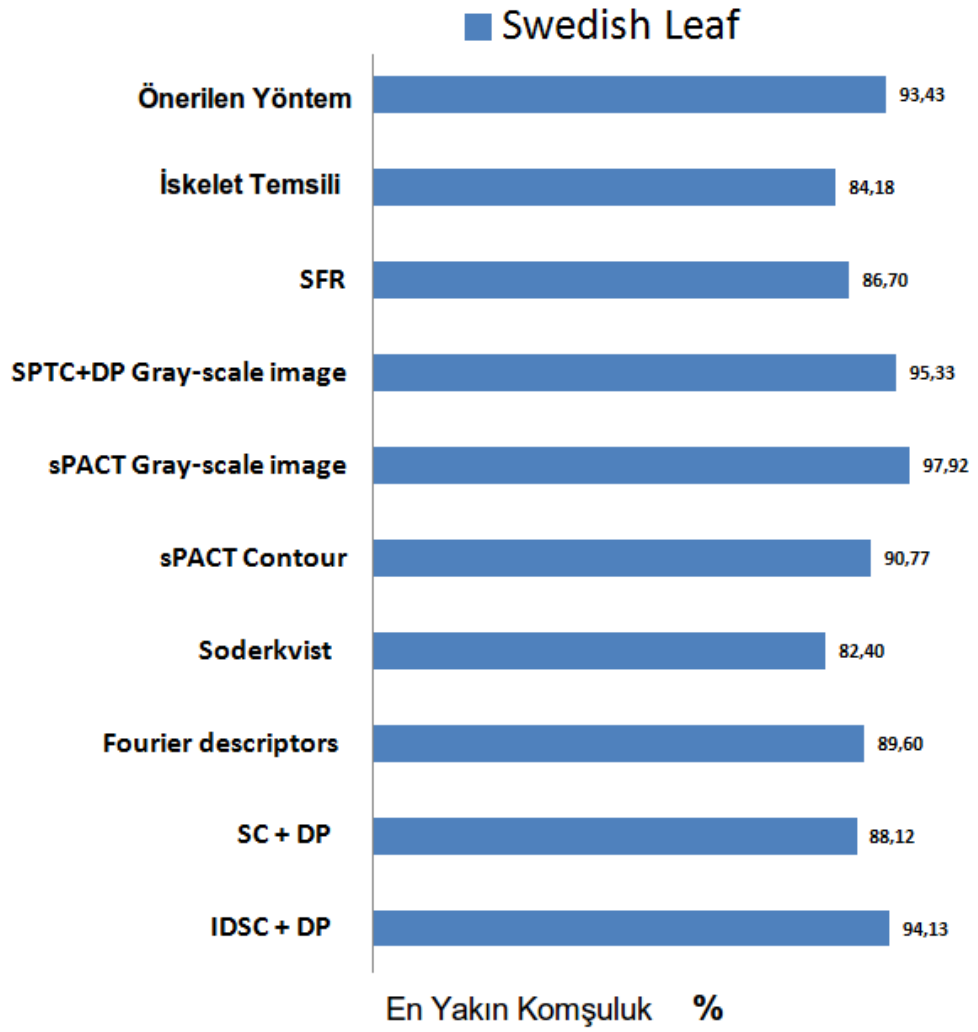
yapılan deneyler ve diğer yöntemlere ait sonuçlar Şekil 5.8 içerisinde gösterilmektedir.

Diğer taraftan, Tools veri seti 35 adet eklemli şekil içermektedir. Bunlar; 10 makas, 15 pense, 5 bıçak ve 5 kerpeten den oluşmaktadır. Bütün veri seti Şekil 5.9 de gösterilmektedir. Önerilen algoritma ve diğer yöntemler ile yapılan sonuçlar Şekil 5.10 içerisinde raporlanmaktadır. Deney sonuçları değerlendirildiğinde bu iki veri seti ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ile diğer veri setleri ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar birbirleri ile tutarlı gözükmemektedir. Tools veri seti ile yapılan deneylerde önerilen yöntem ile diğer tüm yöntemlerden daha iyi bir sonuç elde edilmiş, yine aynı şekilde Swedish Leaf veri seti için yapılan deneylerde kombine olmayan diğerler metodlardan daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır.

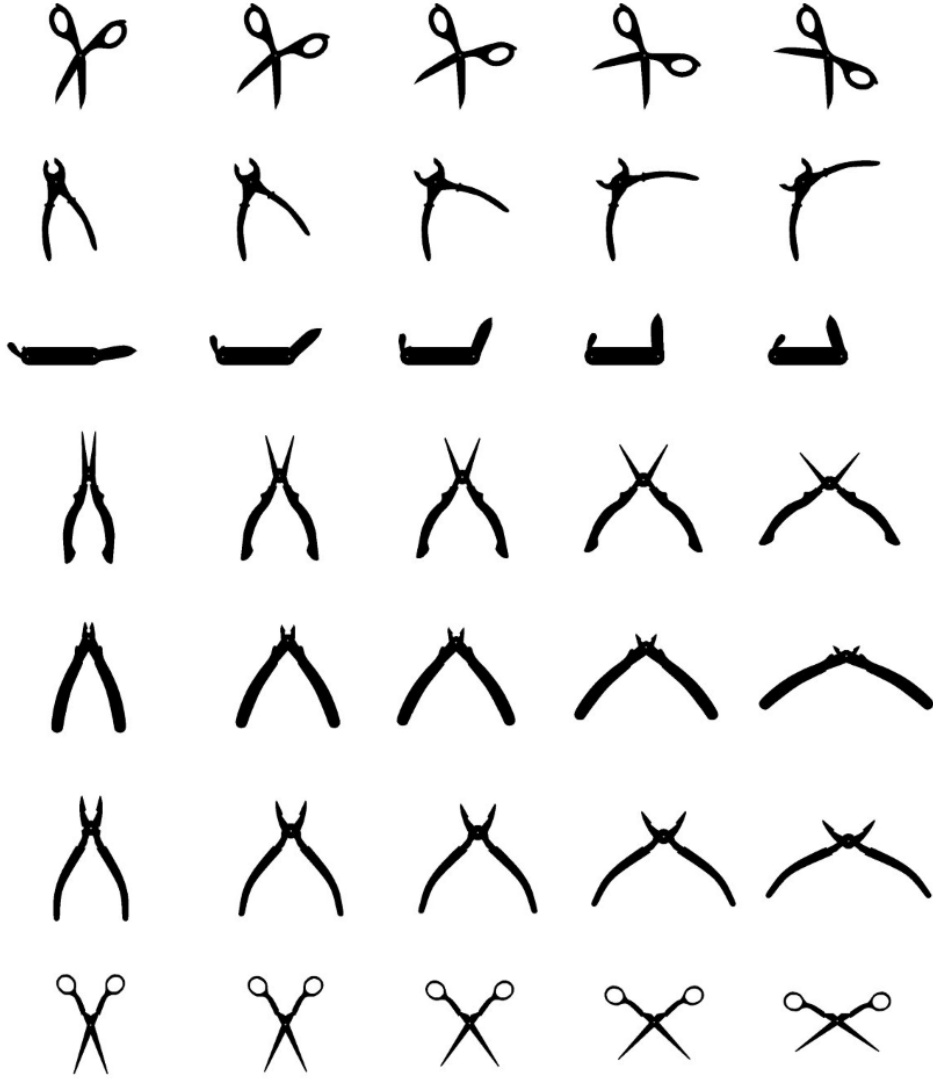
Swedish Leaf veri seti için elde edilen sonuçlardan en iyi üç tanesinin yaprak resmi olarak gri tonlama kullandığı veya birden fazla yöntemi birleştirerek çalıştığı da not edilmelidir. Böylece gri tonlama ile temsil edilen şekiller silüetlerden çok daha fazla ayırt edici özellik taşıyabilmektedir. Örnek olarak sPACT [282] yöntemi, şekil tanımlama yaparken sınırları ve gri tonlamayı birlikte kullanmaktadır. Diğer taraftan sadece silüetleri kullanan yöntemler ile karşılaştırıldığında önerilen yöntem ikinci en iyi yöntem olarak görülmektedir.



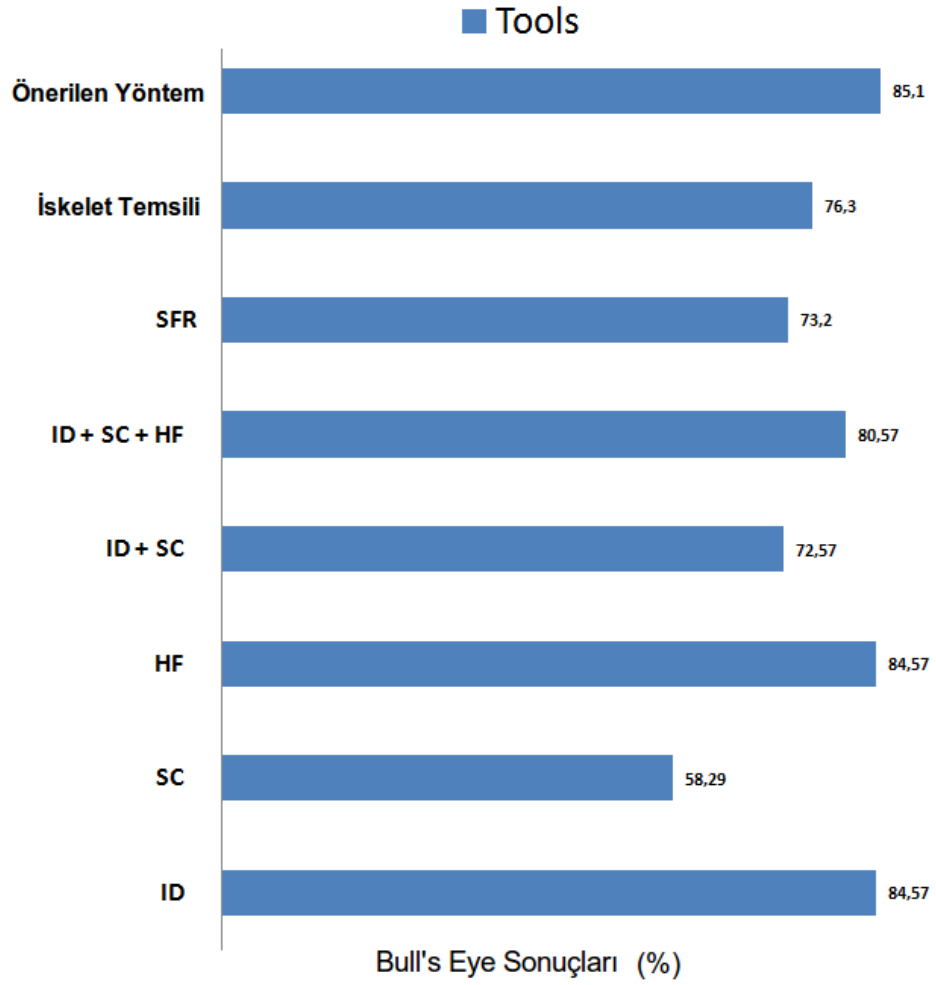
Şekil 5.7: 15 farklı ağaç türüne ait Swedish Leaf veri seti.



Şekil 5.8: Swedish leaf veri seti için birçok metoda ait tanıma sonuçları: IDSC+DP [156], SC+DP [156], Fourier tanımlayıcılar [156], Soderkvist [255], sPACT [282], SPTC+DP [157], ve SFR [92].



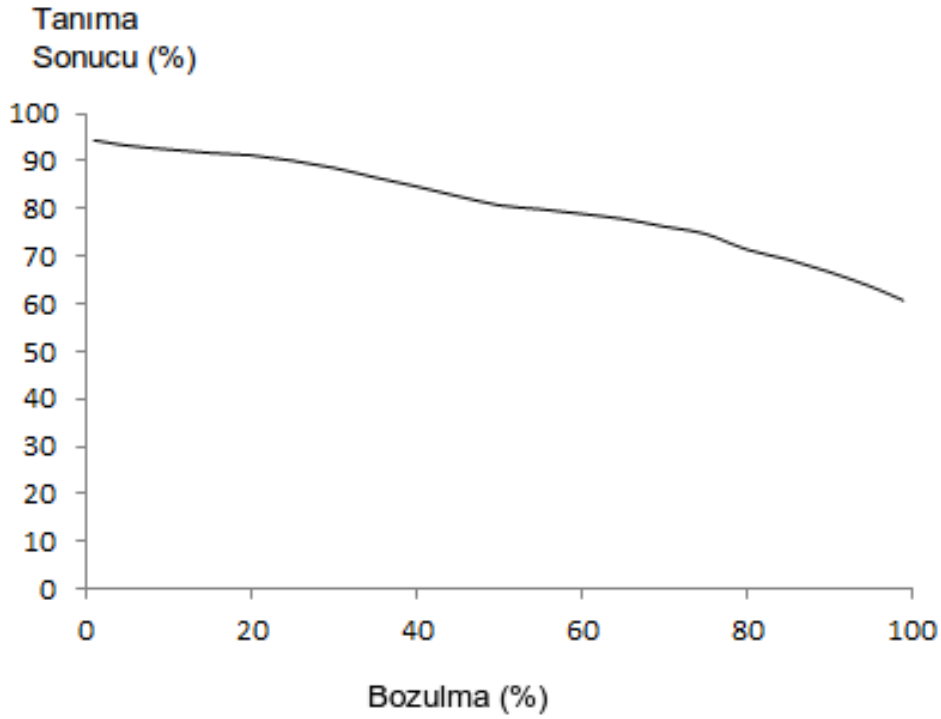
Şekil 5.9: Tools veri seti toplam 35 eklemli şekil içeren 4 sınıftan oluşmaktadır.



Şekil 5.10: Tools veri seti için birçok yöntemin Bull's Eye sonuçları: ID [157], SC [18], HF [279], ID+SC [187], ID+SC+HF [187], ve SFR [92].

5.3.4 Gürültü Kararlılığı Deneyleri

Önerilen algoritmanın gürültü karşısında hassasiyet karakteristiğinin test edilmesi için Kimia-216 veri setinde bulunan şekillerin iskelet noktalarını rastgele seçerek silecek şekilde oluşturulan problemleri sorgular yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda rastgele seçilerek silinen noktalar iskelet noktalarının tamamının %1 ve % k oranında silinmesi ile elde edilmektedir. Deneyde k değeri sistematik olarak %1 oranından %99 oranına kadar artırılmıştır. Aynı deney düzeneği daha sonra bozulmuş sorgular için kullanılmıştır. En yakın komşuluk için $k = \%20$, $k = \%50$, ve $k = \%80$ alınarak yapılan deneylerin sonuçları sırası ile %3.4, %14.5, ve %24.4 olarak bulunur. k değerinin tüm değerleri için alınan sonuçlar Şekil 5.11 ile gösterilmektedir.



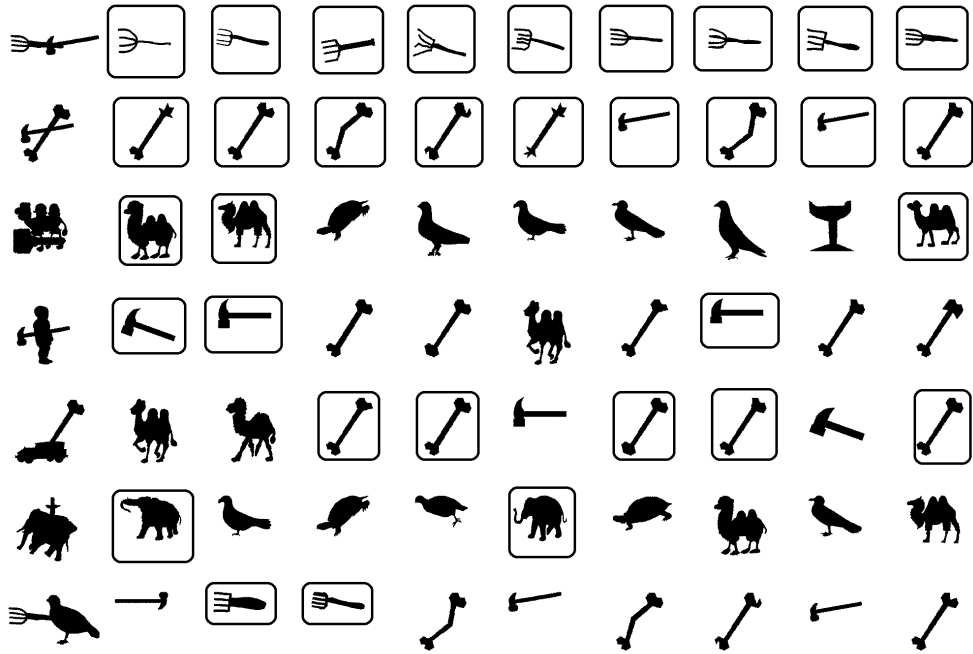
Şekil 5.11: Yükselen gürültü oranlarına karşı yavaş yavaş düşen en yakın komşuluk tanıma değerleri.

5.3.5 Kapanma Deney Sonuçları

Son olarak önerilen algoritmanın kapanma testleri ve sağlamlık değerlendirme deneyleri için, kapanma olan bir grup şekil üretilmiştir. Herbir şekil, Kimia-216 veri seti içerisindeki farklı sınıflardan seçilerek oluşturulmuştur. Her kapanma içeren şekil, Kimia-216 veri setinde bulunan şekiller içerisinde sorgulanmıştır. Sorgulanan kapanma olan sahneyi oluşturan şekillerden ikisinden birisinin sınıfında bulunan şeklin geri getiril-

mesi başarı kriteri olarak belirlenmiştir.

Testlerde en yakın komşuluk yaklaşımı kullanılmıştır. Sonuçlar Şekil 5.12 gösterilmektedir. Şekilde soldaki kolon kapanma olan sorguyu ve en yakın dokuz komşuluk olarak da her bir satır sağa doğru gösterilmektedir. Doğru olan geri getirme işlemleri, dikdörtgenler içerisinde gösterilmektedir. Bu sonuçlar ışığında önerilen algoritmanın topolojik benzerlikleri çözebildiği sonucuna varılmıştır. Böylece farklı sınıflara ait şekiller yakın komşuluk olarak alınabilmektedir. Bir örnek olarak inceleyecek olursak çekiç ile kemik ve deve ile fil sınıfları topolojik olarak benzer ancak gerçekte farklı sınıflardır. Farklı sınıflara mensup şekiller bu nedenle en yakın komşu listesinde üst sırada olabilir.



Şekil 5.12: Kimia-216 veri seti kullanılarak elde edilen sorgu şekilleri farklı sınıflardan seçilerek oluşturulmuştur. En soldaki kolon kapanma olan sorgu şekillerini ve satırlar sağa doğru en yakın komşuluk sonuçlarından dokuz tanesini göstermektedir. Dikdörtgen içerisinde alınan şekil doğru sorgu sonucu olarak işaretlenmiştir. Şekiller farklı sınıflarda olmasına karşın topolojik olarak aynı olabilmektedir. Bu sebeple farklı sonuçlar sıralamalarda önde olabilmektedir.

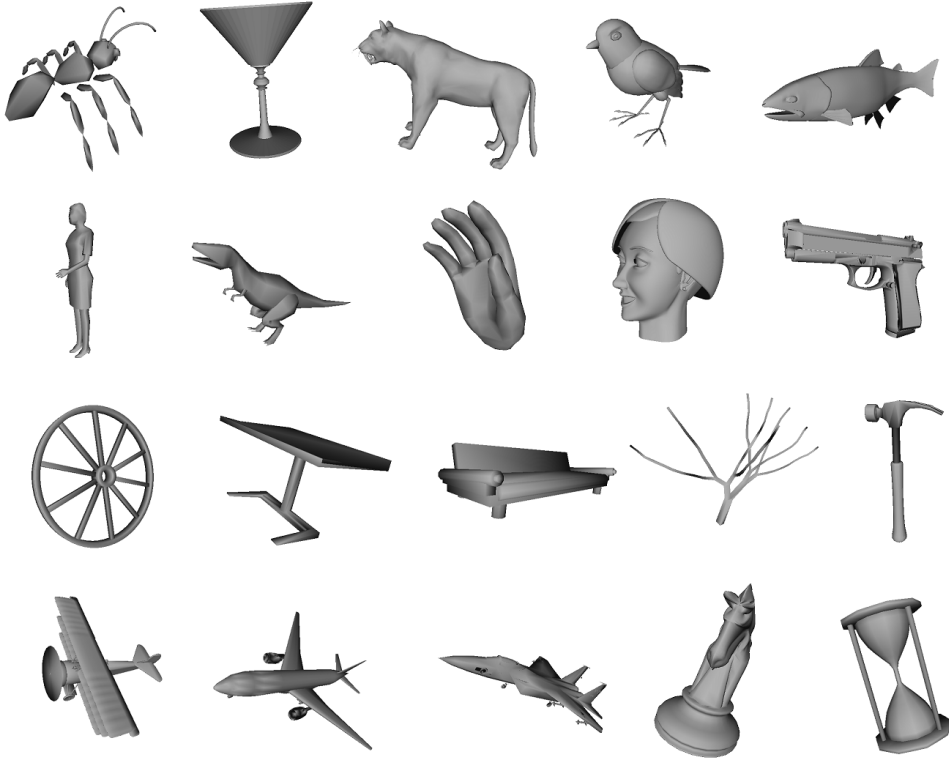
5.4. 3B Şekil Geri Getirme Deneyleri

3B şekil geri getirme deneyleri, Princeton Shape Benchmark (PSB) [246] ve McGill Shape Benchmark gibi çok bilinen iki veri seti kullanılarak yapılmıştır (MSB) [253]. Bu veri setlerinin performanslarını ölçmek için, R-Precision olarak anılan ve verilen

veri setindeki şekiller kullanılarak R en yakın eşleme oranı olarak hesaplanan bir yöntem kullanılmıştır. R değeri bu sorgulamada kullanılan sınıftaki şekil sayısı değeridir. Başka bir deyiş ile R-precision en üstteki R geri getirmedir. 2B şekil geri getirme deneylerine benzer olarak, önerilen algoritma ile orijinal iskelet temsili yöntemi karşılaştırılmaktadır.

5.4.1 Princeton Shape Benchmark (PSB) Veri Seti

PSB veri seti toplamda 1814 şekil ihtiva etmektedir. Veri setindeki şekiller eşit sayıda eğitim ve test alt grupları olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Eğitim setine ait olan kümede bulunan şekiller 90 sınıftan oluşmaktadır. Diğer taraftan test setindeki sınıflar ise 92 sınıftan oluşmaktadır. Şekil 5.13 bu veri setine ait 3B şekillerden örnekler göstermektedir.



Şekil 5.13: PSB veri setine ait nesnelerin örnek görüntüleri.

Şekil geri getirme ve şekil sınıflandırması çalışmalarında kullanılmak üzere oluşturulan basit ve karmaşık yapıları 3B modeller içeren bir veri setidir. Ayrıca, yaygın uygulama ve araştırmalarda kullanılmak üzere modeller birçok farklı formatta bulunabilmektedir.

5.4.2 McGill Shape Benchmark (MSB) Veri Seti

MSB veri seti, 420 nesne ve 19 şekil sınıfından oluşan bir veri setidir. PSB den farklı olarak sadece katı cisimlerden oluşmamakta, insan, yılan, pense, ahtapot ve örümcek gibi şekilleri de içermektedir. Şekil 5.13’de veri setine ait nesnelere örnekler göstermektedir.



Şekil 5.14: MSB veri setine ait katı ve katı olmayan nesnelere örnek görüntüleri.

Aynı amaca hitap eden MSB veri seti de şekil geri getirme ve şekil sınıflandırması çalışmalarında kullanılmak üzere oluşturulan basit ve karmaşık yapıları 3B modeller içeren bir veri setidir. Yine bu veri seti içinde bulunan modeller de farklı formatlarda temin edilebilmektedir.

5.5. PSB ve MSB Veri Setleri İle 3B Şekil Geri Getirme Deneyleri

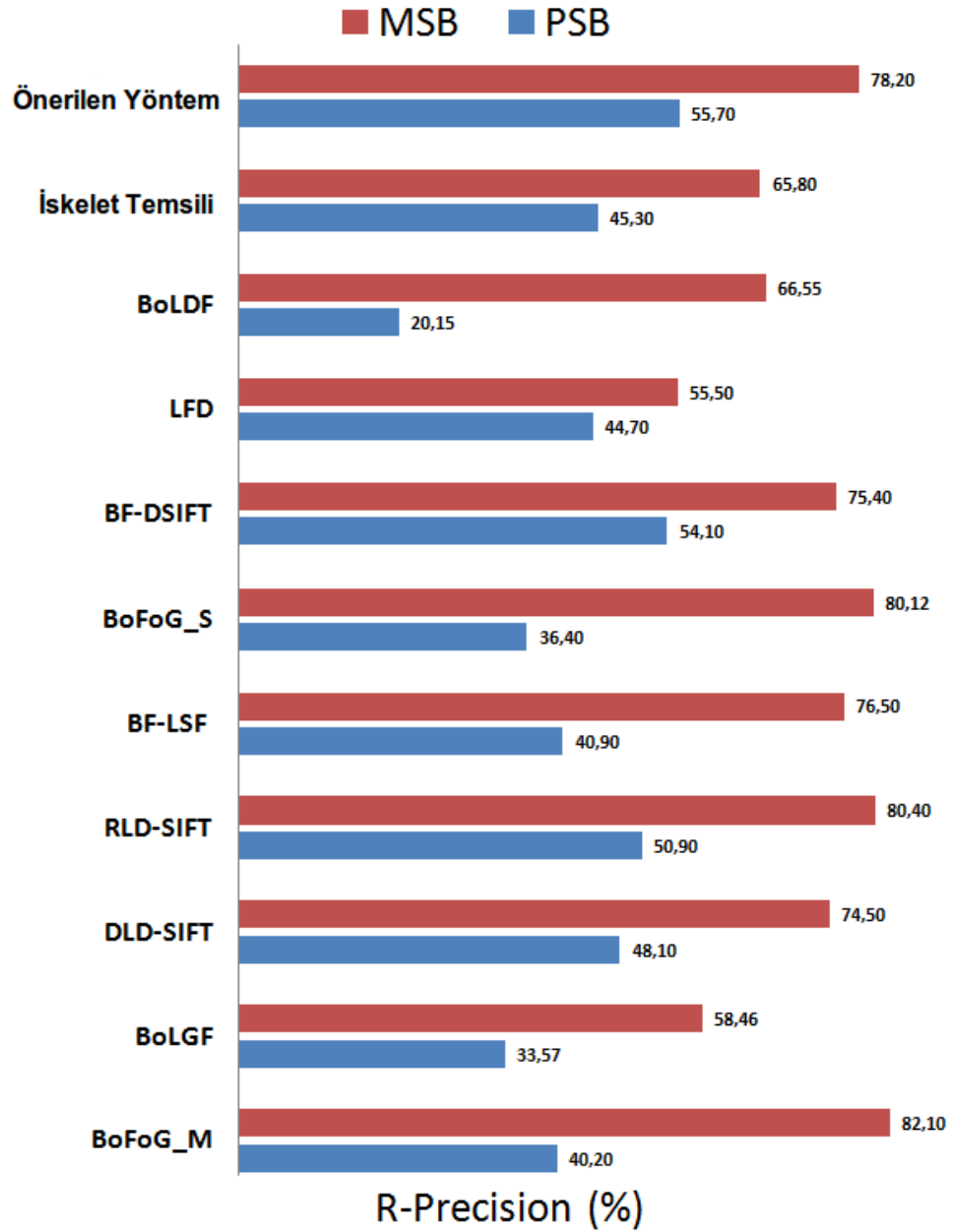
Herbir iskelet, 3B koordinat değerleri ve içine sığan maksimum kürelerin yarıçap değerlerine sahiptir. Orijinal iskelet temsili yöntemi, önerilen yöntem ve diğer yaklaşımların R-Precision deney sonuçları Şekil 5.15 ile gösterilmektedir. Deney sonuçları bakımından yüksek başarıma sahip olan Jeodezik yapıda Öznitelikler Torbası yönteminin, çoklu-ölçek versiyonu [123], hariç olmak üzere MSB veri seti ile yapılan deneylerin

tümünde diğer yöntemlerden daha iyi sonuçlar alınmıştır. Bu yöntem, çoklu-ölçekleme kullanılarak yerel geometrik özellikler ile konumsal bağlamı kombine eden bir yaklaşıma sahiptir.

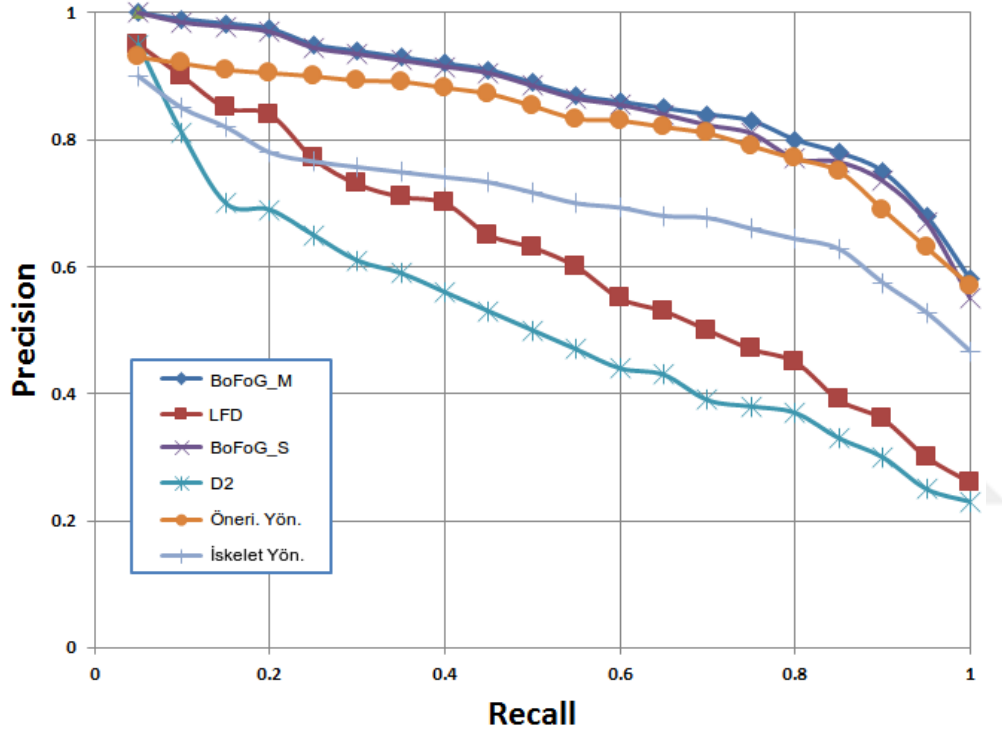
Daha önce değinildiği gibi önerilen algoritma için birden fazla yöntemin birleştirilmesi, performansı artırmaktadır. Diğer taraftan PSB sadece katı cisimleri içermekte ve önerilen yöntem ile R-Precision oranı için iyi sonuçlar elde edilmektedir. Zenginleştirilmiş iskelet temsilinin açıklama gücü ve EMD fonksiyonunun kısmi ve bütünsel eşlemede ortaya koyduğu etkinlik sayesinde önerilen yöntem bu veri setlerinde en iyi sonuçlar vermesinin en önemli iki nedenidir.

Yapılan bir sonraki deneyde, önerilen yöntem ile diğer yaklaşımlar arasında daha kapsamlı bir değerlendirme yapılmıştır. Daha önce yapılan R adet geri getirme testi yerine geri getirilen şekillerin tamamı sayılarak daha güçlü bir deney yapılmıştır. Bunu ölçmek için veri setlerine ait Precision Recall eğrileri oluşturulmuştur. Şekil 5.16 ve Şekil 5.17 sırası ile MSB ve PSB veri setlerine ait eğriler gösterilmektedir.

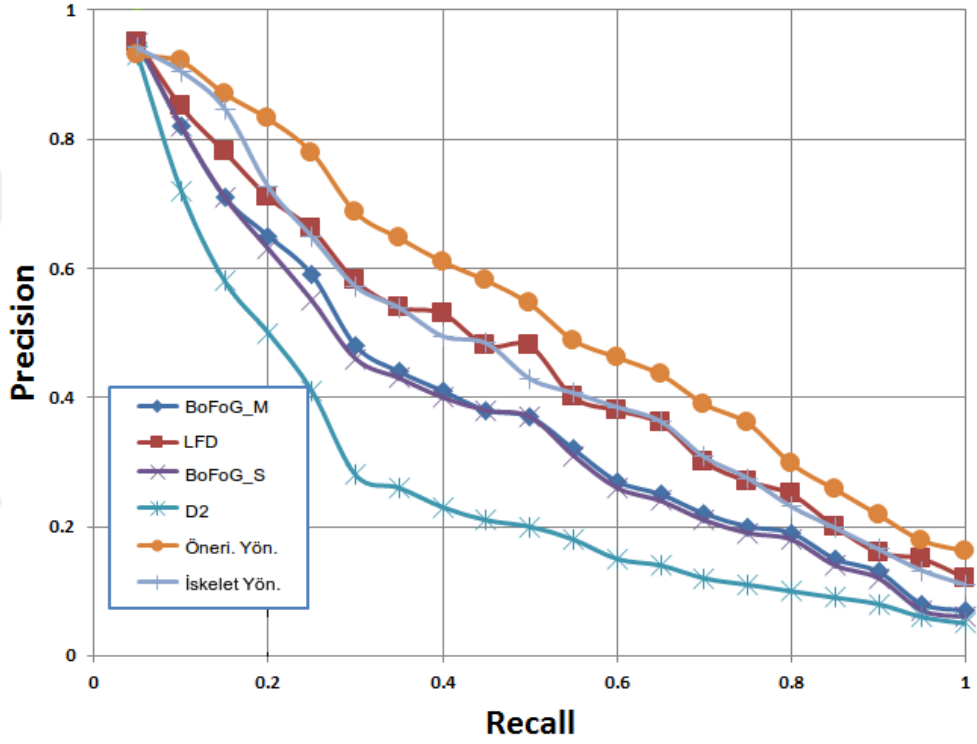
Daha önceki deneylerde olduğu gibi önerilen algoritma, MSB veri seti için en başarılı algoritmalar ile yarışmakta ve PSB için ise en iyi sonucu yakalamaktadır. Bunun üzerine önerilen algoritmanın MSB veri seti için ortaya koyduğu nispeten düşük performansın sebeplerini araştırdığımızda, birbirlerine benzeyen bir hayli farklı sınıfın olduğu ve bu katı olmayan şekillerin (karıncalar, yengeçler, örümcekler, ahtapotlar) negatif bir etki ile sonuç kalitesini düşürdüğü görülmektedir. Bütün bu değerlendirmelerin üzerine eşleme esnasındaki konumsal kısıtlamalar veya çizge gösterimindeki avantajlar kullanıldığında önerilen algoritmanın performansına etkileri olmaktadır.



Şekil 5.15: PSB ve MSB veri setlerinde R-Precision için birçok metod sonuçları: Jeodezik yapıda Bag of Feature yönteminin çoklu-ölçek versiyonu (BoFoG-M) [123], Bag of Local Geometry Feature (BoLGF) [123], Dense LD-SIFT (DLD-SIFT) [197], Resampled LD-SIFT (RLD-SIFT) [197], Linear Combination Local Statistical Features (BF-LSF) [198], Jeodezik yapıda Bag of Feature yönteminin tekli-ölçek versiyonu (BoFoG-S) [123], (Işık Alan Tanımlayıcısı) Light Field Descriptor (LFD) [43], ve Bag of Local Distance Feature (BoLDF) [123].



Şekil 5.16: MSB veri setinin birçok yöntem için Precision-recall sonuç çizimleri: Jeodezik ortamda Bag of Feature Çoklu-ölçek versiyonu (BoFoG-M), Jeodezik ortamda Bag of Feature Tekli-ölçek versiyonu (BoFoG-S) [123], (Işık Alan Tanımlayıcısı) Light Field Descriptor (LFD) [43], D2 [200].



Şekil 5.17: PSB veri setinin birçok yöntem için Precision-recall sonuç çizimleri: Jeodezik ortamda Bag of Feature Çoklu-ölçek versiyonu (BoFoG-M), Jeodezik ortamda Bag of Feature Tekli-ölçek versiyonu (BoFoG-S) [123], (Işık Alan Tanımlayıcısı) Light Field Descriptor (LFD) [43], D2 [200].

5.6. Verimlilik Deneyleri

Bir sonraki deney setleri ile önerilen yöntem için 2B ve 3B şekil geri getirme işlemlerinin tamamı için verimlilik testi yapılmıştır. Bunu yapabilmek için ilk olarak, iki şekil arasındaki benzerlik testinin tamamlanması esnasında ihtiyaç duyulan süre ölçülmüştür. Intel(R) Core(TM) i5-3317U CPU @ 1.70GHz bilgisayar ile 4GB RAM, kullanılarak yapılan deneyde 0,7 saniyede yaklaşık 1000 iskelet temsili içinden bir çift şekil arasında eşleme yapılabilmektedir.

Herbir şekil için e değerinin hesaplanması işlemleri ile harcanan süre 0,05 saniyeden daha az bir zamandır. Her ne kadar 3B şekiller fazladan bir boyuta daha sahip olsalar bile 2B ve 3B şekilleri için e değerinin hesaplanması yaklaşık olarak aynıdır. SFR yaklaşımı [92] için bu tez kapsamında yapılan kodlama ve orijinal iskelet temsili için yapılan hesaplamalar ve karşılaştırmalar da yine aynı bilgisayar ile yakın zamanlarda tamamlanmaktadır.

Daha önceden de bahsedildiği gibi, deneylerde yaptığımız hesaplamalarda FastEMD [210] kullanılmıştır. FastEMD ile yapılan iyileştirmeyi ölçebilmek adına bir önceki deneyler orijinal EMD ile [228] tekrar edilmiştir. Alınan sonuçlar değerlendirildiğinde 2B ve 3B şekil çiftleri arasındaki mesafeyi bulmak 11-15 saniye sürmekte ve FastEMD yöntemine oranla 20 kat daha yavaş olmaktadır.

6. 2B ve 3B için ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ İSKELET NOKTALARI ile UZAKLIK ÖLÇÜM FONKSİYONLARI

Özellik benzeşim hesaplama fonksiyonları literatürde genel olarak kısım-kısım ve kısımlar- arası olmak üzere iki farklı sınıfta değerlendirilirler. Kısım-kısım hesaplama yöntem- lerinde işlem yapılmadan önce kısımların hizalandığı kabulü yapılarak başlanır. Bu ka- bulde bir kısım sadece karşılık gelen bir kısım ile karşılaştırılır. Bu şekilde hesaplama yapıldığından bu yöntemi kullanan fonksiyonlar kuantulamaya karşı duyarlıdır.

Kısımlar arası hesaplama yöntemlerinde kısımların birbirleri ile karşılıklı olmaları ge- rekmediğinden sonuçlar kuantlamadan az etkilenmekte, bazı yöntemler için kısmi eş- lemeler de yapılmaktadır. Ancak, getirdikleri yüksek hesaplama karmaşıklığı netice- sinde çok boyutlu özelliklerin hesaplanmasında uygulama limitleri bulunmaktadır. Bu bölümde yapılan deneyler ile EMD fonksiyonunun tez çalışması için uygun bir yöntem olduğu doğrulanmıştır. Bu kapsamda, Hausdorff, Hellinger, Kullback Leibler-Jeffrey ve Earth Mover's Uzaklığı fonksiyonları incelenmiştir.

6.1. Uzaklık

Uzaklık, nesnelerin ne kadar mesafede olduklarının sayısal değerleridir. Bilimsel ve güncel kullanımında, mesafe fiziksel olarak bir uzunluk veya tahmini olarak bir uzun- luk ifade etmektedir (iki kasaba arasındaki tahmini mesafe gibi). Matematik biliminde ise uzaklık, fiziksel olarak tanımlanan konseptin bir fonksiyon ya da metrik tarafın- dan ifade edilmesidir. Metrik, bazı özel kurallar kümesine sahip ve bu kurallara göre karakteristiği olan bir fonksiyondur. Uzayda çeşitli elemanlara sahip gruplar arasında ne kadar yakınlık ya da uzaklık olduğunu açıklamaktadır. Birçok durumda A ile B arasındaki uzaklık B ile A arasındaki uzaklık ile değişebilir durumdadır.

6.1.1 Metrik

Matematik biliminde, metrik veya uzaklık fonksiyonu bir çift küme arasındaki mesa- feyi bulmak için kullanılan fonksiyon olarak tanımlanmaktadır. Metrik ile birlikte bir

küme metrik uzayı olarak adlandırılmaktadır. Metrik fonksiyonunun küme üzerinde bir topolojisi vardır. Ancak bütün topolojiler bir metrik değildir. Topolojisi bir metrik ile açıklanabilen topolojik uzay metrik edilebilir olarak adlandırılmaktadır.

X kümesi üzerinde tanımlı bir metrik için (mesafe fonksiyonu veya basit mesafe olarak isimlendirilir):

$$d : X \times X \longrightarrow [0, \infty), \quad (6.1.1)$$

öyle ki,

$[0, \infty)$ negatif olmayan reel sayılar kümesi (uzaklık negatif olamayacağı için \mathbb{R} kümesi kullanılamamaktadır) ve X kümesinde bulunan her x, y, z için aşağıdaki koşullar sağlanmalıdır.

1. $d(x, y) \geq 0$ negatif olmama veya ayırık olma aksiyomu,
2. $d(x, y) = 0 \iff x = y$ ayırt edilemezlerin tekilliği,
3. $d(x, y) = d(y, x)$ simetriklik,
4. $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$ üçgen eşitsizliği veya alt toplamsallık

Koşul 1 ve 2 birlikte pozitif tanımlı fonksiyondur. Birinci koşul ile anlatılmak istenen durum diğer koşullar tarafından sağlanmaktadır.

Metrik, eğer aşağıdaki koşulları sağlar ise ultra metrik olarak adlandırılır. Aşağıda tanımlanan koşul üçgen eşitsizliğinin güçlü halidir ve "noktalar asla iki nokta arasında olamaz" koşuludur.

$$d(x, z) \leq \max(d(x, y), d(y, z))$$

X içerisinde bulunan bütün x, y, z noktaları için sağlar.

X içerisinde x ve y iki nokta herhangi bir eğri yardımı ile birleştirilebiliyor ise bu durumda metrik asıl metrik olarak adlandırılır.

(+) toplama işlemi küme için $X \times X \rightarrow X$

$$d(x, y) = d(x + a, y + a)$$

X kümesinde bulunan her x, y için.

6.2. Uzaklık Hesaplama Fonksiyonları

Uzaklık veya benzerlik fonksiyonları örüntü tanıma, sınıflandırma, görüntü geri getirme, kümeleme gibi birçok problemin çözümünde kullanılmaktadır. Uzaklık fonksiyonlarının seçimi, işlem performansını ve karmaşıklığını kuvvetli şekilde etkilemektedir. Literatürde birçok sayıda uzaklık hesaplama fonksiyonu bulunmaktadır. Çalışmada yaygın olarak kullanılan fonksiyonlar incelenmiş, bu yöntemler içerisinde görüntü işleme işlemlerinde kullanılan metotlar ile deneyler yapılmıştır.

6.2.1 Hausdorff Uzaklığı

Hausdorff uzaklığı iki nokta kümesinin aralarında olan uzaklığının hesaplanması için kullanılan bir metriktir. Performans açısından oldukça iyi sonuçlar üretmekte ancak simetrik bir yapıya sahip değildir. Hausdorff uzaklığı dönme ve ölçek farklılıklarına karşı esnek bir davranış göstermektedir. Ancak kısmi eşleme için uygun yapıya sahip değildir.

$$d(P, Q) \neq d(Q, P), \quad (6.2.1)$$

Hausdorff uzaklığı aralarında benzerlik hesaplaması yapılacak olan nokta setlerinin her bir elemanı için, diğer kümede minimum uzaklığı sağlayan noktayı bulup, daha sonra hesaplanarak arasından en büyük mesafe olanı seçmektir. Bu sebeple iki nokta kümesi arasındaki benzerlik bu yöntem ile hesaplanırken tüm noktalar eşleştirilerek yapıldığı için kısmi eşleşen görüntülerde fark her bir uyuşmayan nokta ile artmaktadır. En büyük uzaklık değeri alındığından gürültü etkisi hesaplamalarda sonuçlara yansımaktadır. Bu etkinin azaltılması için hesaplamalar yapılırken temsil noktaları bir eşik tespit edilerek değerlendirilebilmektedir.

Hausdorff uzaklığı için matematiksel ifade aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} H(A, B) &= \max\{h(A, B), h(B, A)\} \\ h(A, B) &= \max_{a \in A} \{\min_{b \in B} d\{(a, b)\}\} \end{aligned} \quad (6.2.2)$$

Bütünsel eşlemede iyi sonuçlar verebilen bu yöntem kısmi eşleme için uygun olmamaktadır. Gürültüye karşı hassasiyeti yüksektir. Buna rağmen deformasyona dayanıklı, hesaplama karmaşıklığı düşük, sağlam ve simetrik olmayan bir uzaklık hesaplama yöntemi olarak özetlenebilmektedir.

6.2.2 Hellinger Uzaklığı

İlk olarak Ernst Hellinger tarafından ortaya atılan Hellinger Mesafesi [96], $P = (p_1, \dots, p_k)$ ve $Q = (q_1, \dots, q_k)$ iki dağılım kümesi ve p, q dağılım vektörleri olmak üzere P ve Q arasındaki mesafe hesabında ayrık dağılımlar için *Hellinger Uzaklığı* aşağıdaki şekilde tanımlanır. Hellinger f diverjanslarının özelleştirilmiş bir üyesidir:

$$H(P, Q) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{i=1}^k (\sqrt{p_i} - \sqrt{q_i})^2} \quad (6.2.3)$$

öyle ki, vektörlerin karekökünün doğrudan Euclidian normu uzaklığına eşittir.

$$H(P, Q) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\| \sum_{i=1}^k (\sqrt{p_i} - \sqrt{q_i})^2 \right\| \quad (6.2.4)$$

Hellinger uzaklığı uzayda sınırlandırılmış bir alan için nokta dağılımları üzerinde çalışabilen bir metriktir. Uygulamada iki dağılım arasında maksimum uzaklık "1" olabilmektedir. Uzaklığın sıfıra yaklaşması iki küme arasındaki benzerliğin arttığı anlamına gelmektedir. Bu özelliklere ilave olarak simetri özelliğine sahiptir.

$$H(P, Q) = H(Q, P) \quad (6.2.5)$$

Arandjelović ve ark. [8], nesne geri getirme yöntemlerinin performans artırımı ile ilgili

önerdikleri çalışmada Hellinger uzaklığı ile Ki-kare metriklerini SIFT mesafe hesaplaması için kullanarak performans ölçümleri yapmışlardır. Yaptıkları değerlendirme de nesne geri getirme hesaplamalarında, Hellinger kullanımının başarımı artırdığı hakkındaki bulguları yayınlamışlardır. Bu özellikleri ile Hellinger mesafesi deformasyonlara karşı Ki-kare metriğine göre dayanıklılığı yükseltmektedir.

Farklı bir çalışma ise Pourian ve Manjunath [215] tarafından yapılmıştır. Nesneyi bölümlerine ayırarak bölümler arasındaki benzerlikleri ölçmek için Hellinger metrik kullanılmıştır. Bölümlerin benzerliklerini dikkate alan bir ağ yapısı oluşturarak nesne geri getirme işlemlerinde kullanmışlardır. Diğer yöntemlerde olduğu gibi Hillenger metriği kullanılmasının temel sebebi küçük benzemezlikleri ihmal edebilmesidir. Kısmi eşlemede iyi sonuçlar verebilen bu yöntem bütünsel eşleme için uygun olmamaktadır. Buna rağmen deformasyona dayanıklı, hesaplama karmaşıklığı düşük ve sağlam bir metrik olarak özetlenebilmektedir.

6.2.3 Kullback Leibler-Jeffrey Uzaklığı

Kullback-Leibler (KLM) Mesafesi [137] aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır. KLM f uzaklıklarının özelleştirilmiş bir üyesidir. $P = (p_1, \dots, p_k)$ ve $Q = (q_1, \dots, p_k)$ iki dağılım kümesi olmak üzere $D_{KL}(P \parallel Q)$ şeklinde gösterilmektedir.

$$D_{KL}(P \parallel Q) = \sum h_i \log \frac{h_i}{k_i} \quad (6.2.6)$$

P ve Q nokta dağılımları arasındaki logaritmik farkı ölçmek için kullanılan bir ıraksama fonksiyonudur. Ancak gerçek bir metrik değildir, simetri özelliği yoktur $D_{KL}(Q \parallel P)$ ile $D_{KL}(P \parallel Q)$ eşit değildir, ayrıca üçgen eşitsizliğini sağlayacak yapıda değildir. Buna rağmen görüntü geri getirme işlemlerinde yapılan hesaplamalarda Hausdorff'ta olduğu gibi simetrikliği sağlamak için sonuçlar aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir.

$$D_{av} = \frac{D_{KL}(Q \parallel P) + D_{KL}(P \parallel Q)}{2} \quad (6.2.7)$$

D_{av} iki farkın ortalaması alınarak hesaplamalar yapılabilmektedir. Yapılan işlem he-

saplama karmaşıklığına olumsuz etki yaparken gürültüye karşı dayanıklılığı artırmaktadır. KL uzaklık fonksiyonu deformasyona ve gürültüye dayanıklı işlemler olmasına rağmen hesaplama karmaşıklığı düşük, sağlam, kısmi ve bütünsel eşlemeler için uygun bir metrik olarak özetlenebilir. Ayrıca logaritmik bir eğilimi olduğundan dolayı gürültüye karşı dayanıklı bir fonksiyon olarak değerlendirilebilir.

6.2.4 Earth Mover's Uzaklığı

Bilgisayar bilimlerinde Earth Mover's Uzaklığı olarak adlandırılan ve P ve Q gibi iki farklı nokta dağılımının arasındaki mesafeyi bulmak için kullanılan bir metriktir. Matematik biliminde Wasserstein metriği olarak isimlendirilir. Karşılaştırılan iki dağılım parçaları arasında farklar var ise bir dağılımı diğer dağılıma götürebilecek minimum maliyeti hesaplayabilmektedir.

Bazı uygulamalarda yapılan benzerlik hesaplamaları farklı büyüklükteki dağılımlar arasında olmaktadır. Diğer taraftan kısmi eşleme işlemi kimi uygulamalar için vazgeçilemez bir özelliktir. Bu özellikleri ile EMD bazı metrik koşullarını sağlamasa bile kullanımı oldukça yaygındır.

EMD fonksiyonu iki nokta p_i ve q_j arasında f_{ij} akışının hesaplanması aşağıdaki objektif fonksiyonunun minimize edilmesi ile yapılır:

$$\text{Work}(P, Q, F) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} d_{ij}$$

buradaki kısıtlar:

$$f_{ij} \geq 0, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$$

$$\sum_{j=1}^n f_{ij} \leq w_{p_i}, 1 \leq i \leq m$$

$$\sum_{i=1}^m f_{ij} \leq w_{q_j}, 1 \leq j \leq n$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} = \min \left(\sum_{i=1}^m w_{p_i}, \sum_{j=1}^n w_{q_j} \right).$$

olarak formülize edilmektedir. Çalışmada, nesne geri getirme konusunda birçok uygu-

lamada [249, 278, 284] başarılı sonuçlar veren Earth Mover's Uzaklığı(EMD) algoritması [228] kullanılmıştır.

Earth Mover's Uzaklık fonksiyonu deformasyona ve gürültüye dayanıklı, hesaplama karmaşıklığı diğer yöntemlere oranla yüksektir, gürültüye karşı sağlam, kısmi ve bütünsel eşlemeler için uygun bir metrik olarak özetlenebilir. Hesaplama karmaşıklığındaki problemler, örnek olarak FastEMD [211] adı verilen yaklaşım gibi farklı yaklaşımlar ile aşılabilmektedir.

6.3. Uzaklık Hesaplama Fonksiyonu Deneyleri

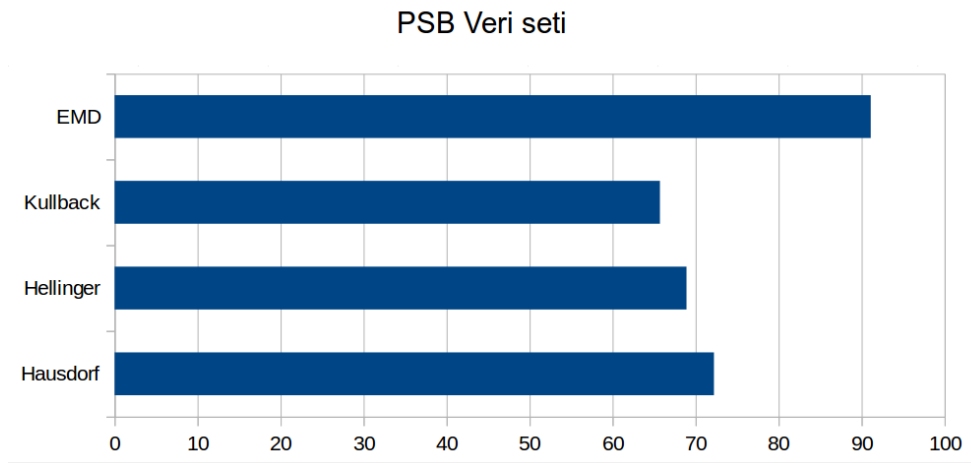
Tezde önerilen algoritmanın ikinci kısmında kullanılan uzaklık hesaplama fonksiyonlarının değerlendirilmesi için bir dizi deney yapılmıştır. Deneyler 2B ve 3B şekiller için ayrı ayrı yapılmış ve bu amaçla farklı veri setleri kullanılmıştır. 3B deneyler için PSB veri setinin bir altkümesi oluşturulmuş, 2B deneyler için ise Kimia 99 veri seti kullanılmıştır.

PSB veri setinin alt kümesi olarak oluşturulan veri Şekil 6.1'de gösterilmektedir. Veri seti eklemlerinin de bulunduğu 12 sınıf ve her sınıfta 8 şekil içermektedir. Şekil temsili olarak oluşturulan zenginleştirilmiş iskelet noktaları bu veri seti için dört farklı uzaklık hesaplama fonksiyonu ile çalıştırılmıştır.

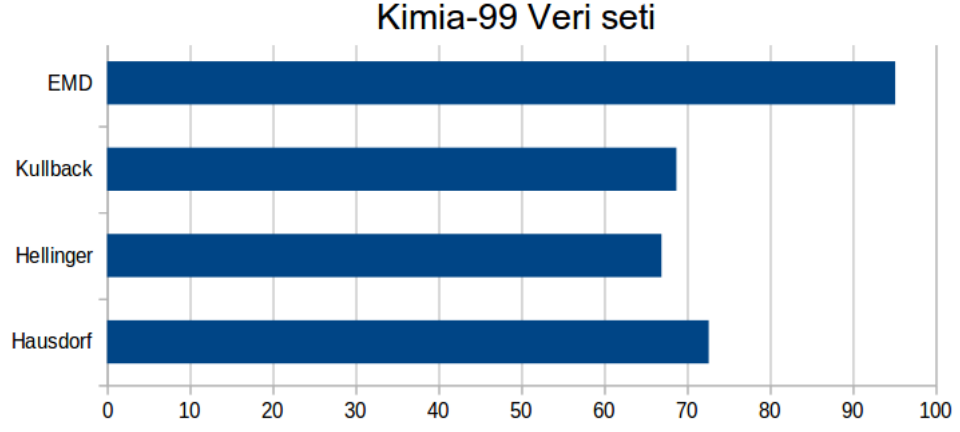
Yapılan deneylerle K En Yakın komşuluk değerlendirme yöntemi kullanılmıştır. Sonuçları karşılaştırdığımızda, önerilen metot ile yapılan deneylerde Hausdorff, Hellinger, Kullback ve EMD fonksiyonları için sonuçlar PSB altküme veri seti ile sırasıyla %72.2, %68.9, %65,7 ve %91.1 elde edilmiştir. K En Yakın komşuluk değerlendirme sonuçları Şekil 6.2'de gösterilmektedir.



Şekil 6.1: PSB veri seti içerisinde seçilen 96 şekil ile oluşturulmuştur. 12 sınıf ve her sınıfta 8 şekil içermektedir.



Şekil 6.2: Uzaklık hesaplama fonksiyonu PSB alt kümesi veri seti deney sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 6.3: Uzaklık hesaplama fonksiyonu Kimia-99 veri seti deney sonuçları gösterilmektedir.

2B şekil düzlemi için aynı deney Kimia 99 veri seti ile tekrar edilmiştir. Bu deney sonucunda yine önerdiğimiz yöntem sonuçlar sırası ile %72.6, %66.9, %68,7 ve %95.1 değerleri elde edilmiştir. K En Yakın komşuluk değerlendirme sonuçları Şekil 6.3'de gösterilmektedir.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, 2B ve 3B nesnelere için kullanılabilir yeteneklere sahip yeni bir iskelet bazlı şekil tanıma algoritması önerilmiştir. Algoritma, şekil iskeleti üzerindeki noktaları merkez olarak kabul eden, 2B için daire 3B için küreler çizerek çalışmaktadır. Daireler her nokta için minimum yarıçap değerinden şekilde bulunan maksimum yarıçap değerine ulaşana kadar oluşturulur. Çizilen dairelerin şekil içinde kalan pikselleri sayısı toplam daire piksel sayısına oranlanarak her nokta için şekil bütünü ve yerel bilgilerini taşıyan parametreler bulunur. Yapılan çalışma şu ana kadar yapılan çalışmalar içerisinde şekil iskelet noktalarını zenginleştiren yegane çalışmadır.

Tez kapsamında yapılan 2B deneyler Kimia-99, Kimia-216, MPEG-7 veri setinin bir alt kümesi, MPEG-7 veri setinin tamamı, Swedish Leaf, and Tools veri setleri ve 3B için McGill Shape Benchmark (MSB) ve Princeton Shape Benchmark (PSB) kullanılarak değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar önerilen yeni yöntemin hem 2B şekiller ve 3B nesnelere için şekil iskelet temsilini güçlendirdiği ve yapılan deneyler literatürdeki birçok çalışma ile performans olarak yarışabileceğini göstermektedir.

Gelecekte, önerilen algoritma için daha yüksek geri getirme başarımı elde edilecek çalışmalar yapılması planlanmaktadır. Özellikle uzamsal olarak kısıtlı durumlar için e değerleri hesaplanarak iskelet etrafında histogramlar oluşturularak zenginleştirme, hiyerarşik çözünürlük değerleri için hesaplama yapabilme ve farklı dağılım fonksiyonları ile algoritmanın denenmesi planlanmaktadır. Bunlara ilave olarak çalışma olan şekiller için ve karmaşık olarak kapanma olan şekillerin geri getirme performanslarının artırılmasıdır.

Çalışmada elde edilen sonuçlar, yöntemin uygulama kolaylığına sahip olmasından dolayı elde edilen sonuçlar açısından ümit vaat eden sonuçlardır. Çalışmanın katkıları aşağıda sunulmuştur.

- Literatür tarama bölümünde incelenen 3B şekil geri getirme teknikleri için yeni

bir sınıflandırma yapılmıştır.

- 2B ve 3B şekillerin iskelet temsilleri artan yarı çaplara sahip daireler ve küreler çizilerek elde edilen yerel bilgiler ile zenginleştirilmiştir.
- Tez kapsamında yapılan çalışmalarda edinilen bilgiler ışığında literatürde şekil iskelet temsili zenginleştiren yegane çalışma, önerilen çalışmadır.
- Zenginleştirilmiş şekil iskelet temsili verimli bir şekilde benzer veri seti şekillerini nasıl geri getirdiği gösterilmiştir.
- Farklı özellikler ve sayılarda şekillere sahip, çok sayıda 2B ve 3B şekil veri seti kullanılarak yapılan kapsamlı deneyler değerlendirilmiştir.
- Bu veri setleri üzerinde en iyi sonuçları alan yöntemler ile karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmekte ve yapılan çalışmaların bir çoğundan daha üstün sonuçlar elde edilmiştir.
- Kısmi eşleme işlemleri için iskelet tabanlı yöntemlerin sınır tabanlı yöntemlerden daha başarılı olması [239, 283] sebebi ile 2B şekiller için iskelet tabanlı yöntemler üzerinde çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Yapılan katkı sayesinde iskelet temsili kullanan diğer yöntemlerden daha da güçlü hale gelmektedir.
- 2B şekil geri getirme için tezde önerilen algoritma çok kolay kodlanabilen ve düşük karmaşıklığa sahip uygulanabilir bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.
- Önerilen yöntem, 3B koordinatların 2B düzleme yansıması kullanılmadan çalıştığından indirgenme problemleri içermemektedir.
- Çizge temsilleri kullanarak algoritmayı geliştirmek ve çizge benzeşim algoritmaları kullanarak başarıyı artırmak.
- Farklı çözünürlüklerde iskeleti hiyerarşik olarak karşılaştırmak için geliştirilmesi iyi olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Abbasi, S., Farzin Mokhtarian, and Josef Kittler.** 1999. *Multimedia systems* **7** (6):467–476.
- [2] **Abbasi, S., Farzin Mokhtarian, and Josef Kittler.** 2000. *Image and Vision Computing* **18** (3):199–211.
- [3] **Akimaliev, M., and M. Fatih Demirci.** 2015. *Pattern Recognition* **48** (11):3504 – 3515.
- [4] **Andaló, F. A., Paulo AV Miranda, R da S Torres, and Alexandre X Falcão.** 2010. *Pattern Recognition* **43** (1):26–36.
- [5] **Ankerst, M., Gabi Kastenmüller, Hans-Peter Kriegel, and Thomas Seidl.** 1999a. p. 207–226. *In: Advances in Spatial Databases* . Springer.
- [6] **Ankerst, M., Gabi Kastenmüller, Hans-Peter Kriegel, Thomas Seidl, et al.** 1999b. p. 34–43. *In: ISMB vol. 99.*
- [7] **Antini, G., Stefano Berretti, Alberto Del Bimbo, and Pietro Pala.** 2005. p. 4–pp. *In: Multimedia and Expo, 2005. ICME 2005. IEEE International Conference on* . IEEE.
- [8] **Arandjelović, R., and Andrew Zisserman.** 2012. p. 2911–2918. *In: Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on* . IEEE.
- [9] **Arbter, K.** 1989. *From Pixels to Features* :153–164.
- [10] **Arbter, K., Wesley E Snyder, Hans Burkhardt, and Gerd Hirzinger.** 1990. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* **12** (7):640–647.
- [11] **Asada, H., and Michael Brady.** 1986. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* (1):2–14.
- [12] **Assfalg, J., Alberto Del Bimbo, and Pietro Pala.** 2003. p. I–301. *In: Multimedia and Expo, 2003. ICME'03. Proceedings. 2003 International Conference on vol. 1.* IEEE.
- [13] **Assfalg, J., Alberto Del Bimbo, and Pietro Pala.** 2004. p. 77–83. *In: Proceedings of the 6th ACM SIGMM international workshop on Multimedia information retrieval* . ACM.
- [14] **Atmosukarto, I., Wee Kheng Leow, and Zhiyong Huang.** 2005. p. 334–339. *In: Multimedia Modelling Conference, 2005. MMM 2005. Proceedings of the 11th International* . IEEE.
- [15] **Aubry, M., Ulrich Schlickewei, and Daniel Cremers.** 2011. p. 1626–1633. *In: Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011 IEEE International Conference on* . IEEE.
- [16] **Belkasim, S. O., Malayappan Shridhar, and Majid Ahmadi.** 1991. *Pattern recognition* **24** (12):1117–1138.

- [17] **Belongie, S., Jitendra Malik, and Jan Puzicha.** 2001. p. 454–461. *In: Computer Vision, 2001. ICCV 2001. Proceedings. Eighth IEEE International Conference on vol. 1.* IEEE.
- [18] **Belongie, S., Jitendra Malik, and Jan Puzicha.** 2002. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on **24** (4):509–522.
- [19] **Berman, H. M., John Westbrook, Zukang Feng, Gary Gilliland, TN Bhat, Helge Weissig, Ilya N Shindyalov, and Philip E Bourne.** 2000. Nucleic acids research **28** (1):235–242.
- [20] **Berretti, S., Alberto Del Bimbo, and Pietro Pala.** 2000. Multimedia, IEEE Transactions on **2** (4):225–239.
- [21] **Besl, P. J., and Ramesh C Jain.** 1985. ACM Computing Surveys (CSUR) **17** (1):75–145.
- [22] **Bespalov, D., William C Regli, and Ali Shokoufandeh.** 2003a. p. 229–238. *In: ASME 2003 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference . American Society of Mechanical Engineers.*
- [23] **Bespalov, D., Ali Shokoufandeh, William C Regli, and Wei Sun.** 2003b. p. 208–215. *In: Proceedings of the eighth ACM symposium on Solid modeling and applications . ACM.*
- [24] **Biasotti, S., Simone Marini, Michela Mortara, Giuseppe Patane, Michela Spagnuolo, and Bianca Falcidieno.** 2003. p. 194–203. *In: Discrete Geometry for Computer Imagery . Springer.*
- [25] **Bimbo, A. D., and Pietro Pala.** 1997. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on **19** (2):121–132.
- [26] **Bimbo, A. D., and Pietro Pala.** 2006. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM) **2** (1):20–43.
- [27] **Blum, H.** 1967. title .
- [28] **Blum, H., and Roger N Nagel.** 1978. Pattern recognition **10** (3):167–180.
- [29] **Borgefors, G.** 1984. Computer vision, graphics, and image processing **27** (3):321–345.
- [30] **Brill, E. L.** 1968. WESCON, session **25**:1–10.
- [31] **Bronstein, A. M., Michael M Bronstein, Alfred M Bruckstein, and Ron Kimmel.** 2008. International Journal of Computer Vision **78** (1):67–88.
- [32] **Bronstein, A. M., Michael M Bronstein, Benjamin Bustos, Umberto Castellani, Marco Crisani, Bianca Falcidieno, LJ Guibas, Iasonas Kokkinos, Vittorio Murino, Maks Ovsjanikov, et al..** 2010. Proc. 3DOR **2** (5):6.
- [33] **Bronstein, A. M., Michael M Bronstein, Leonidas J Guibas, and Maks Ovsjanikov.** 2011. ACM Transactions on Graphics (TOG) **30** (1):1.

- [34] **Bronstein, A. M., Michael M Bronstein, Ron Kimmel, Mona Mahmoudi, and Guillermo Sapiro.** 2010. *International Journal of Computer Vision* **89** (2-3):266–286.
- [35] **Bronstein, M. M., and Iasonas Kokkinos.** 2010. p. 1704–1711. *In: Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on* . IEEE.
- [36] **Bustos, B., Daniel Keim, Dietmar Saupe, Tobias Schreck, and Dejan Vranić.** 2006. *International Journal on Digital Libraries* **6** (1):39–54.
- [37] **Bustos, B., Daniel A Keim, Dietmar Saupe, Tobias Schreck, and Dejan V Vranić.** 2005. *ACM Computing Surveys (CSUR)* **37** (4):345–387.
- [38] **Campbell, R. J., and Patrick J Flynn.** 2001. *Computer Vision and Image Understanding* **81** (2):166–210.
- [39] **Cardone, A., Satyandra K Gupta, and Mukul Karnik.** 2003. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* **3** (2):109–118.
- [40] **Chakrabarti, K., Michael Ortega-Binderberger, Kriengkrai Porkaew, and Sharad Mehrotra.** 2000. p. 709–712. *In: Multimedia and Expo, 2000. ICME 2000. 2000 IEEE International Conference on* vol. 2. IEEE.
- [41] **Chellappa, R., and R Bagdazian.** 1984. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* (1):102–105.
- [42] **Chen, D.-Y., and Ming Ouhyoung.** 2002. *In: Proc. of Computer Graphics Workshop* vol. 16.
- [43] **Chen, D.-Y., Xiao-Pei Tian, Yu-Te Shen, and Ming Ouhyoung.** 2003. p. 223–232. *In: Computer graphics forum* vol. 22. Wiley Online Library.
- [44] **Chetverikov, D., and Yuri Khenokh.** 1999. p. 367–374. *In: Computer Analysis of Images and Patterns* . Springer.
- [45] **Chomsky, N.** 2002. *Syntactic structures*. Walter de Gruyter.
- [46] **Chung, F. R.** 1997. American Mathematical Society .
- [47] **Cohen, S., and Leonidas Guibas.** 1999. p. 1076–1083. *In: Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on* vol. 2. IEEE.
- [48] **Coifman, R. R., and Stéphane Lafon.** 2006. *Applied and computational harmonic analysis* **21** (1):5–30.
- [49] **Cornea, N. D., M Fatih Demirci, Deborah Silver, Ali Shokoufandeh, Sven J Dickinson, and Paul B Kantor.** 2005. p. 366–371. *In: Shape Modeling and Applications, 2005 International Conference* . IEEE.
- [50] **Csurka, G., Christopher Dance, Lixin Fan, Jutta Willamowski, and Cédric Bray.** 2004. p. 1–2. *In: Workshop on statistical learning in computer vision, ECCV* vol. 1. Prague.

- [51] **Cvetković, D. M., Michael Doob, and Horst Sachs.** 1980. *Spectra of graphs: theory and application*, vol. 87. Academic Pr.
- [52] **Daoudi, M., and Stanislaw Matusiak.** 2000. *Journal of Visual Languages & Computing* **11** (3):287–301.
- [53] **Das, M., Mark J Paulik, and NK Loh.** 1990. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *IEEE Transactions on* **12** (1):97–103.
- [54] **Davies, E. R.** 2004. *Machine vision: theory, algorithms, practicalities*. Elsevier.
- [55] **Davies, E. R.** 2012. *Computer and machine vision: theory, algorithms, practicalities*. Academic Press.
- [56] **De Alarcón, P. A., Alberto D Pascual-Montano, and José M Carazo.** 2002. *In: Image and Video Retrieval* p. 225–234. Springer.
- [57] **Demirci, F., Y. Osmanlioglu, A. Shokoufandeh, and S. Dickinson.** 2011. *Computer Vision and Image Understanding* **115** (7):976–983.
- [58] **Demirci, M., B. Platel, A. Shokoufandeh, L. Florack, and S. Dickinson.** 2009. *Journal of Mathematical Imaging and Vision* **35** (2):103–116.
- [59] **Dey, T. K., Joachim Giesen, and Samrat Goswami.** 2003. *In: Algorithms and Data Structures* p. 25–36. Springer.
- [60] **di Baja, G. S., and Stina Svensson.** 2002. *Pattern Recognition Letters* **23** (6):703–711.
- [61] **Donoser, M., and Horst Bischof.** 2013. p. 1320–1327. *In: Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2013 IEEE Conference on* . IEEE.
- [62] **Dubois, S. R., and Filson H Glanz.** 1986. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *IEEE Transactions on* (1):55–66.
- [63] **Dudani, S. A., Kenneth J Breeding, and Robert B McGhee.** 1977. *Computers*, *IEEE Transactions on* **100** (1):39–46.
- [64] **Dudek, G., and John K Tsotsos.** 1997. *Computer Vision and Image Understanding* **68** (2):170–189.
- [65] **Eberly, D.** 1994a. *In: ter Haar Romeny, B. , (ed.), Geometry-Driven Diffusion in Computer Vision*, vol. 1 of *Computational Imaging and Vision* p. 371–392. Springer Netherlands.
- [66] **Eberly, D. H.** 1994b. *GEOMETRIC METHODS FOR ANALYSIS OF RIDGES IN N-DIMENSIONAL IMAGES*. PhD thesis The University of North Carolina at Chapel Hill.
- [67] **Ebrahim, Y., Maher Ahmed, Wegdan Abdelsalam, and Siu-Cheung Chau.** 2009. *Pattern Recognition Letters* **30** (4):348–358.
- [68] **Eichmann, G., Chao Lu, Mariusz Jankowski, and Richard Tolimieri.** 1990. p. 86–94. *In: Hybrid Image and Signal Processing II* . International Society for Optics and Photonics.

- [69] **Eini, S., and Abdolah Chalechale.** 2013. arXiv preprint arXiv:1302.5894 .
- [70] **El-Mehalawi, M., and R Allen Miller.** 2003a. *Computer-Aided Design* **35** (1):83–94.
- [71] **El-Mehalawi, M., and R Allen Miller.** 2003b. *Computer-Aided Design* **35** (1):95–105.
- [72] **Elad, M., Ayellet Tal, and Sigal Ar.** 2000. Hewlett-Packard Research Report HPL-2000-20R1 .
- [73] **Elad, M., Ayellet Tal, and Sigal Ar.** 2002. *Content based retrieval of VRML objects an iterative and interactive approach.* Springer.
- [74] **Eom, K.-B., and Juha Park.** 1990. p. 860–864. *In: Pattern Recognition, 1990. Proceedings., 10th International Conference on* vol. 1. IEEE.
- [75] **Fatih Demirci, M., Ali Shokoufandeh, Yakov Keselman, Sven Dickinson, and Lars Bretzner.** 2003. *In: Griffin, L., and Martin Lillholm. , (ed.), Scale Space Methods in Computer Vision*, vol. 2695 of *Lecture Notes in Computer Science* p. 17–32. Springer Berlin Heidelberg.
- [76] **Fergus, R., Li Fei-Fei, Pietro Perona, and Andrew Zisserman.** 2005. p. 1816–1823. *In: Computer Vision, 2005. ICCV 2005. Tenth IEEE International Conference on* vol. 2. IEEE.
- [77] **Freeman, H.** 1961. *Electronic Computers*, IRE Transactions on (2):260–268.
- [78] **Freeman, H., and A Saghri.** 1978. p. 701–703. *In: Proceedings of the 4th International joint conference on Pattern Recognition .*
- [79] **Funkhouser, T., Michael Kazhdan, Philip Shilane, Patrick Min, William Kiefer, Ayellet Tal, Szymon Rusinkiewicz, and David Dobkin.** 2004. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* **23** (3):652–663.
- [80] **Funkhouser, T., Patrick Min, Michael Kazhdan, Joyce Chen, Alex Halderman, David Dobkin, and David Jacobs.** 2003. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* **22** (1):83–105.
- [81] **Furuya, T., and Ryutarou Ohbuchi.** 2009. p. 26. *In: Proceedings of the ACM international conference on image and video retrieval .* ACM.
- [82] **Gagvani, N., and Deborah Silver.** 1999. *Graphical Models and Image Processing* **61** (3):149–164.
- [83] **Gal, R., Ariel Shamir, and Daniel Cohen-Or.** 2007. *Visualization and Computer Graphics*, IEEE Transactions on **13** (2):261–271.
- [84] **Giorgi, D., Patrizio Frosini, Michela Spagnuolo, and Bianca Falcidieno.** 2010. *The Visual Computer* **26** (10):1321–1338.
- [85] **Gonzalez, R. C.** 2009. *Digital image processing.* Pearson Education India.

- [86] **Gopalan, R., Pavan Turaga, and Rama Chellappa.** 2010. *In: Computer Vision—ECCV 2010* p. 286–299. Springer.
- [87] **Goshtasby, A.** 1985. Pattern Analysis and Machine Intelligence, *IEEE Transactions on* (6):738–743.
- [88] **Granlund, G. H.** 1972. Computers, *IEEE Transactions on* **100** (2):195–201.
- [89] **Grosky, W. I., and Rajiv Mehrotra.** 1990. Computer Vision, Graphics, and Image Processing **52** (3):416–436.
- [90] **Grosky, W. I., Peter Neo, and Rajiv Mehrotra.** 1989. p. 180–187. *In: Data Engineering, 1989. Proceedings. Fifth International Conference on* . IEEE.
- [91] **Guéziec, A. P., Xavier Pennec, and Nicholas Ayache.** 1997. Computing in Science & Engineering (4):29–41.
- [92] **Guocheng, A., Zhang Fengjun, Wang Hong'an, and Dai Guozhong.** 2010. p. 507–510. *In: Pattern Recognition (ICPR), 2010 20th International Conference on* . IEEE.
- [93] **Hartman, J., and Josie Wernecke.** 1996. *The VRML 2.0 handbook: building moving worlds on the web.* Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- [94] **He, Y., and Amlan Kundu.** 1991. p. 2373–2376. *In: Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1991. ICASSP-91., 1991 International Conference on* . IEEE.
- [95] **Heczko, M., D Keim, Dietmar Saupe, and D Vranic.** 2002. *Datenbank-Spektrum* **2** (2):54–63.
- [96] **Hellinger, E.** 1909. *Journal für die reine und angewandte Mathematik* **136**:210–271.
- [97] **Hilaga, M., Yoshihisa Shinagawa, Taku Kohmura, and Toshiyasu L Kunii.** 2001. p. 203–212. *In: Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* . ACM.
- [98] **Hirata, K., and Toshikazu Kato.** 1992. p. 56–71. *In: Advances in Database Technology-EDBT'92* . Springer.
- [99] **Horn, B. K.** 1984. *Proceedings of the IEEE* **72** (12):1671–1686.
- [100] **Hsu, E. P.** 2002. *Stochastic analysis on manifolds*, vol. 38. American Mathematical Soc.
- [101] **Hu, M.-K.** 1962. Information Theory, *IRE Transactions on* **8** (2):179–187.
- [102] **Hua, S., Qiuxin Jiang, and Qing Zhong.** 2011. *In: Communication Systems and Information Technology* p. 163–169. Springer.
- [103] **Huang, C.-L., and Dai-Hwa Huang.** 1998. *Image and Vision Computing* **16** (3):149–163.

- [104] **Huang, T., Sharad Mehrotra, and Kannan Ramchandran.** 1997. Digital Image Access & Retrieval [papers presented at the 1996 Clinic on Library Applications of Data Processing, March 24-26, 1996 Urbana-Champaign] .
- [105] **Ichida, H., Yuichi Itoh, Yoshifumi Kitamura, and Fumio Kishino.** 2004. p. 231–232. *In: Virtual Reality, 2004. Proceedings.* IEEE . IEEE.
- [106] **Iivarinen, J., and Ari JE Visa.** 1996. p. 25–32. *In: Photonics East'96 . International Society for Optics and Photonics.*
- [107] **Ip, C. Y., Daniel Lapadat, Leonard Sieger, and William C Regli.** 2002. p. 273–280. *In: Proceedings of the seventh ACM symposium on Solid modeling and applications . ACM.*
- [108] **Ip, H., and W Wong.** 2002. p. 314–319. *In: Proceedings of the 15th International Conference on Vision Interface . Citeseer.*
- [109] **Iyer, N., Subramaniam Jayanti, Kuiyang Lou, Yagnanarayanan Kalyanaraman, and Karthik Ramani.** 2005a. *Computer-Aided Design* **37** (5):509–530.
- [110] **Iyer, N., Subramaniam Jayanti, and Karthik Ramani.** 2005b. p. 501–509. *In: ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference . American Society of Mechanical Engineers.*
- [111] **Iyer, N., Yagnanarayanan Kalyanaraman, Kuiyang Lou, Subramaniam Jayanti, and Karthik Ramani.** 2003. p. 89–98. *In: ASME 2003 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference . American Society of Mechanical Engineers.*
- [112] **Jahne, B.** 1997. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag .
- [113] **Jalba, A. C., Jacek Kustra, and Alexandru C Telea.** 2013. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* **35** (6):1495–1508.
- [114] **Jeannin, S., Leszek Cieplinski, Jens Rainer Ohm, and Munchurl Kim.** 2001. *ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N 3914.*
- [115] **Jiantao, P., Liu Yi, Xin Guyu, Zha Hongbin, Liu Weibin, and Yusuke Uehara.** 2004. p. 95–101. *In: 3D Data Processing, Visualization and Transmission, 2004. 3DPVT 2004. Proceedings. 2nd International Symposium on . IEEE.*
- [116] **Johnson, A. E.** 1997. *Spin-images: a representation for 3-D surface matching.* PhD thesis Citeseer.
- [117] **Johnson, A. E., and Martial Hebert.** 1998. *Image and Vision Computing* **16** (9):635–651.
- [118] **Johnson, A. E., and Martial Hebert.** 1999. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* **21** (5):433–449.

- [119] **Kaku, K., Yoshihiro Okada, and Koichi Niijima.** 2004. p. 46–51. *In: Computer Graphics, Imaging and Visualization, 2004. CGIV 2004. Proceedings. International Conference on . IEEE.*
- [120] **Kang, S. B., and Katsushi Ikeuchi.** 1991. p. 580–585. *In: Computer Vision and Pattern Recognition, 1991. Proceedings CVPR'91., IEEE Computer Society Conference on . IEEE.*
- [121] **Kashyap, R. L., and Ramalingam Chellappa.** 1981. *Information Theory, IEEE Transactions on* **27** (5):627–637.
- [122] **Kauppinen, H., Tapio Seppänen, and Matti Pietikäinen.** 1995. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* **17** (2):201–207.
- [123] **Kawamura, S., Kazuya Usui, Takahiko Furuya, and Ryutarou Ohbuchi.** 2012. p. 55–58. *In: 3DOR .*
- [124] **Kazhdan, M.** 2004. Department of Computer Science, Princeton University, PhD thesis .
- [125] **Kazhdan, M., Bernard Chazelle, David Dobkin, Thomas Funkhouser, and Szymon Rusinkiewicz.** 2004. *Algorithmica* **38** (1):201–225.
- [126] **Kazhdan, M., Thomas Funkhouser, and Szymon Rusinkiewicz.** 2003. p. 156–164. *In: Symposium on geometry processing vol. 6.*
- [127] **Ke, Y., and Rahul Sukthankar.** 2004. p. II–506. *In: Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on vol. 2. IEEE.*
- [128] **Keim, D. A.** 1999. *Efficient geometry-based similarity search of 3D spatial databases*, vol. 28. ACM.
- [129] **Kim, D. H., Il D Yun, and Sang U Lee.** 2001. p. 223–230. *In: Photonics West 2001-Electronic Imaging . International Society for Optics and Photonics.*
- [130] **Kim, W.-Y., and Yong-Sung Kim.** 2000. *Signal processing: Image communication* **16** (1):95–102.
- [131] **Kim, Y.-S., and Whoi-Yul Kim.** 1998. *Image and Vision Computing* **16** (12):931–939.
- [132] **Kliot, M., and Ehud Rivlin.** 1998. *In: Computer Vision-ECCV'98* p. 491–507. Springer.
- [133] **Körtgen, M., Gil-Joo Park, Marcin Novotni, and Reinhard Klein.** 2003. p. 5–17. *In: The 7th central European seminar on computer graphics vol. 3.*
- [134] **Kriegel, H.-P., Stefan Brecheisen, Peer Kröger, Martin Pfeifle, and Matthias Schubert.** 2003a. p. 587–598. *In: Proceedings of the 2003 ACM SIGMOD international conference on Management of data . ACM.*

- [135] **Kriegel, H.-P., Peer Kröger, Zahi Mashaël, Martin Pfeifle, Marco Pötke, and Thomas Seidl.** 2003b. p. 27–36. *In: Database Systems for Advanced Applications, 2003.(DASFAA 2003). Proceedings. Eighth International Conference on . IEEE.*
- [136] **Kuang, Z., Zongmin Li, Xiaxia Jiang, Yujie Liu, and Hua Li.** 2015. *Computer-Aided Design* **58**:13–23.
- [137] **Kullback, S.** 1968. *Information theory and statistics.* Courier Corporation.
- [138] **Lafon, S. S.** 2004. *Diffusion maps and geometric harmonics.* PhD thesis Yale University.
- [139] **Laiche, N., Slimane Larabi, Farouk Ladraa, and Abdelnour Khadraoui.** 2014. *Signal Processing: Image Communication* **29** (4):556–571.
- [140] **Lam, L., Seong-Whan Lee, and Ching Y Suen.** 1992. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* **14** (9):869–885.
- [141] **Lamdan, Y., and Haim J Wolfson.** 1988. title .
- [142] **Lee, Y., BV Roy, Christoper D Reed, RP Lippman, and K Wadsworth.** 1997.
- [143] **Leibowitz, N., Zipora Y Fligelman, Ruth Nussinov, and Haim J Wolfson.** 1999. p. 169–177. *In: ISMB . Citeseer.*
- [144] **Leifman, G., Sagi Katz, Ayellet Tal, and Ron Meir.** 2003. title .
- [145] **Leifman, G., Ron Meir, and Ayellet Tal.** 2005. *The Visual Computer* **21** (8-10):865–875.
- [146] **Leng, B., and Zheng Qin.** 2008. *Multimedia Tools and Applications* **40** (1):135–150.
- [147] **Levoy, M., Kari Pulli, Brian Curless, Szymon Rusinkiewicz, David Koller, Lucas Pereira, Matt Ginzton, Sean Anderson, James Davis, Jeremy Ginsberg, et al..** 2000. p. 131–144. *In: Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques . ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.*
- [148] **Li, P., Huadong Ma, and Anlong Ming.** 2010. *In: Advances in Multimedia Information Processing-PCM 2010* p. 449–460. Springer.
- [149] **Li, P., Qilong Wang, and Lei Zhang.** 2013. . ICCV.
- [150] **Li, S. Z.** 1992. *Pattern Recognition* **25** (6):583–594.
- [151] **Li, S. Z.** 1998. title .
- [152] **Lian, Z., Afzal Godil, Benjamin Bustos, Mohamed Daoudi, Jeroen Hermans, Shun Kawamura, Yukinori Kurita, Guillaume Lavoué, Hien Van Nguyen, Ryutarou Ohbuchi, et al..** 2013. *Pattern Recognition* **46** (1):449–461.

- [153] **Lian, Z., Paul L Rosin, and Xianfang Sun.** 2010. International Journal of Computer Vision **89** (2-3):130–151.
- [154] **Liao, S. X., and Miroslaw Pawlak.** 1996. Pattern analysis and machine intelligence, IEEE Transactions on **18** (3):254–266.
- [155] **Lin, C., and Rama Chellappa.** 1987. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on (5):686–690.
- [156] **Ling, H., and David W Jacobs.** 2005. p. 719–726. *In: Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on vol. 2.* IEEE.
- [157] **Ling, H., and David W Jacobs.** 2007. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on **29** (2):286–299.
- [158] **Liu, Y., Jiantao Pu, Guyu Xin, Hongbin Zha, Weibin Liu, and Yusuke Uehara.** 2004a. p. 3–9. *In: Computer Graphics and Applications, 2004. PG 2004. Proceedings. 12th Pacific Conference on .* IEEE.
- [159] **Liu, Y., Jiantao Pu, Hongbin Zha, Weibin Liu, and Yusuke Uehara.** 2004b. p. 896–903. *In: 3D Data Processing, Visualization and Transmission, 2004. 3DPVT 2004. Proceedings. 2nd International Symposium on .* IEEE.
- [160] **Liu, Y., Hongbin Zha, and Hong Qin.** 2006. p. 2025–2032. *In: Computer Vision and Pattern Recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on vol. 2.* IEEE.
- [161] **Loffler, J.** 2000. p. 82–87. *In: Information Visualization, 2000. Proceedings. IEEE International Conference on .* IEEE.
- [162] **Loncaric, S.** 1998. Pattern recognition **31** (8):983–1001.
- [163] **Lou, K., Subramaniam Jayanti, Natraj Iyer, Yagnanarayanan Kalyanaraman, Sunil Prabhakar, and Karthik Ramani.** 2003. p. 169–178. *In: ASME 2003 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference . American Society of Mechanical Engineers.*
- [164] **Lowe, D. G.** 1999. p. 1150–1157. *In: Computer vision, 1999. The proceedings of the seventh IEEE international conference on vol. 2.* Ieee.
- [165] **Lowe, D. G.** 2004. International journal of computer vision **60** (2):91–110.
- [166] **Lu, G., and Atul Sajjanhar.** 1999. Multimedia Systems **7** (2):165–174.
- [167] **Mahmoudi, M., and Guillermo Sapiro.** 2009. Graphical Models **71** (1):22–31.
- [168] **Mamic, G., and Mohammed Bennamoun.** 2002. Digital Signal Processing **12** (1):47–76.
- [169] **Mateus, D., Radu Horaud, David Knossow, Fabio Cuzzolin, and Edmond Boyer.** 2008. p. 1–8. *In: Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on .* IEEE.

- [170] **McWherter, D., Mitchell Peabody, William C Regli, and Ali Shokoufandeh.** 2001a. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* **1** (4):300–310.
- [171] **McWherter, D., Mitchell Peabody, William C Regli, and Ali Shokoufandeh.** 2001b. *In: Proceedings of the DETC '01 ASME Design Engineering Technical Conferences, Pittsburgh, PA, Paper No. DETC* .
- [172] **McWherter, D., Mitchell Peabody, William C Regli, and A Shoukofandeh.** 2001c. Department of Mathematical and Computer Science, Drexel University, Philadelphia, Technical Report .
- [173] **Mehrotra, R., and James E Gary.** 1995. *Computer* **28** (9):57–62.
- [174] **Mehetre, B. M., Mohan S Kankanhalli, and Wing Foon Lee.** 1997. *Information Processing & Management* **33** (3):319–337.
- [175] **Mémoli, F., and Guillermo Sapiro.** 2005. *Foundations of Computational Mathematics* **5** (3):313–347.
- [176] **Min, P.** 2004. p. 1–158. *In: A Dissertation Presented to the Faculty of Princeton University in Candidacy for the Degree of Doctor of Philosophy* .
- [177] **Min, P., Joyce Chen, and Thomas Funkhouser.** 2002. p. 138–138. *In: ACM SIGGRAPH 2002 conference abstracts and applications* . ACM.
- [178] **Min, P., John A Halderman, Michael Kazhdan, and Thomas A Funkhouser.** 2003. p. 7–ff. *In: Proceedings of the eighth international conference on 3D Web technology* . ACM.
- [179] **Mitchell, O., and Timothy A Grogan.** 1984. *Optical Engineering* **23** (5):235484–235484.
- [180] **Mokhtarian, F., Sadegh Abbasi, and Josef Kittler.** 1996. *In: Proceedings of the 1996 British Machine and Vision Conference BMVC vol. 96.* Citeseer.
- [181] **Mokhtarian, F., Sadegh Abbasi, Josef Kittler, et al..** 1997. *Series on Software Engineering and Knowledge Engineering* **8**:51–58.
- [182] **Mokhtarian, F., and Alan Mackworth.** 1986. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* (1):34–43.
- [183] **Morse, B. S.** 1996. title .
- [184] **Mouine, S., Itheri Yahiaoui, and Anne Verroust-Blondet.** 2013. p. 127–134. *In: Proceedings of the 3rd ACM conference on International conference on multimedia retrieval* . ACM.
- [185] **MPEG, M.** 7. Technical report Technical Report ISO/IEC JTC1/SC29/WG11.
- [186] **Nagasaka, Y., M Nakamura, and T Murakami.** 2001. *Proc. of IPMM2001* :8–3.
- [187] **Nanni, L., Sheryl Brahnma, and Alessandra Lumini.** 2012. *Pattern Recognition Letters* **33** (16):2254–2260.

- [188] **Niblack, W., Ron Barber, Will Equitz, Myron Flickner, Eduardo Glasman, Dragutin Petkovic, Peter Yanker, Christos Faloutsos, and Gabriel Taubin.** 1993. Technical report and shape. Technical Report RJ 9203 (81511), IBM Research Division.
- [189] **Novotni, M., and Reinhard Klein.** 2001. p. 167–175. *In: Shape Modeling and Applications, SMI 2001 International Conference on.* . IEEE.
- [190] **Novotni, M., and Reinhard Klein.** 2003. p. 216–225. *In: Proceedings of the eighth ACM symposium on Solid modeling and applications.* . ACM.
- [191] **Ogniewicz, R. L., and Olaf Kübler.** 1995. *Pattern recognition* **28** (3):343–359.
- [192] **Ohbuchi, R., Takahiro Minamitani, and Tsuyoshi Takei.** 2005. *International Journal of Computer Applications in Technology* **23** (2-4):70–85.
- [193] **Ohbuchi, R., Masatoshi Nakazawa, and Tsuyoshi Takei.** 2003. p. 39–45. *In: Proceedings of the 5th ACM SIGMM international workshop on Multimedia information retrieval.* . ACM.
- [194] **Ohbuchi, R., Kunio Osada, Takahiko Furuya, and Tomohisa Banno.** 2008. p. 93–102. *In: Shape Modeling and Applications, 2008. SMI 2008. IEEE International Conference on.* . IEEE.
- [195] **Ohbuchi, R., Tomo Otagiri, Masatoshi Ibatō, and Tsuyoshi Takei.** 2002. p. 265–274. *In: Computer Graphics and Applications, 2002. Proceedings. 10th Pacific Conference on.* . IEEE.
- [196] **Ohbuchi, R., and Tsuyoshi Takei.** 2003. p. 293–302. *In: Computer Graphics and Applications, 2003. Proceedings. 11th Pacific Conference on.* . IEEE.
- [197] **Ohishi, Y., and Ryutarou Ohbuchi.** 2013. p. 1–4. *In: Image Analysis for Multimedia Interactive Services (WIAMIS), 2013 14th International Workshop on.* . IEEE.
- [198] **Ohkita, Y., Yuya Ohishi, Takahiko Furuya, and Ryutarou Ohbuchi.** 2012. p. 593–598. *In: Multimedia and Expo Workshops (ICMEW), 2012 IEEE International Conference on.* . IEEE.
- [199] **Ohm, J.-R., F Bunjamin, Wolfram Liesch, Bela Makai, Karsten Müller, Aljoscha Smolic, and D Zier.** 2000. *Signal Processing: Image Communication* **16** (1):157–179.
- [200] **Osada, R., Thomas Funkhouser, Bernard Chazelle, and David Dobkin.** 2002. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* **21** (4):807–832.
- [201] **Ovsjanikov, M., Jian Sun, and Leonidas Guibas.** 2008. p. 1341–1348. *In: Computer graphics forum vol. 27.* Wiley Online Library.
- [202] **Papadakis, P., Ioannis Pratikakis, Stavros Perantonis, and Theoharis Theoharis.** 2007. *Pattern Recognition* **40** (9):2437–2452.
- [203] **Paquet, E., and Marc Rioux.** 1999. p. 375–380. *In: Multimedia Computing and Systems, 1999. IEEE International Conference on vol. 1.* . IEEE.

- [204] **Paquet, E., Marc Rioux, Anil Murching, Thumpudi Naveen, and Ali Tabatabai.** 2000. Signal processing: Image communication **16** (1):103–122.
- [205] **Parui, S. K., S Eswara Sarma, and D Dutta Majumder.** 1986. Pattern Recognition Letters **4** (3):201–204.
- [206] **Pavlidis, T.** 1980. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence (4):301–312.
- [207] **Pavlidis, T.** 2012. *Algorithms for graphics and image processing.* Springer Science & Business Media.
- [208] **Peabody, M., and William C Regli.** 2001. Hewlett-Packard Research, Tech. Rep .
- [209] **Pedrosa, G. V., Marcos A Batista, and Celia AZ Barcelos.** 2013. Neurocomputing **120**:156–163.
- [210] **Pele, O., and Michael Werman.** 2009a. In: ICCV .
- [211] **Pele, O., and Michael Werman.** 2009b. p. 460–467. In: Computer vision, 2009 IEEE 12th international conference on . IEEE.
- [212] **Persoon, E., and King-Sun Fu.** 1977. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on **7** (3):170–179.
- [213] **Petrou, M., and Costas Petrou.** 2010. *Image processing: the fundamentals.* John Wiley & Sons.
- [214] **Peura, M., and Jukka Iivarinen.** 1997. p. 451. In: Proceedings of the third international workshop on visual form vol. 443. Citeseer.
- [215] **Pourian, N., and BS Manjunath.** 2015. p. 960–967. In: Applications of Computer Vision (WACV), 2015 IEEE Winter Conference on . IEEE.
- [216] **Prokop, R. J., and Anthony P Reeves.** 1992. CVGIP: Graphical Models and Image Processing **54** (5):438–460.
- [217] **Rauber, T., et al..** 1992. p. 466–469. In: Pattern Recognition, 1992. Vol. II. Conference B: Pattern Recognition Methodology and Systems, Proceedings., 11th IAPR International Conference on . IEEE.
- [218] **Rauber, T. W.** 1994. Technical report Technical Report: GR UNINOVA-RT-10-94, University Nova de Lisboa, Portugal.
- [219] **Raviv, D., Alexander M Bronstein, Michael M Bronstein, Ron Kimmel, and Guillermo Sapiro.** 2010a. In: Proc. 3DPVT vol. 2. Citeseer.
- [220] **Raviv, D., Michael M Bronstein, Alexander M Bronstein, and Ron Kimmel.** 2010b. p. 39–44. In: Proceedings of the ACM workshop on 3D object retrieval . ACM.
- [221] **Rea, H., RCW Sung, Jonathan R Corney, and DER Clark.** 2003. In: Proc. of the 18th International Conference on Computer-Aided Production Engineering .

- [222] **Rea, H. J., Jonathan R Corney, Doug ER Clark, and Nick K Taylor.** 2004. p. 167–174. *In: 3D Data Processing, Visualization and Transmission, 2004. 3DPVT 2004. Proceedings. 2nd International Symposium on . IEEE.*
- [223] **Reeb, G.** 1946. *CR Acad. Sci. Paris* **222**:847–849.
- [224] **Regli, W. C., and Vincent A Cicirello.** 2000. *Computer-Aided Design* **32** (2):119–132.
- [225] **Regli, W. C., Cheuk Yiu Ip, and Leonard Sieger.** 2009. US Patent 7,639,868.
- [226] **Ricard, J., David Coeurjolly, and Atilla Baskurt.** 2005. *Pattern Recognition Letters* **26** (14):2174–2186.
- [227] **Richard Jr, C. W., and Hooshang Hemami.** 1974. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on* (4):371–378.
- [228] **Rubner, Y., Carlo Tomasi, and Leonidas J Guibas.** 2000. *International journal of computer vision* **40** (2):99–121.
- [229] **Rucklidge, W. J.** 1997. *International Journal of computer vision* **24** (3):251–270.
- [230] **Ruggeri, M. R., Giuseppe Patanè, Michela Spagnuolo, and Dietmar Saupe.** 2010. *International Journal of Computer Vision* **89** (2-3):248–265.
- [231] **Rui, Y., Alfred C She, and Thomas S Huang.** 1997. *SERIES ON SOFTWARE ENGINEERING AND KNOWLEDGE ENGINEERING* **8**:165–180.
- [232] **Rustamov, R. M.** 2007. p. 225–233. *In: Proceedings of the fifth Eurographics symposium on Geometry processing . Eurographics Association.*
- [233] **Safar, M., Cyw Shahabi, and Xiaoming Sun.** 2000. p. 141–144. *In: Multimedia and Expo, 2000. ICME 2000. 2000 IEEE International Conference on vol. 1. IEEE.*
- [234] **Sajjanhar, A.** 1997. *A technique for similarity retrieval of shapes.* PhD thesis Monash University.
- [235] **Sánchez-Cruz, H., and Ernesto Bribiesca.** 2003. *Image and Vision Computing* **21** (12):1027–1036.
- [236] **Saupe, D., and Dejan V Vranić.** 2001. *3D model retrieval with spherical harmonics and moments.* Springer.
- [237] **Scassellati, B. M., Sophoclis Alexopoulos, and Myron D Flickner.** 1994. p. 2–14. *In: IS&T/SPIE 1994 International Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology . International Society for Optics and Photonics.*
- [238] **Schneider, P., and David H Eberly.** 2002. *Geometric tools for computer graphics.* Morgan Kaufmann.
- [239] **Sebastian, T. B., Philip N Klein, and Benjamin B Kimia.** 2004. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* **26** (5):550–571.

- [240] **Sekita, I., Takio Kurita, and Nobuyuki Otsu.** 1992. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence (4):489–496.
- [241] **Shamir, A., Andrei Scharf, and Daniel Cohen-Or.** 2003. International Journal of Shape Modeling **9** (02):203–222.
- [242] **Shekar, B., and Bharathi Pilar.** 2014. p. 218–224. *In: Signal and Image Processing (ICSIP), 2014 Fifth International Conference on* . IEEE.
- [243] **Shekar, B., Bharathi Pilar, and Josef Kittler.** 2015. p. 46–55. *In: Proceedings of the 2nd International Conference on Perception and Machine Intelligence* . ACM.
- [244] **Shen, W., Xiang Bai, Rong Hu, Hongyuan Wang, and Longin Jan Latecki.** 2011. Pattern Recognition **44** (2):196–209.
- [245] **Shen, Y.-T., Ding-Yun Chen, Xiao-Pei Tian, and Ming Ouhyoung.** 2003. *In: Proc. eurographics* .
- [246] **Shilane, P., Patrick Min, Michael Kazhdan, and Thomas Funkhouser.** 2004. p. 167–178. *In: Shape modeling applications, 2004. Proceedings* . IEEE.
- [247] **Shilane, P. N.** 2008. *Shape Distinction for 3D Object Retrieval*. PhD thesis Cite-seer.
- [248] **Shinagawa, Y., Tosiyasu L Kunii, and Yannick L Kergosien.** 1991. IEEE Computer Graphics and Applications (5):66–78.
- [249] **Shokoufandeh, A., Y Keselman, M Fatih Demirci, D Macrini, and Sven Dickinson.** 2012. Computer Vision, IET **6** (6):500–513.
- [250] **Shu, X., and Xiao-Jun Wu.** 2011. Image and vision Computing **29** (4):286–294.
- [251] **Shum, H.-Y., Martial Hebert, and Katsushi Ikeuchi.** 1996. p. 526–531. *In: Computer Vision and Pattern Recognition, 1996. Proceedings CVPR'96, 1996 IEEE Computer Society Conference on* . IEEE.
- [252] **Siddiqi, K., Ali Shokoufandeh, Sven J Dickinson, and Steven W Zucker.** 1999. International Journal of Computer Vision **35** (1):13–32.
- [253] **Siddiqi, K., Juan Zhang, Diego Macrini, Ali Shokoufandeh, Sylvain Bouix, and Sven Dickinson.** 2008. Machine Vision and Applications **19** (4):261–275.
- [254] **Sivic, J., and Andrew Zisserman.** 2003. p. 1470–1477. *In: Computer Vision, 2003. Proceedings. Ninth IEEE International Conference on* . IEEE.
- [255] **Söderkvist, O.** 2001. title .
- [256] **Song, J.-J., and Forouzan Golshani.** 2002. p. 851–860. *In: Database and Expert Systems Applications* . Springer.
- [257] **Sonka, M., Vaclav Hlavac, and Roger Boyle.** 2014. *Image processing, analysis, and machine vision*. Cengage Learning.

- [258] **Spagnuolo, M., M Bronstein, A Bronstein, and A Ferreira.** 2012. title .
- [259] **Squire, D. M., and Terry M Caelli.** 2000. Computer Vision and Image Understanding **77** (3):284–316.
- [260] **Sun, J., Maks Ovsjanikov, and Leonidas Guibas.** 2009. p. 1383–1392. *In: Computer graphics forum* vol. 28. Wiley Online Library.
- [261] **Sun, T.-L., Chuan-Jun Su, Richard J Mayer, and Richard A Wysk.** 1995. p. 953–962. *In: ASME Design for Manufacturing Conference, Symposium on Computer Integrated Concurrent Design* .
- [262] **Sundar, H., Deborah Silver, Nikhil Gagvani, and Sven Dickinson.** 2003. p. 130–139. *In: Shape Modeling International, 2003* . IEEE.
- [263] **Suzuki, M. T.** 2001. *In: WWW Posters* .
- [264] **Tangelder, J. W., and Remco C Veltkamp.** 2003. International journal of image and graphics **3** (01):209–229.
- [265] **Tangelder, J. W., and Remco C Veltkamp.** 2008. Multimedia tools and applications **39** (3):441–471.
- [266] **Taubin, G., and David B Cooper.** 1991a. *Object recognition based on moment (or algebraic) invariants*. IBM TJ Watson Research Center.
- [267] **Taubin, G., and David B Cooper.** 1991b. p. 175–186. *In: San Diego,'91, San Diego, CA* . International Society for Optics and Photonics.
- [268] **Taza, A., and Ching Y Suen.** 1989. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on **19** (5):1281–1289.
- [269] **Teague, M. R.** 1980. JOSA **70** (8):920–930.
- [270] **Teh, C.-H., and Roland T Chin.** 1988. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on **10** (4):496–513.
- [271] **Tieng, Q. M., and WW Boles.** 1997. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence (8):910–916.
- [272] **Torokhti, A., and Phil Howlett.** 1974. *Syntactic methods in pattern recognition*, vol. 112. Elsevier.
- [273] **Tung, T., and Francis Schmitt.** 2004. p. 157–166. *In: Shape Modeling Applications, 2004. Proceedings* . IEEE.
- [274] **Van Otterloo, P. J.** 1991. *A contour-oriented approach to shape analysis*. Prentice Hall International (UK) Ltd.
- [275] **Vranić, D. V.** 2003. p. III–757. *In: Image Processing, 2003. ICIIP 2003. Proceedings. 2003 International Conference on* vol. 3. IEEE.
- [276] **Vranić, D. V., and D Saupe.** 2004. Proc. SCCG 2000 :3–6.

- [277] **Vranić, D. V., Dietmar Saupe, and Jörg Richter.** 2001. p. 293–298. *In: Multi-media Signal Processing, 2001 IEEE Fourth Workshop on* . IEEE.
- [278] **Wang, F., and Leonidas J Guibas.** 2012. *In: Computer Vision–ECCV 2012* p. 442–455. Springer.
- [279] **Wang, J., Xiang Bai, Xinge You, Wenyu Liu, and Longin Jan Latecki.** 2012. *Pattern Recognition Letters* **33** (2):134–143.
- [280] **Winn, J., Antonio Criminisi, and Thomas Minka.** 2005. p. 1800–1807. *In: Computer Vision, 2005. ICCV 2005. Tenth IEEE International Conference on* vol. 2. IEEE.
- [281] **Wolfson, H. J., and Isidore Rigoutsos.** 1997. *Computing in Science & Engineering* (4):10–21.
- [282] **Wu, J., and James M Rehg.** 2008. p. 1–8. *In: Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on* . IEEE.
- [283] **Xie, J., Pheng-Ann Heng, and Mubarak Shah.** 2008. *Pattern Recognition* **41** (5):1756–1767.
- [284] **Xu, J., Zhenjie Zhang, Anthony KH Tung, and Ge Yu.** 2010. *Proceedings of the VLDB Endowment* **3** (1-2):758–769.
- [285] **Xu, J., Zhenjie Zhang, Anthony K Tung, and Ge Yu.** 2012. *The VLDB Journal–The International Journal on Very Large Data Bases* **21** (4):535–559.
- [286] **Yang, H. S., Sang Uk Lee, and Kyoung Mu Lee.** 1998. *Journal of Visual Communication and Image Representation* **9** (2):171–181.
- [287] **Young, I. T., Joseph E Walker, and Jack E Bowie.** 1974. *Information and control* **25** (4):357–370.
- [288] **Yu, M., Indriyati Atmosukarto, Wee Kheng Leow, Zhiyong Huang, and Rong Xu.** 2003. p. II–656. *In: Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings. 2003 IEEE Computer Society Conference on* vol. 2. IEEE.
- [289] **Zahari, T., and Françoise Prêteux.** 2002. p. 437–440. *In: Multimedia and Expo, 2002. ICME’02. Proceedings. 2002 IEEE International Conference on* vol. 1. IEEE.
- [290] **Zaharia, T., and Françoise J Preteux.** 2001a. p. 133–145. *In: Photonics West 2001–Electronic Imaging* . International Society for Optics and Photonics.
- [291] **Zaharia, T., and Françoise J Preteux.** 2001b. p. 175–185. *In: International Symposium on Optical Science and Technology* . International Society for Optics and Photonics.
- [292] **Zahn, C. T., and Ralph Z Roskies.** 1972. *Computers, IEEE Transactions on* **100** (3):269–281.
- [293] **Zhang, C., and Tsuhan Chen.** 2001. p. 935–938. *In: Image Processing, 2001. Proceedings. 2001 International Conference on* vol. 3. IEEE.

- [294] **Zhang, D.** 2002. *Image retrieval based on shape*. PhD thesis Monash University, School of Computing and Information Technology.
- [295] **Zhang, D., and Guojun Lu.** 2001. *In: Advances in Multimedia Information Processing-PCM 2001* p. 855–860. Springer.
- [296] **Zhang, D., and Guojun Lu.** 2002a. p. IV–3668. *In: Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), 2002 IEEE International Conference on* vol. 4. IEEE.
- [297] **Zhang, D., and Guojun Lu.** 2002b. *In: Proceedings of 5th Asian Conference on Computer Vision (ACCV), Melbourne, Australia .*
- [298] **Zhang, D., and Guojun Lu.** 2002c. *Signal Processing: Image Communication* **17** (10):825–848.
- [299] **Zhang, D., and Guojun Lu.** 2004. *Pattern recognition* **37** (1):1–19.
- [300] **Zhang, D., Guojun Lu, et al..** 2002. *In: Proc. 5th Asian Conference on Computer Vision . Citeseer.*
- [301] **Zuckerberger, E., Ayellet Tal, and Shymon Shlafman.** 2002. *Computers & Graphics* **26** (5):733–743.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Yahya ŞİRİN
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 1977 ANKARA
E-posta : yahyasirin@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 1999, Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2003, Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2014-...	ERİŞİM SAĞLAYICILARI BİRLİĞİ	Genel Sekreter Yardımcısı
2013-2014	TÜBİTAK	Başuzman Araştırmacı
2011-2013	TOBB ETU	Yazılım Uzmanı, Proje Sorumlusu
2009-2011	TPIC	Proje Yöneticisi
2006-2009	DATASEL A.Ş.	Yazılım Mimarı, Teknik Ekipler Lideri
2003-2006	BYS A.Ş.	Proje Yöneticisi
1999-2003	ASKİ	SCADA Teknik Sorumlusu

YABANCI DİL: İngilizce, Arapça, Farsça

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **SIRIN, Yahya; DEMIRCI, M. Fatih.** Circle filling rate descriptor for object recognition. In: Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2013 21st. IEEE, 2013. p. 1-4.
- **SIRIN, Yahya; DEMIRCI, M. Fatih.** Efficient shape recognition with skeleton filling rate. In: Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2014 22nd. IEEE, 2014. p. 441-444.
- **SIRIN, Yahya; DEMIRCI, M. Fatih.** 3D shape recognition: Enhanced skeletal points. In: Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2015 23th. IEEE, 2015. p. 2009-2012.
- **SIRIN, Yahya; DEMIRCI, M. Fatih.** Distance Measure Functions with Enhanced Skeletal Points for 2D and 3D. In: Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2016 24th. IEEE, 2016. p. Accepted.
- **SIRIN, Yahya; DEMIRCI, M. Fatih.** Skeleton filling rate for shape recognition. In: Pattern Recognition (ICPR), 2014 22nd International Conference on., 2014. p. 4005-4009.
DOI 10.1109/ICPR.2014.686
- **SIRIN, Yahya; DEMIRCI, M. Fatih.** 2D and 3D Shape Retrieval using Skeleton Filling Rate. In: MULTIMEDIA TOOLS AND APPLICATIONS (MTAP), 2016 Online Version p. 1-26.
DOI 10.1007/s11042-016-3422-2