

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**GRAFİK UYGULAMALARINDA GERÇEK ZAMANLI
GÖLGE SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Serkan ERGUN

Uluslararası Bilgisayar Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu: 619.02.04

Sunuş Tarihi: 14.08.2008

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Cengiz GÜNGÖR

Bornova-İZMİR

III

Serkan ERGUN tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak sunulan “**Grafik Uygulamalarında Gerçek Zamanlı Gölge Sistemlerinin Karşılaştırılması**” başlıklı bu çalışma E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 14.08.2008 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

Jüri Başkanı : Yrd. Doç. Dr. Cengiz Güngör

Raportör Üye: Prof. Dr. Bahar Karaoğlan

Üye : Yrd. Doç. Dr. Aybars Uğur

İmza:

.....

.....

.....

ÖZET

GRAFİK UYGULAMALARINDA GERÇEK ZAMANLI GÖLGE SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

ERGUN, Serkan

Yüksek Lisans Tezi, Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü

Tez Yöneticisi: Yrd. Doç. Dr. Cengiz GÜNGÖR

Ağustos 2008, 104 sayfa

Sanal gerçeklik uygulamalarında gerçekliğin sağlanabilmesinde gölgelerin rolü önemlidir. Fakat günümüz donanımında gerçekçi gölgelerin hesaplanması zordur. Gölgeleme sistemlerinin farklarını inceleyip, ihtiyaçlara en uygunu seçmek önemlidir. Bu tezde, sert gölgeler oluşturan güncel gölgeleme yöntemleri performansları, hafıza kullanımları ve kalitelerine göre karşılaştırılmıştır.

Bu tezin amacı, grafik uygulama geliştiricilerine gölgeleme algoritmaları hakkında yeterli bilgi verip, ihtiyaçlarına en uygun olanını seçmelerini sağlamaktır. Ayrıca, araştırmacıların, bu tezin sonuçlarını kullanarak geliştirmeye uygun araştırma konularını tespit etmeleri de bu tezin hedeflerinden biridir.

Anahtar sözcükler: bilgisayar grafikleri, gölgeleme algoritmalarının karşılaştırması, sert gölgeler, gölgeleme

ABSTRACT

**COMPARISON OF REAL-TIME SHADOWING SYSTEMS
IN GRAPHICS APPLICATIONS**

ERGUN, Serkan

MSc in International Computer Institute

Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Cengiz GÜNGÖR

August 2008, 104 pages

Shadows play an important role in adding realism to virtual reality applications. But it is hard to compute shadows realistically with today's hardware. It is important to see the differences of each shadowing system and use the suitable one as needed. This thesis compares the current shadowing algorithms which generate hard shadows with respect to their performances, memory usage and quality.

The goal of this thesis is to provide graphics applications programmers with enough information about each shadowing algorithm and to allow them to choose the best one suited to their needs. Allowing the researchers to identify research areas for improvements with the help of the results of this thesis is also hoped.

Keywords: computer graphics, comparison of shadow algorithms, hard shadows, shadowing

IX

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu tez konusu üzerinde bana çalışma olanağı sunan tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Cengiz GÜNGÖR'e tez çalışmam süresince deneyimi, bilgisi ve önerileriyle araştırma ve geliştirmeyi yönlendirmesi ve sağladığı kaynaklarla destek olmasından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca, bilimsel çalışmayı özendirerek manevi desteğinin yanında burs sağlayarak maddi açıdan da destek veren, akademik yaşamıma tartışılmaz katkısı bulunan, ülkemizin en saygın kurumlarından Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na en derin saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmada kullanılan verilerin hazırlanmasında yardımcı dokunan arkadaşım Utku YAMAN'a; Örnek sahneleri modelleyen Nedim TAŞDELEN'e ve bazı görsellerin hazırlanmasında yardımcı olan Melih ÜNVER'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmamı sürekli yanımda bulunan, manevi desteklerini esirgemeyen aileme; anneme ve babama adıyorum.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	V
ABSTRACT	VII
TEŞEKKÜR	IX
İÇİNDEKİLER.....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XV
ÇİZELGELER DİZİNİ	XVII
KISALTMALAR DİZİNİ	XVIII
1. GİRİŞ	1
2. GÖLGELENDİRME YÖNTEMLERİ	5
2.1. Gölge Hacmi Yöntemleri.....	5
2.1.1. Sonlu – sonsuz hacim.....	9
2.1.2. Carmack'ın karşıtlığı (<i>Carmack's Reverse</i>)	10
2.1.3. Derinlik-Başarısız için gölge hacminin kapatılması	12
2.1.4. Genel olarak şablon gölge hacmi yöntemi	14
2.1.5. Siluet belirlenmesi	15
2.1.6. Gölge hacmi kapaklarının oluşturulması	17
2.1.7. Geometrinin sonsuza uzatılması.....	19
2.1.8. Bakış kesik piramidinin (<i>frustum</i>) kırılması.....	21
2.1.9. Derinlik-Başarılı ve Derinlik-Başarısız yöntemlerinin karşılaştırılması	25
2.1.9.1. Derinlik-Başarılı.....	25
2.1.9.2. Derinlik-Başarısız	26
2.1.10. Sağlamlık ve verimlilik	27
2.1.11. Vertex programları ile güçlendirilmiş gölge hacimleri.....	28

XII

2.2.	Gölge Dokusu Yöntemleri	31
2.2.1.	Gölge dokusu yapıları.....	31
2.2.1.1.	Standart gölge dokuları.....	31
2.2.1.2.	Derinlik gölge dokuları.....	32
2.2.1.3.	Yüzde yakınsama süzgeci.....	33
2.2.1.4.	Varyans gölge dokuları.....	37
2.2.2.	Gölge izdüşüm dönüşümleri.....	39
2.2.2.1.	Düzgün gölge izdüşüm dönüşümü.....	40
2.2.2.2.	Perspektif gölge izdüşüm dönüşümü	40
2.2.2.3.	Işık uzayı perspektif gölge izdüşüm dönüşümü..	43
2.2.2.4.	Yamuk gölge izdüşüm dönüşümü	45
2.2.2.5.	Düzlem en uygun gölge izdüşüm dönüşümü	49
2.2.2.6.	Logaritmik gölge izdüşüm dönüşümü	50
2.2.3.	Sahne Bölümlenme Yöntemleri.....	51
2.2.3.1.	Uyarlanabilir gölge eşlemleri	51
2.2.3.2.	Dinamik uyarlanabilir gölge eşlemleri	52
2.2.3.3.	Izgara ile bölünmüş gölge eşlemleri	52
2.2.3.4.	Paralel kesilmiş gölge eşlemleri	53
2.3.	Melez Yöntemler	55
3.	KARŞILAŞTIRMA KISTASLARI.....	57
3.1.	Performans ve Hafıza Karşılaştırmaları	57
3.2.	Kalite Karşılaştırmaları	57
3.2.1.	Gölge dokusu yönteminin kalitesini etkileyen kıstaslar	58
3.2.1.1.	Perspektif ve izdüşümü pürüzlenmesi	58
3.2.1.2.	Gölge akneleri.....	60
3.2.1.3.	Derinlik değerlerinin dağılımı	61
3.2.1.4.	Gölge kalitesinin devamlılığı.....	65
3.2.2.	Kalite skorum fonksiyonları	65

XIII

3.2.2.1.	İzdüşüm dönüşümü skorlama fonksiyonları	65
3.2.2.2.	Gölge dokusu yapısı skorlama fonksiyonu	66
4.	KARŞILAŞTIRMALAR.....	68
4.1.	Performans ve Hafıza.....	68
4.2.	Kalite.....	68
4.2.1.	Derinlik değerlerinin dağılımı	69
4.2.2.	Dokuyu etkin kullanma	70
4.2.2.1.	Düzgün gölge izdüşümü dönüşümü	71
4.2.2.2.	Odaklanmış düzgün gölge izdüşüm dönüşümü .	73
4.2.2.3.	Perspektif gölge izdüşüm dönüşümü	75
4.2.2.4.	Işık uzayı perspektif gölge izdüşüm dönüşümü .	77
4.2.2.5.	Yamuk Gölge İzdüşüm Dönüşümü.....	79
4.2.2.6.	Düzlem En Uygun Gölge İzdüşüm Dönüşümü..	81
4.2.3.	Pürüzlenme hata fonksiyonu.....	83
4.2.3.1.	Düzgün Gölge İzdüşümü Dönüşümü.....	83
4.2.3.2.	Odaklanmış düzgün gölge izdüşümü dönüşümü	83
4.2.3.3.	Perspektif gölge izdüşüm dönüşümü	84
4.2.3.4.	Işık uzayı perspektif gölge izdüşüm Dönüşümü	84
4.2.3.5.	Yamuk gölge izdüşüm dönüşümü.....	85
4.2.3.6.	Düzlem en uygun İzdüşümü Dönüşümü.....	85
4.2.4.	Doku yapısı karşılaştırması	85
4.2.4.1.	Şablon gölge hacmi.....	86
4.2.4.2.	Derinlik gölge dokusu.....	86
4.2.4.3.	Yüzde yakınsama süzgeci	87
4.2.4.4.	Varyans gölge dokuları	87
5.	SONUÇLAR	88
	KAYNAKLAR DİZİNİ.....	93

XIV

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)	94
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)	95
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)	96
EKLER	98
EK1 – Türkçe İngilizce Terimler Sözlüğü	99
EK2 - Koordinat Sistemleri ve Farklı Uzaylar Arası Geçiş	100
ÖZGEÇMİŞ	104

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Gölgelelerin uzaysal algılamadaki önemi.....	2
Şekil 1.2 Gölgeleler sahnede görülmeyen cisimler hakkında bilgi verir (Hasenfratz et al., 2003).....	2
Şekil 1.3 Karmaşık objelerin algılanmasında gölgelelerin önemi (Hasenfratz et al., 2003).....	2
Şekil 2.1 - Perdeleyen ve Gölge Hacmi (Kwoon, 2003).....	6
Şekil 2.2 - Perdeleyen silueti (Kwoon, 2003).....	6
Şekil 2.3 - Derinlik-Başarılı şablon işlemi (Kwoon, 2003).....	8
Şekil 2.4 - Çoklu Gölge hacmi sayımı (Kwoon, 2003).....	9
Şekil 2.5 - Sonlu Gölge hacmi uzaktaki cisimleri gölgelendiremez (Kwoon, 2003).....	10
Şekil 2.6 - Bakış noktası gölge hacminin içinde olduğunda derinlik-başarılı şablonlama işlemi başarısız olur (Kwoon, 2003)....	11
Şekil 2.7 - Derinlik başarısız yöntemi bakış noktası gölge hacmi içinde olduğu durumlarda da çalışır (Kwoon, 2003).....	12
Şekil 2.8 - Gölge hacminin kapatılması (Kwoon, 2003).....	12
Şekil 2.9 - Gölge hacminin normalleri dışı bakmalıdır (Kwoon, 2003).....	13
Şekil 2.10 - Siluet hesaplaması için kenar elemesi (Kwoon, 2003).....	16
Şekil 2.11 - Noktasal ışık kaynağından oluşturulmuş kapalı gölge hacmi (Kwoon, 2003).....	18
Şekil 2.12 - Geniş gölge hacmi uzatma mesafesinin neden olduğu hayalet gölge sorunu (Kwoon, 2003).....	21
Şekil 2.13 - Gölge Hacmi yakın kırpma düzleminde kırılması derinlik başarılı yönteminde sorunlara neden olur (Kwoon, 2003).....	22
Şekil 2.14 - Gölge hacminin uzak kırpma düzleminde kırılmasından kaynaklanan hatalar (Kwoon, 2003).....	23
Şekil 2.15 - Sonsuzdaki perspektif iz düşümünün matrisi.....	25
Şekil 2.16 - Derinlik, yüzde yakınsama süzgeci ve varyans gölge dokularının karşılaştırılması.....	30
Şekil 2.17 - Standart gölgelendirmede öz gölgelendirme hataları.....	32

Şekil 2.18 – Derinlik gölge dokularında gölgelendirme testi (Valient, 2003)	33
Şekil 2.19 – Yüzde yakınsama süzgeci (Valient, 2003)	34
Şekil 2.20 – Çift doğrusal yüzde yakınsama süzgeci (Valient, 2003)	35
Şekil 2.21 – Poisson ve Poisson diski arasındaki fark (Mitchell, 2004)	36
Şekil 2.22 – Poisson diski süzgeci (Mitchell, 2004).....	36
Şekil 2.23 – Varyans gölge dokularında ışık kanaması	39
Şekil 2.24 – bakış kesik piramidi kırmızı renkte, bakışın önündeki ışık bakış kesik piramidi ile mavi, bakış kesik piramidin dışında ama ışığın kesik piramidinin içindeki mor cisim de gölge düşüren cisim (Stamminger, 2002)	42
Şekil 2.25 – Işık gözün arkasında ve bakış kesik piramidini birim küpe dönüştüren dönüşüm ışığın konumunu ters çevirip ışığın yönünü değiştirir. (Stamminger 2002)	42
Şekil 2.26 – Işık uzayında P sanal kesik piramidinin oluşturulması (Wimmer et al., 2004).....	45
Şekil 2.27 – Izgara ile bölünmüş gölge eşlemleri (Arvo, 2004)	53
Şekil 2.28 – Paralel kesilmiş gölge eşlemede kesim düzlemlerinin oluşturulması (Zhang et al., 2006)	55
Şekil 3.1 – Gölge dokusundaki bir pikselin gölgelendirilen yüzeye izdüşümünden sonra oluşan alanın bakış düzlemi üzerindeki izdüşümünün alanı (Stamminger, 2002)	59
Şekil 3.2 – Perspektif pürüzlenme (Stamminger, 2002).....	60
Şekil 3.3 – Gölge aknelerinin nedeni ve çözümü	61
Şekil 3.4 - Gölge aknesi	61
Şekil 3.5 – Kesik piramidin birim küpe dönüşümü	62
Şekil 3.6 – Perspektif izdüşümünden önce ve sonra derinlik değerlerinin değişimi	64
Şekil 4.1- gölge izdüşüm dönüşümlerinin derinlik değişimi. Mavi: Düzgün, Kırmızı: Odaklanmış düzgün, Yeşil: Perspektif, Kahverengi: ışık uzayı perspektif, Turuncu: yamuk, Mor: Düzlem en uygun.	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1 – Gölge izdüşüm dönüşümlerinin doku kullanım, göreceli doku kullanım, pürüzlenme ve göreceli pürüzlenme hata oranları	88
Çizelge 2 – Gölge izdüşüm dönüşümlerinin doku kullanım grafiği	88
Çizelge 3 - Gölge izdüşüm dönüşümlerinin pürüzlenme hatası grafiği	89
Çizelge 4 – Gölge Doku Yapıları PSNR ve Göreceli PSNR değerleri	90
Çizelge 5 – Gölge Doku Yapıları grafiği.....	91

KISALTMALAR DİZİNİ

- PCF : Yüzde Yakınsama Süzgeci (Percentage Closer Filtering)
PSNR : Peak Signal-to-Noise Ratio

1. GİRİŞ

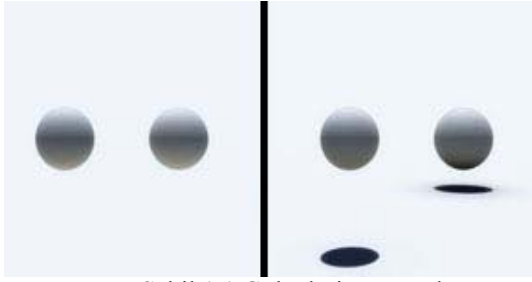
Gölge, ışıklandırılmış bir alanda ışığın bir kısmının ya da tamamının bir cisim arkasında kalmasından kaynaklanan göreceli karanlıktır. Gölgelemlerin, sanal gerçeklik, askeri eğitim uygulamaları, 3 boyutlu mimari tasarım programları ve oyunlar gibi birçok grafik uygulamalarına katkılarını şu şekilde sıralayabiliriz:

1. Gölgelemler, oluşan görüntüde karşıtlık oluşturacağından görüntünün algılanması kolaylaşacaktır
2. Sahnedeki cisimlerin birbirlerine göre konumları, büyüklükleri, bakış noktasından ne kadar uzakta oldukları hakkında bilgi verir. Şekil 1.1’de bu duruma bir örnek verilmiştir. Küreler farklı boyutta olmasına rağmen bakış noktasına olan uzaklıklarından dolayı aynı boyutta görünmektedir. Bu durum gölgelendirilmemiş sahnede anlaşılabilir değildir.
3. Diğer cisimlerin arkasında kalarak ekranda görünmeyen cisimlerin fark edilmesini sağlar Şekil 1.2’de robot tarafından gizlenen cismin çaydanlık olduğu gölgesinden anlaşılabilir.
4. Üzerine gölge düşen karmaşık cisimlerin anlaşılmasını kolaylaştırır. Şekil 1.3’te gölgelendirilmemiş sahnede yüzeyin dalgalı olduğu ışıklandırma olmasına rağmen anlaşılabilir değildir

Eskiden grafik uygulamalarında gölgelendirme yapabilmek için cisimlerin altlarındaki zemine, önceden hazırlanmış, koyu renkte basit doku parçaları yerleştirilirdi. Fakat günümüzde ekran kartlarının hızla

artan işlem kapasitesi sayesinde daha gerçekçi gölge sistemlerini uygulamaya geçirmek mümkün olmuştur.

Gölgelendirme, aslında basit bir görünürlük testidir. Sahnedeki herhangi bir noktanın ışık kaynağı tarafından görülüp görülemediğinin test edilmesidir. İlk bakışta kolay gibi görünse de bu görünürlük testinin yapılması karmaşıktır. Bu karmaşık probleme ilk olarak Crow (1977) çözüm üretmiştir ve bunun üzerine günümüze kadar birçok yöntem geliştirilmiştir. Fakat bugüne kadar kusursuz bir yöntem geliştirilememiştir. Her yöntemin eksileri ve artıları vardır.



Şekil 1.1 Gölgelerin uzaysal algılamadaki önemi



Şekil 1.2 Gölgeler sahnede görülmeyen cisimler hakkında bilgi verir (Hasenfratz et al., 2003)



Şekil 1.3 Karmaşık objelerin algılanmasında gölgelerin önemi (Hasenfratz et al., 2003)

Bu çalışmada gölgelendirme üzerine geliştirilen yöntemlerden sert gölge oluşturan ve gerçek zamanlı çalışanları performansları ve oluşturdukları gölgelerin kaliteleri dikkate alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Işın izleme (Laine et al., 2005), Gölge hacmi (Lehtinen et. al, 2006) ya da gölge dokusu (Atty et al., 2006) kullanılarak oluşturulan yumuşak gölgelendirme yöntemleri incelenmemiştir. 1990 yılında sert ve yumuşak gölgelendirme yöntemlerini (Woo et al., 1990) ve 2003 yılında da sadece yumuşak gölgelendirme yöntemlerini (Hasenfratz et al., 2003) inceleyen benzer karşılaştırmalar bulunmaktadır. 1990'dan sonra geliştirilen yöntemler ise diğer yöntemlerden bazıları ile karşılaştırılsa da yöntemlerin hepsinin performansların ve kalitelerini inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmayla bu açığın kapatılması amaçlanmıştır. Çalışmanın bilim dünyasına katkıları şu şekilde sıralanabilir:

1. Grafik uygulama geliştiricilerine gölge yöntemleri hakkında genel bilgi verip, kullanıcıların ihtiyaçlarına en uygun gölgelendirme yöntemlerini seçebilmelerine olanak sağlar
2. İncelenen gölgelendirme yöntemlerinin zayıflıklarını belirleyerek, ileriki çalışmaların hangi yönde yapılması gerektiğini belirler.

Tezin içerdiği bölümler ve içerikleri şu şekildedir:

İkinci bölümde önce gölgelendirme yöntemlerinden sert gölge oluşturan ve gerçek zamanlı olanları sınıflandırılarak yöntemler hakkında ön bilgi verilecek daha sonra da bu konuda yapılmış karşılaştırmalara değinilecektir.

Üçüncü bölümde, karşılaştırılan gölgelendirme yöntemlerinin performans ve kalitelerini etkileyen etkenler incelenecektir. Bu etkenleri

kullanarak karşılaştırmada kullanılacak puanlandırma yöntemleri açıklanacaktır.

Dördüncü bölümde, örnek bir sahne üzerinde gölgelendirme yöntemlerinin puanlandırılması yapılacaktır.

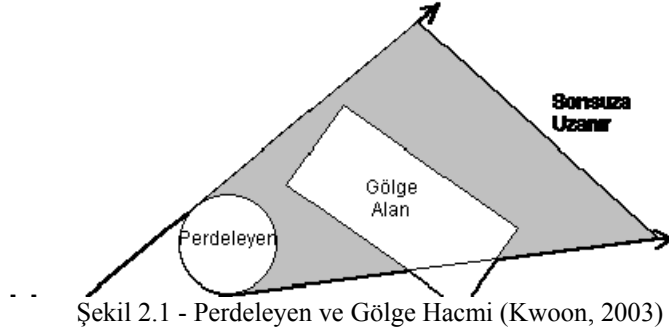
Sonuç bölümünde incelenen gölgelendirme yöntemlerinin puanlandırılmasından elde edilen veriler kullanılarak hangi durumlarda hangi gölgelendirme yöntemlerinin daha performanslı ya da kaliteli sonuçlar ürettiği incelenecektir. Bu bölümü kaynaklar dizini ve ekler takip etmektedir.

2. GÖLGELENDİRME YÖNTEMLERİ

Gölgelendirme yöntemleri; gölge hacmi yöntemleri (*Shadow Volume*), gölge dokusu yöntemleri (*Shadow Mapping*) ve melez yöntemler olmak üzere 3 ana kategoride incelenmektedir. Gölge hacmi yöntemleri sahnedeki cisimlerin silüetlerini ışık yönünde uzatarak gölge hacimleri oluşturur. Bu hacmin içinde kalan bölgeler gölgeli, dışında kalan bölgeler gölgesiz olmalıdır. Gölge hacmi yöntemlerinde gölgelendirilmesi gereken noktanın, bu hacim içinde kalıp kalmadığı test edilerek gölgelendirme yapılır. Gölge dokusu yöntemlerinde ise sahnenin ışık tarafından görülen kısmı geçici bir dokuya betimlenir (*render*). Daha sonra bu betimlenen gölge dokusu sahneyi gölgelendirmede kullanır. Melez yöntemlerde ise sahnenin ışık tarafından görülen kısmı geçici bir dokuya betimlenerek bu doku üzerinden cisimlerin silüetleri çıkarılır. Bu silüetler yine gölge hacmi yöntemlerinde olduğu gibi ışık yönünde uzatılarak gölge hacmi oluşturulur ve gölgelendirilmesi istenen noktaların bu hacim içinde kalıp kalmadığı test edilir.

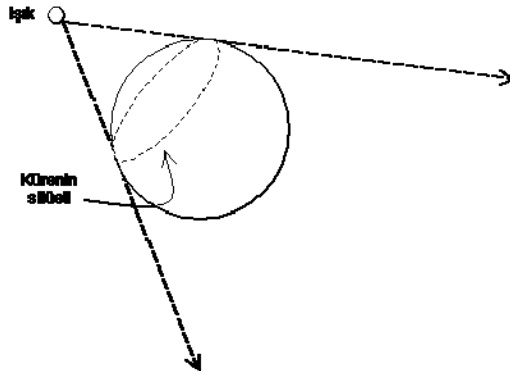
2.1. Gölge Hacmi Yöntemleri

Gölgelendirme tekniği olarak gölge hacimlerinin kullanılması fikri Crow (1977) tarafından sunuldu. Heidmann(1991) Crow'un oluşturduğu gölge hacmi yöntemini, gölge hacmini saymak için piksel başına aritmetik işlemler yapılmasına imkan veren şablon arabelleği (*stencil buffer*) kullanarak geliştirmiş oldu. Gölge hacmi yöntemleri Kwoon'un da (2003) incelediği gibi, sonlu-sonsuz gölge hacimleri, derinlik başarılı ve derinlik başarısız yöntemleri, gölge hacimlerinin kapatılması, silüet belirlenmesi, karşılaşılan sorunlar ve çözümleri konu başlıkları altında incelenecektir.



Şekil 2.1 - Perdeleyen ve Gölge Hacmi (Kwoon, 2003)

Ortak standartlara göre, gölge düşüren cisimlere perdeleyen (*occluder*) adı verilir. Şekil 2.1’de, perdeleyen bir küre içeren, basit bir sahnenin, yukarıdan aşağıya 2 boyutlu görünümü gösterilmektedir. Kürenin, resme göre, sağ tarafında kalan dikdörtgen üzerine gölge düşen bir cisimdir. Taranmış alan ise perdeleyen cisim tarafından oluşturulan gölge hacmini göstermektedir. Dikdörtgenin oluşturduğu gölge hacmi, bu örnekte gösterilmemiştir. Gölge hacmi, ışık kaynağının bakış açısından görülen siluet kenarların sonsuz ya da sonlu bir uzaklığa uzatılmasıyla oluşmaktadır.

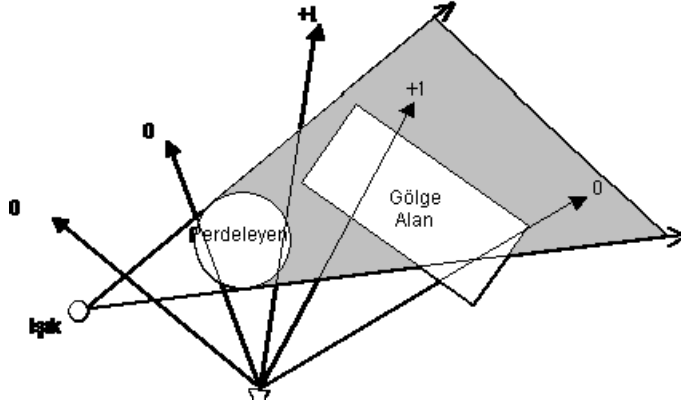


Şekil 2.2 - Perdeleyen silueti (Kwoon, 2003)

Şekil 2.2’de ışık kaynağının bakış açısından üretilmiş, kürenin olası silüetini göstermektedir. Silüet, her biri 2 köşe içeren kenarlardan oluşmaktadır. Daha sonra bu kenarlar, ışık kaynağından başlayarak şekilde gösterilmiş olan kesikli çizgiler yönünde uzatılmıştır. Bu işlem sonucunda gölge hacmi etkili olarak oluşturulmuş olur. Farklı tip ışıklar için gölge hacimlerinin farklı şekilde uzatılması gerekmektedir. Noktasal ışık kaynakları için silüet kenarları noktadan noktaya uzatılmaktadır. Yönlü ışık kaynaklarında ise silüet kenarları sonsuzdaki tek bir noktaya uzatılmaktadır. Silüet kenarlarının saptanması ve gölge hacminin oluşturulması konuları tezin ilerleyen kısımlarında yer almaktadır. Kenarları uzatmanın miktarı sonlu ya da sonsuz olabilir. Bu yüzden silüet kenarlarını sonsuza uzatan gerçekleştirmeler “Sonsuz Gölge Hacmi” olarak bilinirler.

Şekil 2.3 - Derinlik-Başarılı şablon işlemi’te sahnedeki olası birçok bakış yönünü göstermektedir. Okların sonundaki sayılar, gölge hacmi betimlendikten sonra şablon arabelleğinde kalan son değerlerdir. Şablon arabelleğindeki değerler, aşağıdaki işlemler sonucunda oluşturulur:

1. Renk ve derinlik belleklerine yazma işlemi kapatılarak, gölge hacminin ön yüzeyleri betimlenir. Eğer derinlik testi başarılı olursa şablon arabelleğinin değeri bir artırılır; test başarısız olursa herhangi bir işlem yapılmaz.
2. Renk ve derinlik belleklerine yazma işlemi kapatılarak, gölge hacminin arka yüzeyleri betimlenir. Eğer derinlik testi başarılı olursa şablon belleğinin değeri bir azaltılır; test başarısız olursa herhangi bir işlem yapılmaz.

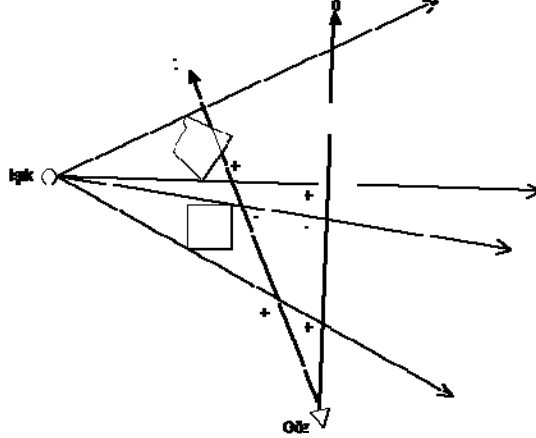


Şekil 2.3 - Derinlik-Başarılı şablon işlemi (Kwoon, 2003)

Yukarıdaki algoritma, Derinlik-Başarılı (*Depth-Pass*) gölge hacmi tekniği olarak da bilinir çünkü şablon değerleri sadece derinlik testi başarılı olduğu zaman değiştirilir. Derinlik-Başarılı yöntemi z-başarılı olarak da bilinir.

Yukarıdaki şablonlama (*stencil*) işlemlerinden önce sahne renk ve derinlik arabelleklerine betimlenirse, derinlik testi için gereken bilgiler derinlik belleğinde doğru olarak yazılmış olur. Bakış noktasından başlayan soldaki iki ışın, gölge hacmi (gri taranmış bölge) ile kesişmediği için şablonlama işlemi sonucu 0 olur. Bu sonuç, bu iki ışının ifade ettiği bölümlerin gölgede olmadığı anlamına gelmektedir. Soldan üçüncü ışın dikkate alındığında, ışın gölge hacminin ön yüzlerini betimlendiğinde, derinlik testi başarılı olup şablon arabelleğindeki değer bir artacaktır. Gölge hacminin arka yüzleri betimlenirken ise bu yüzler, perdeleyen cismin arkasında kaldığı için derinlik testi başarısız olacaktır. Bu yüzden bu ışının ifade ettiği bölümde şablon arabelleğindeki değer 1 olacaktır. Şablon arabelleğindeki 0'dan farklı bir değer, bölümün gölgede kaldığı anlamına gelmektedir.

Gölge hacmi sayma yöntemi birden fazla gölge hacmi için de doğru sonuçlar vermektedir (Şekil 2.4).

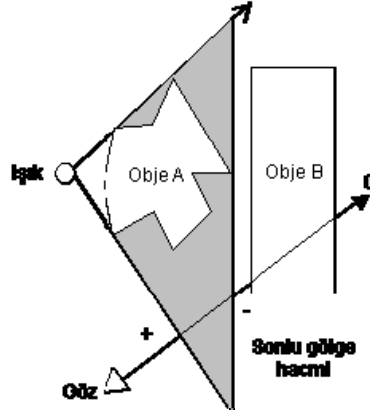


Şekil 2.4 - Çoklu Gölge hacmi sayımı (Kwoon, 2003)

2.1.1. Sonlu – sonsuz hacim

Şekil 2.1' de gölge hacmi sonsuza uzamaktadır ancak bu her zaman gerekli bir işlem değildir. Işık kaynağının herhangi bir perdeleyene çok yakın olmasından kaynaklanacak sıkıntılı sorunlardan (Şekil 2.5) kaçınmak için gölge hacmini sonsuza uzatırız.

Işık kaynağının Cisim A'ya yakın olmasıyla birlikte, sonlu gölge hacmi Cisim B ye yetişmek için yeterli olmayabilir. Göz'den Cisim B'ye giden ışın, şablon değeri 0'dan farklı bir değer olması gerekirken şablon değeri sıfır olan bir bölümlerle sonuçlanır. Sonsuz gölge hacmi, cisimler ne kadar yakında olursa olsun sahnedeki bütün cisimleri içermeye garantisini verir. Gölge hacmini sonsuza uzatma yöntemi tezin ilerleyen kısımlarında işlenmiştir.



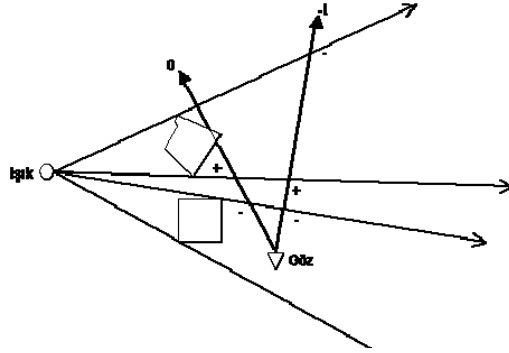
Şekil 2.5 - Sonlu Gölge hacmi uzaktaki cisimleri gölgelendiremez (Kwoon, 2003)

2.1.2. Carmack'ın karşıtlığı (*Carmack's Reverse*)

Derinlik-Başarılı yöntemi çoğu zaman iyi sonuçlar vermektedir fakat bakış noktası gölge hacminin içine girdiği zaman, sonuçlar hatalı olur.

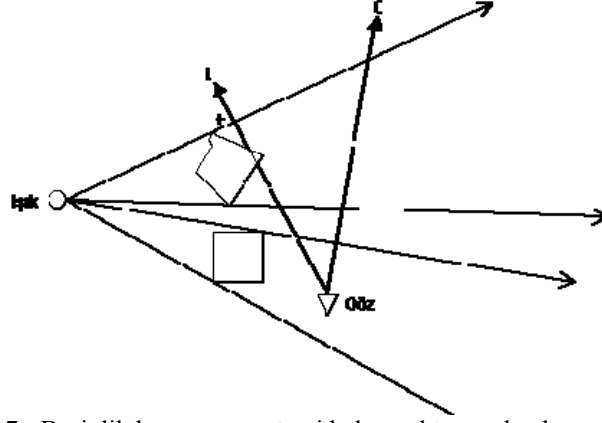
Şekil 2.6' da gösterildiği gibi, bakış noktası gölge hacminin içerisinde bulunduğunda derinlik-başarılı yöntemi tamamen başarısız olur. Bu eksikliği gidermek için John Carmack (2002) 'in geliştirdiği Derinlik-Başarısız (*Depth Fail*) algoritması şu şekildedir:

1. Renk ve derinlik arabelleklerine yazma işlemi kapatılarak, gölge hacminin arka yüzeyleri betimlenir. Eğer derinlik testi başarısız olursa şablon arabelleğin değeri bir arttırılır; test başarılı olursa herhangi bir işlem yapılmaz.
2. Renk ve derinlik arabelleklerine yazma işlemi kapatılarak, gölge hacminin ön yüzeyleri betimlenir. Eğer derinlik testi başarısız olursa şablon arabelleğin değeri bir azaltılır; test başarılı olursa herhangi bir işlem yapılmaz.



Şekil 2.6 - Bakış noktası gölge hacminin içinde olduğunda derinlik-başarılı şablonlama işlemi başarısız olur (Kwoon, 2003)

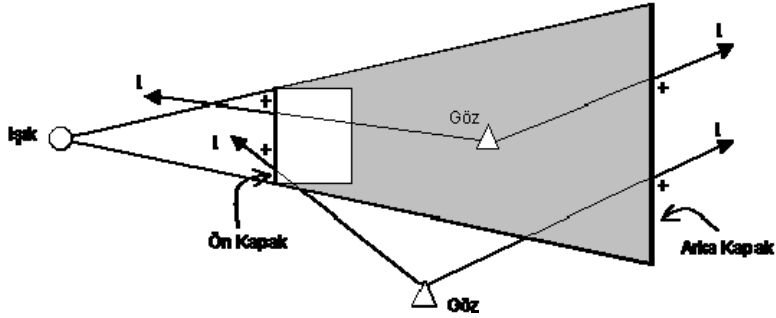
Derinlik-başarısız yöntemi z-başarısız yöntemi olarak da bilinir. Şekil 2.6'de Derinlik-başarısız yönteminin bakış noktası gölge hacminin içinde olduğu durumlarda da doğru sonuçlar ürettiği gösterilmektedir. Bakış noktasının dışarıda olduğu durum düşünüldüğünde de, yöntemin doğru çalıştığı görülmektedir. Fakat bu yöntemin de hatalı sonuç ürettiği durumlar vardır. Bu durumlar tezin ilerleyen kısımlarında detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Derinlik-başarısız yöntemi de derinlik-başarılı yöntemi gibi hatasız bir yöntem değildir. Dayanıklı bir gölge hacmi çözümü üretmek için farklı yöntemlerin birleşimi gerekmektedir.



Şekil 2.7 - Derinlik başarısız yöntemi bakış noktası gölge hacmi içinde olduğu durumlarda da çalışır (Kwoon, 2003)

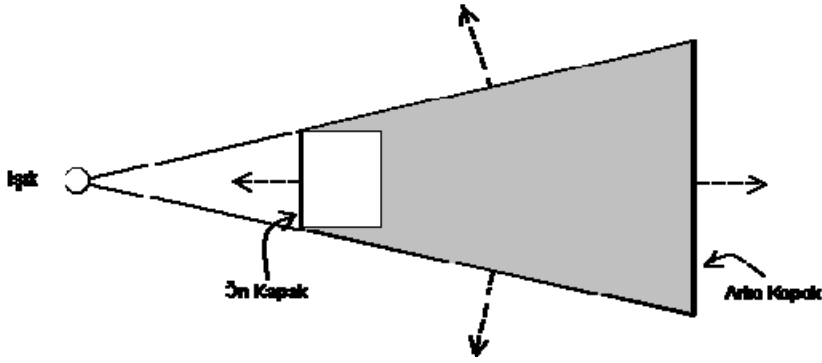
2.1.3. Derinlik-Başarısız için gölge hacminin kapatılması

Derinlik-Başarısız yöntemi, şablon belleğine sıfırdan farklı değerler koyulabilmesi, gölge hacminin bakış noktasına göre arka yüzeylerinin betimlenememesine bağlıdır ve de gölge hacminin kapalı bir hacim olması gerektiği anlamına gelir. Gölge hacminin ön ve arka kısımları (arka kısım sonsuzda olsa bile) kapatılmalıdır. Kapatılma işlemi olmadan, derinlik-başarısız yöntemi, hatalı sonuçlar üretecektir. Mümkün görünmese de sonsuzda da kapatılma işlemi yapılabilir.



Şekil 2.8 - Gölge hacminin kapatılması (Kwoon, 2003)

Şekil 2.8’de de gösterildiği gibi ön ve arka kapak (kalın çizgiler) kapalı bir hacim oluşturur. Her iki kapak da iki göz noktasından arka yüzey olarak görünmektedir. Derinlik başarısız şablonlama yöntemi, kapatılma işlemiyle doğru şablon değerleri üretecektir. Ön ve arka kapakları oluşturmanın birkaç yöntemi vardır. Ön kapak oluşturmak için, perdeleyen cismin arka yüzeylerinin, yakın düzlemine (near plane) izdüşümü alınarak ön kapak oluşturulur. Alternatif olarak perdeleyen cismin ışığa göre ön yüzeyleri ön kapak olarak kullanılabilir. Bu ön yüzeyler sonsuza uzatılıp normallerin yönü değiştirilerek arka kapak da oluşturulabilir. Gölge hacmini oluşturan primitiflerin normallerinin Şekil 2.9’daki gibi dışa doğru olduğundan emin olunması gerekir. Kapalı gölge hacmi betimlemesinde derinlik-başarılı yönteminde kapalı olmayan gölge hacmi betimlemesinden daha fazla iş yapılır. Daha fazla primitif betimlemesi yapılmanın yanı sıra bu kapakların hesaplanması için de işlem yapılmaktadır. Gölge hacminin kapatılması konusunun detayları tezin ileriki kısımlarında açıklanmıştır.



Şekil 2.9 - Gölge hacminin normalleri dışa bakmalıdır (Kwoon, 2003)

2.1.4. Genel olarak şablon gölge hacmi yöntemi

Şablon gölge hacmi yönteminde kullanılan tekniklerin aşamaları:

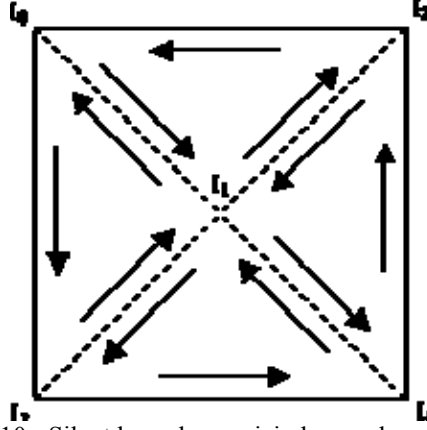
1. Sahnede görünen bütün cisimler, ışıklardan bağımsız sadece arka ışık kullanılarak betimlenir. Bu aşamada derinlik belleği hazırlanmış olur.
2. Her ışık kaynağı için sırayla:
 - a. Şablon belleği temizlenir ve tüm perdeleyen cisimlerin ışığa göre silüetleri hesaplanır.
 - b. Perdeleyen cisimlerin silüetleri ışık kaynağından başlayarak sonlu ya da sonsuz olarak uzatılarak gölge hacimleri oluşturulur. Eğer derinlik-başarısız yöntemi kullanılıyorsa ön ve arka kapak hesaplanır. (sonsuz silüet uzatılması zorunlu değildir)
 - c. Kullanılan tekniğe göre (derinlik-başarılı ya da derinlik-başarısız) gölge hacimleri betimlenir.
 - d. Güncellenmiş şablon bellek değerleri kullanılarak ışıklandırma işlemi yapılır. Şablon belleğinde 0 değerine sahip bölümler aydınlatılır. Diğer bölümler karanlık kalır.

Sahnede ne kadar çok ışık varsa o kadar çok betimleme aşaması yapılması gerekir. Bu da çerçeve oranını (*frame rate*) olumsuz etkilemektedir. Bu yüzden hangi ışığın sahneye gölge düşüreceği seçilirken çok dikkatli olunması gerekmektedir. 4 farklı noktadan ışıklandırılan bir sahnenin ortasında bulunan cismin en az 4 gölgesi görünmesi gerekmektedir. Burada tek ışık kaynağını gölge düşüren olarak seçmek hatalı sonuçlar verecektir. Birden fazla ışık seçmek daha yumuşak görünen gölgelere neden olacaktır, fakat yumuşak gölgeler kendi başında kapsamlı bir konu olduğu için bu tez kapsamı dışındadır.

Sahneye gölge düşüren ışıkları seçerken dikkat edilmesi gereken en önemli kural seçilen ışıkların sahnenin görünen kısmında en baskın ışıklar olmasıdır. Sadece sahnenin görünen kısmındaki ışıkları seçmek büyük hatalara neden olabilir, çünkü kameranın tam arkasında bulunan ve sahneye gölge düşüren çok güçlü bir spot ışık kaynağı olabilir. Arkadaki ışık kaynağı görünmese bile sahnenin görselliğinde büyük etkileri vardır. Unutulmaması gereken etmenlerden biri de ışık sayısının çerçeve oranı ile ters orantılı olmasıdır. Gölge düşüren ışıkların sayısı dikkatli seçilmelidir.

2.1.5. Siluet belirlenmesi

Gölge hacmi oluşturmanın ilk aşaması perdeleyen cisimlerin siluetini belirlemektir. Şablon gölge (*Stencil Shadows*) algoritması, perdeleyen cisimlerin kapalı üçgen ağyapıda (*triangular mesh*) olmasını gerektirir. Bu, modeldeki her kenarın sadece iki üçgen tarafından paylaşılması gerektiği yani modelin iç yüzeyinin görünmesi önleendiği anlamına gelmektedir. Sadece, bir tarafındaki üçgen ışık kaynağından görülüp diğer tarafındaki üçgen ışık kaynağından görülmeyen kenarlar siluet kenarları olacaktır. Siluet kenarlarının belirlenmesi için birçok yöntem vardır ve bu yöntemlerin çoğu yoğun işlemci gücü gerektirir. Yöntemler anlatılırken dizinlenmiş üçgen ağyapılar (*indexed triangular mesh*) kullanılmıştır.



Şekil 2.10 - Siluet hesaplaması için kenar elemesi (Kwoon, 2003)

Şekil 2.10, bir kutunun, saat yönünün tersine istikrarlı dolaşan 4 üçgenden oluşmuş bir kenarını göstermektedir. Kesikli çizgiler gereksiz olan iç kenarları göstermektedir. Kutuyu çevreleyen dıştaki kenarlar siluet kenarları olacaktır. Gereksiz iç kenarlar her üçgende 2 kere dizinlenmişlerdir. Bu özelliği kullanarak siluet kenarların belirlenmesi için basit bir yöntem geliştirilebilir:

Model'deki tüm üçgenler için:

- Eğer üçgen ışık kaynağından görünüyorsa (noktasal çarpımı > 0)
- Üçgendeki her kenar için:
 - Kenarın kenar listesinde olup olmadığını kontrol edilir
 - Eğer kenar listesine önceden eklenmiş ise listeden bu kenar silinir
 - Eğer listede yoksa kenar listeye eklenir

Gereksiz iç kenarlar ışık kaynağından görülen birden fazla üçgen tarafından paylaşıldıkları için yukarıdaki algoritma bu kenarların listeden silinmesini sağlayacaktır.

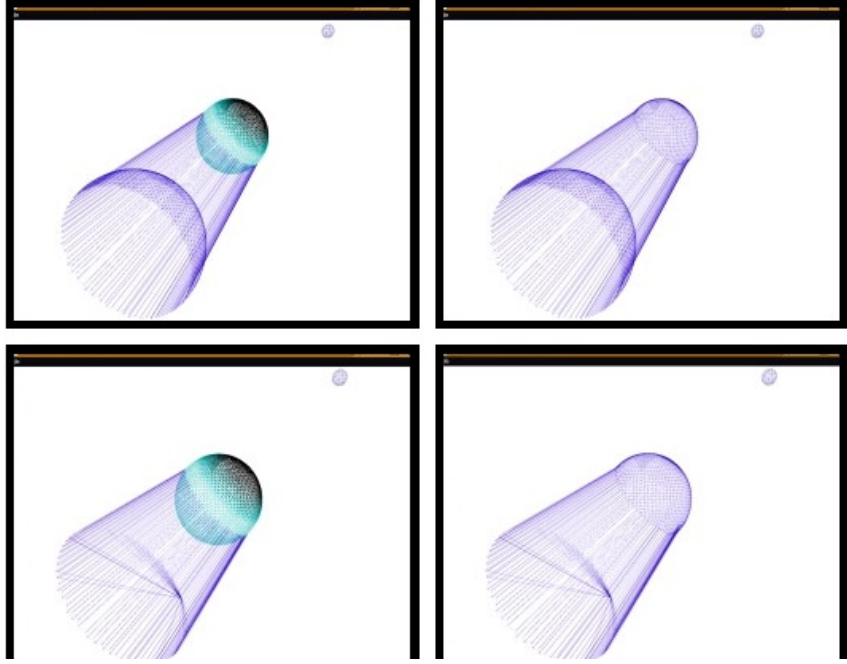
Üçgenlerin istikrarlı dolaşımından yararlanan bir silüet belirleme yönteminde de modelin tüm üçgenleri üzerinde üçgen çiftleri tarafından paylaşılan kenarları süzgeçlemek için 2 sefer işlem yapılmaktadır. Daha sonra oluşan kenar listesi, bir tarafı ışık kaynağından görülen diğer tarafı görülmeyen kenarları bulmak için nokta çarpımı işlemlerinden geçirilmektedir.

Silüet belirleme işlemi, şablon gölge hacmi gerçekleştirmelerindeki en pahalı 2 işlem den biridir. Diğer ise gölge hacminin betimlenmesidir. Bu iki işlem, tezin ilerisindeki konularda detaylarıyla açıklanacak olan yoğun eniyilemeler (*optimization*) için ilk adaylardır.

2.1.6. Gölge hacmi kapaklarının oluşturulması

Gölge hacmi kapakları sadece derinlik-başarısız yönteminde gerekmektedir. Kapakların amacı, gölge hacminin sonsuzda da olsa kapalı bir hacim haline dönüştürülmesidir. Noktasal ve yönlü ışık kaynakları için silüet uzatımı farklı yapılmaktadır. Noktasal ışık kaynakları silüet kenarlarını noktadan noktaya uzatırken, yönlü ışık kaynakları, sonsuzda tek bir noktaya uzatmaktadır. Bu yüzden yönlü ışık kaynaklarının oluşturduğu gölge hacminin arka yüzeyi sonsuzda kapalıdır. Yönlü ışık kaynaklarında arka kapak oluşturmak gereksizdir.

Kapakların oluşturulması için en uygun zaman silüetlerin oluşturulduğu andır. Çünkü silüetler oluşturulurken zaten ışık kaynağı ile kenarlar arasındaki açılar hesaplanmaktadır. Ön kapak için sadece ışık kaynağı tarafından görülen yüzeylerin alınması yeterlidir arka kapak içinse bu yüzeyler uzatılarak kullanılabilir.



Şekil 2.11 – Noktasal ışık kaynağından oluşturulmuş kapalı gölge hacmi
(Kwoon, 2003)

Şekil 2.11’de farklı yöntemlerle kapatılma uygulanmış 2 ayrı gölge hacmi görülmektedir. Üstteki sırada ışık kaynağı tarafından görülen yüzeyler kullanılarak kapak oluşturulmuştur. İkinci sırada ise ön kapak için ışık kaynağı tarafından görülen yüzeyler kullanılmış, arka kapak için ise uzatılmış silüet kenarlarından oluşturulmuş bir üçgen yelpazesi kullanılmıştır. Buradaki üçgen yelpazenin kullanılması daha az primitif oluşturduğu için gölge hacminin daha hızlı betimlenmesini sağlamaktadır. Işık kaynağından görülen yüzeyler kullanılırken dikkatli olunmalıdır çünkü bu yüzeyler gölge hacmi betimlenirken cismin kendisindeki yüzeylerle aynı düzlemde bulunmaktadır. Bu durumda sıklıkla hassasiyet sorunları yaşanır ve gölge hacminin bazı bölümleri perdeleyen cismin önünde betimlenir. Bu bölümler hatalı olarak

gölgedeymiş gibi görünürler. Bu sorun derinlik savaşı ya da z-savaşı (*z fight*) olarak bilinir.

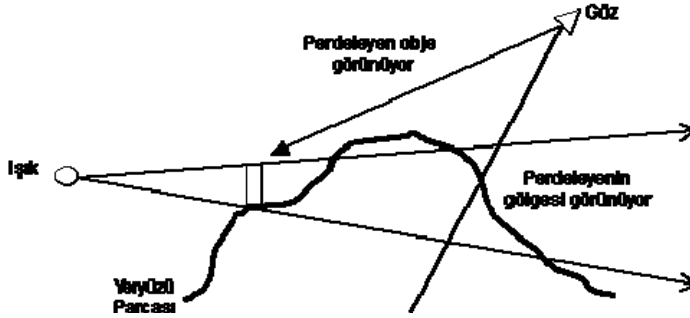
2.1.7. Geometrinin sonsuza uzatılması

Şekil 2.5’de gösterilen gölge içinde olması gereken tüm cisimlerin gölge hacminin içerisinde bulunmadığı durumdan kaçınmak için siluet kenarlarının sonsuza uzatılması gerektiği açıklanmıştı. Fakat eğer bu durumun oluşmayacağı garantilenebilirse, siluet kenarlarının sonsuza uzatılması zorunluluğu ortadan kalkar. Çoğu durumda yüksek bir değer sahne için yeterli olacaktır.

Homojen koordinat sisteminin w değerleri kullanılarak yarı sonsuz köşeleri betimlemeyi sağlayan bir yöntem bulunmaktadır. 4 boyutlu homojen koordinat sisteminde bir nokta ya da vektör (x,y,z,w) olarak ifade edilir. Noktalar için w değeri 0 vektörler için 1’dir. Homojen koordinat sisteminde hem vektörlere hem de noktalara dönüşüm uygulanabildiği için, son derece yararlıdır. Öteleme (*translation*) işlemi sadece noktalar için önemli olup vektörlere herhangi bir etki etmediği için, homojen koordinat sisteminin önemli bir rolü vardır. W ’nin değeri sadece noktaların ötelenmesinde önemli bir rol oynar çünkü öteleme değerleri matrisin 4. kolonunda sonsuzda olması gereken noktaların w değerlerini 0 yaparak bu noktaların homojen gösterimlerini 3 boyutlu noktalardan 3 boyutlu vektörlere çevirmiş oluruz. Vektörün ($w = 0$) betimlenmesi kırpma uzayında (*clipping space*) yarı sonsuz olur. W değerlerinin 0 yapılması işleminin kırpma uzayında yapılmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu; sahne, model uzayından bakış uzayına olan dönüşüm ile (*view space*) bakış uzayından izdüşüm uzayına (*projection space*) olan dönüşümün birleştirilmiş dönüşümüne yani model uzayından, izdüşümü uzayına dönüştürülmüş haline denk gelmektedir.

Kırpma uzayında çalışıldığı için, siluet uzatma işlemi de en uygun vertex programlarında (*vertex shader*) yapılabilir. Tezin ilerleyen kısımlarında şablon gölge hacimlerinin vertex programlarında oluşturulmasının yararlarına değinilmiştir.

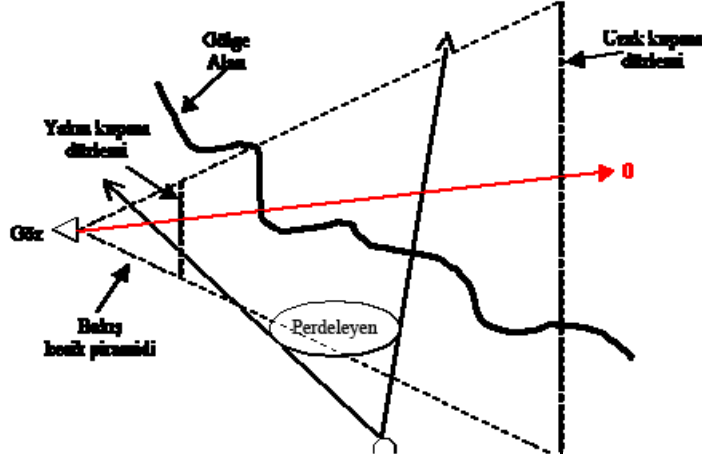
Sonlu uzatmanın sorunlarını önlemek amacıyla silueti sonsuza ya da geniş uzaklıklara uzatmak farklı sorunlara neden olmaktadır. Bir zindanda aralarında tuğla duvar bulunan iki odada gezinen iki oyuncu olduğu varsayıldığında, odalardan birindeki masa lambası, oyunculardan birinin duvar üzerine gölgesinin düşmesine neden oluyor. Diğer odada bulunan oyuncu, masa ışığının oluşturduğu bu gölgeyi siluetler sonsuza uzatıldığı için duvarda görecektir. Tuğla duvar sanki ince bir kâğıtmış gibi arkasındaki oyuncunun hayalet gölgesini gösterecektir. Bu gibi bir durumda duvar arkasındaki görünmesi olanaksız olan oyuncuyu hiç betimlemeyerek sorunu çözebiliriz. Şekil 2.12’de çok daha farklı bir durum görülmektedir. Kamera’dan hem perdeleyen cisim hem de bu cismin yeryüzü parçasının diğer tarafındaki hayalet gölgesi görülmektedir. Bu senaryo ile uçuş benzetimleri ya da hava savaşları oyunlarında sıklıkla karşılaşılır. Bu durumda, sonlu gölge hacmi ve hayalet gölge sorunlarını önleyebilmenin tek çözümü ışık kaynakları ve perdeleyen cisimlerin sahnedeki olası konumlarına kısıtlar getirmektir. Eğer perdeleyen cisimlerin gölge düşüren ışık kaynaklarına önceden belirlenmiş bir uzaklıktan daha yakında olamayacağından emin olunursa sorunsuz bir şekilde sınırlı gölge hacmi ve hayalet gölge sorunlarını oluşturmayacak şekilde gölge hacmi uzatma mesafesi tahmin edilebilir.



Şekil 2.12 - Geniş gölge hacmi uzatma mesafesinin neden olduğu hayalet gölge sorunu (Kwoon, 2003)

2.1.8. Bakış kesik piramidinin (*frustum*) kırılması

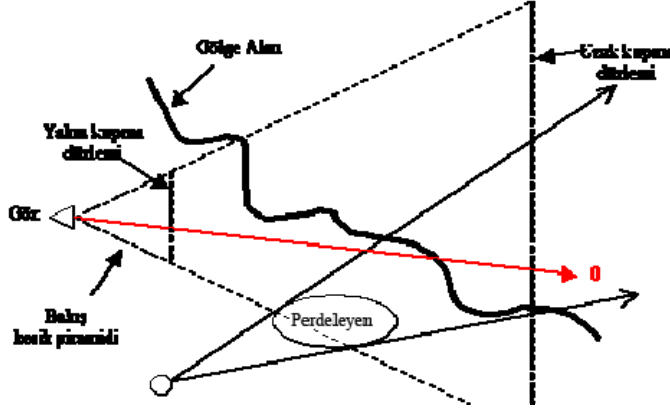
Şablon gölge yöntemlerindeki en büyük sorunlardan biri de bakış kesik piramidinin kırılmasıdır. 3 boyutlu betimleme teknikleri çoğunlukla sahnenin bakış açısından perspektif izdüşümüne dayandığı için kırma işlemi bu yöntemlerin olası sorunlarından biridir. Bakış kesik piramidi yakın ve uzak kırma düzlemlerine (*clip plane*) ihtiyaç duyar. Derinlik- başarılı ve derinlik başarısız yöntemlerinin ikisi de bu kırma işleminden olumsuz etkilenirler. Şekil 2.13'te de gösterildiği gibi, derinlik başarılı yönteminde, gölge hacminin yakın kırma düzlemi tarafından kesildikten sonra kırılmasından kaynaklanan hatalar oluşur. Şekildeki kırmızı ok, yakın kırma düzleminde kaynaklanan hatalı şablon değerleri hesaplanan durumlardan birini gösterir.



Şekil 2.13 - Gölge Hacmi yakın kırpma düzleminde kırılması derinlik başarılı yönteminde sorunlara neden olur (Kwoon, 2003)

Diğer taraftan, derinlik-başarısız yöntemi de uzak kırpma düzleminin gölge hacmini kırpmasından kaynaklanan sorunlardan olumsuz etkilenir. Uzak kırpma düzlemi, bakış noktasından sonlu bir uzaklıkta olduğundan, neredeyse her durumda gölge hacmi uzak kırpma düzlemi tarafından kırılır. Şekil 2.14'deki kırmızı ok, gölge hacminin arka yüzeylerinin kırılmasından kaynaklanan hatalı şablon değeri hesaplanan durumlardan birini gösterir.

Kırpma işleminden kaynaklanan sorunları kırpma düzlemlerinin yerleri değiştirilerek çözülebilir, ama bu yöntem tercih edilen bir yöntem değildir. Örneğin yakın kırpma düzleminin yerini değiştirmek derinlik hassasiyetini önemli ölçüde etkileyecektir ve derinlik arabelleğini kullanan diğer işlemleri de etkileyecektir.



Şekil 2.14 - Gölge hacminin uzak kırpma düzleminde kırılmasından kaynaklanan hatalar (Kwoon, 2003)

Gölge hacminin yakın kırpma düzlemi ile çakıştığı iki farklı durumu da çözebilmek için yakın gölge hacmini yakın kırpma alanında kapatılmalıdır böylece daha önce kırılmış olan ön yüzü görünen geometrik cisimler yakın kırpma düzlemine betimlenebilirler.

Öngörülen ilk durum perdeleyen silüetinin tüm köşelerinin yakın kırpma düzlemine iz düşmesidir. Bu durumda perdeleyen silüetinin içindeki tüm ön yüzü dönük köşeleri kullanarak bir dörtlü şerit döngüsü (*quad strip loop*) oluşturulur. Bu dörtlü şerit döngüsü daha sonra yakın kırpma düzlemine iz düşürülür ve gölge hacmi için bir kapak oluşturmuş olur.

Öngörülen ikinci durum gölge hacminin sadece bir kısmının yakın kırpma düzlemine iz düşürülmesi ile ortaya çıkar. Ortaya çıkan bu durum bir önceki durumdan daha karmaşık bir şekilde çözülür. Gölge hacminin yakın kırpma düzleminde kapatılması başka bir soruna yol açmıştır: derinlik hassasiyeti. Yakın kırpma düzleminde cisimlerin iz düşürülmesi sırasında yakın düzlem, gölge hacmini kapatması gereken köşeleri de kırabilir. Bu problem çözülürken gölge hacmini, normal sahnenin

çizildiği 0.1 den 1.0 a kadar olan derinlik aralığında değil de 0.0 dan 1.0 a kadar olan derinlik aralığında çizerek çözülür. Bu çizgi bakış kesik piramidine perspektif izdüşüm matrisini değiştirerek yaratılabilir. Yeri belirlendikten sonra yakın kırpma düzlemindeki gölge hacminin kırılması 0.05 derinlik değerinde gerçekleştirilir, bu da çizginin yarısına eşittir. Bu fikir orijinal olmasına rağmen problemi çözmek konusunda yetersiz kalmıştır. Sıklıkla yakın düzlem gölge kapağında çatlak ve de delikler oluşup hatalı sonuçlara neden olmaktadır. Yakın kırpma düzlemi problemine yaygın ve de sağlam bir çözüm bulunamamıştır. Bu da derinlik-başarılı teknikleri tercih edilmeyen teknikler kategorisine koymuştur.

Derinlik-Başarısız tekniğinde hatalara neden olan uzak düzlem kırpma problemine bir çözüm vardır. Bu problemin çözümü, sonsuz perspektif bakış izdüşümü kullanmak ya da sonsuz bakış kesik piramidi kullanmaktır. Uzak düzlemin izdüşümünü sonsuzda oluşturmak, gölge hacmini betimlerken, gölge hacminin uzak düzlem tarafından kırılması ihtimalini matematiksel olarak sıfıra indirir. Gölge hacmi sonsuza uzansa bile sonsuzdaki uzak düzlem tarafından kırılmaz. Lengyel (2001) perspektif izdüşüm matrisini de sunmuştur.

$$P = \begin{bmatrix} \frac{2n}{r-l} & 0 & \frac{r+l}{r-l} & 0 \\ 0 & \frac{2n}{t-b} & \frac{t+b}{t-b} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{f+n}{f-n} & -\frac{2fn}{f-n} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_{\infty} = \lim_{f \rightarrow \infty} P = \begin{bmatrix} \frac{2n}{r-l} & 0 & \frac{r+l}{r-l} & 0 \\ 0 & \frac{2n}{t-b} & \frac{t+b}{t-b} & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -2n \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Şekil 2.15 - Sonsuzdaki perspektif iz düşümünün matrisi

N yakın düzleme olan mesafe, f uzak düzleme olan mesafe l , r , b ve t de sırasıyla yakın düzlemden bakış kesik piramidinin yakın düzleminin sahne uzayındaki sol sağ alt ve üst kenarlarıdır. Limit f sonsuza giderken gereken matris bulunur.

2.1.9. Derinlik-Başarılı ve Derinlik-Başarısız yöntemlerinin karşılaştırılması

Şablon gölge hacmini oluşturmak için derinlik-başarılı ve de derinlik-başarısız metotların ikisini de incelenmesinin sonuçları:

2.1.9.1. Derinlik-Başarılı

Avantajları

- Gölge hacimleri için kapağa ihtiyaç duymamaktadır.
- Az miktarda cisim betimlenir.
- İki teknik içinde en hızlısıdır.
- Yakın düzlem kırpma problemini göz ardı edildiği durumda uygulama zorluğu yoktur.
- Sonsuz perspektif izdüşümüne ihtiyaç duymaz.

Dezavantajları

- Yakın düzlem kırpma problemi çözülemediğinden sağlam değildir

2.1.9.2. Derinlik-Başarısız

Avantajları

- Uzak düzlem problemi çözülebildiğinden her koşulda doğru sonuçlar verir.

Dezavantajları

- Kapalı gölge hacimleri oluşturabilmek için kapaklara ihtiyacı var
- Kapak oluşturulduğu için betimlenecek cisim sayısında artış oluyor
- İki teknik içinde en yavaş olanıdır
- Uygulanması diğerine göre daha zordur
- Sonsuz perspektif izdüşümü gerektirmektedir

Derinlik-başarılı yöntem iki yöntem arasından en iyisi gibi görünse de kamera gölge hacmine girdiğinde tamamıyla başarısız olmaktadır. Eğer sorunsuz bir yöntem isteniyorsa, yakın kırpma düzlemi problemi çözülene kadar, kullanılması gereken yöntem derinlik-başarısız yöntemdir. İki yöntem arasındaki tercih tamamıyla yapılacak

uygulamanın kısıtlamalarına bağlıdır. Eğer yukarıdan aşağıya ya da izometrik görüntünün kullanıldığı bir uygulama için gölgelendirme gerekiyorsa derinlik-başarisız yöntem kullanmak yeterli olacaktır. Bunların dışında kameranın gölge hacmine girmesi kuvvetle muhtemeldir. Bu durumda derinlik-başarisız teknik tek güvenli çözüm olmaktadır. Bunların yanında gölge eşleme gibi daha farklı gölgeleme tekniklerini de unutmamak gerekir. Sahne içindeki gölge alan cisimlerin kendi gölgelerinin grnemeyeceği durumlarda izdüşümsel gölge eşleme metodu kullanılabilir.

2.1.10.Sağlamlık ve verimlilik

Sağlamlık gözönüne alındığında derinlik-başarisız teknik çoğu durumda istenen sonucu verse de donanım kısıtlamaları sebebiyle kullanım alanı kısıtlıdır. Bu kısıtlama sebebiyle gölge hacmi tekniği iyileştirilmiştir. şablon gölge hacmi uygulamalarında ana engel siluet belirleme ve de gölge hacim betimlemesidir. Bunlardan siluet belirleme çok fazla CPU döngüsü gerektirir ve de perdeleyenin üçgen sayısı arttıa işlem maliyeti daha da artmaktadır. Bu sebeple perdeleyen cisimlerin üçgen sayılarının düşük tutulması kullanılan bir iyileştirme yöntemidir. Bir başka yöntem de ışığın ve de perdeleyenin yerinin çok hızlı değişimlere uğramadıkları varsayımı yapılarak siluetlerin 2-4 çerçevede bir çizilmesidir.

Kullanılan metodun iyileştirilmesi açısından önemli olan bir diğer nokta da sahnedeki ışıkların yerleridir. Günümüz donanımları gözönüne alındığında bir sahneyi etkileyecek olan ışıkların sayısının dördü geçmemesine de dikkat etmek gerekir.

2.1.11.Vertex programları ile güçlendirilmiş gölge hacimleri

Grafik donanımlarının gelişimi sırasında, gölge hacimleri açısından en önemli ilerleme programlanabilir vertex ardışık düzendir. Gölge hacimlerini vertex program'da yapmanın kazandırdığı en büyük fayda gölge hacim cisimlerinin olduğu anda yüklenmek zorunda olunmamasıdır. Brabec (2003) de gölge hacmi yöntemlerinde silüetlerin belirlenmesi ve uzatılması işleminin ekran kartında yapılmasının performans artışı sağlayacağını ifade etmektedir. Bütün gölge hacmi donanım belleğinde statik vertex belleği olarak tutulabilir. Veri yolu kazancı oldukça etkili olur. Ayrıca vertex programlarında ondalıklı sayılarla yapılan işlemler oldukça hızlıdır. Ama gölge hacmi tekniğini tamamıyla vertex programı ile oluşturmak bazı durumlarda düşük performansa yol açabilir. Bu tarz durumlar konunun sonunda açıklanmıştır.

Vertex programlarının gücünden yararlanmak için öncelikle perdeleyen cisimlerin işleme tabi tutulması gerekmektedir. Vertex programı donanımlarının yeni köşe yaratmaları olanaksızdır. Köşe ardışık düzeninde girdiler ve çıktılar birebirdir. Bu özellik de gölge hacmini oluşturmak için silüet kenarlarından yararlanarak yeni köşeler oluşturmamız gerektiği için sorun oluşturmaktadır.

Vertex programlarının bu kısıtlamasının çözümü, gereken bütün köşeleri önışlem sırasında oluşturmaktır. Vertex programında gölge hacmini yaratılmış olan köşeleri kullanarak oluşturulmaktadır. 2 yüz tarafından ortak olan 2 köşenin oluşturduğu her kenar için bir adet dörtgen oluşturulmalıdır. Bu dörtgen 2 farklı yüz tarafından paylaşılan orijinal kenarın bozulmuş bir dörtgeni şeklinde gösterilebilir. Her yüz bozulmuş dörtgenin aynı köşesine katkıda bulunur. İki yüz tarafından oluşturulan köşeler, yön bakımından, benzer olduğundan bozulmuş

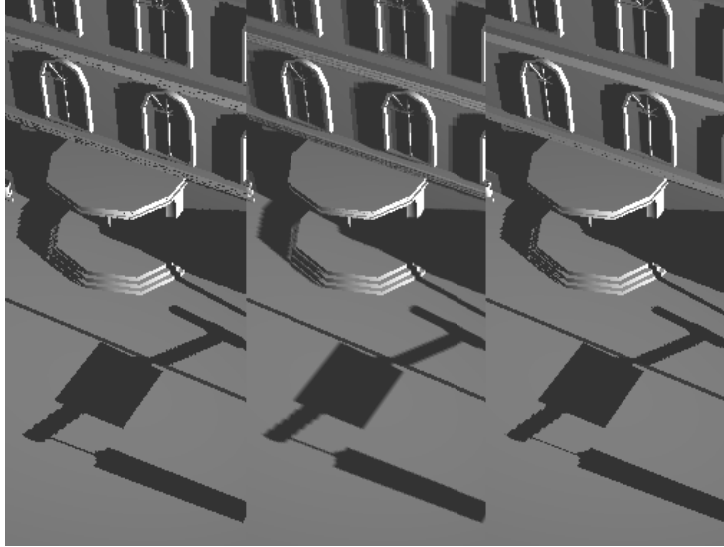
dörtgen sıfır uzunluğundadır. Tek fark köşelerin kendi yüzlerine göre normal değerlerinin olmasıdır. Vertex programında ışık vektörü ile köşe normali nokta çarpımı yapılır. Köşeler; eğer sonuç pozitif ise vertex programında değişikliğe uğramaz, eğer sonuç negatif ise ışık vektörünün yönünde uzatılır. Bu teknik, ışık gören cisimler değiştirilmeyerek ön kapak oluştururken ışık görmeyen cisimler uzatılarak gölge hacminin kenarlarını ve arka kapağı oluşturarak, kapalı gölge hacmini oluşturur.

Örnek olarak, sol tarafında nokta ışık kaynağı olan bir küre cisim ele alınabilir. Sol yarı küredeki bütün yüzler ışık alacağından buradaki yüzler değişmeden kalacak ve ön kapağı oluşturacaklar. Bunun yanında sağ yarıküre tamamen ışık almayacağından buradaki yüzler arka kapağı oluşturmak üzere uzatılacaklar. Gölge hacminin kenarları siluet kenarlarında bulunan bozulmuş dörtgenler tarafından oluşturulacaktır. Bu durumda siluet kenarları kürenin ortasından geçen dikey bir çizgi şeklini alacaktır. Bunun çalışmasının sebebi siluet kenarındaki bozulmuş dörtgenlerin her biri için sadece 1 tane kenarın uzatılmasıdır. Biraz önce bozulmuş olan dörtgen şimdi gölge hacminin kenarlarını tanımlayan bir normal dörtgene dönüşmüş oldu.

Önişlemin ardından bir sürü ek cisim de yaratılmıştır. Aslında sadece siluet kenarlarındaki bozulmuş dörtgenler yararlıdır. Kalan cisimler ise kullanılmayan ama işlem ardışık düzeninde yer kaplayan cisimlerdir. Buna rağmen gölge hacim oluşturma işlemi tamamıyla grafik donanımında yapılmaktadır ve performans, çoğu durumda, vertex programı kullanılmadan yapılmış olan uyarlamalardan daha üstündür.

Yakın geçmişte Kilgard (2002) eğer perdeleyenlerin yüksek poligonlu olmaları ya da gölge yaratan birçok ışık kaynağının olmasının, siluet kenarlarını vertex programında hesaplama işleminin performansına oldukça zararlı olduğunun altını çizdi. Bu değerlendirme vertex programından geçen köşe sayısının artması ve her birinin siluet kenarı

hesaplama kullanılması bir sonucudur. Sonuç olarak yüksek poligonlu perdeleyenler çok sayıda gereksiz köşeye sebep olacağından ve her ekstra köşenin test edilmesi vertex programlarının bize sağladığı kazancı negatife indirebilir. Daha fazla ışık kaynağı olması da vertex programlama yöntemine daha da fazla zarar vermektedir. Dolayısıyla gölge hacmini vertex programı yardımıyla oluşturmanın işlemci ile oluşturmaktan daha kazançlı olduğundan emin olunmalıdır. Eğer işlemci uygulamanın daha başka kısımları için kullanılıyorsa gölge hacmini hesaplama işini vertex programı yapması daha mantıklı olacaktır. Ama bununla birlikte çoğu zaman bütün işi vertex programı ile yapmak yerine, yapılan işlere yardımcı olarak kullanmak daha mantıklıdır.



Şekil 2.16 - Derinlik, yüzde yakınsama süzgeci ve varyans gölge dokularının karşılaştırılması

2.2. Gölge Dokusu Yöntemleri

Işık noktasından ışık yönüne doğru bakıldığında sahnede görünen bütün cisimler aydınlık olacaktır, fakat bu cisimlerin arkasında kalan bölümler gölgede kalacaktır. Gölge dokusu oluşturmanın temeli buna dayanır. Sahnedeki her ışık kaynağı için, O ışık kaynağının konumundan ışığın yönüne doğru bakarak sahne geçici dokulara betimlenir. Bu dokulara gölge dokuları denir. (Williams, 1978) Daha sonra ekranda görülen görüntü betimlenirken bu gölge dokularının sahneye izdüşümleri alınarak gölgelendirme işlemi yapılır. Gölge yapısı yöntemleri kullanılan dokunun yapısına, ışık kaynağından sahne betimlenirken kullanılan izdüşüm dönüşümüne ve sahneyi bölümlere ayırma yöntemine göre değişiklikler gösterir.

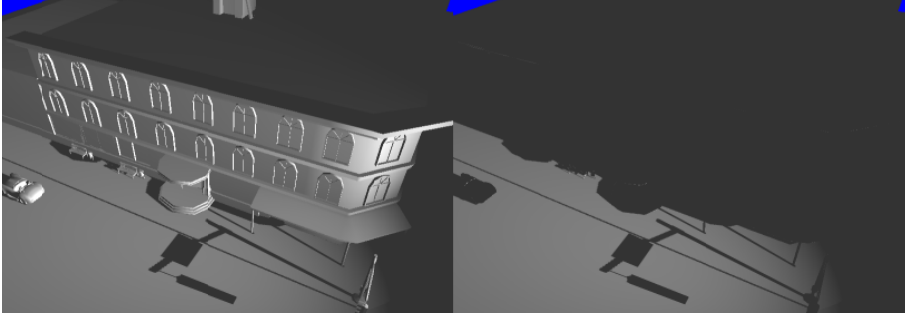
2.2.1. Gölge dokusu yapıları

Bu çalışmada Gölge dokuları kullanılan dokunun yapısına göre standart gölge dokusu, derinlik gölge dokusu (*depth shadow maps*) ve varyans gölge dokuları (*variance shadow maps*) başlıkları altında incelenmiştir. Ayrıca bu başlıklara ek olarak gölge dokularını süzgeçten geçirme yöntemlerinden biri olan yüzde yakınsama süzgeci de (*Percentage Closer Filtering, PCF*) bu kategori altında incelenmiştir.

2.2.1.1. Standart gölge dokuları

Standart gölge dokuları oluşturulurken gölge düşüren cisimler, ışık düzlemine izdüşümleri alınarak gölge dokusuna daha önceden belirlenmiş bir gölge renginde betimlenir. Daha sonra bu doku üzerinde hiçbir işlem yapılmadan sahneye izdüşümü alınır. Cisimlerin hem gölge düşüren hem de gölge alan olması cisimlerin kendileri tarafından

gölgelendirilmesine neden olduğundan bu koşula izin verilmemektedir. Şekil 2.17 - Standart gölgelendirmede öz gölgelendirme hataları'de bu durum gösterilmiştir. Bu yüzden bu yöntemde sahnedeki cisimler gölge düşüren ve gölge alan olarak ikiye ayrılır. Bir cisim aynı anda hem gölge alıp hem de gölge düşüremez. Yöntemin bu kısıtlamalarından dolayı karşılaştırmada kullanılmamıştır.

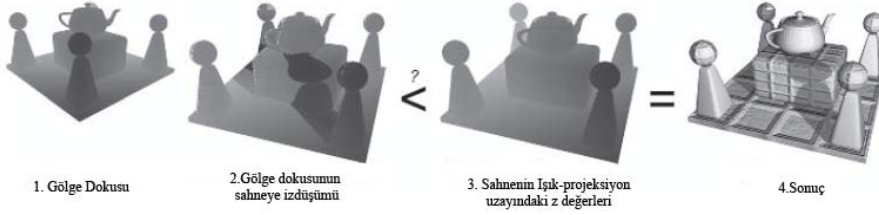


Şekil 2.17 - Standart gölgelendirmede öz gölgelendirme hataları

2.2.1.2. Derinlik gölge dokuları

Işık kaynağından betimlenen sahne uzayındaki koordinatlar önce ışık uzayına (*light space*) daha sonra da ışığın izdüşüm uzayına dönüştürülür. Bu uzayda ışığın gördüğü alan $[-1, -1, -1]$ ile $[1, 1, 1]$ noktaları arasında sınırlandırılmıştır. Derinlik gölge dokuları oluşturulurken noktanın bu ışık-izdüşümü uzayındaki (*light projection space*) derinlik değeri dokuya yazılır. Oluşan doku $f(x,y) = z$ gibi 2 boyutlu bir fonksiyondan eşit aralıklarla alınmış örnekler olarak görülebilir. Daha sonra sahne gölgelendirilirken, test edilen nokta ışık-izdüşüm uzayına dönüştürülür. Dönüştürülmüş bu noktanın derinlik değeri bu noktanın ışık-izdüşümü uzayındaki x,y koordinatları kullanılarak gölge dokusundaki z değeri ile karşılaştırılır. Eğer test edilen noktanın z değeri dokudaki z değerinden büyük ise ışık ile nokta arasında

bu noktadan daha yakın başka bir cisim bulunduğu anlamına gelmektedir. Bu da test edilen noktanın gölgede olduğunu gösterir. Karşılaştırma Şekil 2.18’de görsel olarak gösterilmiştir.



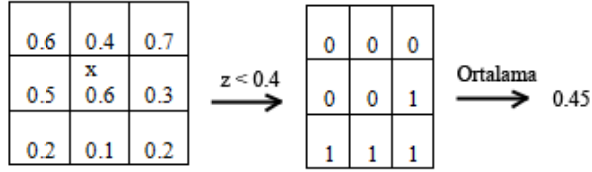
Şekil 2.18 – Derinlik gölge dokularında gölgelendirme testi (Valient, 2003)

Gölgelendirmede kullanılan izdüşüm matrislerinde z değerlerinin lineer değişim göstermesinin mümkün olmadığından ve kullanılan dokuların ondalıklı sayı hassasiyeti (*floating point precision*) fazla olmamasından derinlik karşılaştırmalarının duyarlılığı bütün sahnede eşit değildir ve bazı karşılaştırma hatalarına neden olabilir. Aynı şekilde kullanılan gölge dokusunun çözünürlüğünden ve izdüşüm dönüşümünden kaynaklı pürüzler (*aliasing*) görülebilir. Bu hatalar 3. Bölümde daha detaylı olarak incelenecektir.

2.2.1.3. Yüzde yakınsama süzgeci

Bu yöntem derinlik gölge dokularına ek olarak geliştirilmiştir. Yöntemin amacı gölge dokusunun çözünürlüğünden ya da izdüşüm matrisinden kaynaklanan pürüzleri filtreleyebilmektir (Reeves et al., 1987). Bu amaçla gölge dokusuna yumuşatma süzgeçleri uygulamak hatalı olur. Çünkü bu yöntem ortalama($f(x,y)$) $< z$ anlamına gelmektedir. Gölge dokusundaki derinlik değerlerinin ortalamasının alınması, dokunun ani derinlik değişikliği olan bölümlerinde hatalara neden

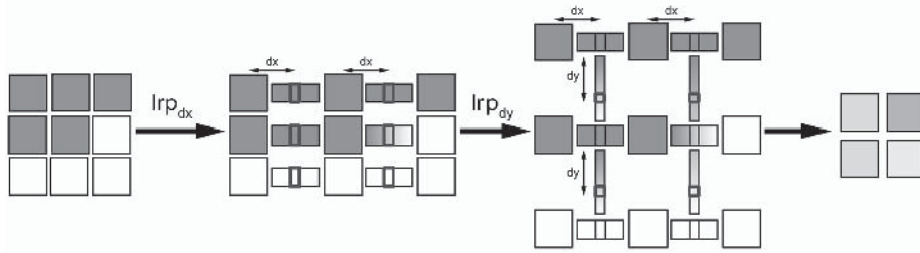
olacaktır. Doğru süzgeçten geçirme yapabilmek için ortalama($f(x,y) < z$) değerinin hesaplanması gerekir. Yüzde Yakınsama Süzgeci bu değeri hesaplar. Derinlik gölge yöntemindeki gibi tek karşılaştırma yapmak yerine bu noktaya yakın gelişigüzel ya da belirli kurallara göre seçilmiş konumlardan birden fazla karşılaştırma yaparak bu karşılaştırmaların ağırlıklı ortalaması alınır. Bulunan değer gölgelendirmede kullanılır. Ayrıca Brabec ve Seidal (2001) tarafından donanım hızlandırılmış PCF yönteminde süzgeç değerleri dokunun 4 kanalına yazılıp tek seferde filtre matrisiyle nokta çarpımı yaparak süzgeçten geçirme yapılabileceği sunulmuştur. Şekil 2.19’da örnek doğrusal PCF hesaplaması gösterilmiştir. Şekil 2.16’da da örnek sahnenin derinlik gölge dokusu ve PCF ile gölgelendirilmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 2.19 – Yüzde yakınsama süzgeci (Valient, 2003)

Yakın geçmişe kadar PCF gerçek zamanlı hesaplanamıyordu. Günümüzde piksel programlama mimarisi (*pixel shader architecture*) kullanılarak gerçek zamanlı hesaplanması mümkün olmuştur. Yöntem üzerinde uygulanan küçük farklar, yöntemin daha düzgün sonuçlar vermesini sağlamıştır (Valient, 2003). PCF’nin ikinci kısmında 3x3’lük bölge için ikili (*binary*) sonuçlar elde edildikten sonra, sonuçlar üzerine çift doğrusal süzgeç (*bilinear filtering*) uygulanarak yeni dört adet filtelenmiş sonuç elde edilir. Bunun için en yakın sol üst doku ögesine bağıntılı gölge dokusu koordinatları kullanılır. İlk olarak kolonlar

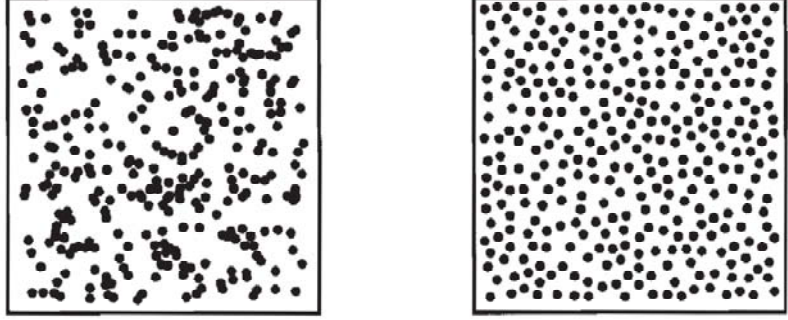
arasında doğrusal ara değerlendirme uygulanır ve 2×3 'lük geçici bir süzgeç matrisi elde edilir. Sonra satırlara doğrusal ara değerlendirme (*interpolation*) uygulanıp dört adet süzgeçlenmiş değer elde edilir. Şekil 2.20'de bu aşamalar gösterilmektedir. Son adımda ise, süzgeçten geçirilmiş değerlerin ortalaması alınıp son azaltma işlemi uygulanmış olur.



Şekil 2.20 – Çift doğrusal yüzde yakınsama süzgeci (Valient, 2003)

Üçüncü bir PCF yönteminde (Mitchell, 2004) ise gölge dokusu betimlendikten sonra, uzaysal-değişken süzgeç matrisi ile süzgeçten geçirilir. Süzgeç matrisi olarak Poisson disk dağılımından elde edilen değerler, istenilen ölçütlere göre gölge dokusunu daraltılıp genişletilebilen bir alçak geçiş süzgeci oluşturur.

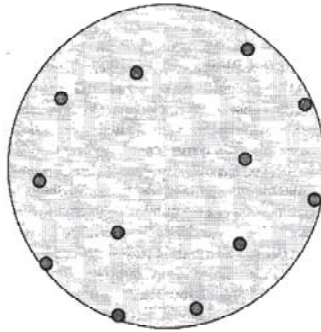
Poisson disk dağılımını kullanan filtreler grafik uygulamalarında yaygın olarak kullanılırlar. Bir dizi alternatif stokastik süzgeç bulunmasına rağmen poisson disk süzgecinin tercih edilmesinin sebebi uzaysal özellikleridir. Poisson disk dağılımı, standart poisson dağılımına ek olarak örnek uzayındaki verilerin, kümelenmeyi önlemek için aralarında minimum bir uzaklık bırakılması kuralının eklenmiş halidir. Poisson disk dağılımı oluşturabilmek için bulunan örnekler teker teker eklenir ama daha önce eklenmiş değerlere çok yakın olan değerler silinir. Poisson disk dağılımı uyguladıktan sonra ortaya çıkan sonuç poisson dağılımının sonucundan daha düzenli görünür.



Şekil 2.21 – Poisson ve Poisson diski arasındaki fark (Mitchell,, 2004)

Poisson disk süzgeci oluşturmak için doku örneklerini dairesel bir alandan seçmek gerekir. Poisson disk dağılım süzgeç matrisini oluşturmak için 12 adet örneği kapsayan bir çekirdek seçilirse Şekil 2.22'deki gibi bir görünüm oluşur.

Gölge dokusu oluşturmak için poisson disk örneklemesinin merkez noktası v vektör koordinatları ile ölçülür. Dokunun, $v = 1$ olan ucunda bulanıklaştırma uygulanmazken $v = 0$ olan ucunda gölge dokusu bulanıktır.



Şekil 2.22 – Poisson diski süzgeci (Mitchell, 2004)

Poisson PCF oluşturmak için her disk için 12 adet doku örneğinin merkeze olan uzaklıkları kaydedilir. Süzgeç boyutunu ölçeklendirmek için örneklerin merkeze olan görelî konumları istenen oranda ölçeklendirilir. 12 örnek için de değerler hesaplandıktan sonra v değerlerinin bulunma işlemi sonuçlanmış olur.

2.2.1.4. Varyans gölge dokuları

Bütün dokularda olduğu gibi gölge dokularında da çözünürlük yetersizliğinden kaynaklı pürüzler meydana gelir. Standart renk bilgisi içeren dokularda bu pürüzleri önlemeye yönelik süzgeçler ekran kartı donanımında çok hızlı yapılabilmektedir. Fakat gölge dokusundaki değerlerin bu şekilde filtrelenmesi hatalı sonuçlar verir. Bu filtreleme işlemi için PCF yöntemi geliştirilmiştir fakat filtrelemeyi donanıma yaptırmaktan çok daha pahalıdır.

Gölge dokusundaki her pikselde bir tek nokta hakkında bilgi tutulduğu bilinmektedir. Varyans gölge dokuları, her pikselde derinlik bilgisi tutmak yerine derinlik dağılımlarının ilk iki momentini dokuya yazar. Bu yöntemin en büyük avantajlarından biri, iki ayrı dağılımın ortalamaları dağılımların ilk iki momentlerinin ortalaması alınarak yaklaşık olarak ifade edilebilmesidir. Bu gölge dokusunun standart renk bilgisi içeren bir doku gibi filtrelenebileceği anlamına gelmektedir. (Donnelly et al. 2006)

Gölge dokusundaki derinlik değerinin t gibi gölgelendirilecek olan noktanın ışık-izdüşüm uzayındaki derinliğiyle karşılaştırılması gerekmektedir. Fakat varyans gölge dokusunda derinlik yerine derinliğin dağılımının ilk 2 momentini bulunmaktadır. Bilindiği gibi Chebyshev eşitsizliği X gibi bir rastsal değişkenin t den büyük olma olasılığına üst sınır verir.

Chebyshev eşitsizliği:

$$P(X \geq t) \leq p_{max}(t) \equiv \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + (t - \mu)^2}$$

Denklemdaki $P(X \geq t)$ değeri PCF yöntemindeki oranı ile eşdeğerdir. Çünkü süzgeçten geçirilmiş belirli bir alandaki gölgelendirme katsayısını verir. Fakat denklemde sadece üst sınır verilmiştir. Derinlik dağılımının ilk iki momenti bilindiğinden Chebyshev eşitsizliğindeki üst sınır kolayca hesaplanabilir. Fakat bu sınırın gölgelendirme katsayısı olarak kullanıp kullanılmayacağı incelenmesi gerekir.

d_1 derinliğinde gölge düşüren ve d_2 derinliğinde gölge alan olmak üzere birbirine paralel 2 düzlemsel yüzey olduğu, sabit bir filtre boyutu ve p 'nin de bu filtredeki perdelenmeyen noktaların oranı olduğu düşünülürse;

$$\begin{aligned}\mu &= E(x) = pd_2 + (1 - p)d_1 \\ E(x^2) &= pd_2^2 + (1 - p)d_1^2 \\ \sigma^2 &= pd_2^2 + (1 - p)d_1^2 - (pd_2 + (1 - p)d_1)^2 \\ &= (p - p^2)(d_2 - d_1)^2\end{aligned}$$

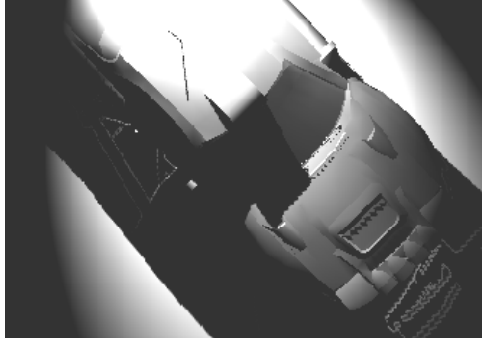
Yukarıda verilen beklenen değer ve varyans kullanılarak Chebyshev eşitsizliğinin üst sınırını hesaplarırsa:

$$\begin{aligned}p_{max}(d_2) &= \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + (t - \mu)^2} \\ &= \frac{(p - p^2)(d_2 - d_1)^2}{(p - p^2)(d_2 - d_1)^2 + (d_2 - pd_2^2 - (1 - p)d_1^2)^2} = p\end{aligned}$$

Bu durumda Chebyshev eşitsizliğinin eşitlik olduğu görülmektedir ve PCF'in verdiği kesin sonucu vermektedir.

Burada incelenen durum çok genel bir durum olsa da bulunan bu üst sınır filtrelenmiş gölgelendirme oranı olarak kullanılabilir. Fakat bazı durumlarda Chebyshev eşitsizliği geniş bir aralık tanımladığından varyansın yüksek olduğu yerlerde ışık sızmaları görülür.

Şekil 2.23'te ışık sızmasına örnek gösterilmiştir. Bu soruna çözüm olarak hesaplanan gölgelendirme oranının (0-epsilon) aralığı (0-1) aralığına çekilerek [epsilon - 1] aralığı da 1 e eşitlenir. Buradaki epsilon değeri sahneye göre belirlenen ve ışık sızmasını gideren bir parametredir.



Şekil 2.23 – Varyans gölge dokularında ışık kanaması

2.2.2. Gölge izdüşüm dönüşümleri

Gölge dokusu yöntemlerinin kalitesini belirleyen bir diğer etmen de kullanılan izdüşüm dönüşümüdür. Bu çalışmada düzgün, perspektif, ışık uzayı perspektif, Yamuk, düzlem en uygun, logaritmik izdüşüm dönüşümleri incelenecektir.

2.2.2.1. Düzgün gölge izdüşüm dönüşümü

Düzgün izdüşüm dönüşümü sahneyi bakış noktasından betimlemekten farksızdır. Kameranın konumundan bakış yönüne kameranın görüş alanını kullanarak oluşturulan bir izdüşüm dönüşümü yerine ışığın konumundan ışık yönüne bakan ve ışık görüş alanı kullanılarak oluşturulan standart izdüşüm dönüşümü kullanılır. Noktasal ışık kaynakları için bu matris perspektif izdüşüm matrisidir. Doğrusal ışık kaynakları için ise dikgen izdüşüm dönüşümleri kullanılır.

Düzgün izdüşüm dönüşümü bakış noktasından bağımsız hesaplanır. Standart perspektif izdüşümü ışıktan uzakta olan noktalar için daha dar gölge dokusu ayrılmasına neden olur. Bu da ışıktan uzakta fakat bakış noktasına yakın olabilecek noktalarda pürüzlenmelere neden olacaktır.

Bunun yanı sıra ışık gölge dokusunu daha verimli kullanabilmek, perspektif sonrası derinlik değerlerinin dağılımından kaynaklanan pürüzlenme hatalarını azaltmak amacıyla Işık kesik piramidinin yakın ve uzak kırpma düzlemlerini sadece gölge dokusunda yer alması gereken cisimlere odaklayan Odaklanmış düzgün gölge izdüşüm dönüşümü de kullanılan yöntemler arasındadır.

2.2.2.2. Perspektif gölge izdüşüm dönüşümü

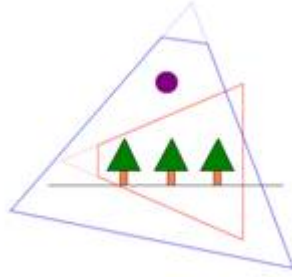
Gölge üretmek için kullanılan gölge eşleme yönteminin bir çeşididir. Düzgün gölge izdüşümünde olduğu gibi gölge dokusunun ışık-bakış uzayında oluşturması yerine, perspektif gölge eşleme yönteminde gölge dokuları bakış – izdüşümü uzayında yani perspektif dönüşümden sonra üretilir (Stamminger, 2002). Makalede yöntemin sonuç olarak gölge dokusu pürüzlerinde kayda değer bir azalmayı neredeyse hiç ek yük olmadan elde ettiği ve direk olarak derinlik gölge dokularını değiştirerek gerçek zamanlı betimlemenin geliştirildiği iddia ediliyor.

Standart gölge eşleme yöntemindeki iki geçiştten oluşan işlemler perspektif gölge izdüşüm matrisi yöntemine şu şekilde uyarlanmıştır: ilk geçişte sahne ve ışıklar bakış – izdüşüm uzayı koordinat sistemine dönüştürülürler sonra da derinlik arabelleği etkin iken dönüştürülmüş ışığın bakış açısından betimlenir. Oluşan bu arabelleğe perspektif gölge dokusu denir. İkinci geçişte sahne kamera görüş açısından betimlenir ve sahneden görülen her nokta için gölge testi gerçekleştirilir. Noktanın ışık-izdüşüm uzayındaki z değeri, gölge dokusundaki bu noktaya karşılık gelen derinlik değerinden büyükse, nokta ışığa daha yakın başka bir cismin gölgesinde kalmaktadır.

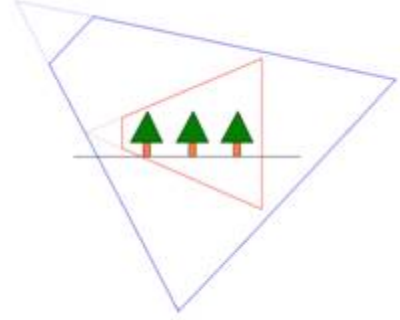
Temelde iki ana adımdan oluşsa da uygulamalarda genellikle kullanılan 3 adımlık yöntem aşağıdaki şekilde uygulanmaktadır.

İlk adımda perspektif izdüşümü uzayına dönüştürülmek üzere uzayın hazırlanması 3. adımda gölge dokusunun oluşturulabilmesi için perspektif dönüşümü için uygulanabilecek çok farklı yöntemler bulunmaktadır. İlk olarak, bakış kesik piramidi gölge düşüren bütün cisimleri kapsamadığı zaman (Şekil 2.24), Perspektif izdüşümü uzayında bakış kesik piramidini birim küpe dönüştüren dönüşümden sonra, bu cisimler birim küpün dışında kalır. Dönüştürülmüş ışıktan gölge dokusu alınabilmesi için, bu cisimlerin dönüştürülmüş ışığın kesik piramidinde olması gerekmektedir. Bunun için dönüştürülmüş ışığın düzlemi dikkatlice seçilmeli, birim küpe değinceye kadar itilmemelidir. Bir diğer durum da Şekil 2.25’de olduğu gibi ışık bakış açısının arkasında kalmasıdır. Bu durum ışığın, gözün düzlemine göre, uzak düzlemin diğer tarafında kalması durumudur, sonra da bakış kesik piramidini birim küpe dönüştüren perspektif sonrası uzayda, ışığın konumunu bakış kesik piramidindeki cisimlere göre tersine çevrilir. 3. adımda elde edilecek olan Gölge dokusu için ikinci aşamadaki derinlik karşılaştırmasının da terse çevrilmesi gerekir. Ayrıca bakış kesik piramidinin dışında olan ama

ışığın kesik piramidinin içinde olan cisimler de Şekil 2.24'te görünebilir ve bu cisimler için ayrı işlem yapılmalıdır.



Şekil 2.24 – bakış kesik piramidi kırmızı renkte, bakışın önündeki ışık bakış kesik piramidi ile mavi, bakış kesik piramidin dışında ama ışığın kesik piramidinin içindeki mor cisim de gölge düşüren cisim (Stamminger, 2002)



Şekil 2.25 – Işık gözün arkasında ve bakış kesik piramidini birim küpe dönüştüren dönüşüm ışığın konumunu ters çevirip ışığın yönünü değiştirir. (Stamminger 2002)

İkinci aşamada ışığın perspektif sonrası uzay koordinatlarına dönüştürülür perspektif sonrası uzay koordinatlarına dönüşümü sağlayan P matrisi aynı zamanda ışığın konum ve yön vektörlerini perspektif sonrası uzay koordinatlarına dönüştürmek için de kullanılır. Sonuçlar homojen koordinatlar temel alınarak hesaplanmıştır ve bir sonraki adımda olduğu gibi, bu vektörleri sonraki işlemlerde kullanmak için homojen bölüm işlemleri uygulanmalıdır.

Önceki iki adım, sahneyi, dönüştürülmüş ışığın konumu ve doğrultusundan perspektif gölge izdüşümü yöntemine hazırlamıştır. Gerekli izdüşümü ve model bakış matrisleri ayarlanıp sahne gölge

dokusuna betimlenir. Başarılı bir gölge eşleme almak için sanal ışığın kesik piramidinin perspektif izdüşüm uzayındaki bakış kesik piramidine ki bu bir birim küptür, yakın olması gerekir. Bu açıdan dikkat edilmesi gereken iki nokta vardır:

- Işığın yakın düzlemi birim küpe olabildiğince yakın olmalıdır. Bir diğer deyişle, yakın düzlemi uzak düzleme bütün birim küpü ve birim küpün dışında olup da hala birim küpe gölge düşüren bütün cisimleri içine alacak şekilde yaklaştırmalıyız.
- Işığın bakış açısı bütün birim küpü ve birim küpün dışında olup da birim küpe gölge düşüren bütün cisimleri alacak en küçük halde olmalıdır. Genelde bu işlem asimetrik bakış kesik piramidi gerektirir ama hesaplaması karışıktır. Bu probleme basit bir yaklaşım bakış açısını ışığın izdüşümünün merkezinin vektörleriyle birim küpün 8 köşesinin arasındaki 8 açının en yüksekini iki katına ayarlamaktır. Ama bu da ışığın kesik piramidi birim küpe birebir uyuşmadığından (birim küpün bir köşesi dışında) en iyi çözüm değildir.

2.2.2.3. Işık uzayı perspektif gölge izdüşüm dönüşümü

Işık uzayı perspektif gölge izdüşümü yönteminde, perspektif gölge izdüşümü yönteminin verimsiz çalıştığı durumları iyileştirmeyi amaçlamıştır (Wimmer et al., 2004). Geliştirilen bu yöntem şu iki düşünce üzerine kurulmuştur:

- Perspektif dönüşümler gölge eşlemeyi bükme için uygun yöntemler olsa da bu perspektif dönüşümün perspektif gölge izdüşümü yöntemindeki gibi bakış perspektif dönüşümüne bağlı olmasına gerek yoktur. Herhangi bir perspektif dönüşüm kullanılabilir.

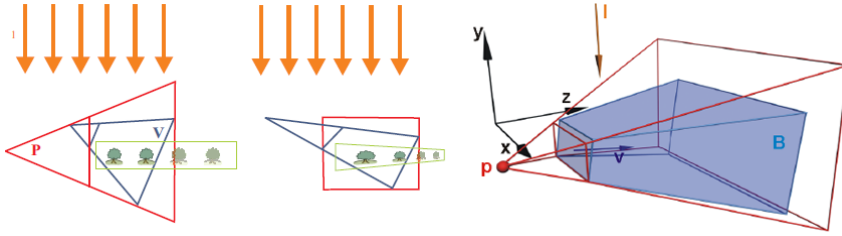
- Kullanılan perspektif dönüşümün asıl amacı gölge dokusu piksellerinin dağılımını değiştirmek olduğuna göre sadece gölge dokusu düzleminin değiştirilmesi yeterlidir. Düzleme dik olan eksenin değişmesine gerek yoktur.

Bu gözlemler, ışık uzayında yapılan perspektif dönüşümünün kullanılabilirliğini gösterir. Perspektif gölge izdüşümü dönüşümünden farklı olarak ışık uzayında yapılan perspektif dönüşümü ışığın yönünü değiştirmez. Doğrusal ışık kaynakları perspektif dönüşümden sonra doğrusal kalırken, noktasal ışık kaynakları doğrusal ışık kaynaklarına dönüşür. Bu yöntem perspektif gölge izdüşümü yönteminin problemlerinden kaçınırken, çok daha anlamlı bir dönüşümle sonuçlanır.

Işık uzayı perspektif gölge izdüşümü yönteminde ilk olarak, sahnedeki gölge dokusunda bulunması gereken cisimler seçilir. Bu cisimler, kamera tarafından görülen cisimler ve bu cisimlere gölge düşürmesi olası olan cisimlerden oluşur. Daha sonra bu cisimleri içerecek ve gölge dokusu düzlemine paralel olan yeni bir P perspektif kesik piramidi oluşturulur. Oluşan bu kesik piramidin tepe noktası p 'nin kesik piramide olan uzaklığı n parametresiyle belirlenir. Bu parametre perspektif bükmenin miktarını belirler küçük n değerleri standart perspektif gölge izdüşümü dönüşümüyle sonuçlanırken büyük n değerleri düzgün gölge izdüşümü dönüşümüyle sonuçlanır. En son işlem olarak oluşturulan bu P perspektif izdüşümü ile sahnedeki cisimlere ve ışığa uygulanır. Işık doğrusal olduğundan ve ışığın yönü P kesik piramidini dik kestiğinden, dönüşümden sonra ışığın yönü ve tipi değişmez.

P kesik piramidinin parametreleri en kolay ışık uzayında seçilir. Işık uzayı koordinat sistemi şu şekilde oluşturulur: (Şekil 2.26) Sistemin y eksenini ışık yönünün tersidir. Noktasal ışık kaynakları için noktasal ışık kaynağının yönü kullanılır. Z eksenini y eksenine dik ve kamera bakış yönü vektörünün oluşturduğu düzlem üzerinde olacak şekilde seçilir. Son

olarak da x eksenini dikgen bir koordinat sistemi oluşturmak için y ve z eksenlerine aynı anda dik olacak şekilde seçilir. Noktasal ışık kaynaklarında da ışık uzayı bu şekilde oluşturulur. Fakat bu işlemden önce ışık, kendi perspektif izdüşümü dönüşümü kullanılarak doğrusal ışık tipine dönüştürülür. Oluşan yeni koordinat sisteminde gölge dokusu düzlemi, xz düzlemine paralel olmaktadır.



Şekil 2.26 – Işık uzayında P sanal kesik piramidinin oluşturulması (Wimmer et al., 2004)

2.2.2.4. Yamuk gölge izdüşüm dönüşümü

Yamuk gölge izdüşüm dönüşümünde kameranın kesik piramidi düzgün ışık-izdüşüm uzayına dönüştürülür. Daha sonra yakın kırpma düzlemi üzerinde oluşan 2 boyutlu şekli içeren bir yamuk oluşturulur. En son olarak da bu yamuğun köşeleri diğer perspektif izdüşüm matrislerinde olduğu gibi (-1, 1) aralığındaki koordinat sistemine taşıyan yeni bir matris hesaplanır. Oluşan yeni matris, düzgün ışık-izdüşüm uzayını sadece bu yamuğu içeren yeni bir uzaya taşır. Bu matris düzgün ışık-izdüşüm matrisiyle çarpıldığında yamuk izdüşüm matrisi bulunmuş olur. Burada yamuk kullanılmasındaki asıl amaç gölge dokusunu daha iyi kullanmaktır (Martin et al., 2004). Çünkü gölge dokusu sadece kamera tarafından görülebilecek alanları içerir. Yamuğun dar kısmı diğer kısımlara göre daha fazla esneyeceğinden bu bölümler gölge dokusunda

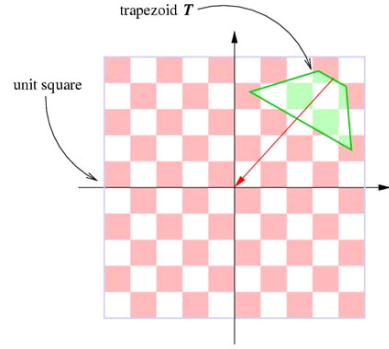
daha geniş alan kaplayacaktır. Kameraya yakın noktalar yamuğun dar kısmına yakın olduklarından bu bölümler için ayrılan gölge dokusu daha geniş olur. Bu da pürüzlenme hatalarını minimuma indirir.

Kamera kesik piramidinin ışık izdüşüm uzayında oluşturduğu yamuğu birim kareye dönüştüren matris T_1 matrisin çarpılmasıyla oluşur:

- T_1 tepe kenarının ortasını merkeze dönüştürür ($u = (x_u, y_u, z_u, w_u)$ ve $v = (x_v, y_v, z_v, w_v)$ vektörleri ara sonuçları tutar).

$$u = \frac{(t_2 + t_3)}{2}$$

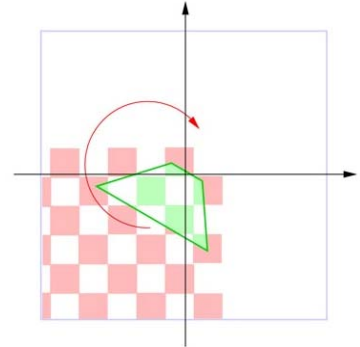
$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_u \\ 0 & 1 & 0 & -y_u \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



- T yamuğu merkezin çevresinden R uygulanarak, tepe kenarı x-ekseni ile aynı doğrultuda olacak şekilde döndürülür.

$$u = \frac{t_2 - t_3}{|t_2 - t_3|}$$

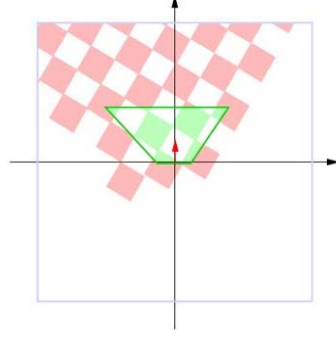
$$R = \begin{bmatrix} x_u & y_u & 0 & 0 \\ y_u & -x_u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



- 2. adımdan sonra (t_0, t_3) ve (t_1, t_2) kenar köşelerini içeren iki kenar çizgisinin kesişimi i , T_2 uygulanarak merkeze dönüştürülür.

$$u = R * T_1 * i$$

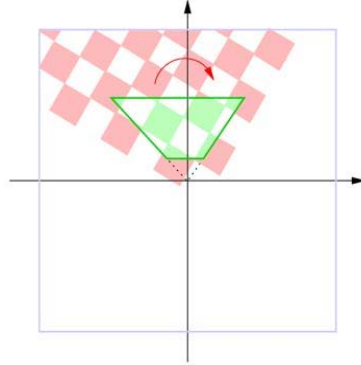
$$T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_u \\ 0 & 1 & 0 & -y_u \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



- Bir sonraki adımda yamuk y-eksenine simetrik olması için H ile paralel eğilir, yani alt kenarın merkezinden geçen çizgi ile üst kenarın ortasından geçen çizgi y-ekseni ile doğru orantılıdır.

$$u = \frac{(T_2 * R * T_1 * (t_2 + t_3))}{2}$$

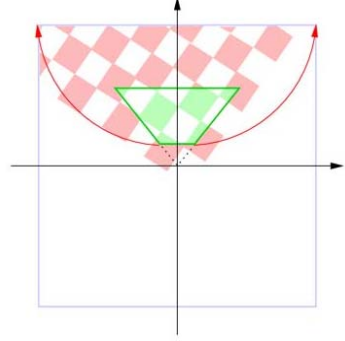
$$H = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-x_u}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



- Yamuk S_1 uygulanarak, (t_0, t_3) ve (t_1, t_2) kenar köşelerini içeren iki kenar çizgisi arasındaki açı 90 derece olacak şekilde ölçeklendirilir ve böylece üst kenar ve x-ekseni arasındaki mesafe 1 olur:

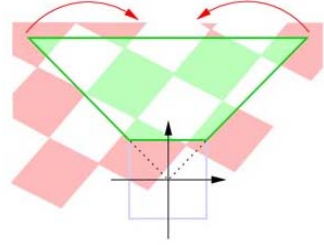
$$u = H * T_2 * R * T_1 * t_2$$

$$S_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{x_u} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{y_u} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



- N dönüşümü yamuğu dikdörtgene dönüştürür:

$$N = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

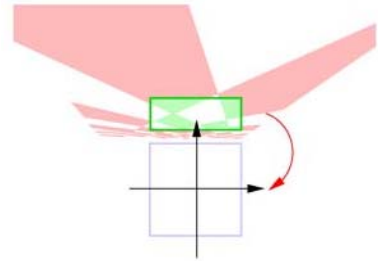


- Dikdörtgen, merkezi eksen merkeziyle kesişene kadar y-ekseni boyunca çevrilir. Bu işlem T_3 uygulanarak yapılır. Bu çevrilme sonucunda dikdörtgen aynı zamanda x-ekseni ile de simetriktir:

$$u = N * S_1 * H * T_2 * R * T_1 * t_0$$

$$v = N * S_1 * H * T_2 * R * T_1 * t_2$$

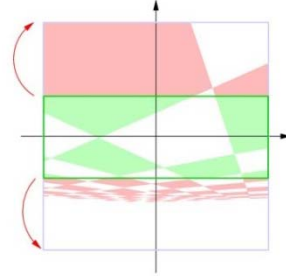
$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{y_u + y_v}{w_u + w_v} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



- Son adımda dikdörtgen y-ekseni boyunca S_2 ile ölçeklenir böylece dikdörtgen birim küpün ön yüzünü kapsamış olur:

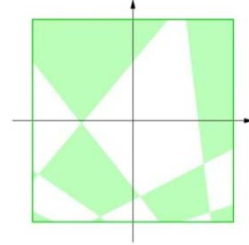
$$u = T_3 * N * S_1 * H * T_2 * R * T_1 * t_0$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-w_u}{y_u} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Yamuk izdüşümü dönüşümü N_t şu şekilde hesaplanabilir:

$$N_T = S_2 * T_3 * N * S_1 * H * T_2 * R * T_1$$



2.2.2.5. Düzlem en uygun gölge izdüşüm dönüşümü

Düzlem en uygun izdüşüm dönüşümünün hesaplanması için her sahne için önceden bir odak düzlemi belirlenir. Bu odak düzlemi üzerine düşecek gölgelerin minimum hataya sahip olması amaçlanmıştır (Chong et al., 2004). İzdüşüm matrisleri, koordinat sistemini ışık-bakış uzayından ışık izdüşüm uzayına aktarır.

$$V_p = P * V_e$$

Yukarıdaki eşitlikte P izdüşüm matrisi, V_e ışık-bakış uzayında herhangi bir nokta, V_p ise bu noktaya ışık-izdüşüm uzayındaki karşılığıdır. İzdüşüm matrislerinin doğrusal çözüm uygulanarak bulunabilmesi için herhangi 4 ü aynı düzlem üzerinde olmayan 5 farklı

nokta ve bu noktaların ışık-izdüşüm uzayındaki karşılıklarını bilmek yeterlidir. Düzlem en uygun izdüşüm matrisi yönteminde bu özelliklerden yararlanılmıştır. Işığın ışık bakış uzayındaki konumu ve bunun ışık-izdüşüm uzayındaki karşılıkları bilinmektedir. Bu şekilde 4 ayrı noktanın 2 uzayda da konumları bilinmesi gerekmektedir. Bunun için bakış kesik piramidinin önceden belirlenen düzlemi kestiği noktalar kullanılır. Bu noktaların ışık-bakış uzayındaki koordinatları matris çarpımıyla hesaplanabilir. Işık-izdüşüm uzayında da birim küpün köşelerinde olmaları amaçlanmıştır. Elbette ki seçilen bu 4 nokta düzlem üzerinden seçtikleri için izdüşüm matrisini hesaplamak için kullanılamazlar. Bu yüzden bu noktalardan birisi bakış noktasına doğru bir miktar ötelenir. Son olarak bu 5 noktanın iki uzaydaki koordinatları kullanılarak izdüşüm matrisi çıkarılır.

2.2.2.6. Logaritmik gölge izdüşüm dönüşümü

Logaritmik gölge izdüşümü dönüşümü makalesinde (Lloyd et al., 2007) herhangi bir perspektif dönüşümün hata oranını belirleyecek genel bir fonksiyon üretilmiştir. Daha sonra bu fonksiyon perspektif pürüzlenme ve izdüşüm pürüzlenme etkisi olarak 2 parçaya bölünmüştür. İzdüşüm etkisini alçaltmak mümkün değildir. Betimlenen yüzeylerin bakış yönüne paralel olmasından kaynaklanmaktadır. Bu fonksiyon önce iki boyutta oluşturulup daha sonra 3. boyuta geçilmiştir. 2 boyutlu şu şekilde oluşturulmuştur:

Diğer gölge izdüşüm yöntemlerinde olduğu gibi Logaritmik gölge izdüşüm dönüşümünde de hata fonksiyonunun perspektif etkisi minimum yapacak bir dönüşüm geliştirilmiştir. Dönüşüm, hata fonksiyonundaki perspektif etkisini diğer yöntemlere göre çok daha iyi düşürse de, matris çarpımıyla ifade edilemeyen logaritmik bir dönüşüm olduğundan

günümüz donanımında diğer dönüşüm yöntemlerine alternatif olabilecek performansta uygulanması mümkün değildir. Bunun yanı sıra makalede, logaritmik gölge izdüşümü dönüşümünün günümüz donanımında matris ile ifade edilen diğer dönüşümlerin performansına rakip olabilmesi için donanıma yapılması gereken değişikliklerden de bahsedilmiştir.

2.2.3. Sahne Bölümleme Yöntemleri

Sahne bölümleme yöntemleri, gölge dokuları yöntemlerinde dokunun yapısı ve kullanılan izdüşüm yöntemine paralel olarak gölge kalitesini yükseltmek amaçlı kullanılır. Bu yöntem böl ve yönet mantığındadır. Sahne belirli bölümlere ayrılarak her bölüm için ayrı gölge dokusu ya da gölge izdüşümü dönüşümü kullanılır. Sahne bölümlere ayrıldığı için gölge izdüşümü yöntemleri daha kaliteli sonuçlar üretebilecek dönüşümler üretebilir. Bunun yanı sıra sahneyi tek bir bütün olarak betimlemeden farklı olarak daha fazla doku hafızası, daha fazla betimleme aşaması yapılması gerekmektedir bu da performans ve hafıza kullanımını olumsuz etkilemektedir. Bu kategorideki yöntemler gölge dokusu ve gölge izdüşüm dönüşümü yöntemlerinin kalitesini aynı oranda etkilediği için tez kapsamında sadece bu iki kategori karşılaştırılmış bu kategorideki yöntemler referans olarak verilmiştir. Bu kategoride, Uyarlanabilir gölge eşlemeleri, Dinamik uyarlanabilir gölge eşlemeleri, ızgara ile bölünmüş gölge eşlemeleri, yüzey bölümleme ve paralel kesilmiş gölge eşlemeleri yöntemleri incelenecektir.

2.2.3.1. Uyarlanabilir gölge eşlemeleri

Uyarlanabilir gölge eşlemeleri yüksek kalite gölge dokularının düzgün dağılmış doku çözünürlükte olmaması gerektiğine dayanarak geliştirilmiştir (Fernando et al., 2001). Sadece gölge sınırlarının olduğu

bölümler daha yoğun örneklendirilmelidir. Bu düşünce üzerine bakış-izdüşüm uzayından gölge sınırlarının olduğu bölümlere daha geniş doku ayırmak amacıyla önceden belirlenmiş hafıza sınırını aşmadan sahne dörtlü ağaç yapısında parçaların hata oranını minimuma indirmek amacıyla parçalara bölünür. Her parça için ayrı gölge dokusu kullanılır. Bu yöntem yüksek hafıza gereksinimleri ve sahne analizi yapmasından dolayı gerçek zamanlı uygulamalara elverişli değildir.

2.2.3.2. Dinamik uyarlanabilir gölge eşlemleri

Dinamik uyarlanabilir gölge eşlemleri, Uyarlanabilir gölge eşlemlerinden farklı olarak 2 gölge dokusu kullanmaktadır. (Lefohn et al., 2005) İlk dokuya uyarlanabilir gölge eşlemi yöntemindeki gölge dokuları yerleştirilmiştir. İkinci dokuda da hangi gölge dokusunun ilk dokuda hangi koordinatlara yerleştirildiği bilgisi saklanır. Böylece uyarlanabilir gölge eşlemleri yöntemindeki dörtlü ağaç yapısı 2 dokuda ifade edilmiş olur. Ağacın 2 dokuda ifade edilmiş olması betimleme işinin tamamen donanımda yapılmasına olanak sağlamış olsa da sahne analizinin karmaşıklığı dar boğaz yaratmaktadır. Yöntem bu yüzden gerçek zamanlı uygulamalara elverişli değildir.

2.2.3.3. Izgara ile bölünmüş gölge eşlemleri

Izgara ile bölünmüş gölge eşlemleri (Arvo, 2004) yönteminde sahne ışığın bakış açısından sabit hücre boyutuyla oluşturulmuş bir ızgara ile bölünür. Bu ızgaranın her hücresi için buluşsal bir ağırlık değeri hesaplanır. Bu ağırlıklar hesaplanırken önce sahne ışığın bakış açısından düşük çözünürlükte geçici bir dokuya betimlenir. Daha sonra bu dokudaki değerler okunarak ızgara hücrelerinin ağırlıklandırılması buluşsal olarak yapılır. Daha sonra bu ağırlıklar kullanılarak ızgara

hücrelerinin doku üzerindeki boyutları değiştirilir. Değiştirilmemiş ızgara hücrelerinin boyutları kullanılarak sahne doku üzerindeki değiştirilmiş ızgara hücrelerine betimlenir. Her hücre için ayrı betimleme işlemi yapılır. Gölgeleme işleminde kullanılmak üzere ızgaradaki hücrelerin öteleme ve ölçeklendirme değerlerinin kaydedildiği ayrı bir doku oluşturulmaktadır. Yapılan işlemlerin kaliteye olumlu etkisi olsa da çok sayıda betimleme işlemi yapıldığı için ve dahası hücre ağırlıklarının hesaplanması için oluşturulan düşük çözünürlüklü dokunun işlemci tarafından okunması gerektiği için, performans olumsuz etkilenir. Yöntem bu yüzden gerçek zamanlı uygulamalara elverişli değildir.



Şekil 2.27 – İzgara ile bölünmüş gölge eşlemleri (Arvo, 2004)

2.2.3.4. Paralel kesilmiş gölge eşlemleri

Paralel kesilmiş gölge eşlemlerinde perspektif pürüzlenme hatalarını minimuma indirme amacıyla kamera kesik piramidi kamera yakın kırpma düzlemine paralel düzlemlerle önceden belirlenmiş sayıda parçalara bölünür. (Zhang et al., 2006) Her parça için ayrı gölge dokusu kullanılır. Bölümleme işlemi sahneden bağımsız olarak yapıldığı için performans diğer yöntemler gibi olumsuz etkilenmez. Makalede, düzlemlerin yerleştirileceği derinlik değerleri bulunmasında 2 ayrı

yöntemden söz edilmiştir. Bu yöntemlerden ilki perspektif pürüzlenme hatalarını minimuma indirmeyi amaçlar. Perspektif pürüzlenme oranını sahnenin tüm derinliklerinde sabit yapan bir s parametresi

$$s = \frac{\ln(z/n)}{\ln(f/n)}$$

Şeklinde hesaplanır. Denklemden z : derinlik, n : yakın kırpma düzleminin derinliği, f : uzak kırpma düzleminin derinliği. Sahne eşit s aralıklarında bölündüğünde:

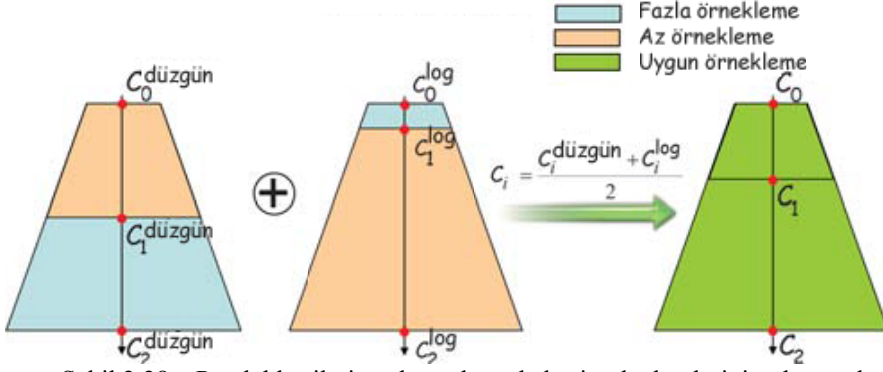
$$\frac{i}{m} = s_i = \frac{\ln(C_i^{log}/n)}{\ln(f/n)}$$

$$C_i^{log} = n(f/n)^{s_i} = n(f/n)^{i/m}$$

Şeklinde hesaplanır. Denklem, m parçaya bölünen sahnenin i . düzleminin derinliğini verir. Fakat bu bölümlerde yakın kırpma düzlemine yakın olan kesim düzlemleri birbirine çok yakın olduğundan bu bölümlerde gereğinden fazla örneklendirme yapılır. Bu yüzden ikinci bir yöntem olarak düzgün bölme yöntemi düşünülmüştür. Bu yöntemde derinlik değerleri m eşit parçaya bölünmüştür bunlardan i .sinin derinliği şu denklemle hesaplanır.

$$C_i^{düzgün} = n + i \frac{f - n}{m}$$

Bu bölümlere ayırma yönteminde de uzak kırpma düzlemine yakın bölümlerde fazla örnekleme yapılmaktadır. Makalede en iyi yöntem olarak bu iki yöntemin aritmetik ortalaması önerilmektedir. Şekil 2.28'de bu en iyi yöntem gösterilmiştir.



Şekil 2.28 – Paralel kesilmiş gölge eşlemede kesim düzlemlerinin oluşturulması (Zhang et al., 2006)

Yukarıda bahsedilen sahne bölümlene yöntemlerinden en verimli olanı budur. Ayrılan bölüm sayısı kullanıcıya kalmıştır. Bu yüzden gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılması mümkündür.

2.3. Melez Yöntemler

Gölge hacmi yöntemlerinde performansı etkileyen başlıca etmenlerden biri de oluşturulan siluet geometrisinin karmaşıklığı yüzünden şablon belleğin hazırlanmasında kaybedilen zamandır. Melez yöntemler siluetin belirlenmesi kısmını gölge hacmi yöntemlerinde yapıldığı gibi tüm cisimler için hazırlamaktansa önce gölge dokusu yöntemlerinde olduğu gibi derinlik değerlerini bir dokuya yazar. Daha sonra bu dokuda iki boyutlu görüntü işleme algoritmalarından biri olan kenar tespit algoritması uygulanarak tespit edilen kenarlardan siluet geometrisi oluşturulur (Mc Cool, 2000; Govindaraju et al., 2003; Sen et al. 2003). Bu siluet geometrisi yine gölge hacmi yöntemlerinde olduğu gibi kullanılmaktadır. Fakat bu yöntem, her iki yöntemi birden uyguladığı için diğer yöntemlere göre performans açısından daha zayıf kalmaktadır. Ayrıca gölge dokusu yöntemlerinde bahsedilen pürüzlenme

ve diğer hatalardan da etkilendiği için kalite olarak da diğer yöntemlerden zayıf kalmaktadır. Hem performans hem kalite açısından zayıf kaldığı için diğer yöntemlerle karşılaştırılması yapılmamıştır.

3. KARŞILAŞTIRMA KISTASLARI

Gölgelendirme yöntemleri önce performansları ve kullandıkları hafıza miktarlarına göre ve sonra da oluşan gölgelerin kalitelerine göre karşılaştırılmıştır.

3.1. Performans ve Hafıza Karşılaştırmaları

Öncelikle gölgelendirme yöntemlerinin gerektirdiği hafıza miktarları belirtilip daha sonra performans karşılaştırılması yapılacaktır. Gölgelendirmede kullanılan her iki yöntemde de yani gölge hacimlerinde ve gölge dokularında gölgelendirme işlemi 2 aşama da yapılır. Gölge hacimlerinde önce cisim silüetleri belirlenerek uzatılır ve şablon arabelleği doldurulur. Daha sonra bu şablon arabelleği kullanılarak sahne gölgelendirilir. Gölge dokularında ise öncelikle gölge dokusu oluşturulur ve daha sonra bu doku kullanılarak gölgelendirme işlemi yapılır. Bu 2 aşama ayrı ayrı hazırlık aşaması ve gölgelendirme olmak üzere 2 başlıkta incelenecektir

3.2. Kalite Karşılaştırması

Gölge hacmi yöntemlerinde işlemler bakış izdüşüm uzayında yapıldığı için sert gölgeler kusursuz sonuç vermektedir. Bu yüzden gölge hacmi yöntemiyle oluşturulmuş gölgelerini kalitesi incelenmeyecektir. Burada gölge dokusu kullanan yöntemlerin kalite karşılaştırmaları yapılacaktır. Öncelikle gölge doku yöntemlerinde kalitenin düşmesine neden olan kıstaslar açıklanıp daha sonra da bu kalite düşmesini skorlayan fonksiyonlar incelenecektir.

3.2.1. Gölge dokusu yönteminin kalitesini etkileyen kısıtlar

Gölge dokusunun kalitesi öncelikle dokunun çözünürlüğünden yani sahnenin ışık bakış izdüşümünden alınan derinlik örneklerinin sayısı ile orantılıdır. Daha düşük örnek almak gölgelerde pürüzlenmelere yol açacaktır. Daha sonra ışık izdüşümünde kullanılan dönüşümün sahnedeki cisimler için dokuda ayırdığı yer alan kaliteyi etkiler. Bakış noktasına uzak cisimler için daha az derinlik örneği gerekirken, bakış noktasına yakın cisimler için daha fazla derinlik örneği gerekir. Uzaktaki cisimler için fazla örnek harcamak doku alanını israfli kullanıldığını gösterirken, yakın cisimler için az örnek kullanmak gölgelerde pürüzlenmelere neden olacaktır.

İkinci bölümde de anlatıldığı gibi gölge dokularında derinlik karşılaştırılması yapılmaktadır. Matris ile ifade edilen perspektif izdüşümlerinde derinlik değerleri doğrusal değişim göstermez. Bu yüzden sınırlı ondalıklı sayı duyarlılığına sahip gölge dokusunda saklanan derinlik değerlerinde ondalıklı sayı duyarlılığı hataları olur.

Son olarak yukarıda bahsedilen izdüşüm dönüşümlerinin çoğu sahneye ve bakış yönüne bağlı olarak değişim gösterir. Akıcı bir görüntüde bakış noktası hareket ederken kullanılan izdüşüm dönüşümlerinden bakış noktasına bağlı olanlarda ani değişimler olabilir bu da gölge hatalarının ani değişmesine neden olmaktadır.

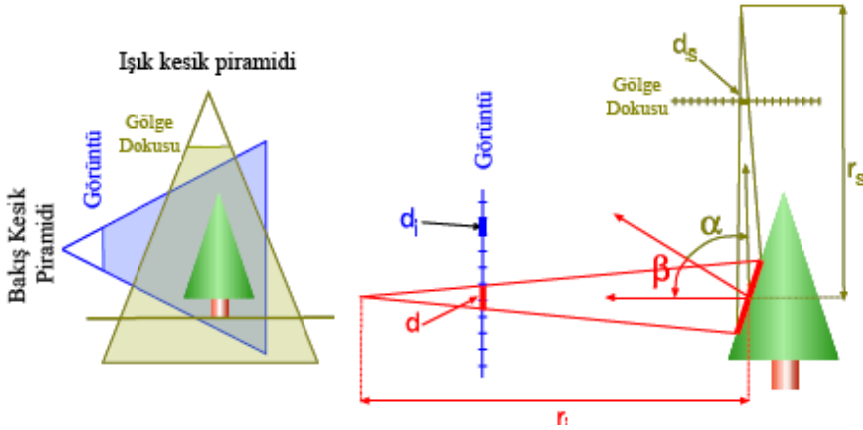
3.2.1.1. Perspektif ve izdüşümü pürüzlenmesi

Gölge dokuları yöntemlerinde noktasal ışık kaynaklarında perspektif izdüşümü dönüşümünü ışık düzleminde pürüzlere neden olur. Gölge dokusundaki her piksel sahnede $d_s \times d_s$ boyutlarında bir dörtgenden geçen kesik bir piramidi ifade etmektedir. d_s burada gölge

dokusunun çözünürlüğünün çarpmaya göre eşleniği olmaktadır. Dokunun çözünürlüğünü arttırmak için d_s 'in azaltılması gerekir. Gölge dokusundaki bir pikselin ifade ettiği piramidin r_s uzaklıktaki gölgelendirilecek yüzeyi α açısıyla kestiği düşünülürse, kesilen yüzeyin alanı ortalama $d_s r_s / \cos \alpha$ olmaktadır. Bakış noktasından görülen resimde bu kesilen yüzeyinin ortalama alanı ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$d = d_s \frac{r_s \cos \beta}{r_i \cos \alpha}$$

β burada yüzey normali ile bakış yönü arasındaki açıdır. r_i ise bakış noktasının kesişim noktasına olan uzaklığıdır.



Şekil 3.1 – Gölge dokusundaki bir pikselin gölgelendirilen yüzeye izdüşümünden sonra oluşan alanın bakış düzlemi üzerindeki izdüşümünün alanı (Stamminger, 2002)

Gölge dokusunda yetersiz örnek olması durumu d 'nin görüntü piksel boyutu d_i den büyük olduğu durumlarda görülür. Bu durum $d_s r_s / r_i$ değeri büyüdüğünde yani kamera gölge sınırı olan bir bölüme odaklandığında oluşur. Bu yetersiz örnekleme sonucunda oluşan gölge pürüzlü olur ve bu tür pürüzlere perspektif pürüzlenme denir.

$\cos \beta / \cos \alpha$ değerinin büyüdüğü durumlarda da izdüşümü pürüzlenme hataları oluşur. Bu durum ışık ışınlarının yüzeye neredeyse paralel olduğu durumlarda görülür. Gölge tamamen yüzey üstüne yayılır.



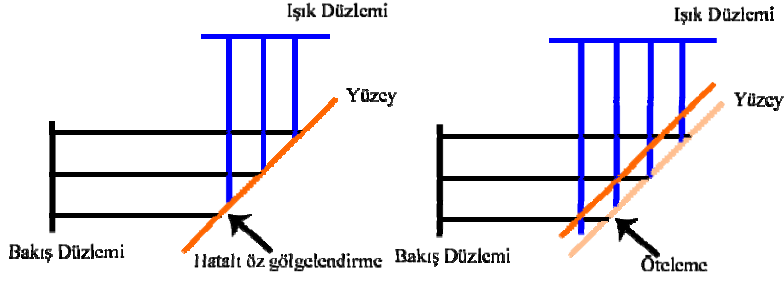
Şekil 3.2 – Perspektif pürüzlenme (Stamminger, 2002)

3.2.1.2. Gölge akneleri

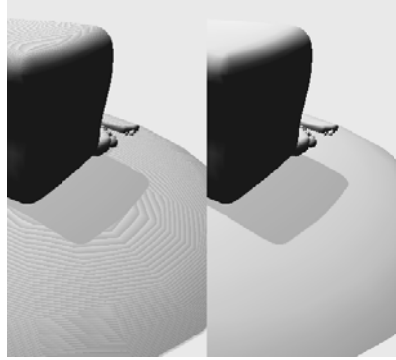
Gölge akneleri, öz gölgelendirme sırasında ışık düzlemi üzerinde alınan örnekler ile kamera düzlemi üzerinde alınan örneklerin öz gölgelendirilen yüzeyi kestikleri noktaların örtüşmemesinden kaynaklanan hatalı gölgelerdir. Şekil 3.3'te solda bu duruma örnek gösterilmiştir

Gölge aknelerini önlemek amacıyla, gölge dokusu oluşturulduktan sonra gölgelendirme testi yapılırken gölgelendirilecek olan yüzey bir miktar ötelenir. Bu ötelemenin miktarı iyi belirlenmelidir çünkü fazla öteleme yüzeyde gölgelendirilmesi gereken yerlerde gölgelendirme

testinin hatalı sonuçlanmasına neden olabilir. Şekil 3.3'te sağda ötelemeden sonraki sonuç görünmektedir.



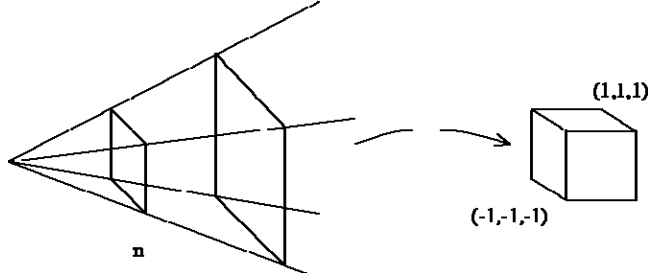
Şekil 3.3 – Gölge aknelerinin nedeni ve çözümü



Şekil 3.4 - Gölge aknesi

3.2.1.3. Derinlik değerlerinin dağılımı

Standart perspektif izdüşümü dönüşümü yakın ve uzak düzlemlerin uzaklığı verilen bir kesik piramidi birim küpe dönüştüren bir matristir.



Şekil 3.5 – Kesik piramidin birim küpe dönüşümü

Bu matris oluşturulurken, perspektif izdüşümü dönüşümlerinde V vektörünün x değeri x/z , y değeri de y/z ye dönüşmesi istenmektedir. (Piramidin tepe açısının göz ardı edildiği durumda)

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & b \\ 0 & 0 & c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ az + c \\ bz + d \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \frac{x}{bz + d} \\ \frac{y}{bz + d} \\ \frac{az + c}{bz + d} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Yukarıdaki eşitlikte $x/(bz + d)$ 'nin x/z olması istendiği için b ve d değerlerinin 1 ve 0 olması gerektiği görülmektedir. Bu değerler yerine konulduğunda:

$$\begin{bmatrix} x/z \\ y/z \\ (az + c)/z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Vektörü bulunur. Yakın kırpma düzleminin derinliği kullanıldığında sonuç vektörü'nün derinlik değeri -1 uzak kırpma düzleminin derinliğini kullanıldığında sonuç vektörün derinlik değerinin 1 olması istendiğine göre:

$$(an + c)/n = -1$$

$$(af + c)/f = 1$$

$$a = \frac{f + n}{f - n}$$

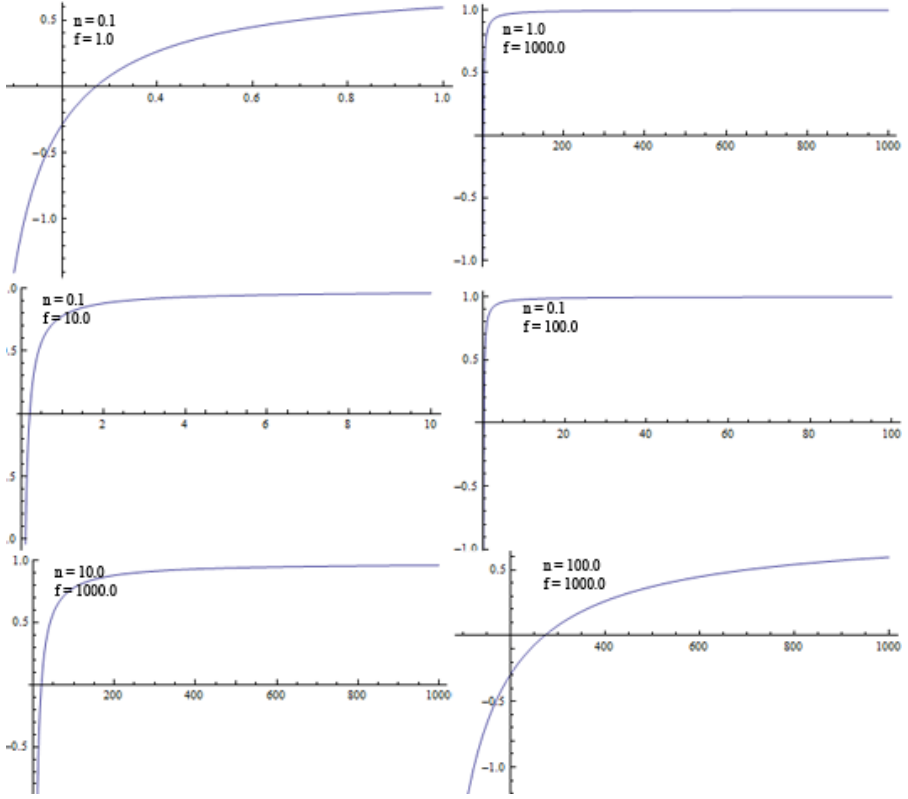
$$c = -\frac{2fn}{f - n}$$

Bulunan perspektif izdüşüm matrisi:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{f+n}{f-n} & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{2fn}{f-n} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} x/z \\ y/z \\ \frac{f+n}{f-n} - \frac{2fn}{(f-n)z} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Oluşan matris ve matrisin bir vektörle çarpıldığında oluşan sonuç incelendiğinde sonuç vektörünün derinlik değeri $1/z$ 'ye göre lineer değişim göstermektedir.

Şekil 3.6'da örnek f ve n değerleri için perspektif izdüşümünden sonra oluşan derinliğin fonksiyon grafikleri gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi perspektif izdüşüm dönüşümünden önceki derinlik değerleri arttıkça perspektif izdüşümünden sonraki derinlik değerlerindeki değişim miktarı f/n ile doğru orantılı olarak azalıyor.



Şekil 3.6 – Perspektif izdüşümünden önce ve sonra derinlik değerlerinin değişimi

Yukarıda belirtildiği gibi perspektiften önceki derinlik arttıkça perspektif izdüşümünden sonraki z değerlerinin değişim miktarı azaldığı için, kesik piramide uzak noktaların yeni derinlik değerleri arasındaki fark çok düşük olur (Brabec et. al. 2002). Günümüz donanımında gölge dokusuna 32 bit ondalıklı sayı tipinde veriler kaydedilebilmektedir. 32 bitlik ondalıklı sayılar ile bu farkı ayırt edebilecek duyarlılığı yakalayabilmek mümkün değildir ve bu yüzden ondalıklı sayı duyarlılık hatalarına oluşur.

3.2.1.4. Gölge kalitesinin devamlılığı

Gölge izdüşüm dönüşümlerinin çoğu sahneye ve bakış yönüne göre üretilir. Akıcı bir görüntüde bakış noktası hareket ederken sahnede bakış noktasından görülen gölge alan cisimler ve bakış noktasının konumu değişir. Bununla birlikte gölge izdüşümü dönüşümü de değişir. Bakış noktası, bakış yönü ya da ışık yönü değişikliklerinde dönüşüm gölge dokusu üzerindeki cisimler için ayrılan alanlarda ani değişikliklere neden oluyorsa, gölge kalitesinde ani değişiklikler olur.

3.2.2. Kalite skorumlama fonksiyonları

Gölge dokusu yöntemlerinin kalite karşılaştırılması yapılırken öncelikle gölge izdüşüm dönüşüm yöntemlerinin kaliteleri karşılaştırılacaktır. Daha sonra bu yöntemlerden en kaliteli olanı seçilip o yöntem kullanılarak gölge dokusu yapılarının kaliteleri karşılaştırılacaktır.

3.2.2.1. İzdüşüm dönüşümü skorumlama fonksiyonları

Öncelikle izdüşüm dönüşümlerinden sonra oluşan derinlik değerlerinin dağılımları incelenecektir. Örnek sahnelerde izdüşüm dönüşümlerinin derinliği nasıl değiştirdiğinin fonksiyonları verilip, fonksiyonların grafikleri incelenecektir.

Dönüşüm yöntemlerinin gölge dokusunu ne kadar etkili kullandıkları karşılaştırılacaktır. Gölge dokusunun verimli kullanılabilmesi için gölge dokusunun her pikseli sahnede eşit sayıda kullanılması gerekir. Öncelikle örnek sahnede gölgelendirme yapmak yerine gölgelendirme yaparken kullanılan derinlik değerinin gölge dokusunda hangi koordinatlara yazıldığı ekranda gösterilecektir. Oluşan

görüntünün kırmızı kanalında gölge dokusunun x koordinatları yazılırken yeşil kanalında y koordinatları yazılmıştır. Mavi kanalı ise sahnede herhangi bir cismin olmadığı yani gölgelendirme yapılmayan alanları göstermektedir. Bu görüntünün kırmızı ve yeşil kanalları tek bir değer gibi düşünülerek histogramı çıkartılacaktır. Verimli kullanılan bir gölge dokusunda oluşan histogram düzgün dağılım gösterecektir. Bu yüzden bulunan bu histogram düzgün dağılıma ne kadar yakınsa gölge dokusu o kadar etkili kullanılıyor demektir. Histogramın düzgün dağılıma yakınlığı ise ortalama karesel hata ile hesaplanmıştır. Aynı sahnede, aynı yöntemle, farklı bakış açılarından çıkarılmış histogramların düzgün dağılıma olan uzaklıkları hesaplanarak, bakış açısının hata oranına etkisini azaltmak amacıyla ortalamaları alınacaktır. Oluşan sonuç yöntemin dokuyu etkili kullanıp kullanmadığı hakkında bilgi verir.

3.2.1.1. bölümde anlatılan perspektif ve izdüşümü hatası fonksiyonları kullanılarak tüm sahne için farklı bakış açılardan hata oranlarını gösteren görüntüler üretilip bu görüntülerin ne kadar hatalı oldukları PSNR'ları bulunarak hesaplanacaktır. Bakış açısının hata oranına etkisini azaltmak amacıyla farklı bakış açılarından bulunan PSNR'ların ortalaması alınıp yöntemin genel hata oranı bulunacaktır. Bu skorlama fonksiyonu önceki izdüşüm dönüşümlerinden sonra oluşan z dağılımlarından ve gölge dokusunu ne kadar etkili kullandıklarından etkilendiği için bu fonksiyon kalite skorlama fonksiyonu olarak kullanılacaktır.

3.2.2.2. Gölge dokusu yapısı skorlama fonksiyonu

Gölge izdüşümü dönüşümünün etkisini minimuma indirecek yöntem seçilip bu yöntemde farklı bakış açılarında gölgelendirme yapılacak. Daha sonra bu gölgelendirmelerin gölge hacmi yöntemiyle

oluşturulan gölgeden ne kadar hatalı olduğunu bulmak için her bakış açısı için PSNR değerleri hesaplanıp bakış açısının etkisini azaltmak için bu değerlerin ortalaması alınarak Gölge dokusu yapısı skortlama fonksiyonu olarak kullanılacaktır.

4. KARŞILAŞTIRMALAR

4.1. Performans ve Hafıza

Hafıza ve gölge karşılaştırmaları yapılırken kullanılan semboller aşağıdaki gibidir.

E	Cisimlerin ortalama kenar sayısı
n	Sahnedeki cisim adedi
p x q	Şablon arabelleğinin çözünürlüğü
r x s	Gölge dokusunun çözünürlüğü
k x j	Görüntü arabelleğinin çözünürlüğü
t	Gölge dokusu yapısının her piksel için gerektirdiği veri boyutu

Gölge hacmi yöntemlerinde ilk aşama olan şablon değerlerinin doldurulması, en kötü durumda $O(E n)$ 'dir. İkinci aşaması olan gölgelendirmede de en kötü durum $O(E n k j)$ dir. (Woo et al, 1990). Hafıza kullanımı ise ortalama kenar sayısına ve cisim adedine bağlıdır bu yüzden hafıza kullanımı da $O(E n)$ olur.

Gölge dokusu yöntemlerinde ise ilk aşama olan gölge dokusunun oluşturulması $O(E n r s)$ zamanda ve ikinci aşama olan gölgelendirme aşaması $O(1)$ zamanda yapılır. Hafıza kullanımı ise $O(r s t)$ şeklindedir.

4.2. Kalite

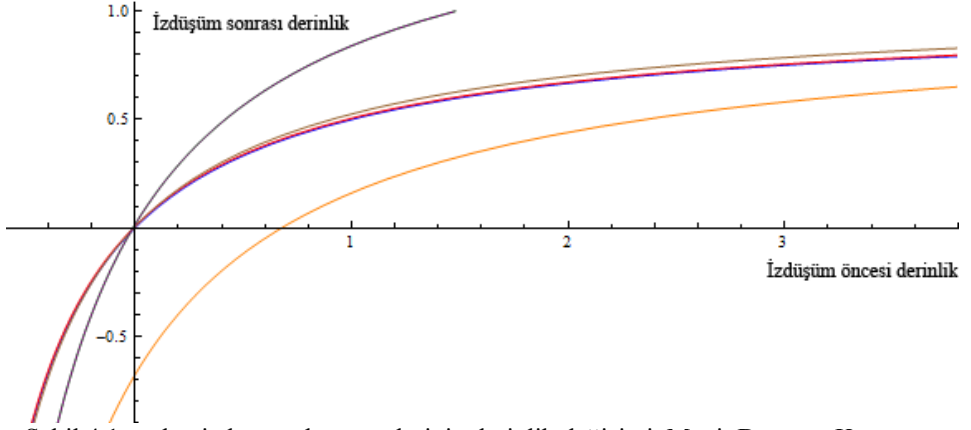
Ogre3D açık kaynak kütüphanesi ve C++ ortamı kullanılarak hazırlanan programda, şablon gölgeler ve gölge izdüşüm dönüşümlerinden düzgün, odaklanmış düzgün, ışık uzayı perspektif ve düzlem en uygun izdüşüm dönüşümleri hazır olarak kullanılmış, yamuk

ve perspektif izdüşüm dönüşümleri eklenmiştir. Kütüphane ile birlikte gelen derinlik ve varyans gölge yapıları üzerinde de geliştirmeler uygulanmıştır. Hazırlanan programda örnek sahne üzerinde gölge yöntemleri karşılaştırılmıştır. Örnek sahnede birbirine yakın 2 ayrı ışık ile farklı açılardan bakan 4 ayrı kamera kullanılmıştır. Işık kaynakları aynı yönde ve birbirine yakın yerleştirilmiştir. Buradaki amaç, gölge kalitesinin devamlılığı hakkında bilgi sahibi olmaktır. Bakış açıları ise gölgelendirme işleminde en kötü ve en iyi durumları test edebilmek için, ışığa bakan, ışık ile aynı yönde, ışık yönü ile dik kesişen ve rastgele seçilmiş bir yönü içermektedir. Işığa bakan bakış açısı en kötü durum, karşıt kesik piramitler (*dueling frusta*) durumudur, ışık ile aynı yönde bakan bakış açısı ise en iyi durum olan madenci ışığı (*miners lamp*) durumudur. Diğer yönler de ara durumlar olarak seçilmiştir.

4.2.1. Derinlik değerlerinin dağılımı

Bu bölümde izdüşüm dönüşümlerinden sonra derinlik değerlerinin önceki derinlik değerlerine göre değişimleri gösterilmiştir. Grafiklerin x ekseninde izdüşümden önceki derinlik değerleri bulunurken y ekseninde ise izdüşümden sonraki derinlik değerleri bulunur.

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi düzgün, odaklanmış düzgün, perspektif ve ışık uzayı perspektif izdüşüm dönüşümleri derinlik değerlerini hemen hemen aynı şekilde etkilemektedir. Fakat Düzlem en uygun izdüşüm dönüşümü ile yamuk izdüşüm dönüşümü diğerlerinden daha kötü sonuçlar oluşturur.

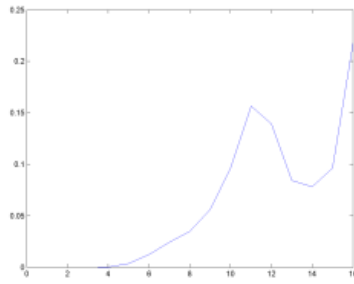
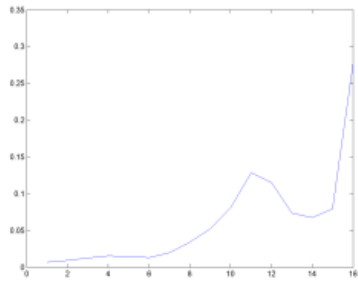
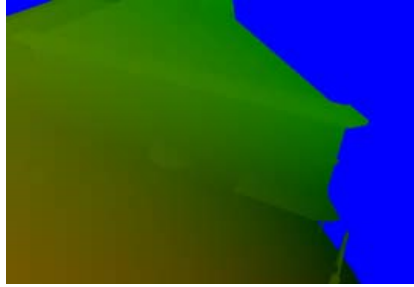
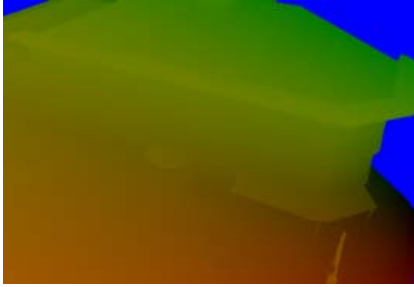


Şekil 4.1- gölge izdüşüm dönüşümlerinin derinlik değişimi. Mavi: Düzgün, Kırmızı: Odaklanmış düzgün, Yeşil: Perspektif, Kahverengi: ışık uzayı perspektif, Turuncu: yamuk, Mor: Düzlem en uygun.

4.2.2. Dokuyu etkin kullanma

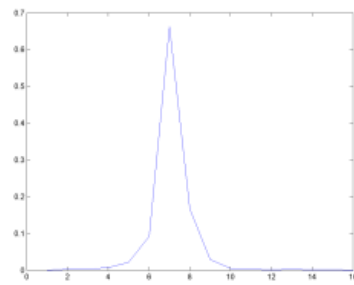
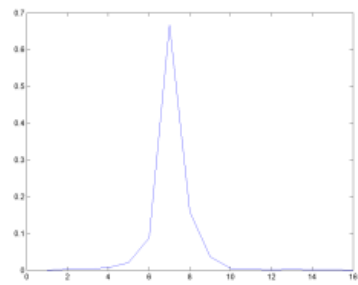
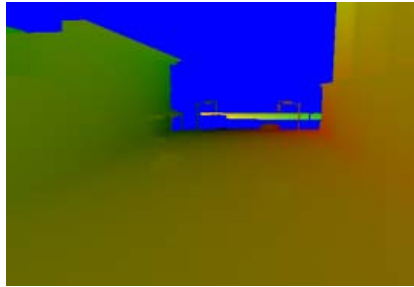
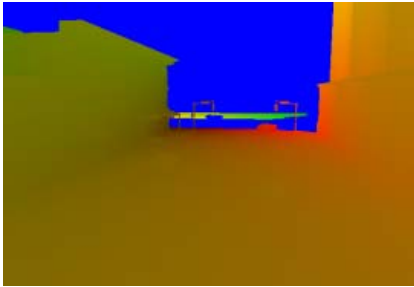
Bu bölümde örnek sahneden farklı bakış açılarından alınan gölge dokusu kullanım dokuları, dokuların histogramları ve bu histogramların düzgün dağılıma olan uzaklıkları gösterilmiştir. Uzaklık değerlerinin hesaplanma yöntemi “3.2.2.1. İzdüşüm dönüşümü skorlama fonksiyonları” konusunda anlatılmıştır. Çizelgelerde sütunlarda ışık konumu değişirken satırlarda bakış açıları değişmiştir. İlk satırda ışık yönünü dik kesen bakış açısı seçilmiştir. İkinci satır ise karşıt kesik piramitler durumunu inceler, kamera ışığa doğru bakmaktadır. Üçüncü satırda en kötü durum olan karşıt kesik piramitler durumuna yakın bir ara durum seçilmiştir. Son satırda ise en iyi durum olan madenci ışığı, ışık ile aynı yönde bakan bakış açısı seçilmiştir.

4.2.2.1. Düzgün gölge izdüşümü dönüşümü



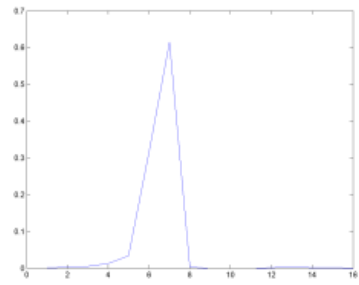
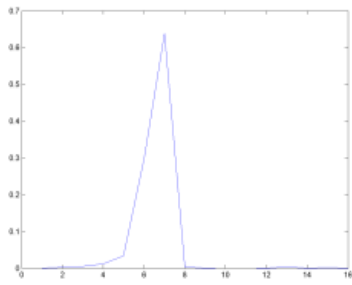
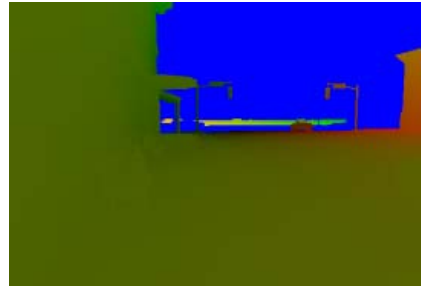
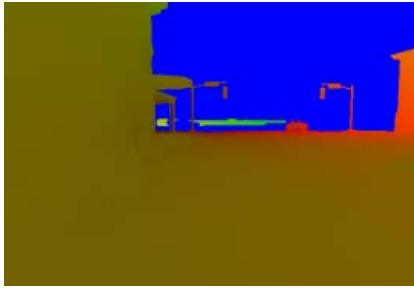
0.0723

0.0658



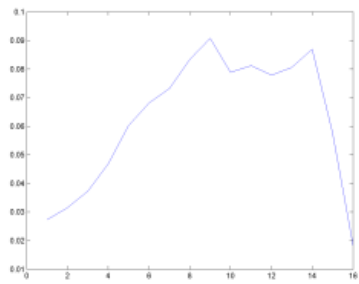
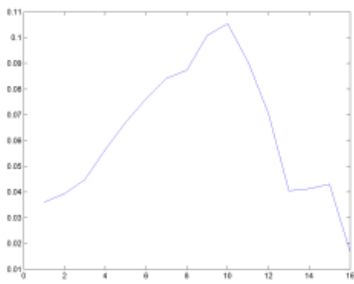
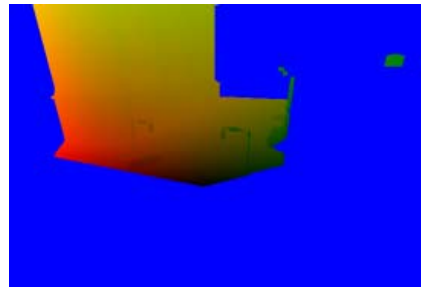
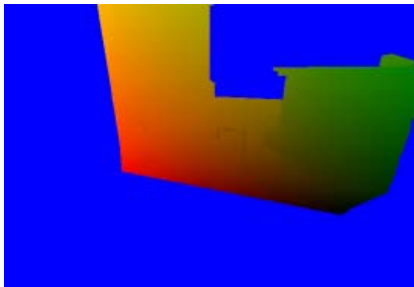
0.4175

0.4146



0.4352

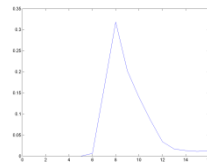
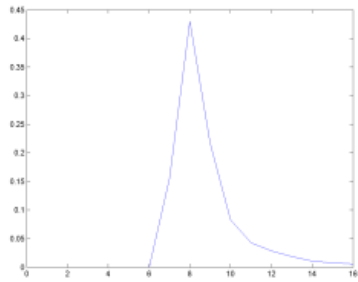
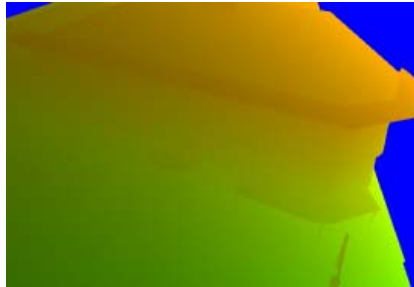
0.4177



0.0104

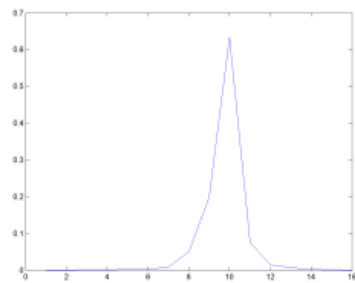
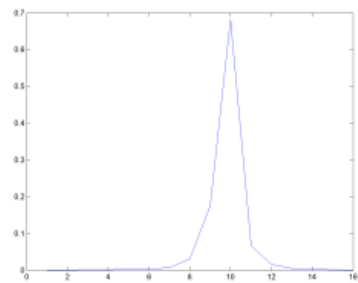
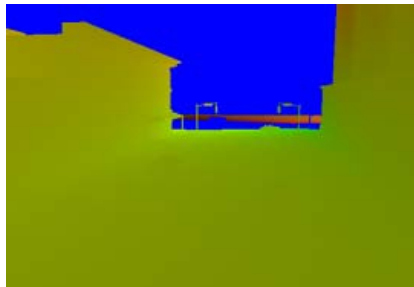
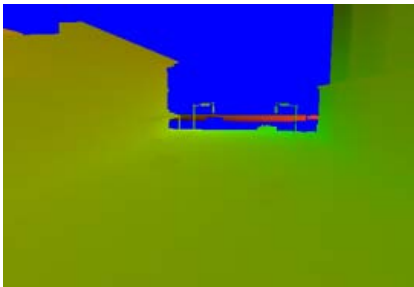
0.0082

4.2.2.2. Odaklanmış düzgün gölge izdüşüm dönüşümü



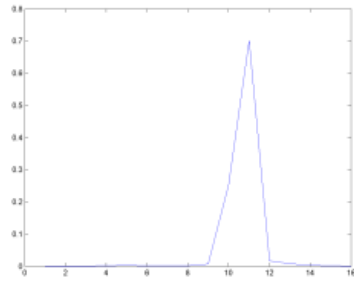
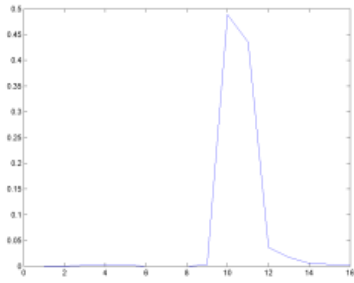
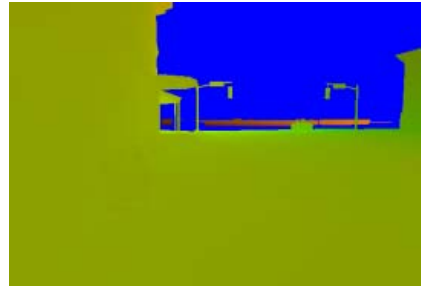
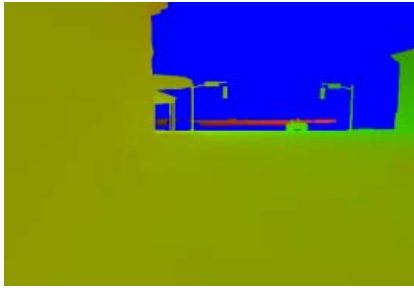
0.2040

0.1340



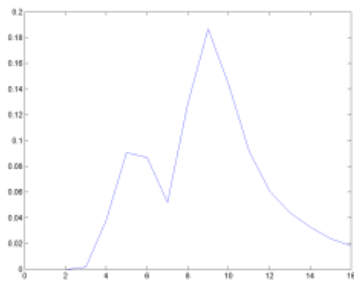
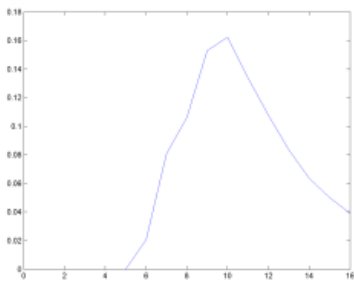
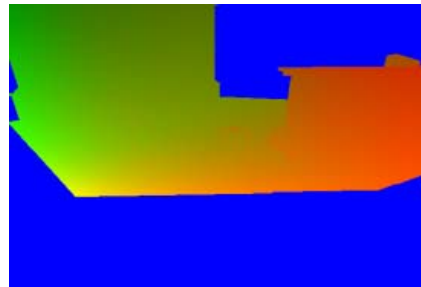
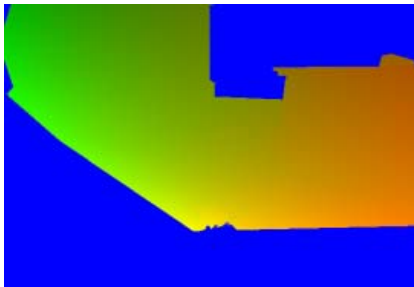
0.4391

0.3865



0.3675

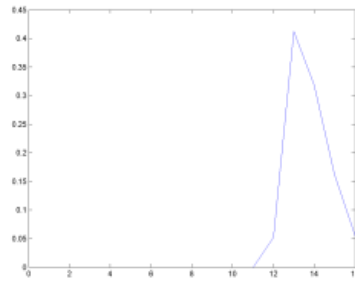
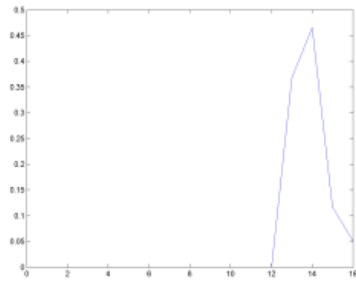
0.4937



0.0498

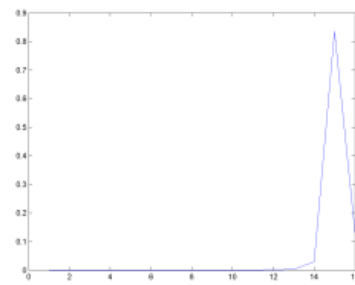
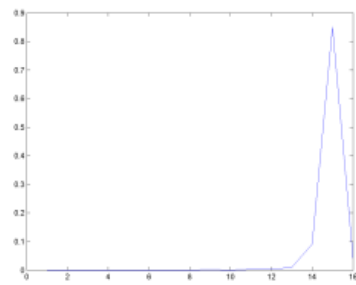
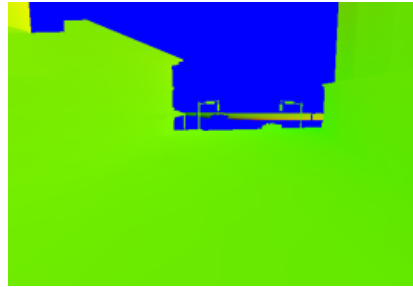
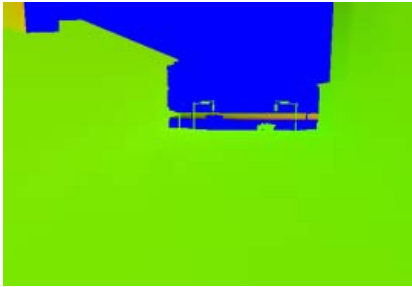
0.0456

4.2.2.3. Perspektif gölge izdüşüm dönüşümü



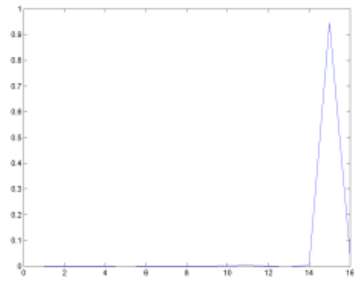
0.3052

0.2409

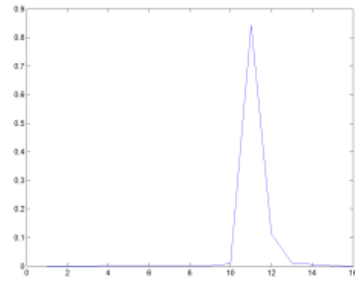


0.6710

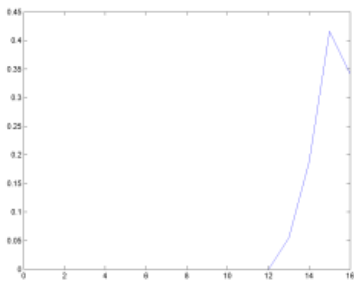
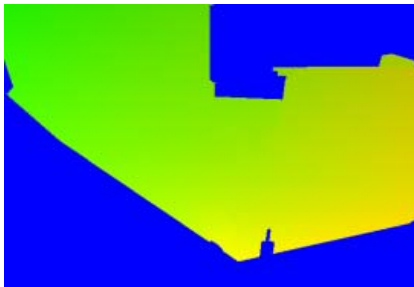
0.6521



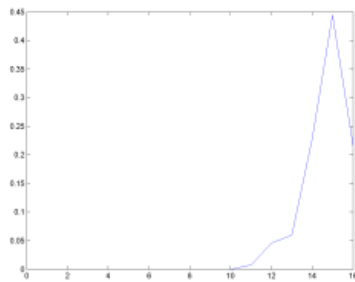
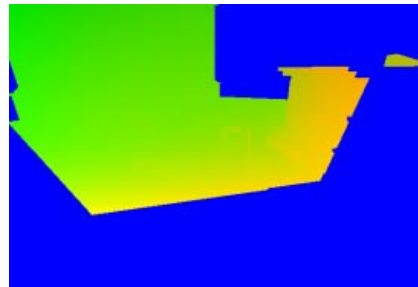
0.8339



0.6636

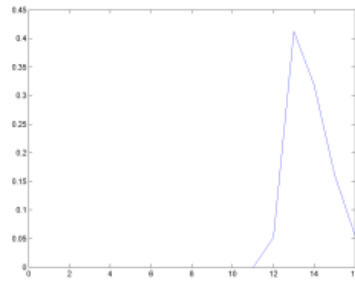
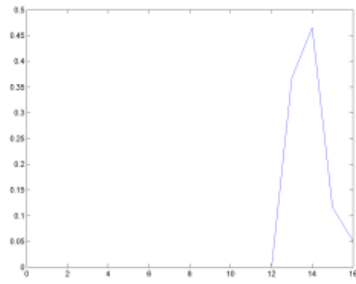


0.2653



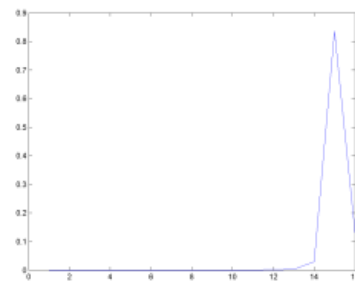
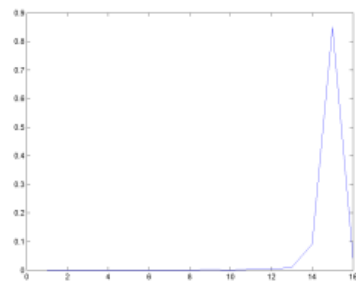
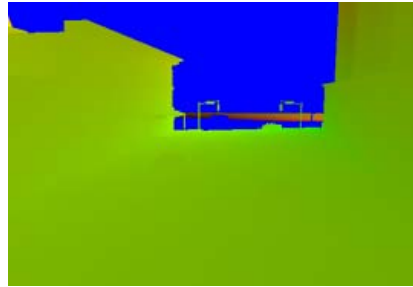
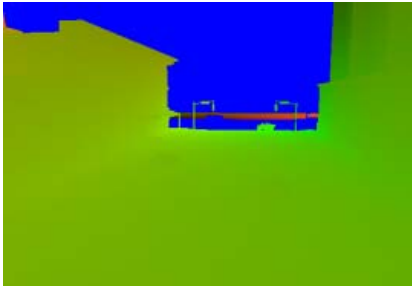
0.2389

4.2.2.4. Işık uzayı perspektif gölge izdüşüm dönüşümü



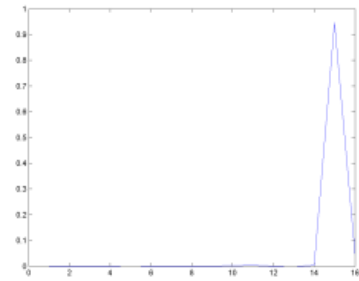
0.2173

0.1372

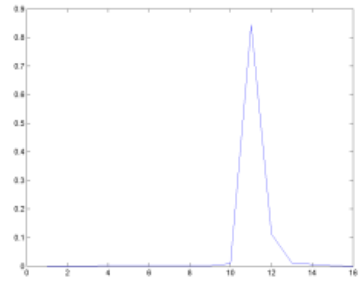


0.2980

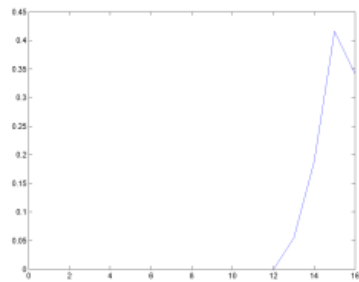
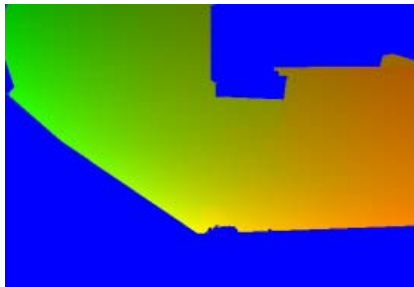
0.3214



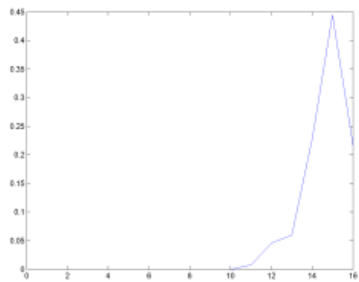
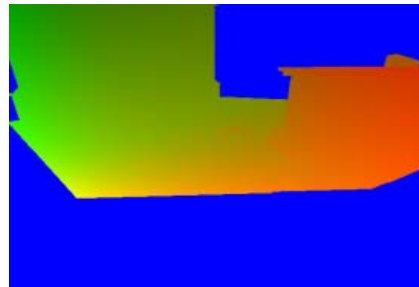
0.6255



0.6001

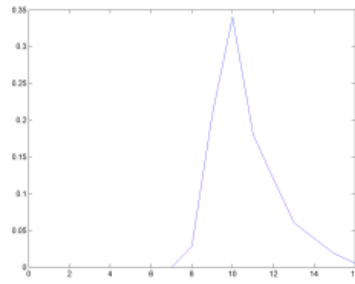
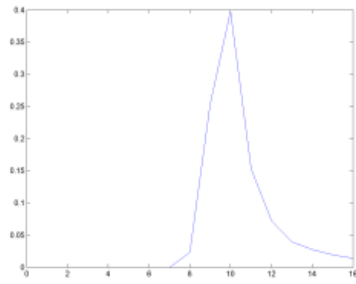
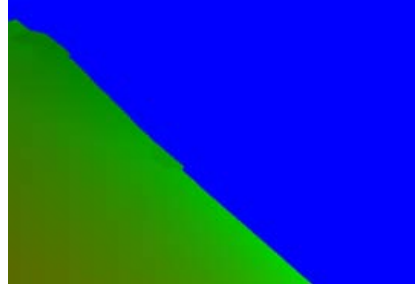


0.0525



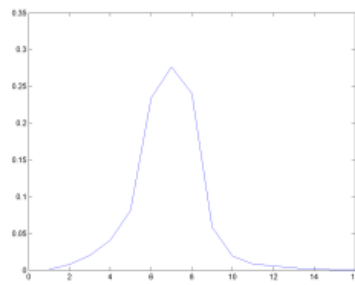
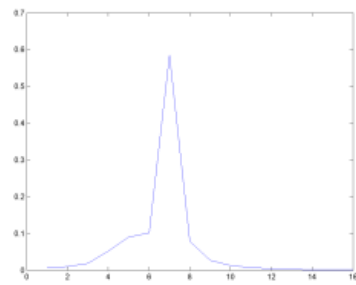
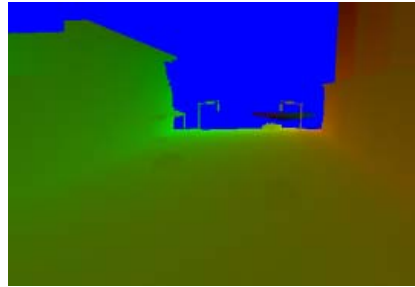
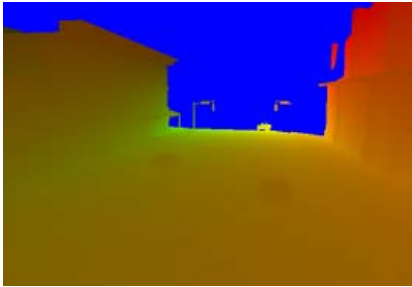
0.0445

4.2.2.5. Yamuk Gölge İzdüşüm Dönüşümü



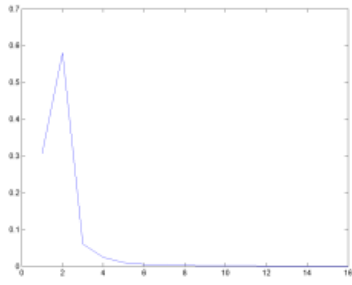
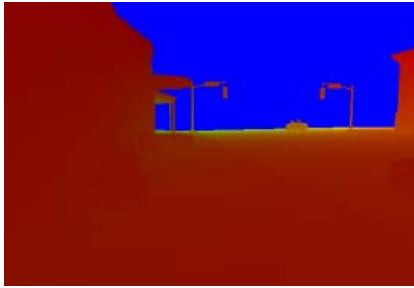
0.1919

0.1495

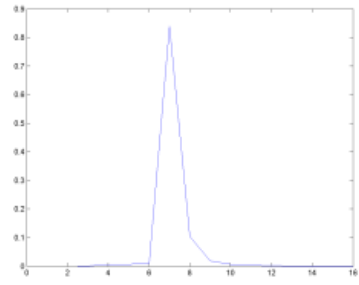
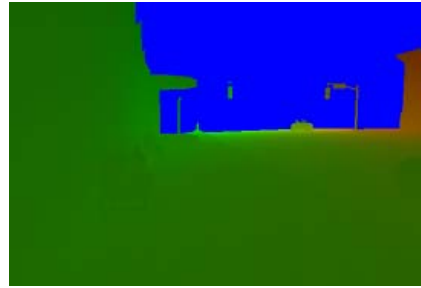


0.3090

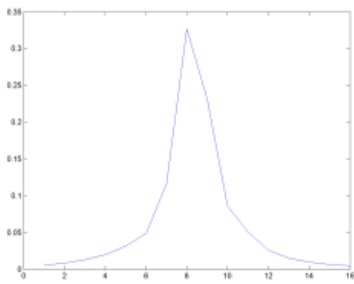
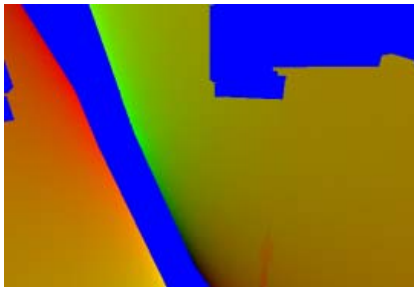
0.1392



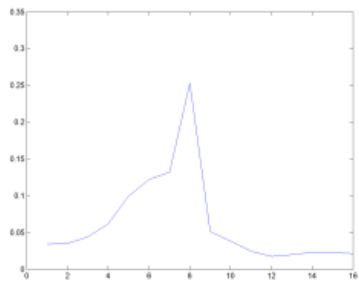
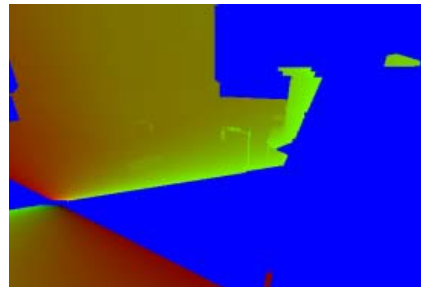
0.3725



0.6523

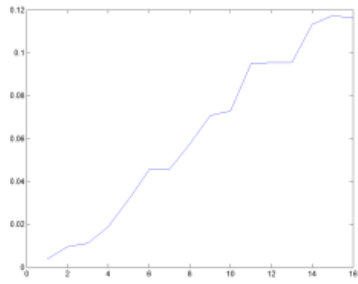
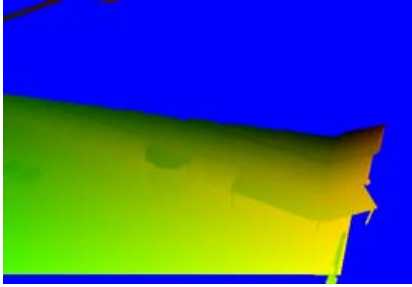


0.1265

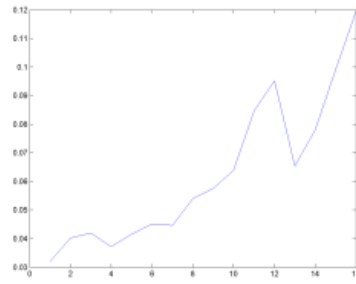
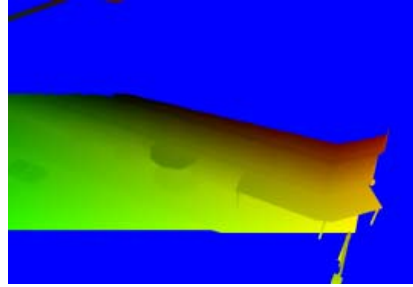


0.0588

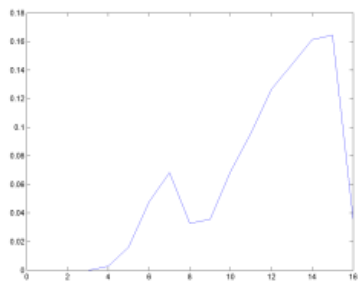
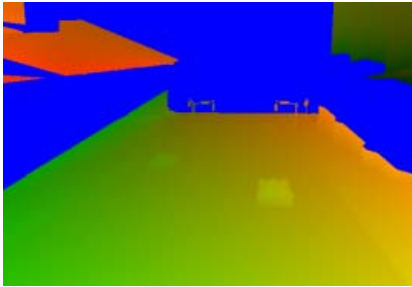
4.2.2.6. Düzlem En Uygun Gölge İzdüşüm Dönüşümü



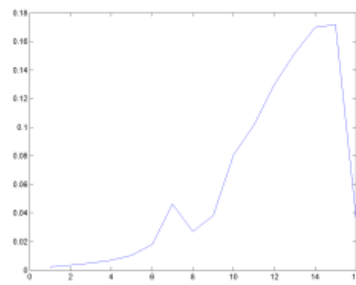
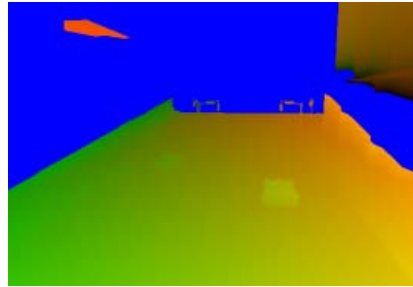
0.0242



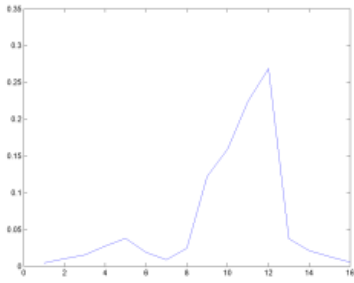
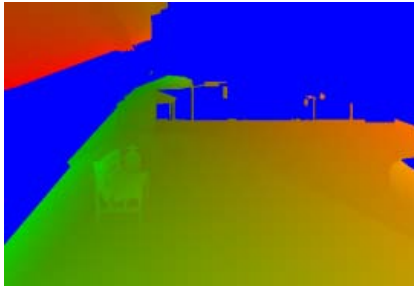
0.0101



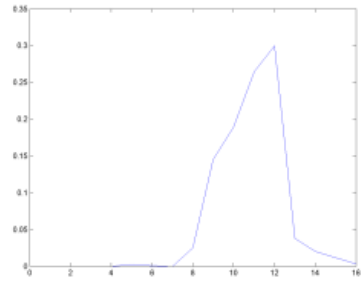
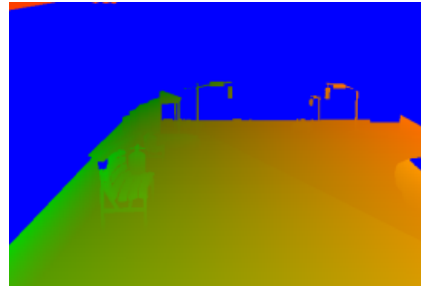
0.0521



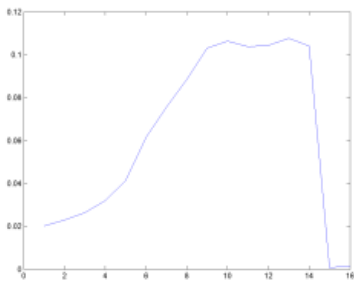
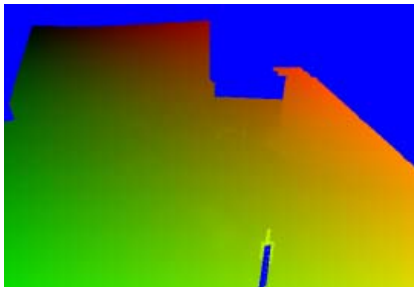
0.0589



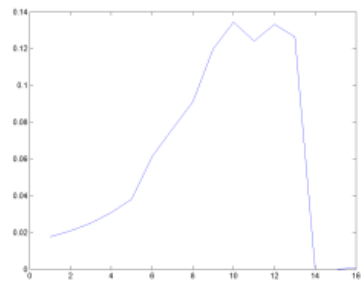
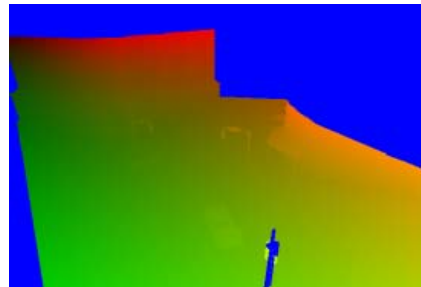
0.1061



0.1567



0.0252

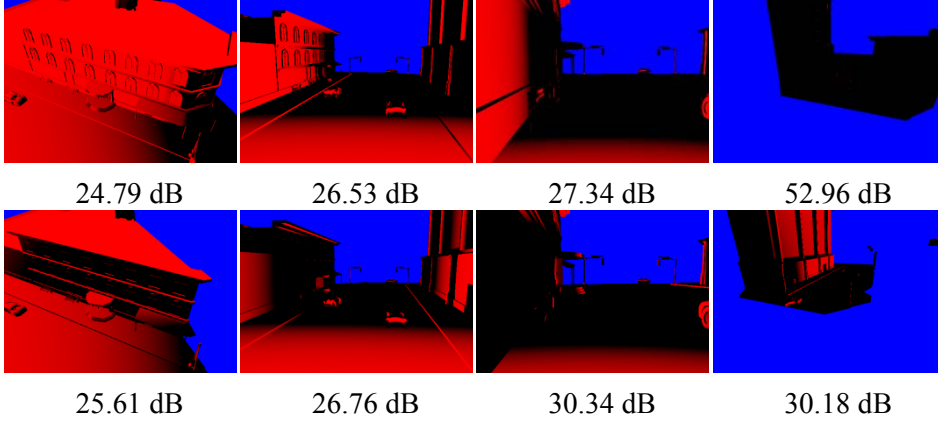


0.0407

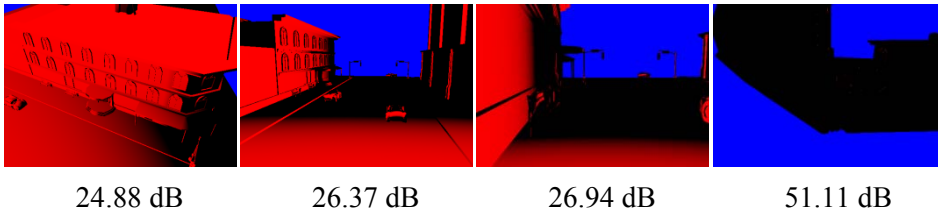
4.2.3. Pürüzlenme hata fonksiyonu

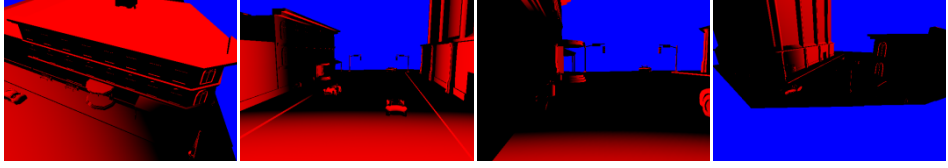
Işık düzlemindeki bir pikselin gölgelendirilen yüzeydeki izdüşümünün kapladığı alan ile bakış düzlemindeki bir pikselin yüzeydeki izdüşümünün alanının oranı kullanılarak oluşturulan bu fonksiyonda farklı bakış açılarından hata değerlerini görüntünün kırmızı kanalında gösteren görüntüler oluşturulup görüntülerin PSNR değerleri hatasız, yani düz siyah bir görüntüye göre hesaplanmıştır. Çizelgelerde satırlarda ışık konumu değişirken sütunlarda bakış açısı değişmiştir, bakış açıları sırasıyla, ışığı dik kesen, karşıt kesik piramitler, karşıt kesik piramitler durumuna yakın ve madenci ışığı durumlarını göstermektedir.

4.2.3.1. Düzgün Gölge İzdüşümü Dönüşümü



4.2.3.2. Odaklanmış düzgün gölge izdüşümü dönüşümü





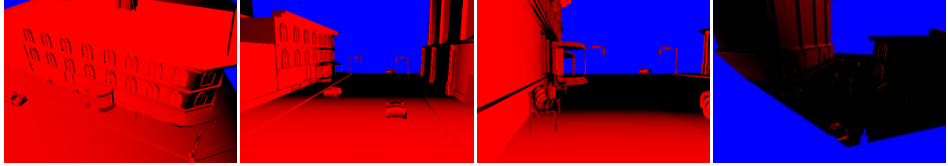
26.21 dB

26.34 dB

29.92 dB

32.21 dB

4.2.3.3. Perspektif gölge izdüşüm dönüşümü

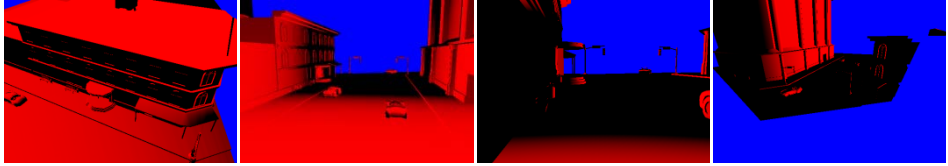


24.35 dB

24.83 dB

25.20 dB

31.83 dB



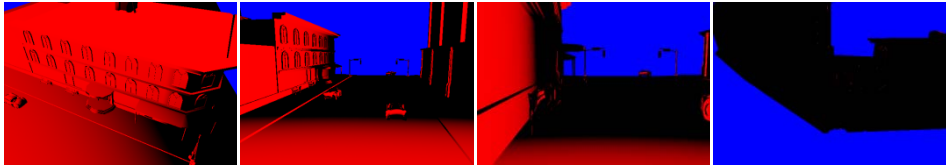
25.47 dB

24.76 dB

30.16 dB

29.83 dB

4.2.3.4. Işık uzayı perspektif gölge izdüşüm Dönüşümü

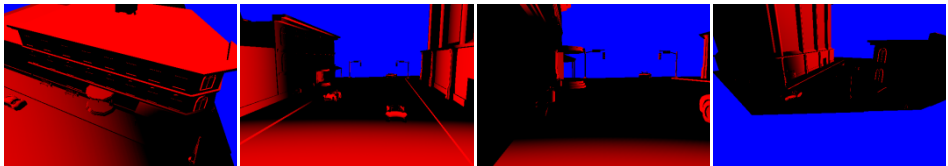


24.89 dB

26.48 dB

26.99 dB

51.03 dB



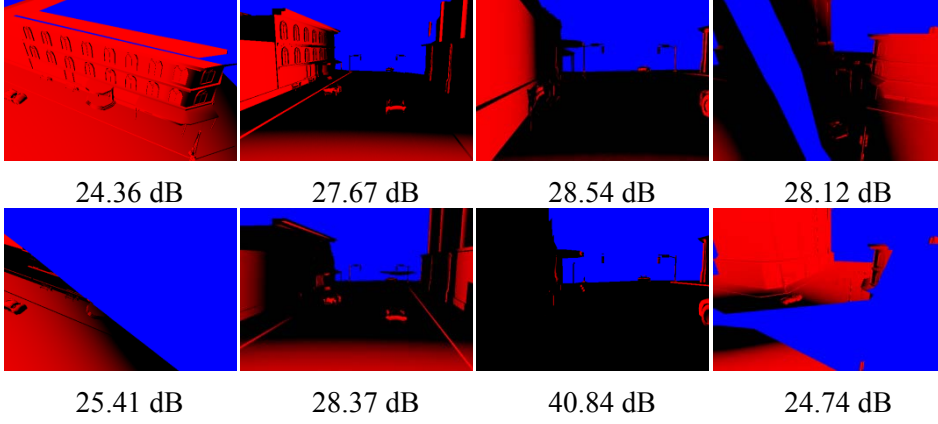
26.27 dB

26.50 dB

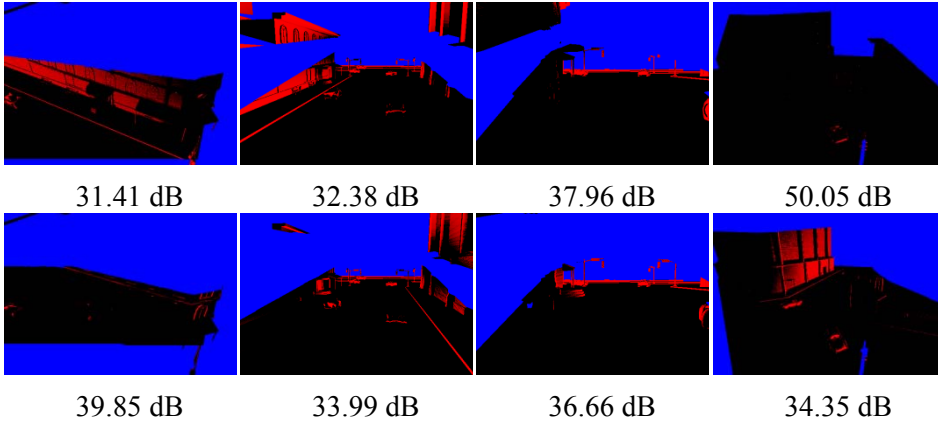
29.99 dB

32.17 dB

4.2.3.5. Yamuk gölge izdüşüm dönüşümü



4.2.3.6. Düzlem en uygun İzdüşümü Dönüşümü

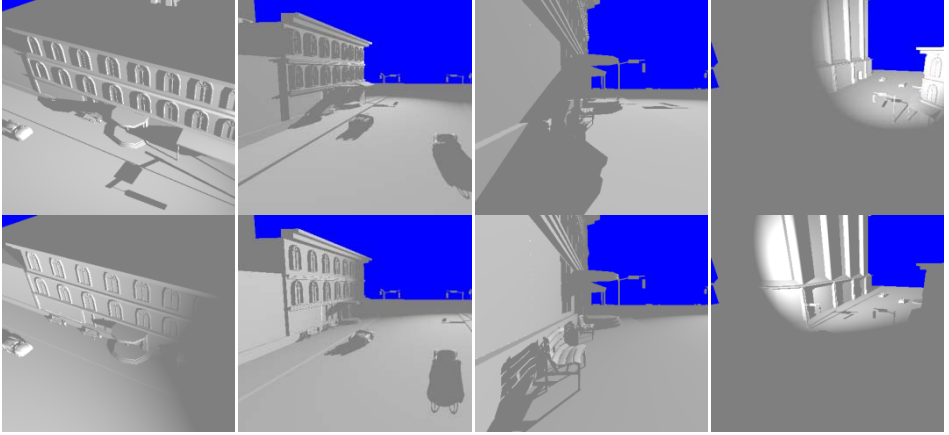


4.2.4. Doku yapısı karşılaştırması

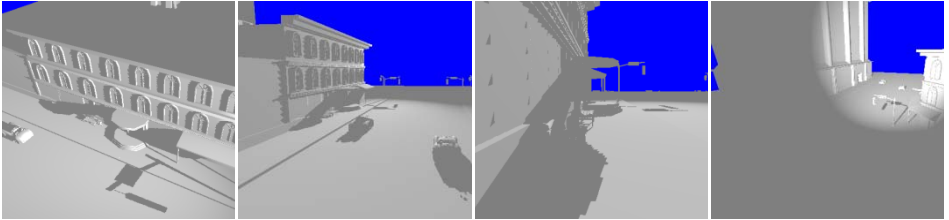
Işık uzayı perspektif gölge izdüşüm dönüşümü ile gölge dokusu yöntemleri kullanılarak gölgelendirilmiş görüntülerin şablon gölge hacmi ile gölgelendirilen görüntüler ile karşılaştırılmıştır. Öncelikler referans olarak kullanılan şablon gölge hacmi görüntüleri listelenip daha sonra gölge dokusu yöntemleri ile oluşturulan görüntüler ve bu görüntülerin referans görüntüye göre PSNR.'ları listelenmiştir. Çizelgelerde satırlarda

ışık konumu değişirken sütunlarda bakış açısı değişmiştir, bakış açıları sırasıyla, ışığı dik kesen, karşıt kesik piramitler, karşıt kesik piramitler durumuna yakın ve madenci ışığı durumlarını göstermektedir.

4.2.4.1. Sablon gölge hacmi



4.2.4.2. Derinlik gölge dokusu

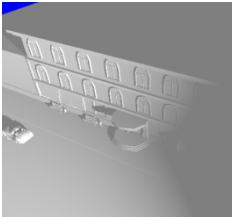


43.96 dB

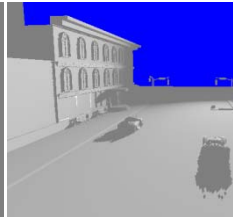
49.67 dB

47.16 dB

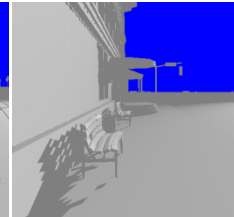
56.44 dB



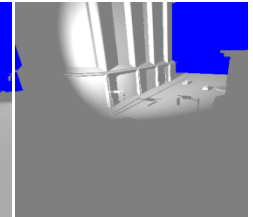
45.37 dB



49.37 dB

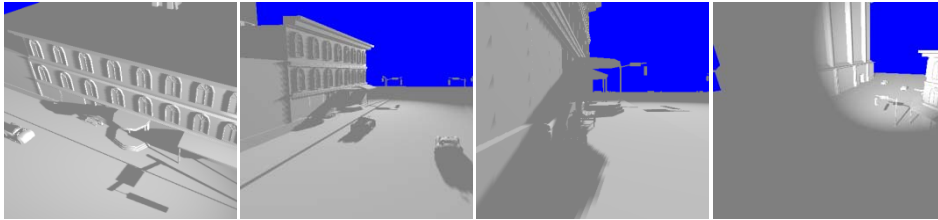


45.16 dB



61.39 dB

4.2.4.3. Yüzde yakınsama süzgeci

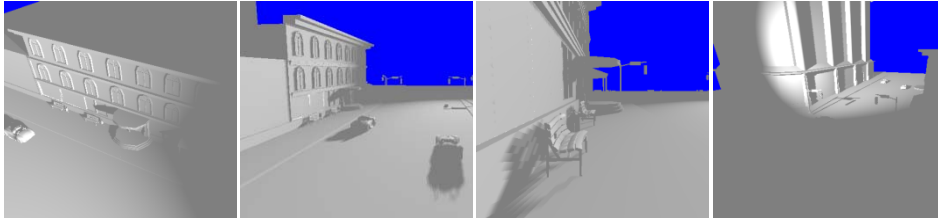


48.09 dB

46.12 dB

45.71 dB

51.05 dB



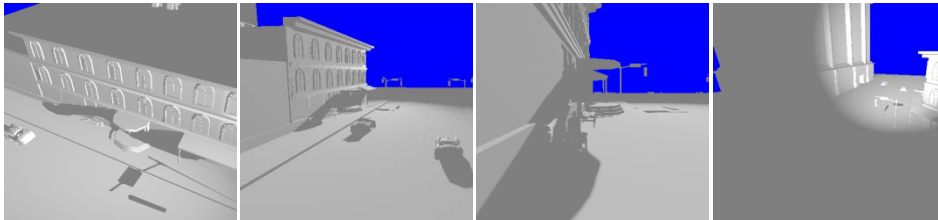
52.00 dB

45.21 dB

42.26 dB

51.68 dB

4.2.4.4. Varyans gölge dokuları

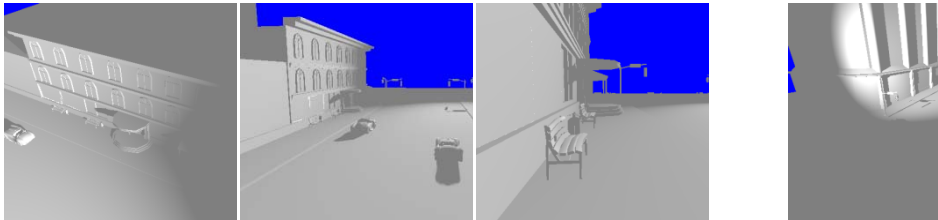


45.43 dB

65.43 dB

63.35 dB

56.39 dB



60.57 dB

70.06 dB

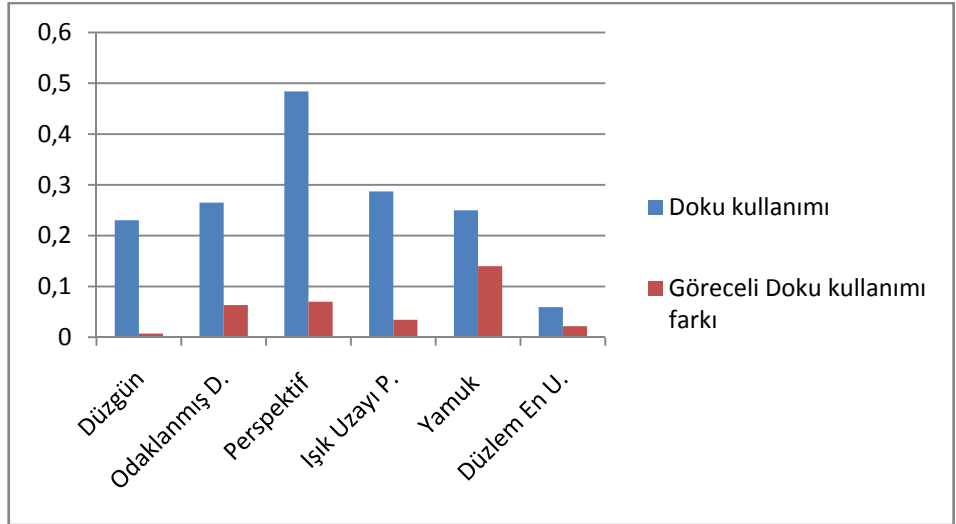
63.08 dB

55.26 dB

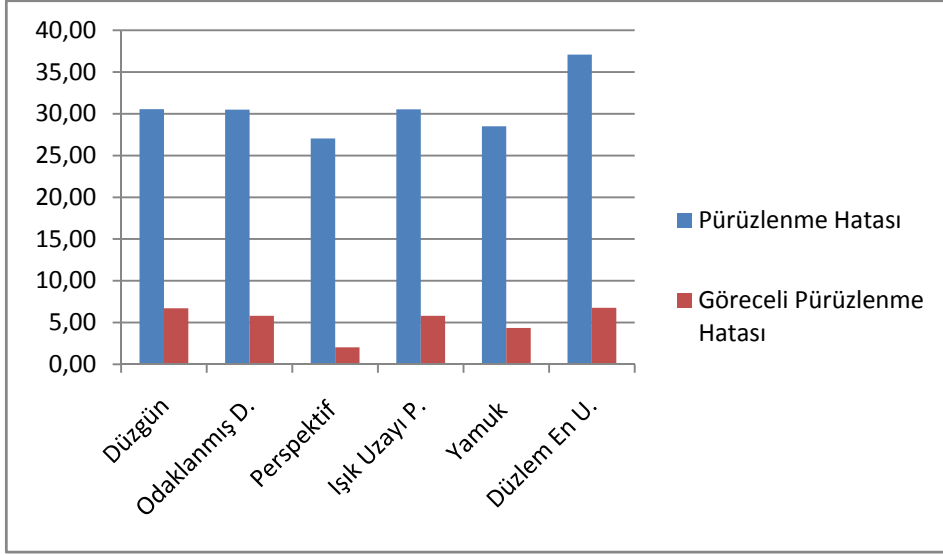
5. SONUÇLAR

	Doku kullanımı	Göreceli Doku kullanımı farkı	Pürüzlenme Hatası	Göreceli Pürüzlenme Hatası
Düzgün	0.2302	0.0073	30.56 dB	6.70
Odaklanmış D.	0.2650	0.0633	30.50 dB	5.81
Perspektif	0.4839	0.0700	27.05 dB	2.03
Işık Uzayı P.	0.2871	0.0342	30.54 dB	5.81
Yamuk	0.2500	0.1399	28.50 dB	4.36
Düzlem En U.	0.0593	0.0218	37.08 dB	6.76

Çizelge 1 - Gölge izdüşüm dönüşümlerinin doku kullanım, göreceli doku kullanım, pürüzlenme ve göreceli pürüzlenme hata oranları



Çizelge 2 – Gölge izdüşüm dönüşümlerinin doku kullanım grafiği



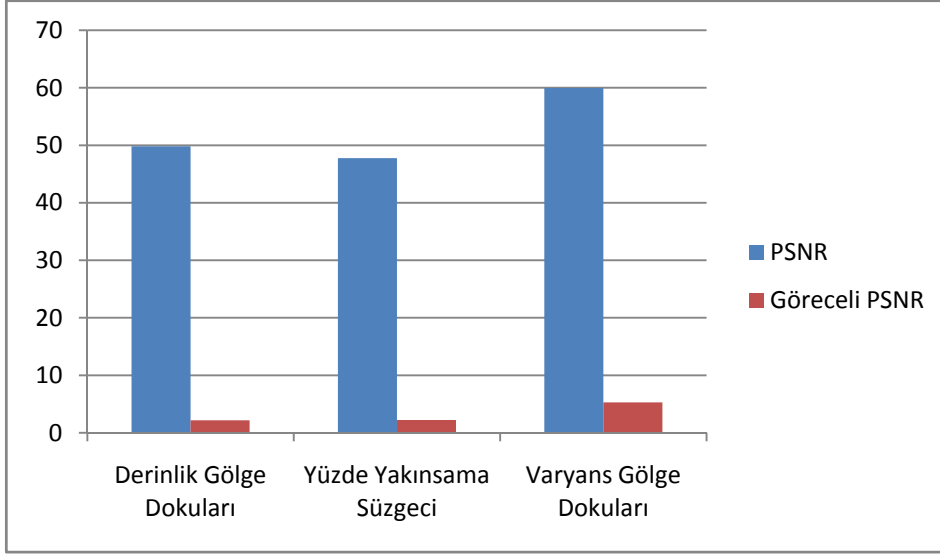
Çizelge 3 - Gölge izdüşüm dönüşümlerinin pürüzlenme hatası grafiği

Çizelge 1'deki Doku kullanımı değerleri örnek sahnede 4 bakış açısı ve 2 ışık ile hesaplanan doku kullanımı değerlerinin ortalamasıdır. Bu değer verimli doku kullanımına uzaklığı ifade ettiği için, değer küçük olması yöntemin diğerlerine göre dokuyu daha verimli kullandığını gösterir. Göreceli Doku kullanımı farkı hesaplanırken önce her bakış açısında birbirine yakın 2 ışık kaynağından hesaplanan doku kullanım değerlerinin farkları hesaplanır. Daha sonra bu farkların mutlak değerlerinin ortalaması alınır. Bu değer, ışık kaynağının konumundaki küçük değişikliklerin doku kullanımını ne kadar değiştirdiğini göstermektedir. Gölge kalitesinin devamlılığı sağlanabilmesi için değer küçük olması gerekmektedir. Çizelgenin pürüzlenme hatası sütununda her izdüşüm dönüşümü için hesaplanan pürüzlenme hatlarının ortalaması alınmıştır. Değerin yüksek olması pürüzlenmelerin düşük olduğu anlamına gelmektedir. Göreceli pürüzlenme hatası sütununda ise göreceli doku kullanımı farkında olduğu gibi ışık konumunun pürüzlenme hatasını nasıl etkilediği gösterilmektedir.

Gölge izdüşüm dönüşümü kalitesi doku alanı kullanımına göre incelenirse en iyi sonucu düzlem en uygun gölge izdüşüm dönüşümleri vermektedir. Bu yöntemi takiben sırasıyla düzgün, yamuk, odaklanmış düzgün, ışık uzayı perspektif ve perspektif gölge izdüşüm dönüşümü gelir. Fakat kaliteyi sadece gölge dokusunun verimli kullanılmasına bağlı değildir. Önemli olan pürüzlenme hatalarını azaltmaktır. Pürüzlenme hataları incelenirse, En iyi yöntem yine düzlem en uygun gölge izdüşüm dönüşümüdür. Bunu sırasıyla düzgün, ışık uzayı perspektif, odaklanmış düzgün, yamuk ve perspektif gölge izdüşüm dönüşümleri takip eder. Düzlem en uygun yöntemi en iyi sonuçları veriyor denebilir Fakat örnek sahnede düzlem en uygun yönteminin gerektirdiği düzlem, zemin olarak seçildiğinden sonuçların bu şekilde olması beklenebilir. Değişken sahnelerde uygun bir düzlemin bulunması zor olabileceğinden her koşulda iyi sonuç vermesi beklenemez. Sıralamada, düzlem en uygun yönteminden sonra gelen iki yöntemin pürüzlenme hataları birbirine çok yakın olduğundan ve göreceli pürüzlenme hatası, yani birbirine yakın farklı iki ışığın düşürdüğü gölgelerin kaliteleri arasındaki farkı, düşük olan ışık uzayı perspektif gölge izdüşüm dönüşümünü seçmek mantıklı olacaktır.

	PSNR	Göreceli PSNR
Derinlik Gölge Dokuları	49.8150	2.1650
Yüzde Yakınsama Süzgeci	47.7650	2.2250
Varyans Gölge Dokuları	59.9462	5.2925

Çizelge 4 – Gölge Doku Yapıları PSNR ve Göreceli PSNR değerleri



Çizelge 5 – Gölge Doku Yapıları grafiği

Gölge dokusu yapılarının kaliteleri incelendiğinde Varyans gölge dokularının en iyi sonuçları verdiği görülmektedir. Bunu takiben derinlik gölge dokuları ve yüzde yakınsama süzgeci gelir. Yüzde yakınsama süzgecinin PSNR değeri düşük olsa da sahte bir yumuşak gölgelendirme yaptığından gözü derinlik dokusu kadar rahatsız etmez.

Bütün kalite kıstasları göz önünde bulundurularak genel bir inceleme yapıldığında şablon gölge yöntemlerinden sonra ışık uzayı perspektif gölge izdüşüm dönüşümüyle birlikte kullanılan varyans gölge dokuları gelmektedir. Bu ikili sahne bölümlenme yöntemlerinden paralel kesilmiş gölge eşlemleri ile birlikte kullanılabilir.

Performans karşılaştırması yapıldığında karmaşık sahnelerde şablon gölge hacmi yöntemi, gölge dokularından çok daha geride kalır. Günümüzde donanım işlem gücü yüksek olsa da uygulamalarda bu işlem kapasitesini sert gölgelendirmeler yerine karmaşık sahneler üzerine

kullanılmaktadırlar. Bu yüzden, şablon gölge hacimleri yerine gölge dokuları tercih edilmelidir.

Hafıza kullanımı göz önünde bulundurularak karşılaştırma yapıldığında da gölge dokuları yöntemleri gölge hacmi yöntemlerine göre daha olumlu sonuçlar vermektedir. Gölge dokuları yöntemlerinin hafıza kullanımı sadece ışık sayısı ve gölge dokusu çözünürlüğüne bağlı iken gölge hacimleri yöntemlerinde ışık sayısının yanı sıra sahnenin karmaşıklığı da hafıza kullanımını etkiler.

Bu karşılaştırmalar göz önünde bulundurulduğunda ileriki çalışmalar gölge dokuları yapılarından varyans gölge dokusunun ışık kanaması sorununun giderilmesi, gölge izdüşüm dönüşümlerinden matris ile ifade edilemeyenlerin ekran kartı donanımında verimli olarak uygulanması, izdüşüm ve perspektif hatalarını da azaltan ve gölge dokusu kullanımını verimli yapan izdüşüm yöntemleri gibi konular üzerine yönelebilir.

İleriki çalışmalarda bu yöntemlerin çalışma zamanlarının incelenmesi, sert gölge yöntemlerinin yumuşak gölge yöntemleri ile karşılaştırılması yapılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Atty, L. and Holzschuch, N. and Lapierre, M. and Hasenfratz, J. and Hansen, C. and Sillion, F., 2006, *COMPUTER GRAPHICS FORUM*, 25(4), 725-741p.

Arvo, J., 2004, Tiled Shadow Maps, *Proceedings of Computer Graphics International '04*, IEEE, 8p.

Brabec, S. and Seidel, H.P., 2001, Hardware-accelerated Rendering of Antialiased Shadows with Shadow Maps, *Proceedings of Computer Graphics International '01*, 209-214

Brabec, S. and Annen, T. and Seidel, H.P., 2002, Practical Shadow Mapping, *Journal of Graphics Tools*, 4(7), 9-18.

Brabec, S. and Seidel, H.P., 2003, Shadow Volumes on Programmable Graphics Hardware, *Computer Graphics Forum(Proceedings of Eurographics '03)*,25(3):2-5.

Chong, H. and Gortler, S. J., 2004, A Lixel for every Pixel, *Proceedings of the 2nd EG Symposium on Rendering*, Eurographics, 6p.

Crow, F. C., 1977, Shadow Algorithms for Computer Graphics, ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 11(2), 246-247

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Donnelly, W. and Lauritzen, A.,** 2006, Variance shadow maps. *I3D '06: Proceedings of the 2006 symposium on Interactive 3D graphics and games*, ACM Press, 161-165.
- Fernando, R. and Fernandez, S. and Bala, K. and Greenberg, D. P.,** 2001, Adaptive Shadow Maps, *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 387-390.
- Govindaraju, N. K. and Lloyd, B. and Yoon, S. and Sud, A. and Manocha, D.,** 2003, Interactive Shadow Generation in Complex Environments, *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2003)*, 10p.
- Hasenfratz, J. and Lapierre, M. and Holzschuh, N. and Sillion, F.,** 2003, A survey of Real-Time Soft Shadows Algorithms, *Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics '03)*, 22(3), 21p.
- Heidmann, T.,** Real Shadows Real Time, 1991, *IRIS Universe*, 18:28-31.
- Kilgard, M. J. and Everitt, C.,** 2002, Practical and Robust Stenciled Shadow Volumes for Hardware-Accelerated Rendering, *developer.nvidia.com*, 8p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Kwoon, H. Y.**, 2003, The Theory of Stencil Shadow Volumes, *ShaderX2: Introductions and Tutorials with DirectX 9.0*, Wordware Publishing, 197-276.
- Laine, T. and Aila, T. and Assarsson, U. and Lehtinen, J., and Akenine-Möller, T.**, 2005, *ACM TRANSACTIONS ON GRAPHICS*, 24(3), 1156-1165p.
- Lefohn, A. and Sengupta, S. and Kniss, J.**, 2005, Dynamic adaptive shadow maps on graphics hardware, *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1p.
- Lehtinen, J. and Laine, S. and Aila, T.**, 2006, *COMPUTER GRAPHICS FORUM*, 25(3) 303-312p.
- Lengyel, E.**, 2001, Projection Matrices, *Mathematics for 3D Game Programming & Computer Graphics*, Charles River Media, 98-100.
- Lloyd, D. B. and Govindaraju, N. K. and Quammen, C. and Molnar, S and Manocha, D.**, 2007, Logarithmic Perspective Shadow Maps, Technical Report TR07-005, 26p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Martin, T. and Tan, T., 2004,** Anti-aliasing and Continuity with Trapezoidal Shadow Maps, *Proceedings of the 2nd EG Symposium on Rendering, Eurographics*, 9p.
- Mc Cool, M. D., 2000,** Shadow volume reconstruction from depth maps, *ACM Transactions on Graphics*, 1-26.
- Mitchell, J. L., 2004,** Poisson Shadow Blur, *ShaderX3*, Charles River Media, 402-409
- Reeves, W. T. and Salesin, D. and Cook, R. L., 1987,** Rendering antialiased shadows with depth maps, *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH '87)*, 283-291.
- Sen, P. and Cammarano, M. and Hanrahan, P., 2003,** Shadow Silhouette Maps, *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2003)*, 6p.
- Stamminger, M. and Drettakis, G., 2002,** Perspective shadow maps, *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2002)*, 557-562.
- Valient, M., 2003,** Shadow Map Filtering, *ShaderX2: Introductions and Tutorials with DirectX 9.0*, Wordware Publishing, 185-195.

Williams L, 1978, Casting Curved Shadows on Curved Surfaces, Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH '78), ACM SIGGRAPH, 270 - 274.

Wimmer, M. , Scherzer, D. and Purgathofer, W., 2004, Light Space Perspective Shadow Maps, Proceedings of the 2nd EG Symposium on Rendering, Eurographics, 9p.

Woo, A. and Poulin, P. and Fournier, A., 1990, A Survey of Shadow Algorithms, IEEE Computer Graphics & Applications, 13-32.

Zhang, F. and Sun, H. and Xu, L. and Lun, L. K., 2006, Parallel-split shadow maps for large-scale virtual environments, VRCIA '06: Proceedings of the 2006 ACM international conference on Virtual reality continuum and its applications, ACM Press, 311-318.

EKLER

Ek 1 Türkçe – İngilizce Teknik Terimler Sözlüğü

Ek 2 Koordinat Sistemleri ve Farklı Uzaylar Arası Geçiş

EK1 – Türkçe İngilizce Terimler Sözlüğü

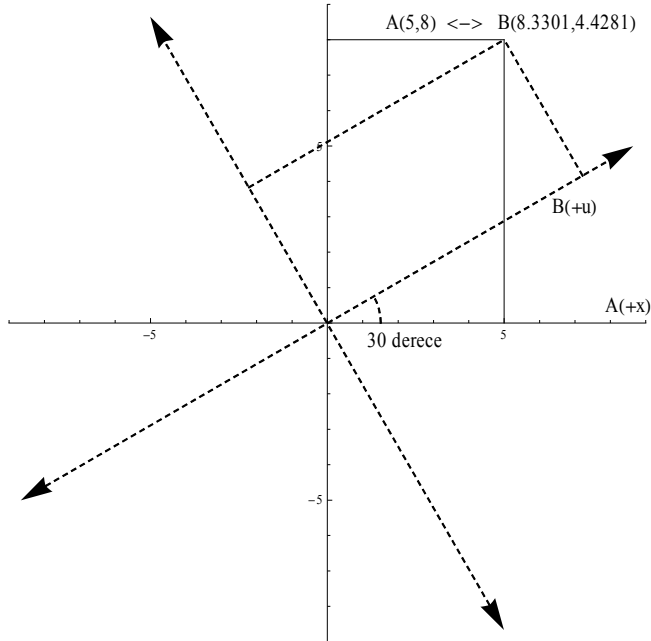
Ara Değerlendirme	: Interpolation
Bakış Uzayı	: View Space
Betimlemek	: Render
Çerçeve Oranı	: Frame Rate
Çift Doğrusal Süzgeç	: Bilinear Filtering
Derinlik Başarılı	: Depth Pass
Derinlik Başarısız	: Depth Fail
Derinlik Gölge Dokusu	: Depth Shadow Maps
Dizinlenmiş Üçgen Ağyapı	: Indexed Triangular Mesh
Eniyileme	: Optimization
Gölge Dokusu	: Shadow Map
Gölge Hacmi	: Shadow Volume
Işık İzdüşümü Uzayı	: Light Projection Space
Işık Bakış Uzayı	: Light Space
İkili	: Binary
Kesik Piramit	: Frustum
Kırpma Düzlemi	: Clip Plane
Kırpma Uzayı	: Clipping Space
Ondalıklı Sayı Hassasiyeti	: Floating Point Precision
Öteleme	: Translation
Perdeleyen	: Occluder
Piksel Programı	: Pixel Shader
Piksel Programlama Mimarisi	: Pixel Shader Architecture
Şablon Arabelleği	: Stencil Buffer
Şablon Gölge	: Stencil Shadows
Şablonlama	: Stencil
Şerit döngüsü	: Strip Loop
Üçgen Ağyapı	: Triangular Mesh
Varyans Gölge Dokusu	: Variance Shadow Map
Vertex Programı	: Vertex Shader
Yüzde Yakınsama Süzgeci	: Percentage Closer Filtering
Z-Savaşı	: Z-Fight

EK2 - Koordinat Sistemleri ve Farklı Uzaylar Arası Geçiş

Koordinat sistemleri:

Koordinat sistemleri, uzaydaki noktaların belirli bir pozisyona göre bağıl konumlarının bilinmesini sağlayan sistemlerdir. Bağıllığı kısaca anlatmak gerekirse;

Aşağıdaki şekildeki koordinat sistemlerinden, A sistemindeki $Z = (5,8)$ noktası, kabul edilen $(0,0)$ merkez noktasına göre $(5,8)$ koordinatlarda bulunmaktadır. A sisteminin 30 derece kadar, saat yönünün aksi döndürülmesi ile elde edilen B sisteminde ise aynı nokta $Z' = (8.3301, 4.4281)$ şeklinde yer göstermektedir. İki koordinat sistemi arasındaki ilişki bilirse bir koordinat sisteminden diğer koordinat sistemine geçiş de dönüşüm işlemleri ile gerçekleştirilebilir.



Vektörler:

Vektörler uzayda bir yönü ve büyüklüğü olan matematiksel objelerdir. $\vec{a} = (x_0, x_1, x_2, \dots, x_n)$ şeklinde gösterilirler ve çok boyutlu olabilirler. Bilgisayar grafiklerinde 2 ve 3 boyutlu vektörler kullanılır. Uzayda nereye taşınırlarsa taşınırlar büyüklükleri ve yönleri değişmez. Dolayısıyla, noktaların aksine konumdan bağımsızdırlar

Grafik programlamada kullanılan koordinat sistemleri genel olarak birbirine dik yani orthogonal birim vektörlerle tanımlanırlar ve bu sistemlere orthonormal sistemler adı verilir. Vektörlerin dik olması, bir noktaya ait koordinatların birbirinden bağımsız işlenebilmesini sağlar. Birbirine dik vektörlerin birbirleri üzerindeki izdüşümleri 0 birimdir.

Kartezyen koordinat sistemi:

Kartezyen koordinat sistemi $\vec{x} = (1,0)$ ve $\vec{y} = (0,1)$ uzunluğu bir birim olan ve birbirine dik baz vektörleri ile tanımlanır. Baz vektörler bir koordinat sisteminde herhangi bir vektörü ifade etmede kullanılırlar. Örneğin kartezyen koordinat sisteminde tanımlı vektör $\vec{a} = (3,4)$ ise bu vektörü $a = 3\vec{x} + 4\vec{y}$ şeklinde gösterilebilir.

Vektör normalizasyonu:

Vektör normalizasyonu vektör uzunluğunun 1 birime indirgenmesi için kullanılır. Bunun için vektöre ait tüm bileşenler vektör uzunluğuna bölünür.

\vec{a} vektörüne ait vektör uzunluğu $\|\vec{a}\|$ şeklinde gösterilir $\vec{a} = (x_0, x_1, x_2, \dots, x_n)$ şeklinde bir vektörse:

$$\|\vec{a}\| = \sqrt{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}$$

$\vec{a}_{norm} = \vec{a}/\|\vec{a}\|$ şeklinde normal vektör bulunur.

Vektörlerin Skalar Çarpımı (*Dot Product*)

Orthonormal bir sistemde, iki vektör arasında tanımlanan bir işlemdir. Matematikte (.) işareti ile gösterilir.

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = \|\vec{a}\| \|\vec{b}\| \cos\theta \text{ veya}$$

$$\vec{a} = (a_0, a_1, a_2, \dots, a_n), \vec{b} = (b_0, b_1, b_2, \dots, b_n) \text{ için}$$

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = a_0 b_0 + a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n \text{ şeklinde hesaplanır.}$$

Farklı uzaylar arasında geçiş yapılması:

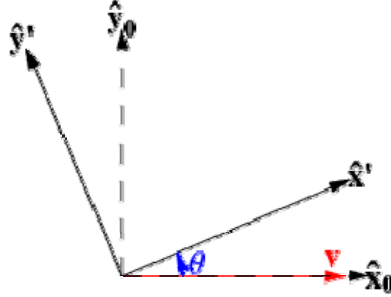
Farklı uzaylar arasında örneğin model uzayı, kamera uzayı vb sistemler arasında dönüşüm yapmak istenirse bir sistemden diğer sisteme dönüşümler yapılması gerekir.

Örneğin elimizde bir kitap olsun, bir masanın sağ kenarında dursun, bu masa da bir odada televizyonun kenarında dursun.

Kitabın üzerine ve tam ortasına bir sinek konsun, ve sineğin yerini soralım.

- 1) Sadece kitabı gören bir kişi kitabın ortasında diyecek.
- 2) Kitabı ve masayı gören bir kişi, “masanın kenarında, kitabın ortasında” diyecek ancak bunu kitabı hiç görmeden “Masanın kenarında” şeklinde de söyleyebilir.
- 3) Odaya yeni giren birisi şöyle diyebilir, televizyonun kenarındaki masanın kenarındaki kitabın, ortasında. Ancak sadece şöyle de diyebilir. Televizyonun yanında.

Dolayısıyla buradan görülen, her durumun kendisine göre bir bağıllığının olmasıdır. Bağıllıkların birbirlerine göre durumları da bilinirse birinden diğerine geçilebilir.



Şekildeki sistemde kartezyen koordinat sisteminin baz vektörleri \vec{x}_0, \vec{y}_0 olsun yeni sisteminde baz vektörleri \hat{x}', \hat{y}' . Matematiksel olarak yeni sistemin baz vektörleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$\hat{x} = \vec{x}_0 \cos(\theta) + \vec{y}_0 \sin(\theta) \quad \hat{y} = -\vec{x}_0 \sin(\theta) + \vec{y}_0 \cos(\theta)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{x}_0 \\ \vec{y}_0 \end{bmatrix}$$

Yukarıda 2 boyutlu döndürme dönüşümü gösterilmiştir. Bunun gibi öteleme ve ölçekleme dönüşümleri de matrislerle ifade edilebilmektedir. Ayrıca matrislerin ardı ardına çarpılmasıyla daha karmaşık dönüşümler de oluşturulabilir.

ÖZGEÇMİŞ

Serkan ERGUN

Adres: 1618 sok. no:23/A Bayraklı/İZM

Tel: (232) 345 59 09

e-mail: serkan.ergun@gmail.com

Kişisel Bilgiler	Uyruğu	: T.C.
	Doğum Yeri / Tarihi	: İzmir / 28.04.1984
Eğitim	2006	Ege Üniversitesi Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü (UBE) <i>Bilgi Teknolojileri Ana Bilim Dalı</i>
	2002 – 2006	İzmir Ekonomi Üniversitesi Bilgisayar Bilimleri Fakültesi Yazılım Mühendisliği Bölümü
	1995 – 2002	Milli Piyango Anadolu Lisesi Fen - Matematik Bölümü
İş Deneyimi	2005	İzmir Ekonomi Üniversitesi Öğrenci Asistan
Yabancı Diller		İngilizce (çok iyi) Almanca (orta)