

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

GÖRÜNTÜLERDE GÖLGELERDEN
3. BOYUT ELDE EDİLMESİ

İSMAİL SEDAT GÜLLE
YÜKSEK LİSANS TEZİ
TASARIM VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI

GEBZE
2007

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

GÖRÜNTÜLERDE GÖLGELERDEN
3. BOYUT ELDE EDİLMESİ

İSMAİL SEDAT GÜLLE
YÜKSEK LİSANS TEZİ
TASARIM VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Fehmi ERZİNCANLI

GEBZE

2007



**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS/DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri/Sosyal Bilimler Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 11/06/2007 tarih ve 2007/20 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından/...../..... tarihinde tez savunma sınavı yapılan İsmail Sedat GÜLLE'nin tez çalışması Tasarım ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Fehmi ERZİNCANLI

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Zafer ŞENALP

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. İrfan SAYIM

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri/Sosyal Bilimler Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI : Görüntülerde Gölgelerden 3. Boyut Elde Edilmesi

YAZAR ADI : İsmail Sedat GÜLLE

Anahtar kelimeler: görsel yöntemlerle 3. boyut ölçümü, kalibrasyon

Günümüzde 3 boyutlu modellere üretim, simulasyon, animasyon, sonlu elemanlar analizi, ölçüm gibi çeşitli alanlarda ihtiyaç duyulmaktadır. Modeller tasarlanabileceği gibi, yaygın olarak ölçüleri bilinmeyen veya modeli bulunmayan mevcut 3B’li cisimlerin yeniden modellenmesi de söz konusu olabilir ve bu durumda tersine mühendislik gereklidir. Tersine mühendislikte kullanılan ölçüm verileri, nokta bulutu veya kesitler koordinat ölçüm ya da optik, lazer tarama cihazlarıyla da elde edilebilir ancak bu cihazların maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle, dijital fotoğraf makineleri ile alınan 2B’li görüntüler ile 3B’li modeller elde edilmesiyle ilgili çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Literatürde konuyla ilgili çeşitli yöntemler mevcuttur ve bu yöntemlerde öne çıkan bazı özellikler; yöntemin kısıtlamaları olup olmadığı, yöntemin kalibrasyon gerektirip gerektirmediği, yöntemin ya da görüntülerin uygulanabilirliği, görüntüler alınırken ışık, döner tabla gibi ekipmanlar kullanılıp kullanılmadığı ve işlem zamanıdır.

Tez çalışmasında, dijital fotoğraf makinesi ile görüntü alınırken kaybolan 3. boyutun elde edilmesi için cisimler üzerine gölge düşürme yöntemi kullanılmıştır. İki farklı cismin görüntüleri alınmış ve kamera kalibrasyonu yazılımı yardımıyla görüntü üzerindeki gölgelerin 3B’li uzayda transformasyonu yapılmıştır. Gölge kesitler 3B’li tanımlanmıştır.

SUMMARY

TITLE OF THE THESIS : Extracting 3D Using Shadows

AUTHOR : İsmail Sedat GÜLLE

Key Words: 3D measuring by visual methods, calibration

3D models are needed in various areas like production, animation, simulation, FEA, dimensional control etc. Models are designed or widely re-designed when the object is present but the sizes of the object are not known and reverse engineering is necessary when the object doesn't have a model or an engineering drawing. Modeling is done by using measuring data, point clouds or sections, which are obtained by touching probes (CMM) or optical, laser scanners. However, these devices are expensive, so works about 3D modeling from 2D images captured by digital cameras are increased in recent years. There are different methods in literature that differ if the method have limitations or not, if calibration is needed or not, if the method is applicable to the particular objects, if the the images have desired properties and light, equipments like rotary table etc. are used or not and the process time.

In this work, the depth information that is lost while capturing images by digital camera, is reconstructed using shadows. The method is applied to two different objects and by the help of a calibration software, shadow sections on the object surface are transferred into 3D.

TEŐEKKÖR

Bu çalıőmanın yűrűtűlmesi ve tamamlanmasında deęerli fikir ve tecrűbelerinden yararlandığım saygıdeęer hocam Doç. Dr. Fehmi ERZİNCANLI'ya, tezin bűtűn aőamalarında çalıőmama katkıda bulunan Doç. Dr. Onur BARAN'a teőekkűr ederim.

Maddi manevi destek ve ilgisini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teőekkűrű bir borç bilirim.

Ekim 2007

İsmail Sedat GÖLLE

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Giriş	1
1.2 Literatür Özeti	2
2. GÖRSEL YÖNTEMLERLE MODELLEME	4
2.1 Görsel Yöntemlerle Modelleme	4
2.1.1 Stereo	4
2.1.2 Siluetlerin Kesiştirilmesi	5
2.1.3 Cisim Yüzeyine Gölge Düşürülmesi	6
2.1.4 Çizgi Tabanlı Modelleme	8
2.2 Geometri	9
2.2.1 Bir Noktanın Pozisyonu	9
2.2.2 Bir Noktanın Ötelenmesi	10
2.2.3 Dönme Matrisi	11
2.2.4 Bir Koordinat Sistemindeki Bir Noktanın Farklı Bir Koordinat	
Sisteminde Tanımlanması	12
2.2.5 Düzlem Denklemi	13
2.2.6 Çizgi Denklemi	15
2.2.7 Çizgi ve Düzlem Kesişimi	16

2.3 Kamera ve Görüntüler	17
2.3.1 Kalibrasyon ve Kalibrasyon Parametreleri	17
2.3.2 Görüntüler	19
2.3.3 Perspektif İzdüşümü	22
2.3.4 Perspektif Kamera Modeli	23
3. KAMERA KALİBRASYONU	27
3.1 Kamera Kalibrasyonu	27
3.2 Görüntülerin Girilmesi	28
3.3 Karelerin Köşelerinin Belirlenmesi	29
3.4 Kalibrasyon	31
3.5 Dış Parametrelerin Gösterilmesi	31
3.6 Dış Parametrelerin Bulunması	33
4. 3. BOYUTUN ELDE EDİLMESİ	34
4.1 Yöntem	34
4.2 3. Boyutu Elde Eden m Dosyası	37
4.2.1 Kalibrasyon Nesnesi Köşeleri	37
4.2.2 Kalibrasyon ile Elde Edilen Odak Uzaklığı, Asal Nokta ve Transformasyon Vektör ve Matrisleri	39
4.2.3 Kalibrasyon Nesnesi Düzlemindeki Noktaların Kamera Koordinat Eksenine Transformasyonu	40
4.2.4 Kalibrasyon Nesnesi Düzleminin Bulunması	41
4.2.5 Kalibrasyon Nesnesi Üzerindeki Köşelerin Kalibrasyon Nesnesi ve Kamera Koordinat Eksenlerinde Gösterimi	41
4.2.6 Kalibrasyon Nesnesi Üzerindeki Gölgenin Okunması	41
4.2.7 Kamera İzdüşüm Merkezi-Görüntüdeki Noktadan Geçen Işınla Kalibrasyon Nesnesinin (XXC plane) Kesiştiği Noktanın Bulunması	42

4.2.8 Kalibrasyon Nesnesi Üzerindeki Gölgenin Bulunması	43
4.2.9 Kalibrasyon Nesnesi Üzerindeki Gölgenin Kaydedilmesi (aaaduzlemde.dat)	43
4.2.10 Kalibrasyon Nesnesi Üzerindeki Gölgeden Geçen Kalibrasyon Nesnesine Dik Düzlemin Bulunması	43
4.2.11 Cisim Üzerindeki Gölgenin Okunması	44
4.2.12 Kamera İzdüşüm Merkezi-Görüntüdeki Noktadan Geçen Işınla Kalibrasyon Nesnesine Dik Düzlemin (DikPlane) Kesiştiği Noktanın Bulunması	44
4.2.13 Cisim Üzerindeki Gölgenin Bulunması	45
4.2.14 Cisim Üzerindeki Gölgenin Kaydedilmesi (aaagolge.dat)	46
4.2.15 Ölçüm	46
4.3 İkinci Deney	48
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR	50
ÖZGEÇMİŞ	52

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
2.1 Stereo	5
2.2 Siluetlerin kesiştirilmesi	6
2.3 Cisim üzerine gölge düşürülmesi	7
2.4 3B'li modeli temsil eden çizgi dizisi	9
2.5 Bir noktanın pozisyonu	10
2.6 Bir noktanın ötelenmesi	11
2.7 W ve W_R eksenleri	12
2.8 Bir koordinat sistemindeki bir noktanın farklı bir koordinat sisteminde tanımlanması	13
2.9 Düzlem denklemi	14
2.10 Çizgi denklemi	15
2.11 Çizgi ve düzlem kesişimi	17
2.12 İç parametreler	18
2.13 Kamera ve kalibrasyon nesnesi koordinat eksenleri	19
2.14 Görüntü, $N.M$ matris	20
2.15 Piksel	20
2.16 Piksel koordinatlar	21
2.17 Spatial koordinatlar	21
2.18 Perspektif izdüşümü	22
2.19 Paralel çizgilerin kesişimi	23
2.20 Perspektif kamera modeli	24
2.21 Perspektif kamera modeli, benzer üçgenler	24
2.22 Piksel koordinatları	25
3.1 Kalibrasyon nesnesi	27
3.2 Kalibrasyon araç takımı arayüzü	28
3.3 Kalibrasyon görüntüleri	28

3.4	Dört uç köşe seçilmesi	29
3.5	Kalibrasyon nesnesi sıfır noktası	30
3.6	Kalibrasyon nesnesi köşeleri	30
3.7	Kalibrasyon nesnesinin kamera koordinat eksenine göre pozisyonları	32
3.8	Koordinat eksenine göre kameranın görüntülerdeki pozisyonları ve yönleri	32
4.1	Cisim üzerine gölge düşürülmesi	34
4.2	Kalibrasyon nesnesi ve cisim üzerinde gölgeler	35
4.3	a)Gimp ile çizgilere dönüştürülmüş gölgeler b)Cisim üzerindeki gölge c)Kalibrasyon nesnesi düzlemi üzerindeki gölge	35
4.4	Yöntem	36
4.5	Kalibrasyon nesnesi düzlemi ve buna dik düzlem	37
4.6	Kalibrasyon nesnesi koordinatları	39
4.7	Gölge nokta bulutu ve üzerine oturtulmuş çizgi	46
4.8	Cisim ve kalibrasyon nesnesi üzerindeki gölgeler	47
4.9	3. boyut ölçümü	47
4.10	İkinci cisim ve yüzeyine düşürülen gölgeler	48
4.11	Transformasyonu yapılan gölgeler	48

1. GİRİŞ

1.1 Giriş

Görüntülerden 3B'li modeller elde edilmesi mühendislikte tasarım ve üretimde, analiz, simulasyon, robot otomasyon, animasyon gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Yakın geçmişte arazi ve bina ölçümlerinde kullanılmakta olan yöntemler bugün, gelişen bilgisayarlar ve görüntü alma teknikleri ile daha küçük boyutlu nesnelere ve daha yüksek doğruluk ile uygulanmaktadır. Son on yılda otomasyonla bütünleşik uzaktan ve dokunmadan yüzey tarama yöntemleri önem kazanmıştır ve hızla geliştirilmektedir (Wong et al., 2003). Ayrıca 3. boyutun elde edilmesi ya da nesnelerin ölçümü kadar görüntülenmesi de önem kazanmıştır (Pollefeys et al., 2000).

Tersine mühendislik ya da modellemede ölçüm verileri, nokta bulutları veya kesitler kullanılır. Nesnelerin ölçülmesinde koordinat ölçüm cihazları (CMM), optik veya lazer tarama cihazları hatta kumpaslar kullanılır, cihazlar yüksek hassasiyette sonuçlar vermektedir ancak maliyetleri yüksektir. Ayrıca ölçüm yöntemi uygulanabilir olmalıdır. Örneğin dikdörtgen, kare, çember gibi temel geometrik özelliklere sahip olmayan, vücut içi protez, türbin kanadı gibi daha karmaşık geometriye sahip mühendislik parçalarında kumpas kullanmak olanaksızdır. Ya da optik veya lazer tarama cihazları ile, doğrulukları koordinat ölçüm cihazlarına göre daha düşük olmasına rağmen daha kısa sürede daha fazla sayıda nokta alınabilmektedir. Ölçülecek veya modellenecek parçalar, cep telefonu gövdesi gibi milimetrik detaylar içerebileceği gibi uçak otomobil gövdeleri, heykeller gibi büyük ölçülere sahip de olabilir. Örneğin, nesnenin taşınması olanağı yoksa nesnenin bulunduğu yerde ölçüm yapılması gerekebilir. Dolayısıyla ölçüm cihazının taşınabilir olması gerekir. Ya da nesneye dokunmadan veya dokunma olanağı bulunmadan ölçüm yapılması gerekebilir. Örneğin, robot otomasyonda nesnenin yerinin belirlenmesinde nesnenin görüntülerinin alınıp, görüntü işleme yöntemleri kullanılabilir. Robot otomasyonda aynı zamanda işlem maliyeti de önemlidir, işlem görüntü alınması ile eş zamalı olmalıdır, çok kısa sürede görüntü işleme yapılmalıdır. Başka bir örnek

animasyon ve simulasyonlarda görüntü kalitesi önemli olabileceği gibi yine işlem maliyeti de önemlidir. Bu uygulamalarda işlemin basit ve esnek olması gereklidir (Pollefeys et al., 2000)

1.2 Literatür Özeti

Bouguet ve Perona, cisimlerin üzerine gölge düşürerek 3B şekil tahmini yapmaktadır. Kullandıkları yöntemin avantajı maliyetli donanım gerektirmemesidir. Donanım bir masa lambası, çubuk, kamera ve siyah beyaz karelere ayrılmış kalibrasyon nesnesidir. Cisim yüzeyine düşürülen gölgenin cismin bulunduğu düzlem ve bu düzleme dik ikinci bir düzlemin geometrik ilişkisi kullanılır. İkinci düzlem kullanılmadığı takdirde ışık kaynağının kalibrasyonu gereklidir.

Tomasi ve Kanade, kullandıkları yöntem ile görüntü dizisiyle kamera hareketi ve 3B'li şekil elde etmektedir ancak yöntemin kısıtlaması, ortografik görüntü alınmasıdır.

Laurentini, farklı açılardan elde edilmiş görüntülerde, cismin silüetlerinin keşitirilmesiyle 3B model eder. Yöntemde her görüntüde cismin silüeti görüntüdeki diğer bölümlerden ayrılmalıdır. Ne kadar fazla görüntü alınırsa 3B modelin doğruluğu o kadar yüksek olur, cismin daha küçük detayları elde edilir.

Fitzgibbon et al. bir eksen etrafında dönen nesnenin görüntülerini otomatik olarak 3B modele çeviren bir yöntem kullanmaktadır. Önceki çalışmalardan farkı ön bilgilere, kamera, görüntüler ile dönme açılarına, ayrıca dönme açılarının eşit olmasına gerek olmamasıdır. Bu bilgiler, bir algoritma ile sistemin geometrik özelliklerinden yararlanılarak bulunmaktadır.

Pollefeys et al. görüntü dizisinden model elde etmektedir, Tomasi ve Kanade'in yönteminden farkı, kamera pozisyonlarını hesaplamamalarıdır. Kamera pozisyonları daha sonra görüntülerden hesaplanmaktadır. Ayrıca serbest kamera hareketleri ile görüntü

alınabilmekte, kamera yakınlaştırılıp uzaklaştırılabilmektedir (zoom). Yöntemin dezavantajı, doğruluğu yüksek değildir, dolayısıyla ölçüm için uygun değildir ancak görsel kalitesi tatmin edicidir. Arkeoloji gibi alanlarda ya da büyük cisimlerde model elde etmekte kullanılmaktadır.

Faugeras et al. kamera kalibrasyonu ile kamera parametrelerini bulmaktadır. Ölçüleri bilinen kalibrasyon amaçlı bir nesne ya da kamera hareketinin bilinmesine gerek yoktur. Bunun yerine görüntülerde noktaların eşleştirilmesi kullanılır.

Fang et al. kullandıkları yöntemde cisimlerin 3. boyutu elde edilirken, farklı görüntülerde birbirine karşılık gelen noktaların belirlenmesine gerek yoktur. Yöntemin bunun yerine dayandığı temel, hacim kesişmesidir. Yöntem ile cismin küçük detayları elde edilebilmektedir.

Niem ve Buschmann, kamera kalibrasyonu yaparak, farklı açılardan alınmış görüntüler ile 3B'li model elde etmektedir. Önce silüetlerden cismin yaklaşık bir şekli çıkarılmakta daha sonra 3B'li model küçük hacimlere bölünerek bu hacimlerden cisme ait olanları hesaplanmaktadır. Modelin karmaşıklığı hacimlerin boyutları ile doğru orantılıdır, küçük hacimlerle cismin daha çok detayı elde edilmektedir. Yöntem karmaşık cisimler için uygundur.

Wong et al. yine nesnelere üzerine gölge düşürerek 3B'li yüzey tarama yapmaktadır. Yöntem, parçalara bölünen gölge çizgilerinin üzerine noktalar koyarak, bu noktalara eğri oturtulması esasına dayanır. Kullanılan yöntemde gölge dik düşürülmektedir.

Zhang, düzlemsel bir nesnenin görüntülerini alarak kamera parametrelerini bulmaktadır. Yöntem, en az iki olmak üzere birkaç görüntü ile uygulanmaktadır. Kalibrasyon nesnesi üzerinde kareler bulunmaktadır ve kalibrasyon için en az iki olmak üzere kamera veya kalibrasyon nesnesi hareket ettirilerek birkaç görüntü alınması yeterlidir. Görüntü alınırken kamera veya kalibrasyon nesnesinin hareketinin bilinmesine gerek yoktur.

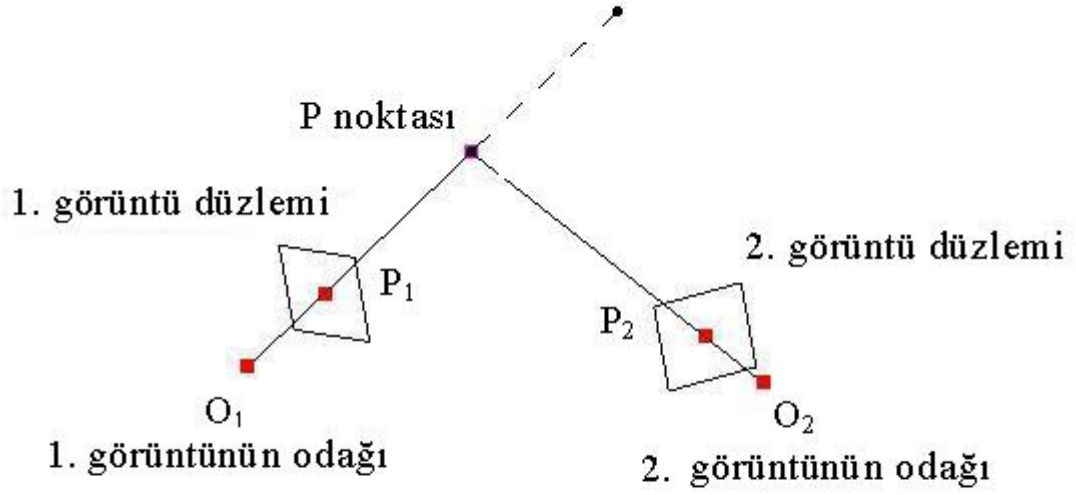
2. GÖRSEL YÖNTEMLERLE MODELLEME

2.1 Görsel Yöntemlerle Modelleme

Görüntülerden 3B'li model etme yöntemleri aktif ve pasif olarak ikiye ayrılır (Bouguet and Perona, 1998). Aktif yöntemler çevredeki ışık vb. değişimleri kullanırken pasif yöntemler sadece görüntüleri kullanır (cs.ucl.ac.uk/staff/D.Nahmias/log.html, 2007). Yöntemlerde örgü, gölge, siluet gibi görsel özellikler kullanılabilen gibi doğrudan görüntü üzerinde bulunan noktaların, çizgilerin 3B'li uzayda transformasyonu da yapılabilir. Transformasyonda kamera pozisyonu, odak uzaklığı ya da kamera hareketi gibi geometrik bilgiler önceden belirlenebileceği gibi görüntülerden de elde edilebilir (Faugeras et al., 1992).

2.1.1 Stereo

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi eğer kalibrasyon yapılmışsa yani kameranın pozisyonları ve odak uzaklığı biliniyorsa, P noktasının en az iki görüntüde yeri belirlenerek 3. boyutu elde edilebilir (Fitzgibbon et. al., 1994). P noktası, 1. görüntünün izdüşüm merkezi (O_1) ve görüntüsünden (P_1) geçen ışın üzerinde herhangi bir yerdedir. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, eğer P noktası ikinci görüntüde de belirlenirse (P_2) yani P noktasının görüntüleri iki görüntüde eşleştirilirse O_1P_1 doğru parçasının O_2P_2 doğru parçası ile kesişimi P noktasının uzaydaki pozisyonudur (Pollefeys, 2002). Hatalı ya da yaklaşık nokta seçimi, görüntünün net olmaması ve dışta kalan noktalar hata üretir.



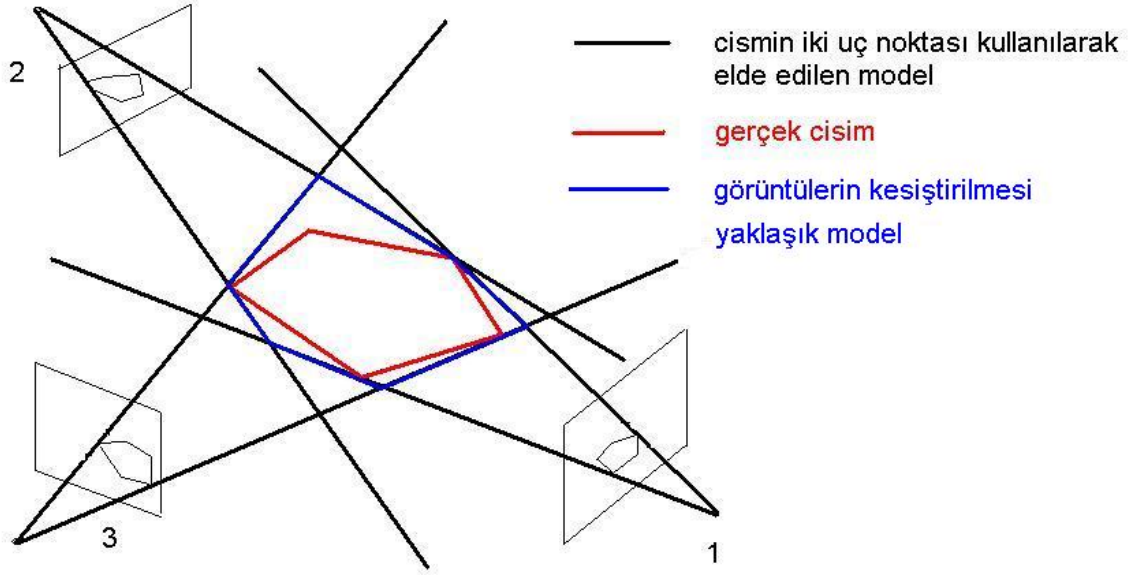
P_1 : P noktasının 1. görüntüdeki görüntüsü

P_2 : P noktasının 2. görüntüdeki görüntüsü

Şekil 2.1 Stereo (Brunet and Chao, 2004)

2.1.2 Silüetlerin Kesiştirilmesi

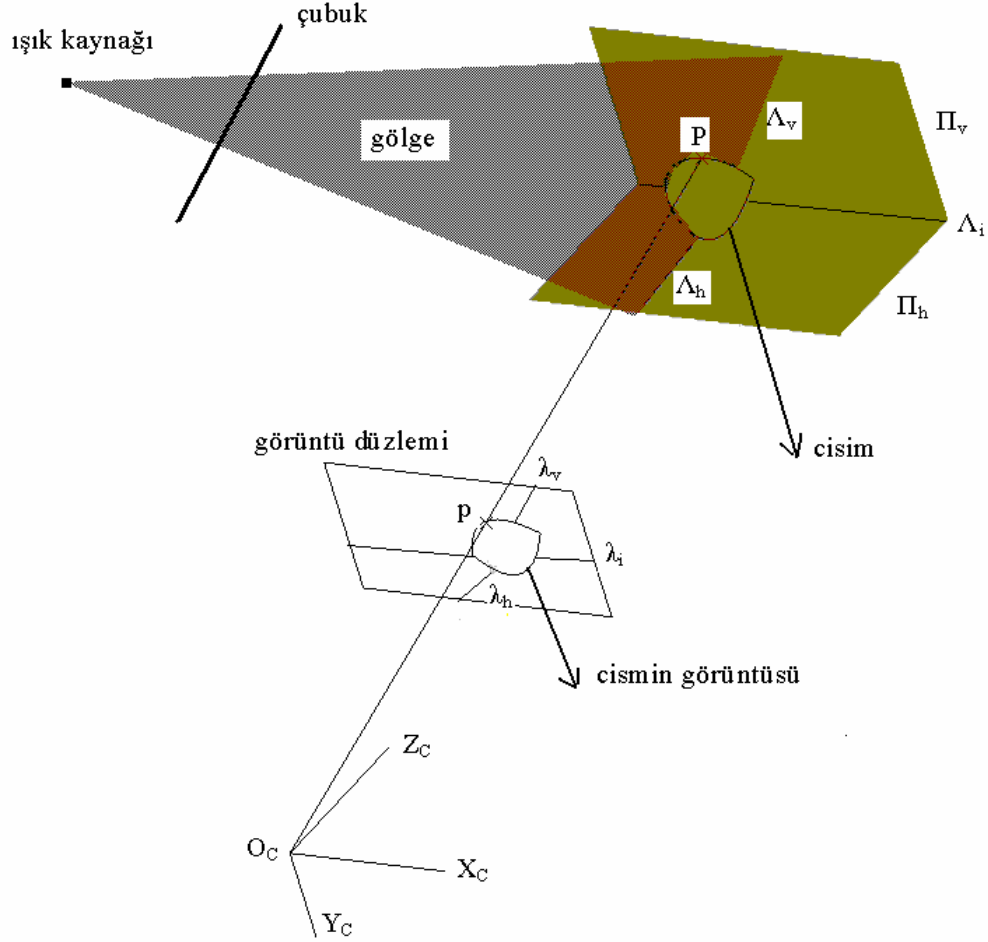
Şekilde 2.2’de görülen yöntemde, cismin silüetleri kullanılarak 3B’li model elde edilmeye çalışılır (Laurentini, 1994). Her görüntüde cismin silüeti görüntüdeki diğer bölümlerden ayrılır ve görüntülerin kesiştirilmesiyle 3B’li model elde edilir. Cismin geometrik detaylarının elde edilmesi görüntü sayısı ile doğru orantılıdır. Kullanılan görüntü sayısı arttıkça daha fazla detay elde edilir. Yöntemin dezavantajı girinti ya da iç bükey ayrıntıları elde edememesidir.



Şekil 2.2 Siluetlerin kesiştirilmesi (Dyer, 2001)

2.1.3 Cisim Yüzeyine Gölge Düşürülmesi

Cisimlerin yüzeyine gölge düşürülerek 3. boyutunun elde edilmesi aktif yöntemlerden biridir (Bouguet, 1999). kalem ya da benzeri basit bir çubuğun bir yönde elle ve serbest halde hareketiyle cisim üzerine düşürdüğü gölgeler ile 3. boyutu elde eder. Yöntemin geometrik prensibi, ışık kaynağı ve çubuğun daima bir düzlem meydana getirmesi ve cisim yüzeyinin gölge ile bu düzlemin kesişimi olmasıdır. Çubuğun gezdirilerek cisim yüzeyine düşürülen gölgelerle cisim yüzeyi taranır ve cismin 3B'li modeli elde edilir.



Şekil 2.3 Cisim üzerine gölge düşürülmesi (Bouquet, 1999)

O_c : Kamera izdüşüm merkezi

P: Cisim üzerinde nokta

p: P noktasının görüntüsü

Π_h : Cismin bulunduğu düzlem

Π_v : Π_h düzlemine dik düzlem

Λ_h : Gölge ile Π_h düzleminin kesişimi

Λ_v : Gölge ile Π_v düzleminin kesişimi

λ_h : Λ_h çizgisinin görüntüsü

λ_v : Λ_v çizgisinin görüntüsü

Λ_i : Π_v ile Π_h düzlemlerinin kesişimi

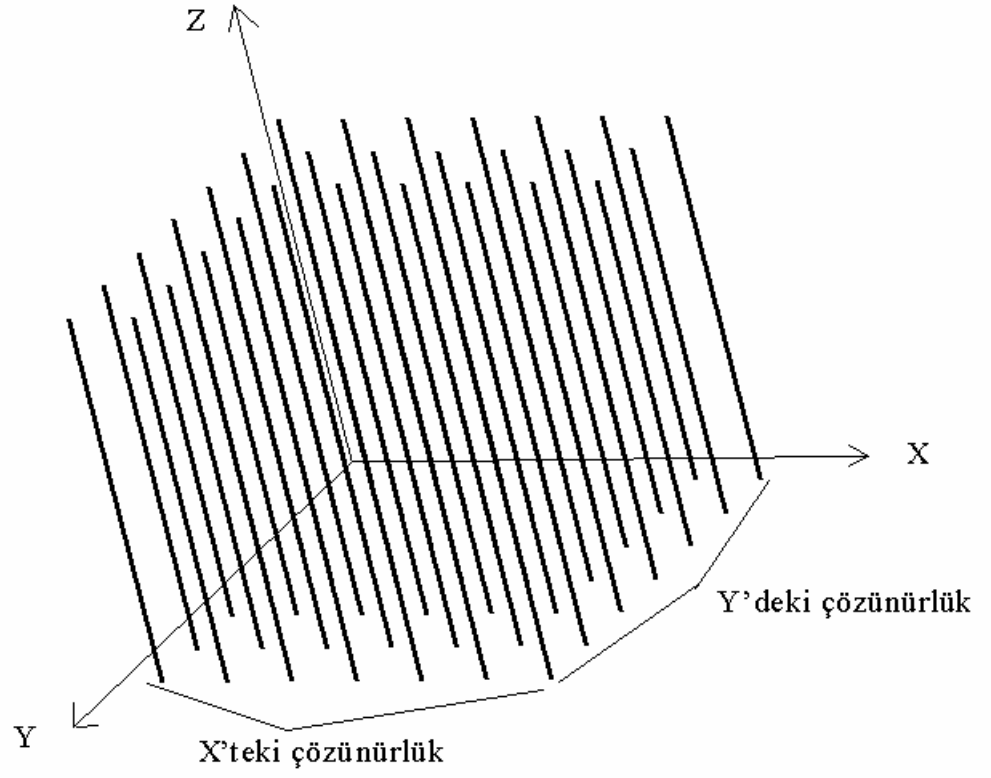
λ_i : λ_h ile λ_v çizgilerinin kesişimi

Şekil 2.3'te yöntem görülmektedir (Bouguet, 1999). Odak uzaklığı, dolayısıyla görüntü düzlemi, kamera izdüşüm merkezi O_c ve Π_h düzleminin kalibrasyon ile bulunur. Π_v , Π_h düzlemine diktir. Eğer λ_h ile λ_v görüntüde görülüyorsa, O_c 'den çıkan λ_h çizgisinden geçen ışınların Π_h ile kesişimi A_h çizgisi, O_c 'den çıkan λ_v çizgisinden geçen ışınların Π_v ile kesişimi A_v çizgisidir. Gölge düzlemi A_h ve A_v çizgileri ile hesaplanır ve O_c 'den çıkan, görüntüde p noktasından geçen ışının gölge düzlemi ile kesişimi uzayda P noktasıdır.

Eğer Π_v düzlemi kullanılmıyorsa ışık kaynağının yeri kalibrasyon ile bulunur ve gölge düzlemi ışık kaynağından çıkan A_h çizgisinin iki ucundan geçen ışınlar ile hesaplanır.

2.1.4 Çizgi Tabanlı Modelleme

2B'li görüntülerden 3B'li model etme yöntemlerinden biri çizgi tabanlı modellemedir (Fang et al.,2002). Şekil 2.4'te yaklaşık modeli temsil eden çizgi dizisi görülmektedir. Kamera kalibrasyon parametreleri kullanılarak, çizgi dizisindeki çizgilerin görüntü düzlemine transformasyonu yapılır. Her çizginin cisim silüetiyle kesişen çizgi parçaları hesaplanır, bu çizgi parçalarının yeniden çizgi dizisine transformasyonu yapılır ve bu işlem her görüntü için tekrar edildiğinde cisim ile kesişen çizgi parçaları 3B'li modeli oluşturur. Modellemede kullanılan görüntü sayısı arttıkça, 3B'li modelin elde edilen detayları da artar.

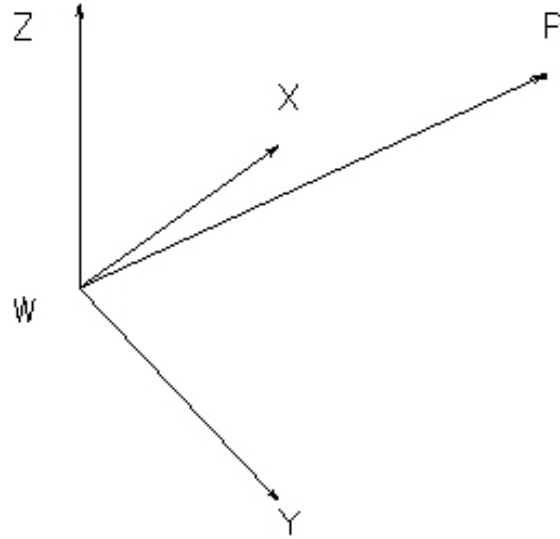


Şekil 2.4 3B'li modeli temsil eden çizgi dizisi (Fang, 2002)

2.2 Geometri

2.2.1 Bir Noktanın Pozisyonu

Şekil 2.5'te, P noktasının W koordinat sistemindeki pozisyonu $P=(X,Y,Z)$ görülmektedir (Kyrki, 2007).



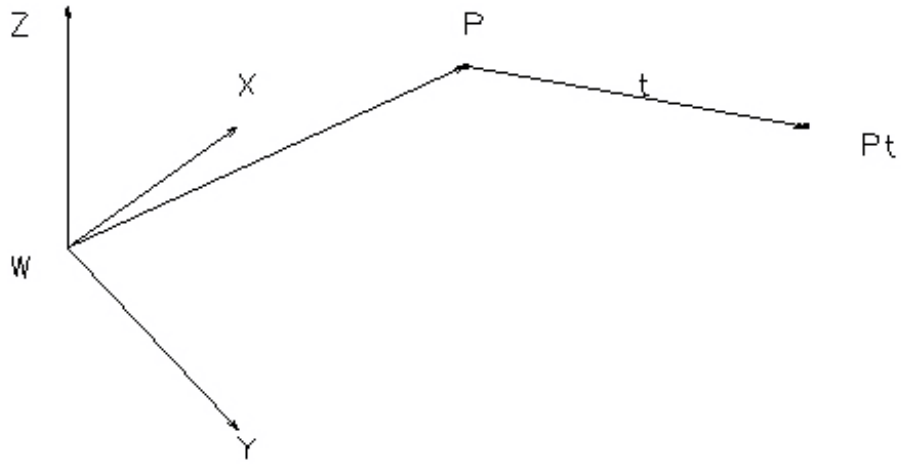
Şekil 2.5 Bir noktanın pozisyonu

2.2.2 Bir Noktanın Ötelenmesi

Şekil 2.6'da görülen P noktası W koordinat sisteminde x, y ve z eksenlerinde sırasıyla t_x, t_y ve t_z kadar ötelenirse, P noktasının pozisyonu $P=(X, Y, Z, 1)$, öteleme vektörü $t=(t_x, t_y, t_z)$ ve

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ öteleme matrisi ise} \quad (2.1)$$

ötelenmiş nokta $P_t = T.P$ dir (devmaster.net/wiki/Transformation_matrices#Translation, 2007). (2.2)



Şekil 2.6 Bir noktanın ötelenmesi

2.2.3 Dönme Matrisi

W koordinat sistemi x, y ve z eksenleri etrafında sırasıyla α , β ve θ açıları kadar döndürülürse,

$R = R_x \cdot R_y \cdot R_z$ dönme matrisi,

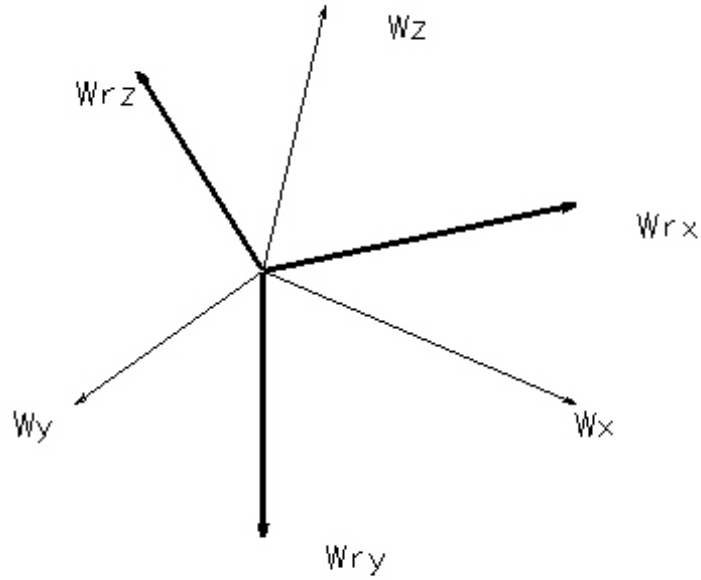
Şekil 2.7’de görülen döndürülmüş koordinat sistemi W_R ise,

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{x eksenini etrafında dönme matrisi} \quad (2.3)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{y eksenini etrafında dönme matrisi} \quad (2.4)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad z \text{ eksenini etrafında dönme matrisi olmak üzere} \quad (2.5)$$

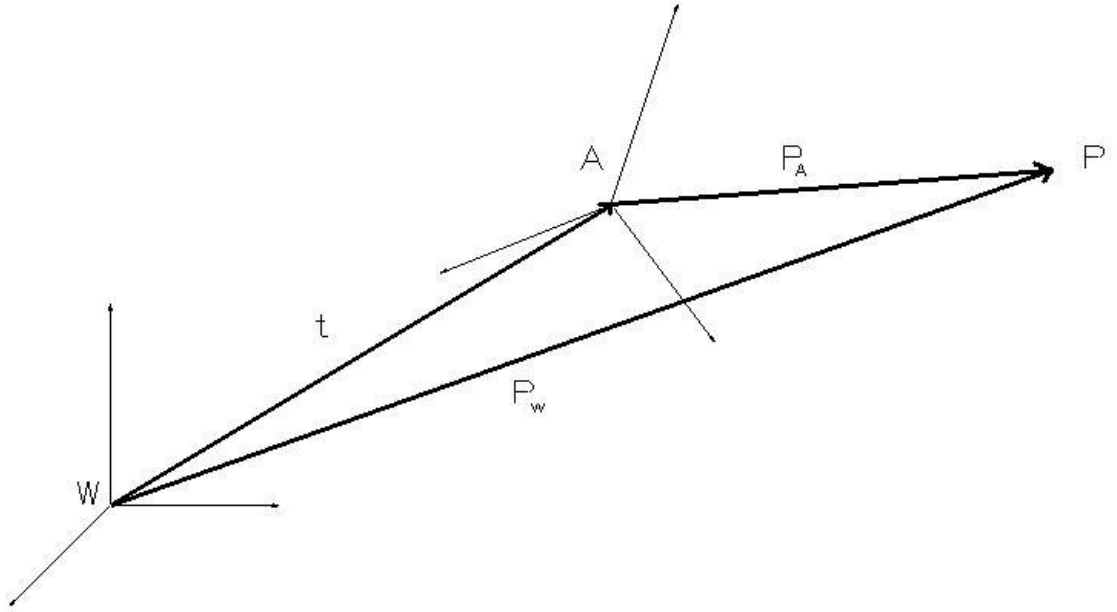
$$W_R = R.W \text{ 'dir (devmaster.net/wiki/Transformation_matrices\#Translation, 2007).} \quad (2.6)$$



Şekil 2.7 W ve W_R eksenleri

2.2.4 Bir Koordinat Sistemindeki Bir Noktanın Farklı Bir Koordinat Sisteminde Tanımlanması

Şekil 2.8'de görülen, P noktasının A koordinat sistemindeki pozisyonu $P_A=(X,Y,Z)$, A koordinat sisteminin W koordinat sistemine göre dönme matrisi R , A koordinat sisteminin W koordinat sistemine göre öteleme vektörü $t=(t_x,t_y,t_z)$ ise, P noktasının W koordinat sistemindeki pozisyonu $P_W=R.P_A+t$ 'dir (Kyrki, 2007). (2.7)



Şekil 2.8 Bir koordinat sistemindeki bir noktanın farklı bir koordinat sisteminde tanımlanması (Kyrki, 2007)

2.2.5 Düzlem Denklemi

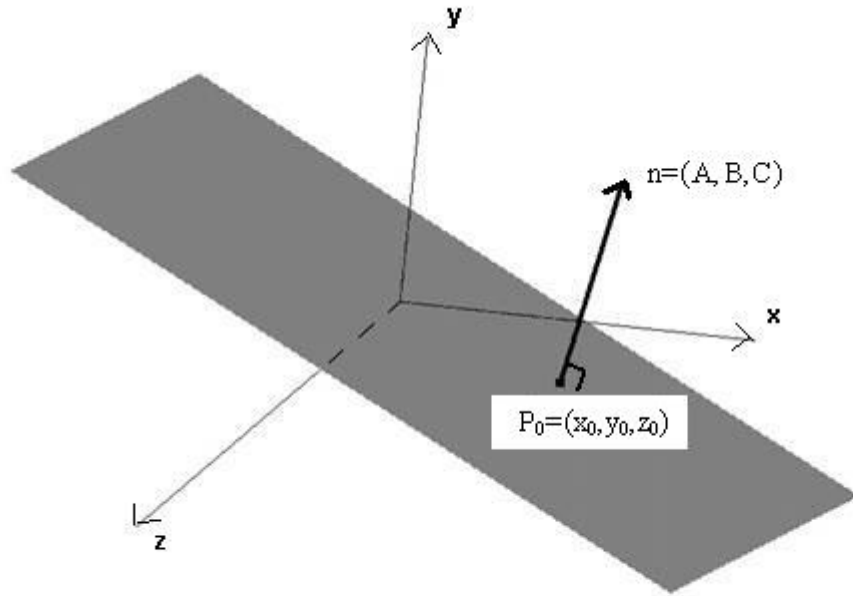
Şekil 2.9'da görülen $n=(A,B,C)$ vektörü düzlem normali olmak üzere,

$n=(A,B,C)$ vektörünün başlangıç noktası $P_0=(x_0,y_0,z_0)$ ise,

$n \cdot (x-P_0)=0$ genel düzlem denklemi, (2.8)

ya da

$A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0$ 'dır (mathworld.wolfram.com/Plane.html, 2007). (2.9)



Şekil 2.9 Düzlem denklemi (mathworld.wolfram.com/Plane.html, 2007)

(x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) ve (x_3, y_3, z_3) düzlem üzerindeki 3 nokta,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} x_1 & 1 & z_1 \\ x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix} \text{ ve } D = - \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix} \text{ ise,}$$

$$A = y_1 \cdot (z_2 - z_3) + y_2 \cdot (z_3 - z_1) + y_3 \cdot (z_1 - z_2)$$

$$B = z_1 \cdot (x_2 - x_3) + z_2 \cdot (x_3 - x_1) + z_3 \cdot (x_1 - x_2)$$

$$C = x_1 \cdot (y_2 - y_3) + x_2 \cdot (y_3 - y_1) + x_3 \cdot (y_1 - y_2) \text{ ve}$$

$$- D = x_1 \cdot (y_2 \cdot z_3 - y_3 \cdot z_2) + x_2 \cdot (y_3 \cdot z_1 - y_1 \cdot z_3) + x_3 \cdot (y_1 \cdot z_2 - y_2 \cdot z_1)$$

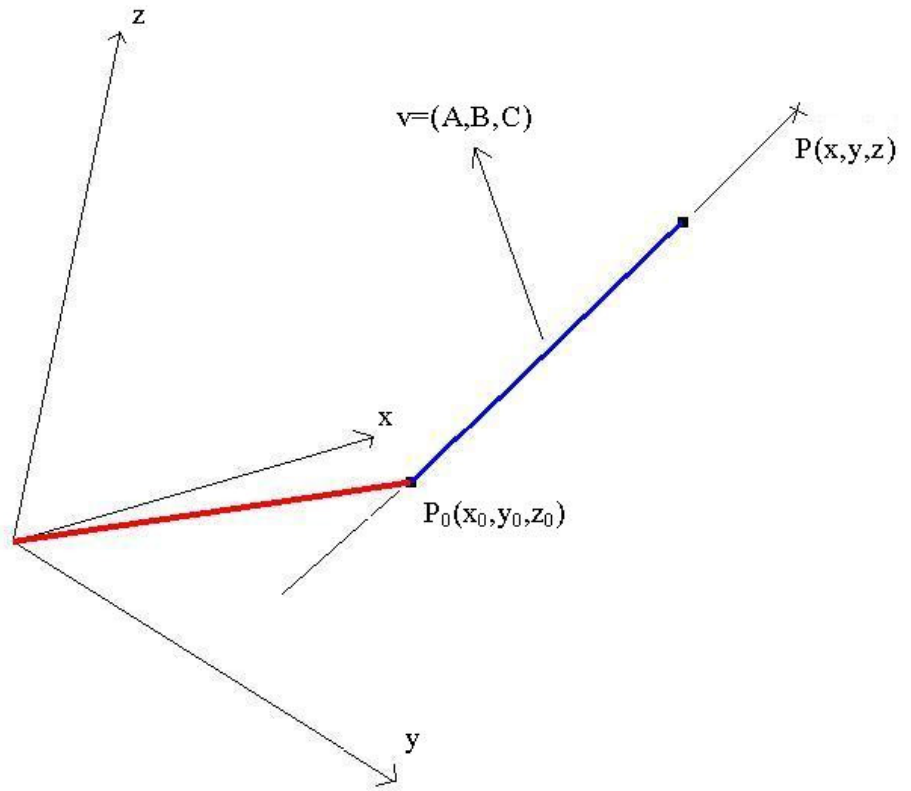
dir (Bourke, 2007).

(2.10)

2.2.6 Çizgi Denklemi

Şekil 2.10’da görülen $P_0(x_0, y_0, z_0)$ noktasından geçen $v=(A, B, C)$ doğrultusundaki çizginin denklemi,

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} \cdot t + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \text{ ‘dir (ies.co.jp/math/java/vector/chok3D/chok3D.html, 2007). (2.11)}$$



Şekil 2.10 Çizgi denklemi (ies.co.jp/math/java/vector/chok3D/chok3D.html, 2007)

2.2.7 Çizgi ve Düzlem Kesişimi

$A.x+B.y+C.z+D=0$ düzlem denklemi ve $P_1(x_1,y_1,z_1)$ ile $P_2(x_2,y_2,z_2)$ çizgi üzerinde iki nokta,

P çizgi üzerindeki noktalar ve

$P=P_1+t.(P_2-P_1)$ ise,

$A.(x_1+t.(x_2-x_1))+B.(y_1+t.(y_2-y_1))+C.(z_1+t.(z_2-z_1))+D=0$ ise,

$$t = \frac{A.x_1 + B.y_1 + C.z_1 + D}{A.(x_1 - x_2) + B.(y_1 - y_2) + C.(z_1 - z_2)} \text{ 'dir.} \quad (2.12)$$

t , x , y ve z de yerine konursa çıkan x , y ve z kesişim noktasıdır (Bourke, 2007).

Ya da Şekil 2.11'de görülen,

x_1, x_2 ve x_3 düzlem üzerindeki üç nokta ve x_4 ile x_5 çizgi üzerindeki iki nokta,

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 \\ x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \end{bmatrix} = 0,$$

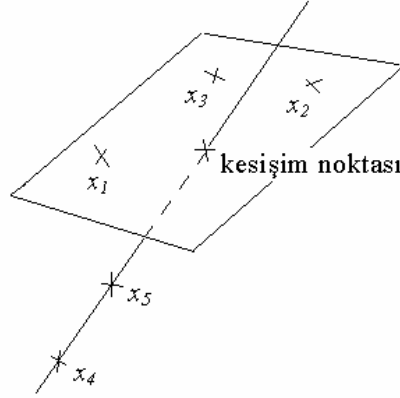
$x = x_4 + (x_5 - x_4).t$,

$y = y_4 + (y_5 - y_4).t$ ve

$z = z_4 + (z_5 - z_4).t$ ise,

$$t = - \frac{\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ x_1 & x_2 & x_3 & (x_5 - x_4) \\ y_1 & y_2 & y_3 & (y_5 - y_4) \\ z_1 & z_2 & z_3 & (z_5 - z_4) \end{vmatrix}} \text{ 'dir.} \quad (2.13)$$

t , x , y ve z de yerine konursa çıkan x , y ve z kesişim noktasıdır (mathworld.wolfram.com/Line-PlaneIntersection.html, 2007).



Şekil 2.11 Çizgi ve düzlem kesişimi

2.3 Kamera ve Görüntüler

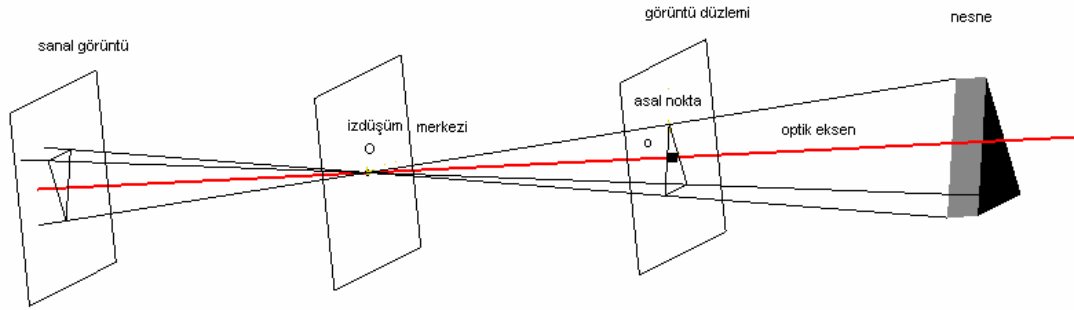
2.3.1 Kalibrasyon ve Kalibrasyon Parametreleri

Kamera kalibrasyonu, kamera odak uzaklığı ve kamera pozisyonları gibi kamera parametrelerinin bulunmasını sağlar. Üzerinde ölçüleri bilinen kareler bulunan kalibrasyon nesnesinin görüntüleri alınarak kamera kalibrasyonu yapılabilir (Zhang, 1998). Kalibrasyon nesnesi kullanmadan, görüntülerdeki noktaların eşleştirilmesi ile de kamera kalibrasyonu yapılabilir (Faugeras et al., 1992).

Kamera parametreleri iç ve dış parametreler olarak ikiye ayrılır. İç parametreler, piksel koordinatlarıyla kamera koordinatları arasındaki ilişki, dış parametreler ise kamera koordinatlarıyla uzay koordinatları arasındaki ilişkidir (Kyrki, 2007).

Şekil 2.12’de iç parametreler görülmektedir. İzdüşüm merkezi ile görüntü düzlemi arasındaki uzaklık odak uzaklığı, izdüşüm merkezinden geçen görüntü düzlemine dik

eksen optik eksen ile optik eksenin görüntü düzlemi ile kesişimi ise asal noktadır. Pikseller çoğunlukla dikdörtgendir, değilse kenarın düşeyle yaptığı açı yan açıdır. Görüntülerde meydana gelen bükülmeler bükülme sabitiyle düzeltilir (Bouguet, 2006).



Şekil 2.12 İç parametreler (Kyrki, 2007)

Dış parametreler ise kalibrasyon nesnesi ile kamera koordinat eksenleri arasındaki öteleme (Tc_{ext}), kalibrasyon nesnesi ile kamera koordinat eksenleri arasındaki dönme (Rc_{ext}), 'Rodrigues' formülü ve dönme matrisiyle ilişkilendirilmiş dönme vektörü (omc_{ext}) ile kalibrasyon nesnesi koordinat ekseninde köşelerin koordinatları (X_{ext})'dir (Bouguet, 2006).

Şekil 2.13'te görülen, P uzayda bir nokta ve bu noktanın kalibrasyon nesnesi koordinat ekseninde koordinat vektörü $XX=(X,Y,Z)$,

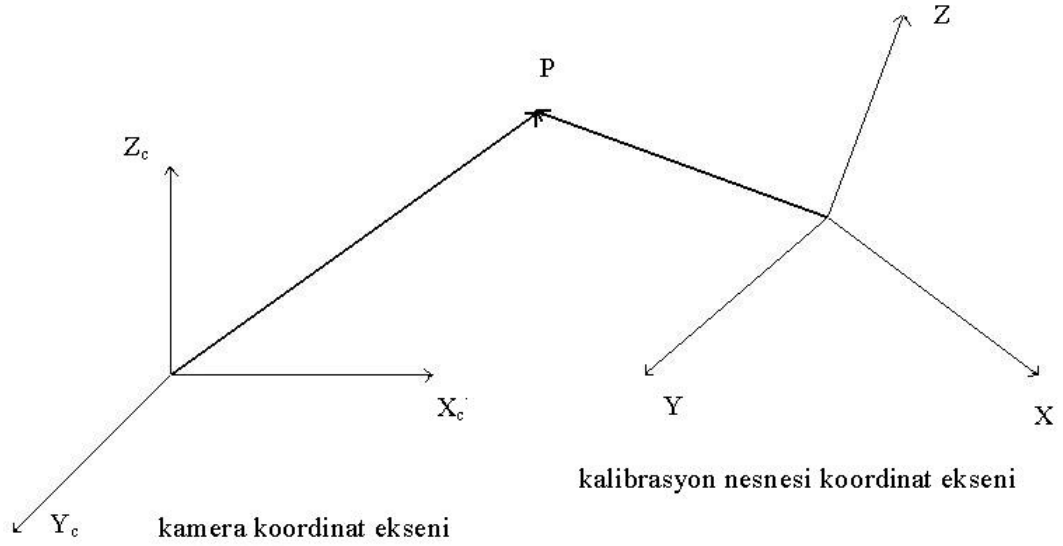
P noktasının kamera koordinat eksenine göre koordinat vektörü $XX_c = (X_c, Y_c, Z_c)$,

Tc_{ext} : öteleme vektörü ve

Rc_{ext} : dönme matrisi ise,

$XX_c=Rc_{ext}.XX+Tc_{ext}$ 'dir (Bouguet, 2006).

(2.14)

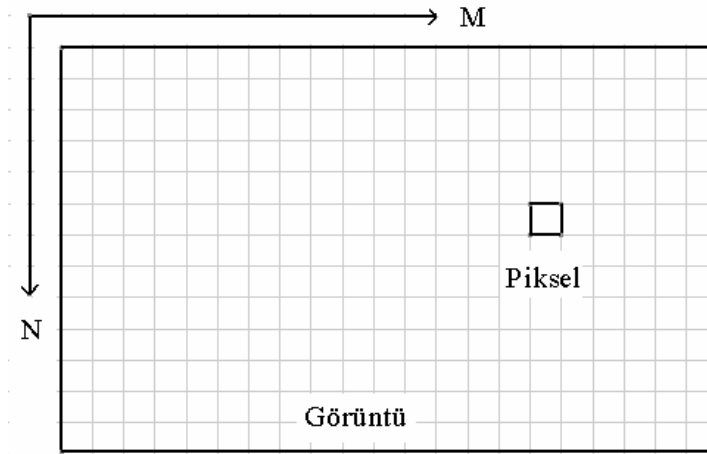


Şekil 2.13 Kamera ve kalibrasyon nesnesi koordinat eksenleri

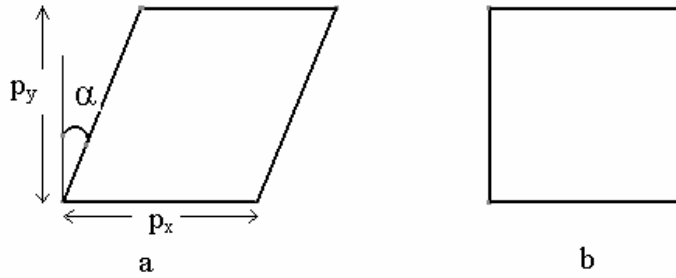
2.3.2 Görüntüler

Şekil 2.14'de görülen dijital görüntü, $N.M$ pikselden oluşan matristir (Kyrki, 2007). $N.M$ matriste her pikselin 0 ile 255 arasında bir karşılığı vardır ve her sayı bir renge karşılık gelir. Siyah beyaz görüntüler 0 ile 1 lerden oluşur (mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/images/images_tb.pdf, 2007).

Şekil 2.15b'de görüldüğü gibi, pikseller dörtgendir ve gerçek kameralarda dörtgenler çoğunlukla dikdörtgen ve birbirine eşittir (Pollefeys, 2002). Bu çalışmada da pikseller eşit ve dikdörtgen alınır, p_x yatayda ve p_y düşeyde pikselin boyudur. Şekil 2.15a'da görülen, dikdörtgen olmayan pikselde yan açı (α) pikselin düşey eksen ile yaptığı açıdır (Pollefeys, 2002).

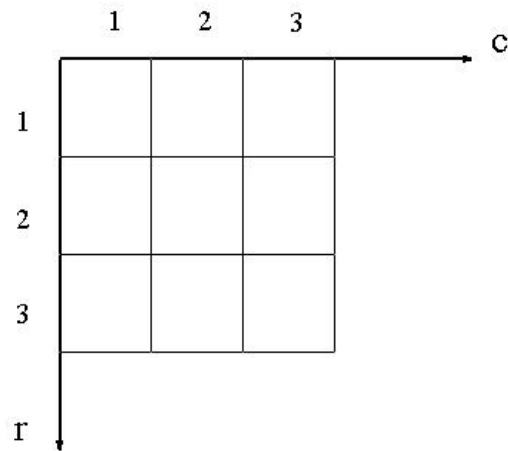


Şekil 2.14 Görüntü, $N.M$ matris



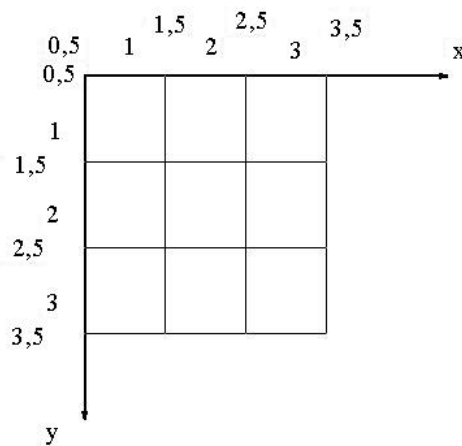
Şekil 2.15 Piksel (Pollefeys, 2002)

Şekil 2.16’da görüldüğü gibi, Matlab’da görüntüler iki boyutlu diziler halinde ifade edilir. Görüntü yukarıdan aşağıya ve soldan sağa olmak üzere iki diziden oluşur. Yukarıdan aşağıya olan dizi kolon, soldan sağa olan ise sıralardır. Kolonlar c , satırlar ise r ile gösterilir ve bunlar piksel koordinatlarıdır (mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/images/images_tb.pdf, 2007).



Şekil 2.16 Piksel koordinatlar (mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/images/images_tb.pdf, 2007)

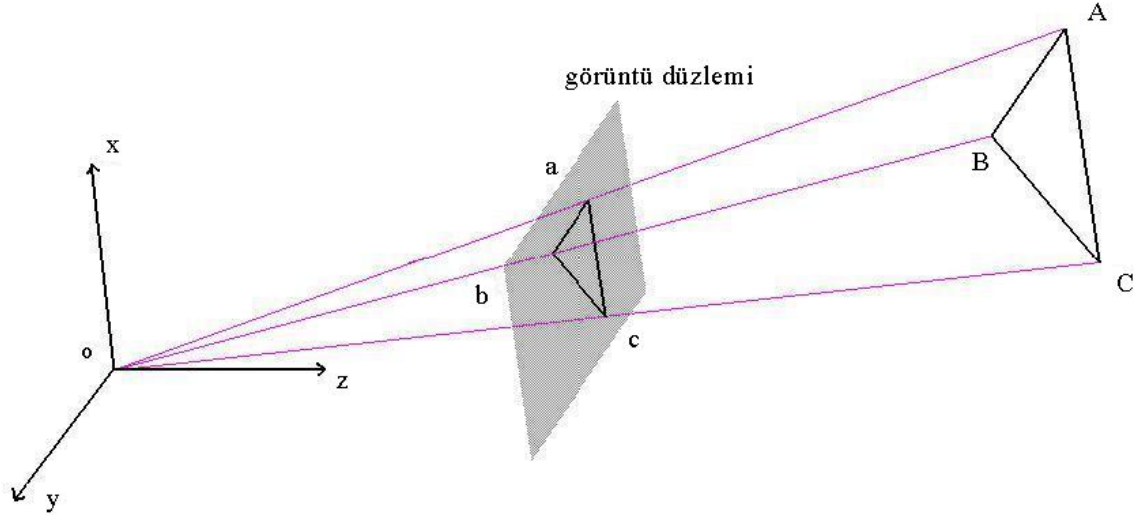
Spatial koordinat eksenleri, c ve r yerine, sırasıyla x ve y olmak üzere, x yatay, y ise düşey eksenidir. Spatial koordinat eksenine göre her pikselin orta noktası piksel koordinatlarına karşılık gelir. Örneğin, piksel koordinatları $(1,1)$ olan sol üst eleman, spatial koordinat ekseninde $(0.5,0.5)$ olarak ifade edilir (Şekil 2.17). Spatial koordinatlar sürekli, piksel koordinatlar ayrı (discrete)'dir (mathworks.com/access/helpdesk/help/df_doc/images/images_tb.pdf, 2007).



Şekil 2.17 Spatial koordinatlar (mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/images/images_tb.pdf, 2007)

2.3.3 Perspektif İzdüşümü

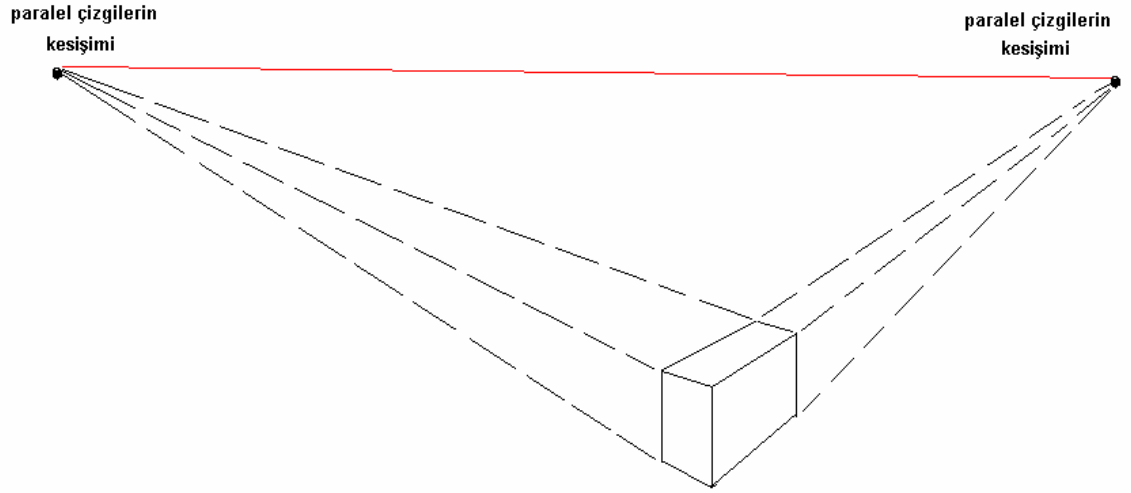
Şekil 2.18’de görülen uzaydaki A, B ve C noktalarının, $2B$ ’li görüntü düzlemindeki izdüşümleri sırasıyla a, b ve c ’dir. O noktası izdüşüm merkezidir (Owens, 1997).



Şekil 2.18 Perspektif izdüşümü (Owens, 1997)

Şekil 2.18’te aA doğru parçası üzerindeki bütün noktaların izdüşümü a noktasıdır. $3B$ ’de cisimlerin görüntülerinin büyüklükleri görüntü düzlemine uzaklıklarıyla ters orantılıdır. İzdüşüm merkeziyle görüntü düzlemi arasındaki uzaklık ile görüntüye giren nokta sayısı ters orantılıdır. $3B$ ’de çizgiler $2B$ ’de, görüntü düzleminde de çizgidir. $3B$ ’de noktalar $2B$ ’de, görüntü düzleminde de noktadır. Uzunluk ve açılar korunmaz. Görüntü düzlemine paralel değilse, çizgilerin paralelliği korunmaz (faculty.cs.tamu.edu/jchai/CPSC641_fall07/PerspectiveProjection.pdf, 2007).

Şekil 2.19’da görülen $3B$ ’de paralel çizgiler görüntü düzleminde paralel kalır veya uzantıları bir noktada (Vanishing point) kesişir (faculty.cs.tamu.edu/jchai/CPSC641_fall07/PerspectiveProjection.pdf, 2007).



Şekil 2.19 Paralel çizgilerin kesişimi (leake.ge.uiuc.edu/EG%20Lecture%20Slides/EG3.ppt#266,6, Vanishing Points, 2007)

2.3.4 Perspektif Kamera Modeli

Şekil 2.20’de görülen, O kamera izdüşüm merkezi olmak üzere, basitleştirmek için kamera izdüşüm merkezi koordinat sisteminin sıfır noktasıyla çakıştırılır ve görüntü düzlemi kamera odak uzaklığına

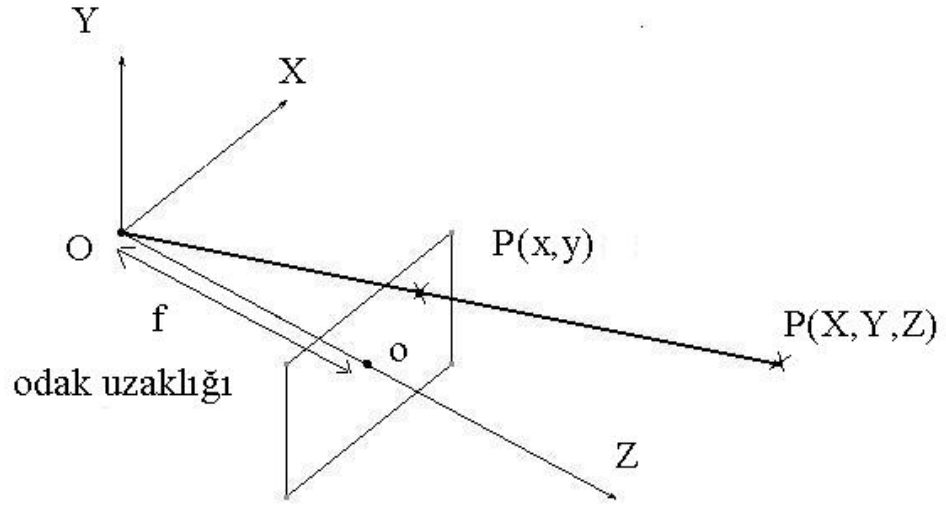
$Z=f$ konursa,

Şekil 2.21’de görülen üçgenlerin benzerliği kullanılarak,

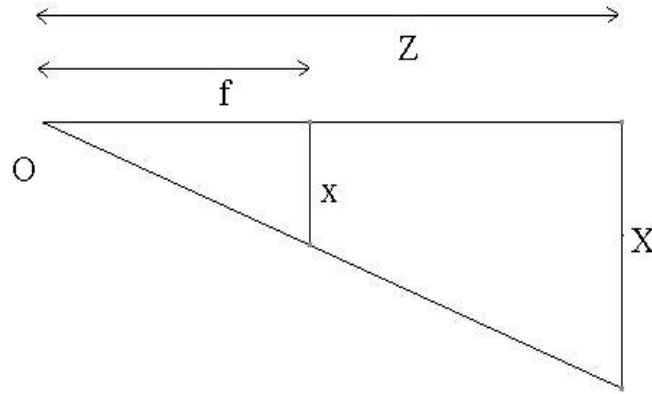
$x=f \cdot (X/Z)$ ve

$y=f \cdot (Y/Z)$ ’dir (Tao, 2007).

(2.15)

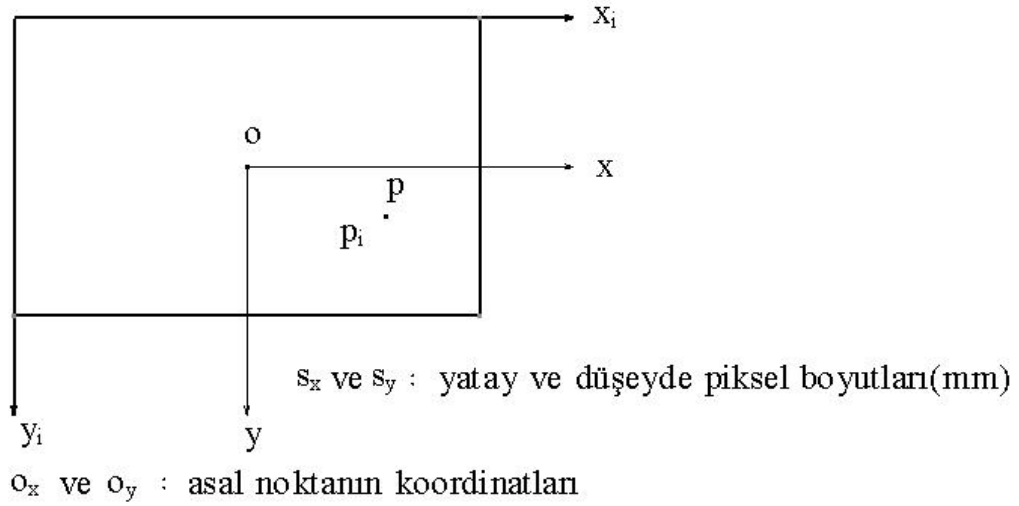


Şekil 2.20 Perspektif kamera modeli (Kyrki, 2007)



Şekil 2.21 Perspektif kamera modeli, benzer üçgenler (Tao, 2007)

Koordinatları (X,Y,Z) olan P noktasının görüntüsü (x,y) olan p noktasıdır. OZ ışını optik eksen, o noktası asal noktadır. Optik eksen görüntü düzlemine diktir (Pollefeys, 2002). Şekil 2.22’de forülen $p_i(x_i,y_i)$ piksel koordinatları, $p(x,y)$ ise aynı pikselin kamera koordinat sisteminde koordinatlarıdır (Tao, 2007).



Şekil 2.22 Piksel koordinatları (Tao, 2007)

Şekil 2.22’de görülen, görüntüdeki bükülme (distortion) ihmal edilirse ve dikdörtgen pikseller ile:

$$x = -(x_i - o_x) \cdot s_x$$

$$y = -(y_i - o_y) \cdot s_y$$

dir (Kyrki, 2007).

(2.16)

o_x ve o_y : asal noktanın koordinatları,

s_x ve s_y : yatay ve düşeyde piksellerin boyutları (mm),

f, o_x, o_y, s_x, s_y iç parametrelerdir (Kyrki, 2007).

cR_w dönme matrisi ve
 wT_c öteleme vektörü olmak üzere,
 cR_w ve wT_c dış parametreler,

$$P_c = {}^cR_w \cdot (P_w - {}^wT_c) \text{ 'dir (Kyrki, 2007).} \quad (2.17)$$

$$K = \begin{bmatrix} -f/sx & 0 & ox \\ 0 & -f/sy & oy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ ve} \quad (2.18)$$

$K \cdot ({}^cR_w \cdot {}^cP_w)$ izdüşüm matrisi, .

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = K \cdot ({}^cR_w \cdot {}^cP_w) \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \text{ 'dir (Kyrki, 2007).} \quad (2.19)$$

Buradan görüntü koordinatları,

$$x_i = u/w \quad \text{ve}$$

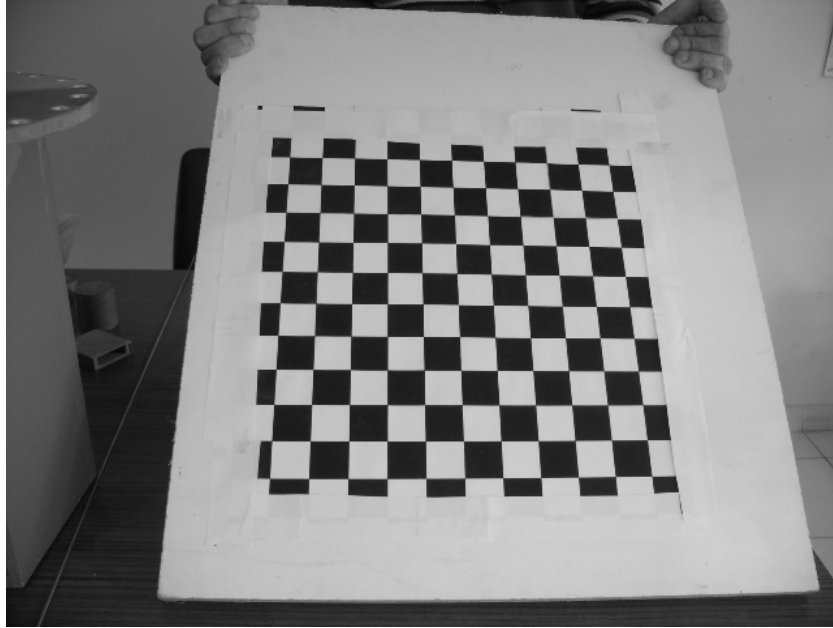
$$y_i = v/w$$

$$\text{olarak bulunur (Kyrki, 2007).} \quad (2.20)$$

3. KAMERA KALİBRASYONU

3.1 Kamera Kalibrasyonu

Tez çalışmasında Matlab ile çalışan '*Kamera kalibrasyon araç takımı*' kullanılır (Bouguet, 2006). Yöntemde, Şekil 3.1'de kalibrasyon için kullanılan, üzerinde siyah beyaz kareler bulunan düzlemsel nesne görülmektedir. Karelerin bir kenarı 30 mm'dir ve kalibrasyon nesnesi üzerinde $10.10=100$ adet kare bulunur.



Şekil 3.1 Kalibrasyon nesnesi

Kalibrasyon nesnesinin farklı açı ve uzaklıklardan 20 adet görüntüsü alınır. İlk görüntü *Image1*, son görüntü *Image20* olmak üzere görüntüler '*Image*' ön sözcüğünün sonuna birer artarak getirilen numaralar ile isimlendirilir. Görüntüler, *jpeg* formatında ve 640.480 'dir.

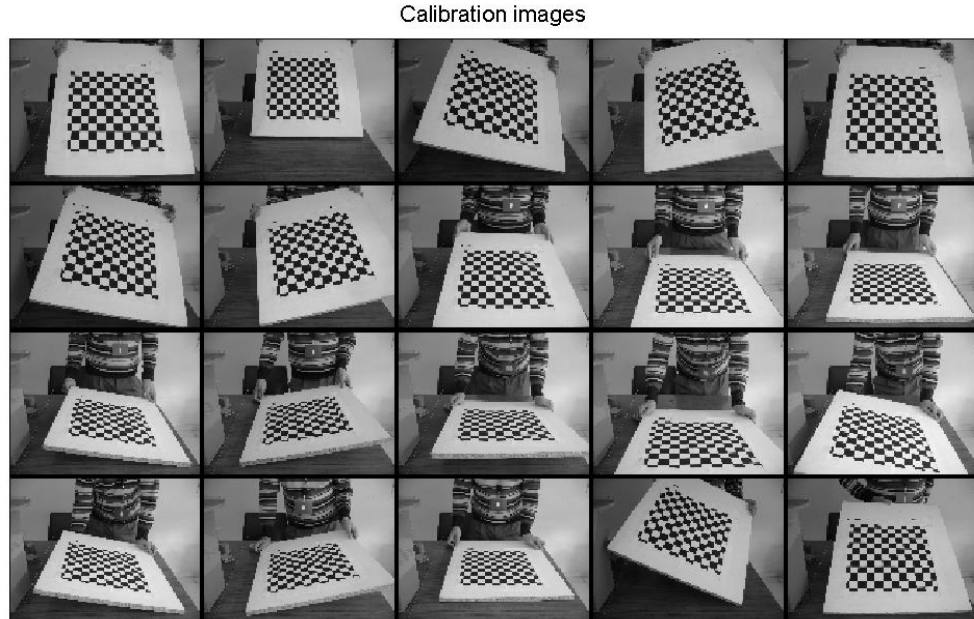
'*calib_gui_normal*' isimli *.m* dosyası çalıştırılır (Bouguet, 2006). Şekil 3.2'de ekrana gelen kamera kalibrasyon araç takımı arayüzü görülmektedir.



Şekil 3.2 Kalibrasyon araç takımı arayüzü

3.2 Görüntülerin Girilmesi

Kamera kalibrasyon araç takımı arayüzünde ‘Image names’ çalıştırıldıktan sonra Matlab komut penceresinde ekrana gelen satıra ‘Image’ girilir. Görüntü formatı olarak ‘ras’, ‘bmp’, ‘tif’, ‘jpeg’ vb. formatlar kullanılabilir. Görüntü formatı *jpeg* için Matlab komut penceresinde ‘j’ girilir (Bouguet, 2006). Şekil 3.3’te, kalibrasyonda kullanılan görüntülerin ekrana geldiği pencere görülmektedir.



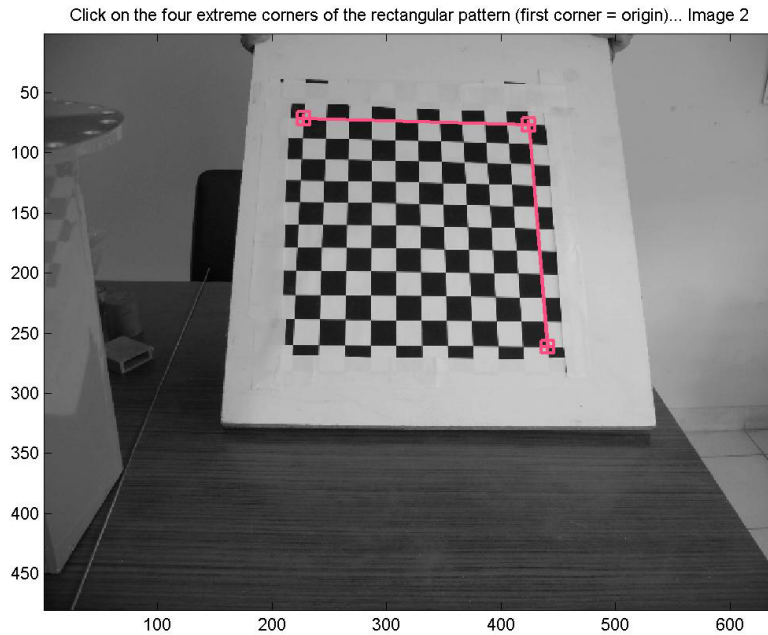
Şekil 3.3 Kalibrasyon görüntüleri

3.3 Karelerin Köşelerinin Belirlenmesi

Kamera kalibrasyon araç takımı arayüzünde ‘*Extract grid corners*’ çalıştırılır. Kalibrasyonda bütün görüntüler kullanılacaksa matlab komut penceresinde boş girilir. Görüntülerin tamamı girilmek istenmiyorsa [] içine birer karakter boşluk bırakılarak istenilen görüntü numaraları girilir (Bouguet, 2006).

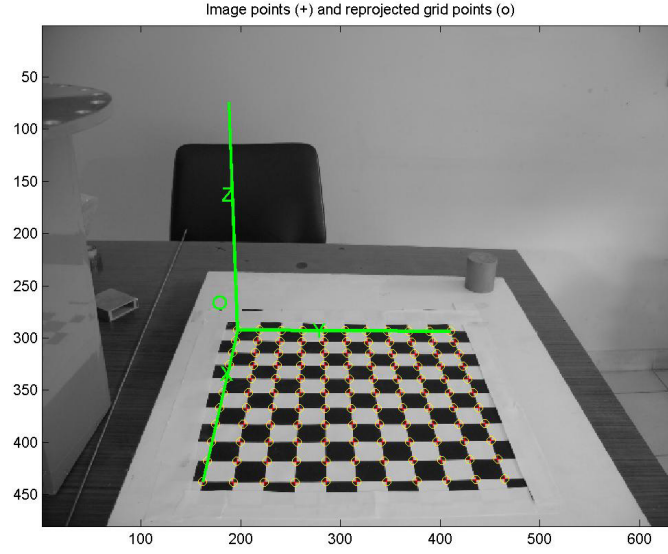
Kalibrasyon programında varsayılan pencere kenarları yatay ve dikey, ikisi için de 5'tir. Bu 11.11 piksellik pencere kenarlarına karşılık gelir. Varsayılan pencere kenarlarını kabul etmek için matlab komut penceresinde x ve y için birer defa olmak üzere iki defa boş girilir (Bouguet, 2006).

Algoritmanın görüntüdeki kare sayısını otomatik hesaplaması için boş, kare sayısını elle girmek için önce 1, ardından kare sayısı girilir. x ve y yönlerinde karelerin kenar uzunlukları olarak varsayılan 30 mm kenar uzunlukları için boş girilir (Bouguet, 2006). Şekil 3.4'te, ekrana gelen görüntüde kalibrasyon nesnesinin dört uç köşesinin seçilmesi görülmektedir.



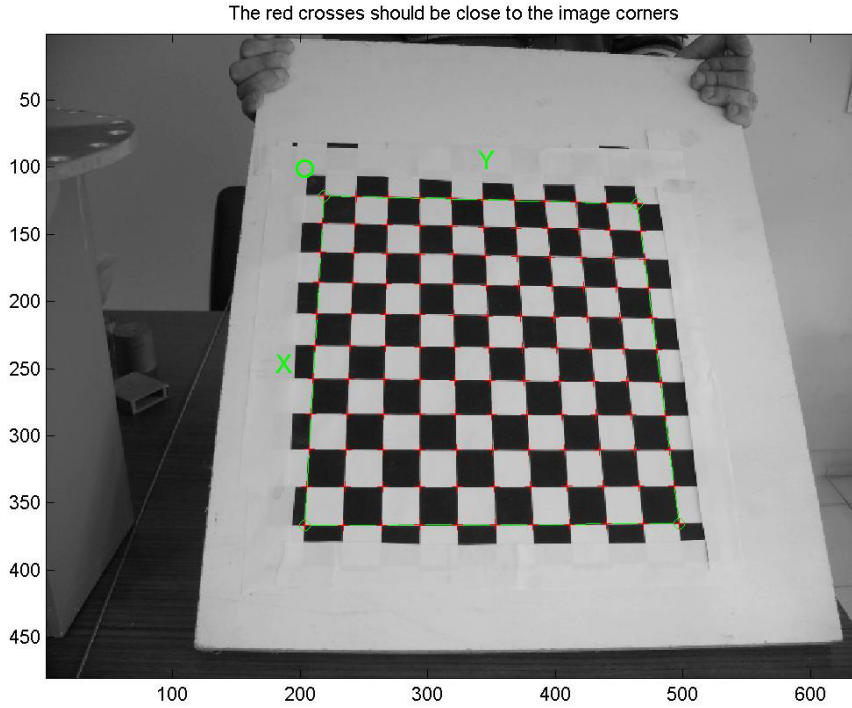
Şekil 3.4 Dört uç köşe seçilmesi

Şekil 3.5’de görülen O noktası, ilk seçilen nokta kalibrasyon nesnesinin koordinat ekseninin sıfır noktasıdır (Bouguet, 2006).



Şekil 3.5 Kalibrasyon nesnesi sıfır noktası

Karelerin x ve y eksenlerinde uzunlukları girilir ve ekrana algoritmanın bulduğu köşeler Şekil 3.6’da görülmektedir (Bouguet, 2006) .



Şekil 3.6 Kalibrasyon nesnesi köşeleri

Sonuçlar uygunsa boş girilir ve ikinci görüntünün köşelerinin belirlenmesine geçilir, aynı adımlar diğer görüntüler için tekrarlanır (Bouguet, 2006).

3.4 Kalibrasyon

Kamera kalibrasyon araç takımı arayüzünde ‘*calibration*’ çalıştırılır ve Matlab komut penceresinde kalibrasyon iç parametreleri ekrana gelir. Bunlar,

fc: odak uzaklığı,

cc: görüntü asal noktası,

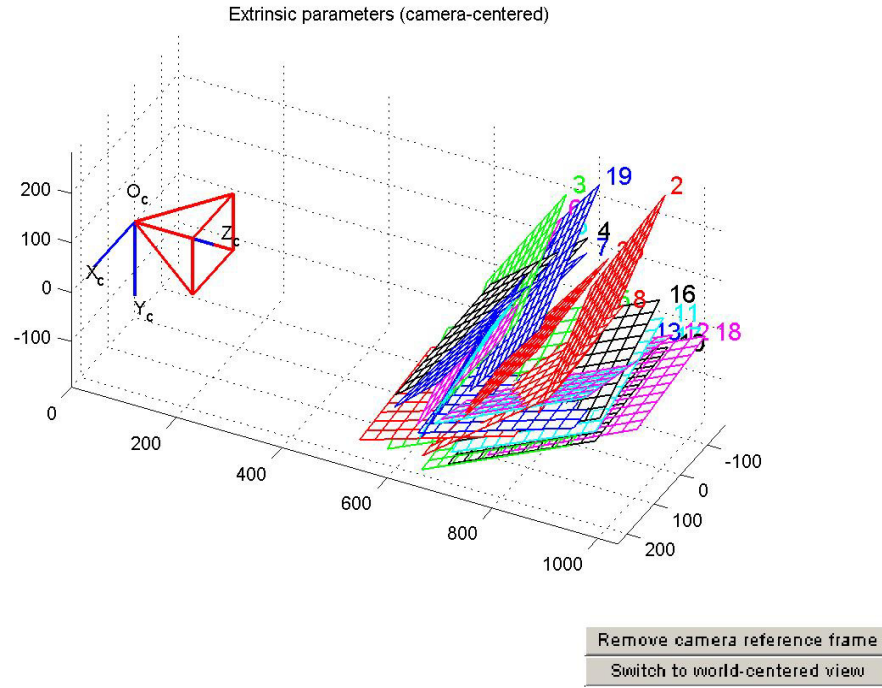
alpha_c: piksellerin yatay ve düşeyinin arasındaki açı ve

kc: görüntüdeki bükülme (distortion) için katsayıdır (Bouguet, 2006).

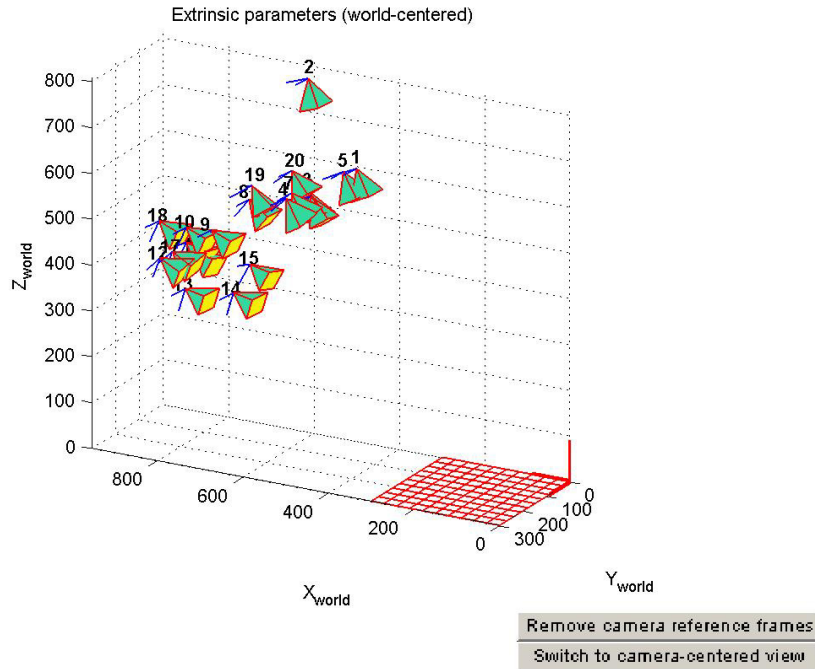
3.5 Dış Parametrelerin Gösterilmesi

Kamera kalibrasyon araç takımı arayüzünde ‘*show extrinsic*’ çalıştırılır. Kalibrasyon nesnesinin kamera koordinat eksenine göre pozisyonları ekrana gelir (Şekil 3.7). Şekil 3.7’de, $O_c(X_c, Y_c, Z_c)$ kamera koordinat ekseninin sıfır noktası ve kırmızı piramidin tabanı kameranın görüntü düzlemidir (Bouguet, 2006).

Şekil 3.8’de görülen, ‘*switch to world centered view*’ ile koordinat eksenine göre kameranın görüntülerdeki pozisyonları ve yönleri ekrana gelir (Bouguet, 2006).



Şekil 3.7 Kalibrasyon nesnesinin kamera koordinat eksenine göre pozisyonları



Şekil 3.8 Koordinat eksenine göre kameranın görüntülerdeki pozisyonları ve yönleri

3.6 Dış Parametrelerin Bulunması

Kamera kalibrasyon araç takımı arayüzünde ‘*comp extrinsic*’ çalıştırılarak matlab komut penceresinde görüntü ismi girilir. Görüntü formatı girilir, önceki bölümde gösterildiği gibi karelerin köşeleri hesaplanır. Girilen görüntünün dış parametreleri matlab komut penceresinde ekrana gelir. Bunlar,

Translation vector:

$$Tc_ext = [-157.547067 \ 61.069606 \ 882.077868]$$

Rotation vector:

$$omc_ext = [1.518425 \ 1.482798 \ -0.920725]$$

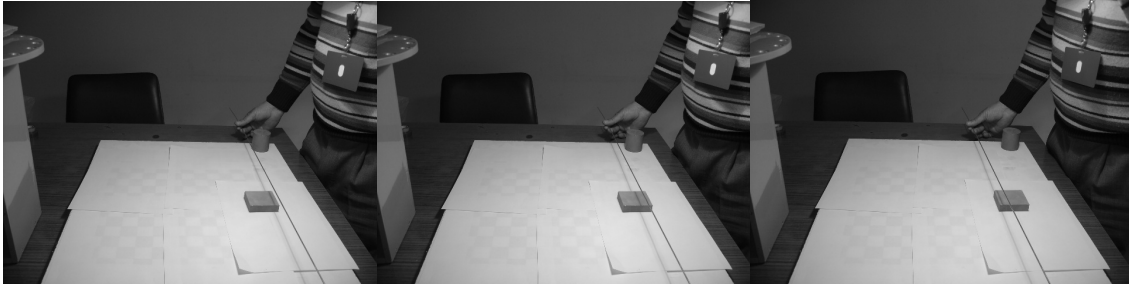
Rotation matrix:

$$Rc_ext = \begin{bmatrix} 0.045869 & 0.998358 & 0.034306 \\ 0.411980 & 0.012380 & -0.911109 \\ -0.910038 & 0.055925 & -0.410735 \end{bmatrix} \text{ 'dir (Bouguet, 2006).}$$

4. 3. BOYUTUN ELDE EDİLMESİ

4.1 Yöntem

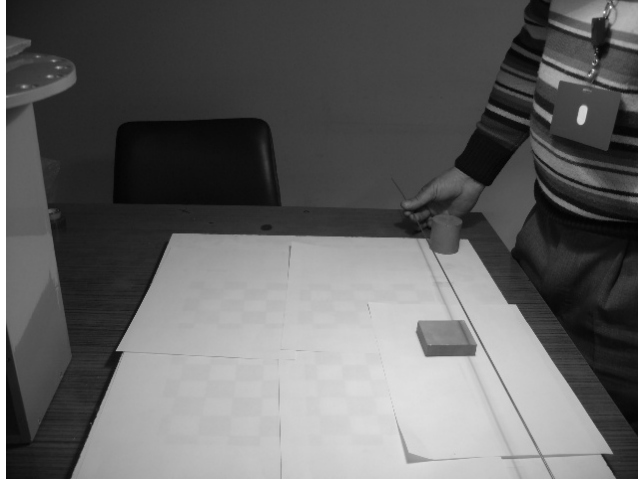
Kalibrasyon nesnesi serbest halde masa üzerine bırakılır ve üzeri beyaz renk ile kapatılır. 3. boyutu elde edilecek cisim kalibrasyon nesnesi üzerine konur. Şekil 4.1’de görülen, cisim üzerine bir çubuk vasıtasıyla gölge düşürülür ve çubuk hareket ettirilerek görüntüler alınır.



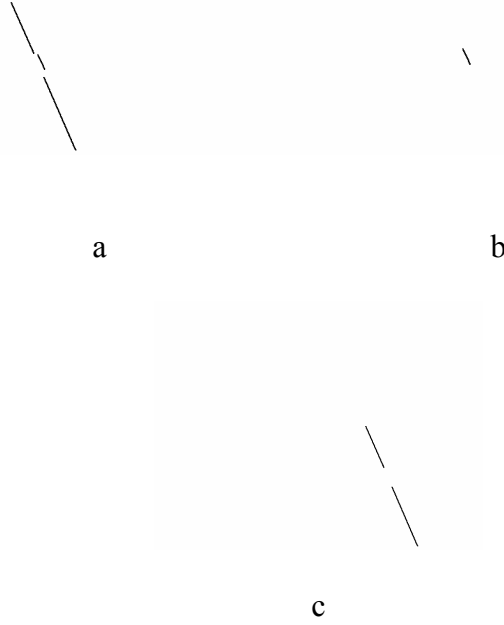
Şekil 4.1 Cisim üzerine gölge düşürülmesi

Alınan görüntüler üzerindeki gölgeler ‘*gimp*’ programı ile çizgiye dönüştürülür ve çizgi siyah, görüntünün diğer bölümleri beyaz olarak kaydedilir. Çünkü 3. boyutu elde eden Matlab m dosyası çizgiyi görüntünün 0 'ları olarak okur. Bu çizgi ayrıca parametrik olarak hesaplanır, denklemleri bulunur. Bu çizgiden kalibrasyon nesnesine dik düzlem hesaplanır. Dik düzlemin hesaplanmasındaki amaç kameradan çıkan ve görüntüdeki bir noktadan geçen ışığın bu dik düzlem ile kesişiminin bu noktanın görüntüde kaybolan üçüncü boyutunu vermesidir. Başka bir deyişle görüntüdeki bir nokta uzayda bu ışın üzerinde herhangi bir yerde olabilir ve bu noktanın yeri gölgeye dik düzlemin hesaplanması ile bulunur. Işık ve çubuğun kalibrasyon nesnesine dik olduğu varsayılır. Cisim yüzeyindeki gölgelerin elde edilmesinde bu diklik özelliği kullanılır (Baran,2007).

3. boyut elde edilmesinde cisim üzerine düşürülen gölgenin kırılması kullanıldığından görüntüdeki gölgenin nesne üzerindeki ve kalibrasyon nesnesi düzlemindeki parçaları ayrı ayrı gereklidir (Şekil 4.2, 4.3).



Şekil 4.2 Kalibrasyon nesnesi ve cisim üzerinde gölgeler

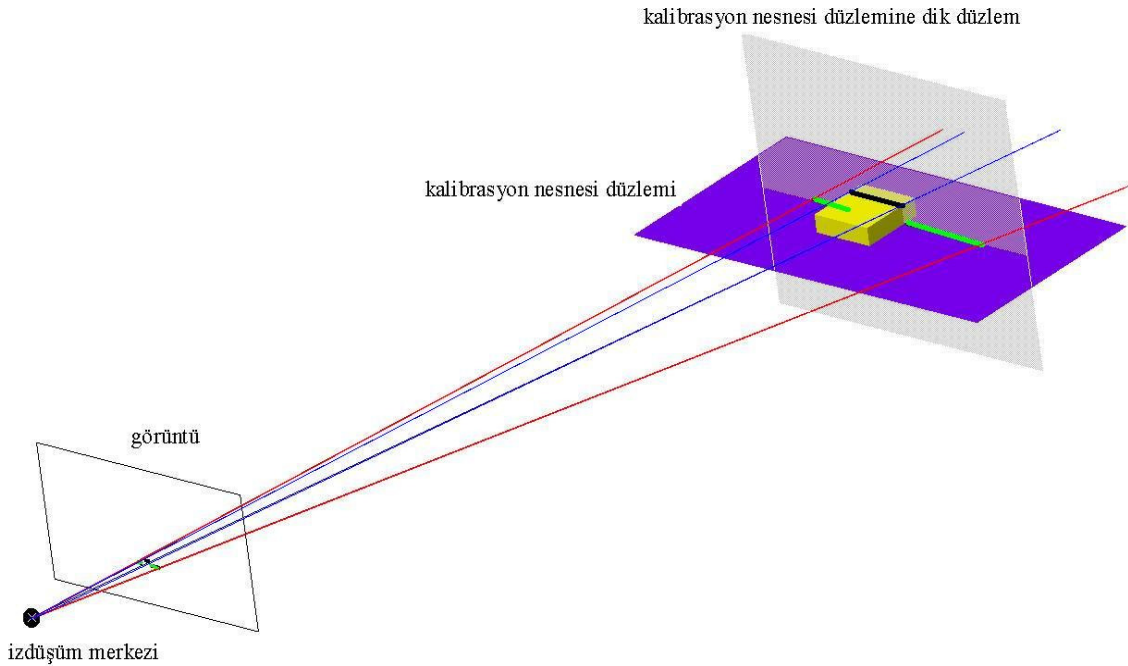


Şekil 4.3 a) Gimp ile çizgilere dönüştürülmüş gölgeler b) Cisim üzerindeki gölge
c) Kalibrasyon nesnesi düzlemi üzerindeki gölge

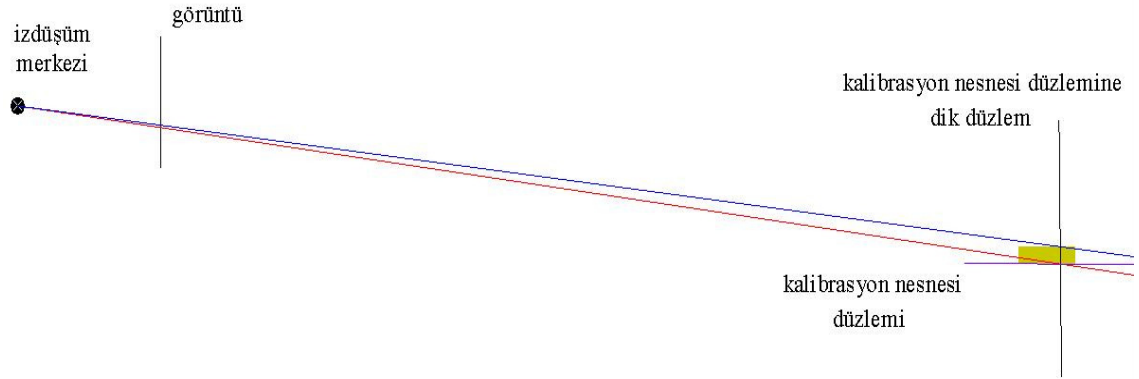
Şekil 4.4'de görülen yöntemde önce, görüntüde, kalibrasyon nesnesi üzerindeki gölge (ince yeşil renk ile gösterilen) okunur. Kamera izdüşüm merkezinden çıkan, kalibrasyon nesnesi üzerindeki gölgenin görüntüsünden (ince yeşil renk ile gösterilen) geçen ışınların (kırmızı ile gösterilen) kalibrasyon nesnesi düzlemi ile kesişimi (kalın yeşil renk ile gösterilen) bulunur.

Kalibrasyon nesnesi düzleminde geçen kalibrasyon nesnesi düzlemine dik düzlem hesaplanır (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5).

Cisim üzerindeki gölge (ince siyah renk ile gösterilen) okunur ve Şekil 4.4'de görülen, kamera izdüşüm merkezinden çıkan, cisimdeki gölgenin görüntüsünden geçen ışınların (mavi renk ile gösterilen) kalibrasyon nesnesine dik olan düzlem ile kesişimi (kalın siyah renk ile gösterilen) bulunur. Bulunan kesişim, cismin 3B'li kesitidir.



Şekil 4.4 Yöntem



Şekil 4.5 Kalibrasyon nesnesi düzlemi ve buna dik düzlem

4.2.3. Boyutu Elde Eden m Dosyası

3. boyutu elde eden m dosyasının girdileri, kalibrasyon nesnesi köşelerinin koordinatları, cisim yüzeyi ve kalibrasyon nesnesi düzlemindeki gölgeler, kamera odak uzaklığı, asal nokta, kalibrasyon nesnesi ile kamera koordinat eksenleri arasındaki öteleme ve dönme matrisleridir. Çıktılar ise kalibrasyon nesnesi ve cismin yüzeyindeki 3B'li gölgelerdir.

4.2.1 Kalibrasyon Nesnesi Köşeleri

Şekil 4.6'da görülen kalibrasyon nesnesi köşelerinin koordinatları XX matrisi ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 XX = [& 0 \quad 30 \quad 60 \quad 90 \quad 120 \quad 150 \quad 180 \quad 210 \quad 240 \quad 270 \quad 300 \quad 0 \quad 30 \quad 60 \quad 90 \quad 120 \\
 & 150 \quad 180 \quad 210 \quad 240 \quad 270 \quad 300 \quad 0 \dots \\
 & \quad 30 \quad 60 \quad 90 \quad 120 \quad 150 \quad 180 \quad 210 \quad 240 \quad 270 \quad 300 \quad 0 \quad 30 \quad 60 \quad 90 \quad 120 \quad 150 \\
 & \quad 180 \quad 210 \quad 240 \quad 270 \quad 300 \quad 0 \quad 30 \dots \\
 & \quad \quad 60 \quad 90 \quad 120 \quad 150 \quad 180 \quad 210 \quad 240 \quad 270 \quad 300 \quad 0 \quad 30 \quad 60 \quad 90 \quad 120 \quad 150 \quad 180 \\
 & \quad \quad \quad 210 \quad 240 \quad 270 \quad 300 \quad 0 \quad 30 \quad 60 \dots
 \end{aligned}$$

90 120 150 180 210 240 270 300 0 30 60 90 120 150 180 210
240 270 300 0 30 60 90...

120 150 180 210 240 270 300 0 30 60 90 120 150 180 210 240
270 300 0 30 60 90 120...

150 180 210 240 270 300;
300 300 300 300 300 300 300 300 300 300 300 270 270 270 270 270
270 270 270 270 270 270 240...

240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 210 210 210 210 210
210 210 210 210 210 210 180 180...

180 180 180 180 180 180 180 180 180 150 150 150 150 150 150
150 150 150 150 150 120 120 120...

120 120 120 120 120 120 120 120 90 90 90 90 90 90 90 90
90 90 90 60 60 60 60...

60 60 60 60 60 60 60 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30
30 0 0 0 0 0...

0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0...

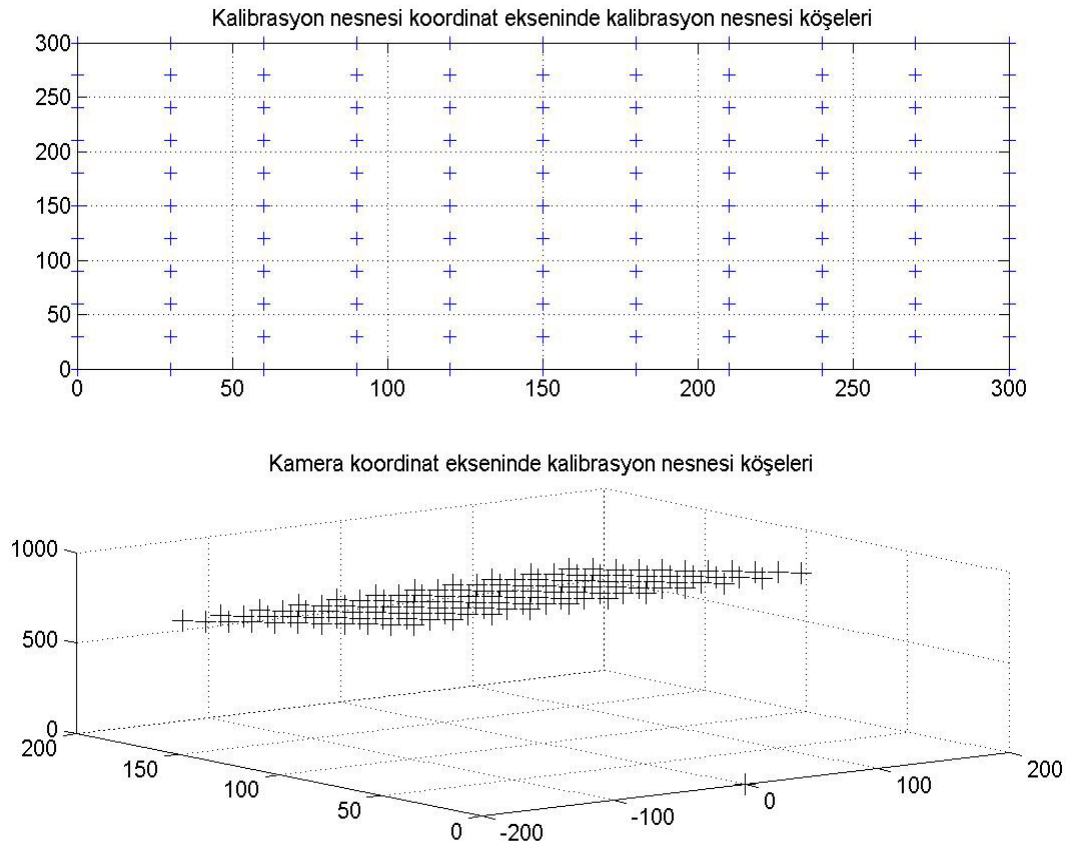
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0...

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0...

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0...

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0...

0 0 0 0 0 0]



Şekil 4.6 Kalibrasyon nesnesi koordinatları

4.2.2 Kalibrasyon ile Elde Edilen Odak Uzaklığı, Asal Nokta ve Transformasyon Vektör ve Matrisleri

$focal=633$

$cc = [309.54866 \quad 247.52667]$

% Translation vector:

$Tc_ext = [-157.547067 \quad 61.069606 \quad 882.077868]$

% Rotation vector:

$omc_ext = [1.518425 \quad 1.482798 \quad -0.920725]$

% Rotation matrix:

$$Rc_ext = \begin{bmatrix} 0.045869 & 0.998358 & 0.034306 \\ 0.411980 & 0.012380 & -0.911109 \\ -0.910038 & 0.055925 & -0.410735 \end{bmatrix}$$

4.2.3 Kalibrasyon Nesnesi Düzlemindeki Noktaların Kamera Koordinat Eksenine Transformasyonu

```

si=size(XX)
birler= ones(1,si(2));
Tc_ext';
TransArrx= Tc_ext(1,1)*birler;
TransArry= Tc_ext(1,2)*birler;
TransArrz= Tc_ext(1,3)*birler;
TransArr=[TransArrx;TransArry;TransArrz]
XXC=Rc_ext*XX+TransArr
XXC(:,1:8)

```

$XXC=Rc_ext.XX+TransArr$ eşitliği ile düzlemdeki noktalar düzlem koordinat ekseninden kamera koordinat eksenine taşınır, başka bir deyişle kalibrasyon nesnesi üzerindeki noktalar kamera koordinat ekseninde ifade edilir.

XXC: kalibrasyon nesnesi düzlemi üzerindeki köşelerin kamera koordinat eksenindeki pozisyonları

XX: kalibrasyon nesnesi düzlemi üzerindeki köşelerin kalibrasyon nesnesi koordinat eksenindeki pozisyonları

Rc_ext ve $TransArr$ sırasıyla dönme matrisi ve öteleme vektörüdür.

4.2.4 Kalibrasyon Nesnesi Düzleminin Bulunması

```
XXCplane=fitplane(XXC)
```

```
xc=[XXC(1,:) 0];
```

```
yc=[XXC(2,:) 0];
```

```
zc=[XXC(3,:) 0];
```

Elde edilen noktalar ile kalibrasyon nesnesi düzlemi elde edilir.

4.2.5 Kalibrasyon Nesnesi Üzerindeki Köşelerin Kalibrasyon Nesnesi ve Kamera Koordinat Eksenlerinde Gösterimi

```
subplot(211)
```

```
plot(XX(1,:),XX(2,:),'+')
```

```
grid on
```

```
subplot(212)
```

```
plot3(xc,yc,zc,'+',...
```

```
 'MarkerEdgeColor','k',...
```

```
 'MarkerFaceColor','k',...
```

```
 'MarkerSize',10.00)
```

```
grid on
```

4.2.6 Kalibrasyon Nesnesi Üzerindeki Gölgenin Okunması

```
ss='kag-2121.bmp'
```

```
I=zeros
```

```
I = imread(ss)
```

```
[i,j]=find(I<1)
```

```

FI=[i,j]
sssi=size(FI)
ssbirler= ones(1,sssi(1))

```

4.2.7 Kamera İzdüşüm Merkezi-Görüntüdeki Noktadan Geçen Işınla Kalibrasyon Nesnesinin (XXC plane) Kesiştiği Noktanın Bulunması

```

a=XXCplane(1)*ssbirler
b=XXCplane(2)*ssbirler
c=XXCplane(3)*ssbirler
d=XXCplane(4)*ssbirler
x0=0.0*ssbirler
y0=0.0*ssbirler
z0=0.0*ssbirler

```

```

pboy=0.02835

```

```

f=((j-0.5)-cc(1))*pboy
g=((i-0.5)-cc(2))*pboy
h=(focal*pboy)*ssbirler

```

```

[intersect, p1, p2, p3]= plane_imp_line_par_ben2 (ssbirler, a, b, c, d, x0, y0, z0, f, g, h)

```

```

intersect

```

```

if intersect==1 'intersect sayisi=', intersect
else stop
end

```

4.2.8 Kalibrasyon Nesnesi Üzerindeki Gölgenin Bulunması

```
PlanedekiCizgi=[p1; p2; p3]
duzlemde=PlanedekiCizgi;
Ltur=fitline3d(PlanedekiCizgi)
```

4.2.9 Kalibrasyon Nesnesi Üzerindeki Gölgenin Kaydedilmesi (aaaduzlemde. dat)

```
fid = fopen('C:\MATLAB6p5\work\aaaduzlemde.dat','w');
fprintf(fid,'%6.2f%6.2f%12.8f\n',duzlemde);
fclose(fid)
```

4.2.10 Kalibrasyon Nesnesi Üzerindeki Gölgeden Geçen Kalibrasyon Nesnesine Dik Düzlemin Bulunması

```
LturA=Ltur(1,2)-Ltur(1,1)
LturB=Ltur(1,1)
LturC=Ltur(2,2)-Ltur(2,1)
LturD=Ltur(2,1)
LturE=Ltur(3,2)-Ltur(3,1)
LturF=Ltur(3,1)

XXCplane(1:3)
bbbb=[-LturA;-LturB;-XXCplane(1)]
aaaa=[ LturC    LturE    0;
       LturD    LturF    1;
       XXCplane(2) XXCplane(3) 0]
DikPlane=aaaa^-1*bbbb
Saglama=aaaa*DikPlane
```

DikPlane=[1; DikPlane]

4.2.11 Cisim Üzerindeki Gölgenin Okunması

ss3='ciz-2121.bmp'

I3=zeros

I3 = imread(ss3)

[i3,j3]=find(I3<1)

FI3=[i3,j3]

si3=size(FI3)

ss3birler= ones(1,si3(1))

4.2.12 Kamera İzdüşüm Merkezi-Görüntüdeki Noktadan Geçen Işımla Kalibrasyon Nesnesine Dik Düzlemin (DikPlane) Kesiştiği Noktanın Bulunması

*a3=DikPlane(1)*ss3birler*

*b3=DikPlane(2)*ss3birler*

*c3=DikPlane(3)*ss3birler*

*d3=DikPlane(4)*ss3birler*

*x03=0.0*ss3birler*

*y03=0.0*ss3birler*

*z03=0.0*ss3birler*

pboy=0.02835

*f3=((j3-0.5)-cc(1))*pboy*

*g3=((i3-0.5)-cc(2))*pboy*

*h3=(focal*pboy)*ss3birler*

```
clear a b c d x0 y0 z0 f g h intersect p1 p2 p3
```

```
ssbirler=ss3birler
```

```
a=a3
```

```
b=b3
```

```
c=c3
```

```
d=d3
```

```
x0=x03
```

```
y0=y03
```

```
z0=z03
```

```
f=f3
```

```
g=g3
```

```
h=h3
```

```
[intersect, p1, p2, p3]=plane_imp_line_par_ben2(ssbirler, a, b, c, d, x0, y0, z0, f, g, h)
```

```
intersect
```

```
if intersect==1 'intersect sayisi=', intersect
```

```
else stop
```

```
end
```

4.2.13 Cisim Üzerindeki Gölgenin Bulunması

```
PlanedekiCizgi3=[p1; p2; p3]
```

```
golge=PlanedekiCizgi3
```

```
Ltur3=fitline3d(PlanedekiCizgi3)
```

```
AA = PlanedekiCizgi3'
```

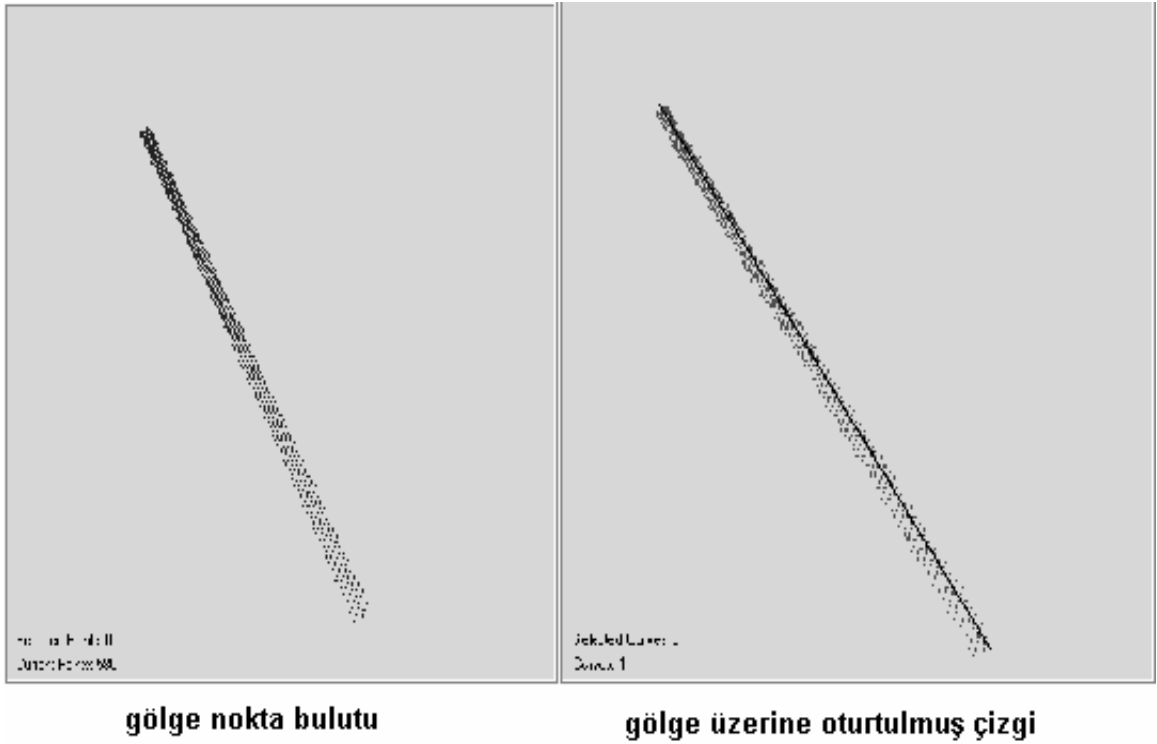
4.2.14 Cisim Üzerindeki Gölgenin Kaydedilmesi (aaagolge.dat)

```
fid = fopen('C:\MATLAB6p5\work\aaagolge.dat','w');
fprintf(fid,'%6.2f%6.2f%12.8f\n',golge);
fclose(fid)
```

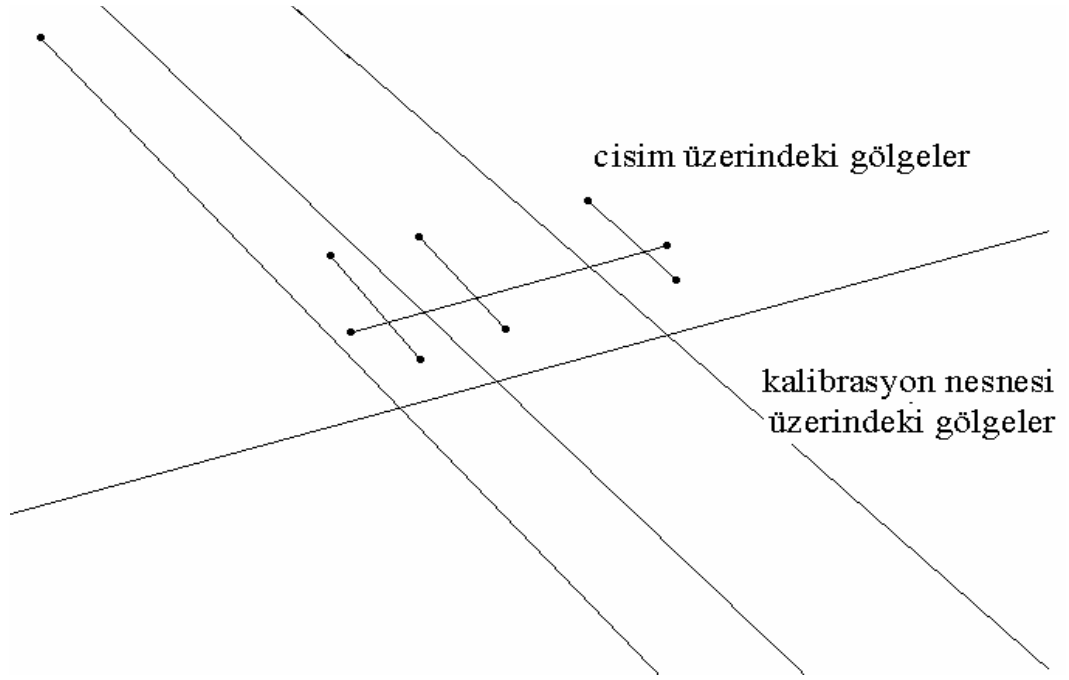
4.2.15 Ölçüm

Çalışmada dijital kamera, kalibrasyon nesnesi, ışık ve çubuk kullanılarak; görüntüde cisim yüzeyindeki 2B'li gölgelerin transformasyonu yapılarak, gölgeler 3B'li tanımlanmıştır.

Şekil 4.7'de cisim ve kalibrasyon nesnesi üzerindeki transformasyonu yapılmış 3B'li noktalar, Şekil 4.8'de ise noktaların üzerine oturtulmuş çizgiler görülmektedir.

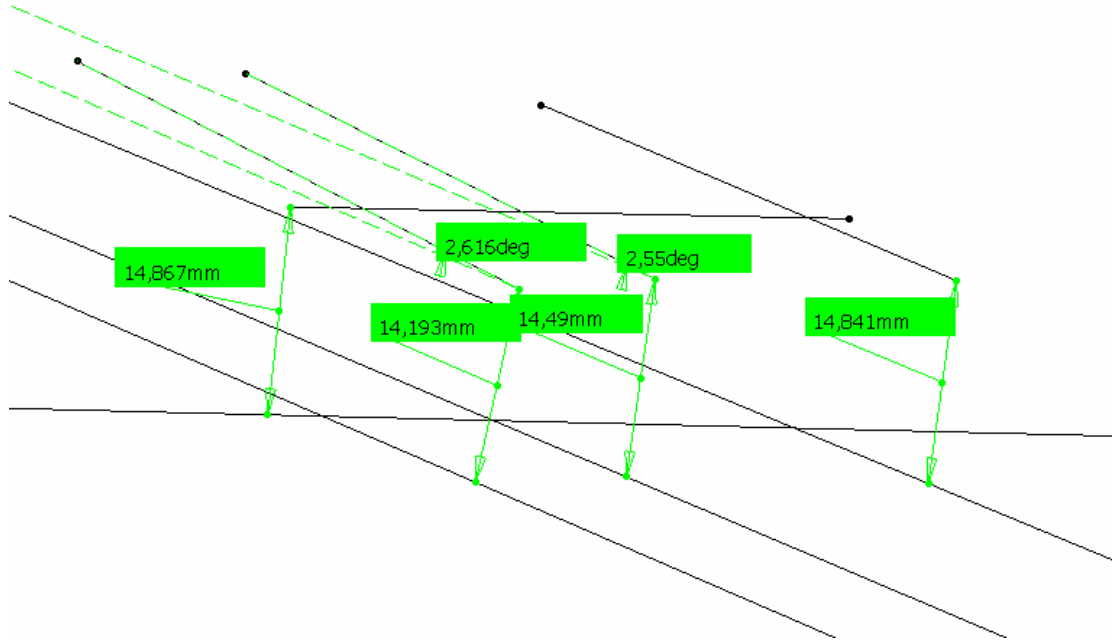


Şekil 4.7 Gölge nokta bulutu ve üzerine oturtulmuş çizgi



Şekil 4.8 Cisim ve kalibrasyon nesnesi üzerindeki gölgeler

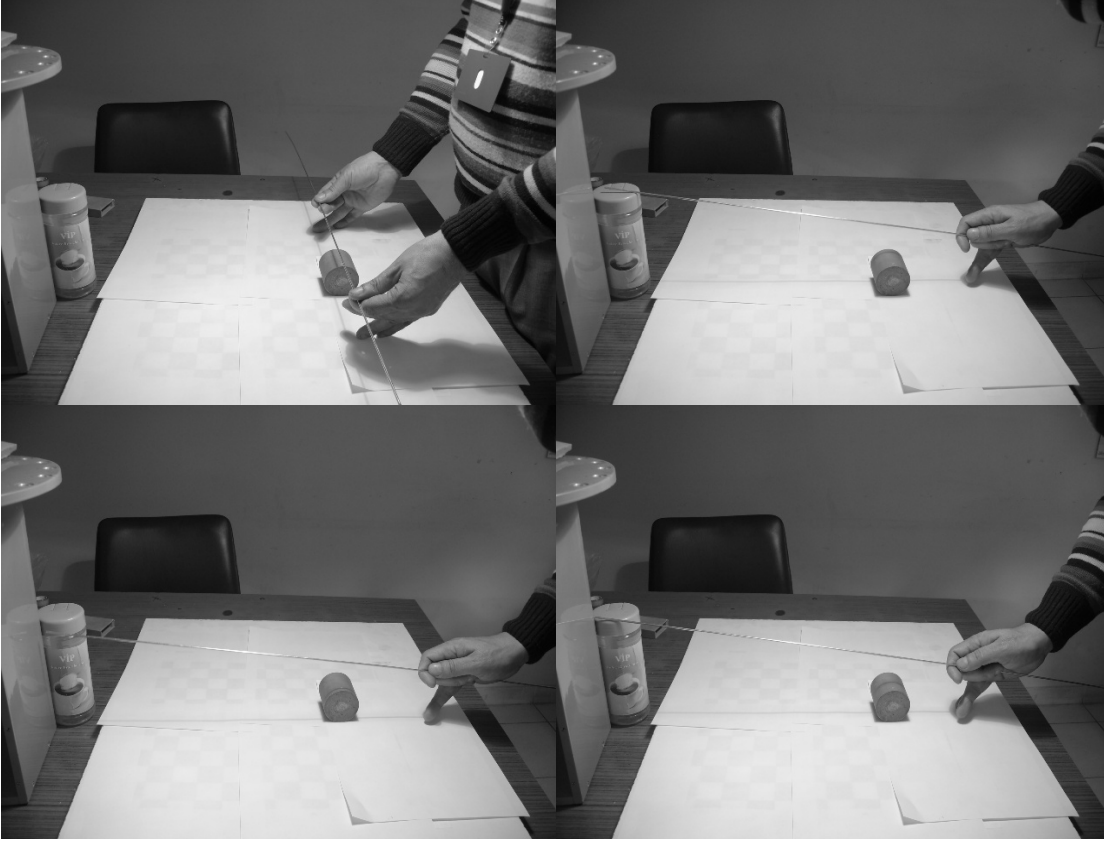
Cisim, yüksekliği yaklaşık 16 mm olan dikdörtgen prizmadır. Sonuçlar dört kesitte 14,867 mm, 14,193 mm, 14,490 mm ve 14,841 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 4.9).



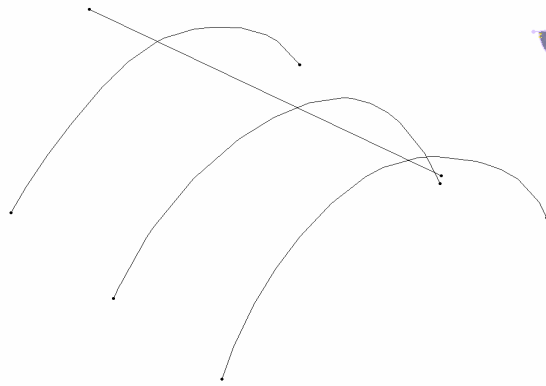
Şekil 4.9 3. boyut ölçümü

4.3 İkinci Deney

İkinci bir cisim ile yöntem tekrarlanır. Cisim üzerine düşürülen gölgeler Şekil 4.10'da, transformasyonu yapılan gölgeler Şekil 4.11'de görülmektedir.



Şekil 4.10 İkinci cisim ve yüzeyine düşürülen gölgeler



Şekil 4.11 Transformasyonu yapılan gölgeler

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Görüntüler alınırken kamera ya da kalibrasyon nesnesinin hareket etmesi hata üretir. Ayrıca buradaki kısıtlama ışığın dik düşürülmesidir, yani ışık ve çubuğun iki noktasından geçen düzlemin kalibrasyon nesnesi düzlemine dik olduğu kabulü yapılır. Cisim üzerine gölge düşüren çubuk doğrusal olmalıdır. Görüntünün çözünürlüğü yani gölgelerin kalınlığı ya da gölgeler üzerine oturtulan çizgiler de hata üretir.

Işığın dik düşürülmesi varsayımı yerine ışık kaynağının kalibrasyonu yapılabilir. Eğer ışık kaynağının yeri bulunursa, kalibrasyon nesnesi düzlemine dik düzlem olarak adlandırılan gölge düzlemi yerine kalibrasyon nesnesi üzerindeki gölgeden ve ışık kaynağından geçen düzlem kullanılabilir. Bu düzlem gölge düzlemi olacaktır ve izdüşüm merkezinden çıkan, görüntüde cisim yüzeyindeki gölgeden geçen ışınların gölge düzlemi ile kesişimi 3. boyut olacaktır.

Literatürde, kalibrasyon nesnesi kullanmadan, görüntülerde aynı noktalar eşleştirilerek, sadece görüntüler kullanılarak kalibrasyon yapabilen yöntemler mevcuttur ve benzer bir yöntem kullanılması kalibrasyon nesnesi kullanımını ortadan kaldıracaktır.

Yöntemde, kalibrasyon nesnesi ve cisim üzerindeki gölgeler elle okunmakta ve girilmektedir. Karmaşık, daha detaylı cisimlerin yüzeyindeki gölgeler daha karmaşık olacaktır ve çalışmada 'gimp' ile oturtulan çizgi ve eğriler doğru ya da detaylı sonuçlar vermeyecektir. Bunun yerine programda eğri oturtma yöntemleri kullanılabilir.

Ayrıca, yine literatürde mevcut olmakla birlikte, çalışmada uygulanan yöntem geliştirilerek, hacim kesişmesi, stereo vb. yöntemlerle birlikte kullanılabilir.

KAYNAKLAR

C. M. Wong, W. H. Chan, T. W. Lam, K Y Yip, “Surface mapping of three-dimensional objects by a planar light scanning technique”

Jean Yves Bouguet, Pietro Perona “3D Photography on your desk”, 1998

Jean Yves Bouguet, “Visual methods for three-dimensional modeling”, 1999

Andrew W. Fitzgibbon, Geoff Cross and Andrew Zisserman, “Automatic 3D Model Construction for Turn-Table Sequences”, 1994

A. Laurentini, “The Visual Hull Concept for Silhouette-Based Image Understanding”, 1994

C. R. Dyer, “Volumetric Scene Reconstruction from Multiple Views”, 2001

M. Pollefeys, R. Koch, M. Vergauwen, L. Van Gool, “Automated Reconstruction of 3d Scenes of Images”, 2000

Carlo Tomasi and Takeo Kanade, “Shape and Motion from Image Streams: a Factorization Method”, 1992

O.D. Faugeras, Q.T. Luong and S.J. Maybank, “Camera Self-Calibration: Theory and Experiments ”, 1992

Yen-Hsiang Fang, Hong-Long Chou, Zen Chen, “3D Shape Recovery of Complex Objects from Multiple Silhouette Images”, 2002

Wolfgang Niem, Ralf Buschmann, “Automatic Modelling of 3D Natural Objects from Multiple Views”

W. N. Martin and J.K. Aggarwal, “Volumetric Descriptions of Objects from Multiple Views”, 1983

Roger Tsai, “An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision”, 1986

Zhengyou Zhang, “A Flexible New Technique for Camera Calibration”, 1998

<http://www.cs.ucl.ac.uk/staff/D.Nahmias/log.html>, 2007

Jean Yves Bouguet, “http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/ICCV98/html_report/extended.html”, 2006

Jean Yves Bouguet, “http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/htmls/parameters.html”, 2006

- Jean Yves Bouguet, “http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html”, 2006
- D.Sc. (Tech.) Ville Kyrki, “<http://www.it.lut.fi/kurssit/05-06/Ti5216200/lectures/lecture1>”, 2007
- D.Sc. (Tech.) Ville Kyrki, “<http://www.it.lut.fi/kurssit/05-06/Ti5216200/lectures/lecture2>”, 2007
- http://www.devmaster.net/wiki/Transformation_matrices#Translation”, 2007
- <http://www.mathworld.wolfram.com/Plane.html>”, 2007
- <http://www.mathworld.wolfram.com/Line-PlaneIntersection.html>”, 2007
- Paul Bourke, “<http://www.local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/geometry/planeeq>”, 2007
- Paul Bourke, “<http://www.local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/geometry/planeline>”, 2007
- <http://www.ies.co.jp/math/java/vector/chok3D/chok3D.html>”, 2007
- M. Pollefeys, “<http://www.cs.unc.edu/~marc/tutorial/node36.html>”, 2002
- M. Pollefeys, “<http://www.cs.unc.edu/~marc/tutorial/node37.html>”, 2002
- http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/images/images_tb.pdf”, 2007
- Hai Tao, “Image Acquisition and Camera Model, <http://www.soe.ucsc.edu/classes/cmpe264/Fall06/lec23.pdf>”, 2007
- Tom Brunet and Leo Chao, “<http://www.pages.cs.wisc.edu/~chaol/cs766/cs766.html#intro>”, 2004
- M. Pollefeys, “<http://www.cs.unc.edu/~marc/tutorial/node43.html>”, 2002
- Robyn Owens, “http://www.homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/OWENS/LECT1/node2.html”, 1997
- http://www.faculty.cs.tamu.edu/jchai/CPSC641_fall07/PerspectiveProjection.pdf”, 2007
- <http://www.leake.ge.uiuc.edu/EG%20Lecture%20Slides/EG3.ppt#266,6, Vanishing Points>”, 2007
- Baran O., 2007, Sözel bilgi desteği

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Eskişehir’de doğdu. İlköğretimini Millizafer İlkokulu’nda, orta öğrenim ve liseyi Eskişehir Anadolu Lisesi’nde, lisans eğitimini Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde tamamladı. 2003 yılında başladığı, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü Hassas Döküm Laboratuvarı’ndaki görevine halen devam etmektedir.