

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

**İŞARETLİ GÖZLÜK SAYESİNDE 3B GÖZ
BAKİŞ DOĞRULTUSUNUN KESTİRİMİ**

**ŞAMİL KARAHAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE
2013**

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

**İŞARETLİ GÖZLÜK SAYESİNDE 3B GÖZ
BAKİŞ DOĞRULTUSUNUN KESTİRİMİ**

ŞAMİL KARAHAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. YUSUF SİNAN AKGÜL

GEBZE
2013



GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
tarih ve sayılı kararıyla oluşturulan juri tarafından 27/06/2013 tarihinde tez
savunma sınavı yapılan Şamil Karahan'ın tez çalışması Bilgisayar Mühendisliği Anabilim
Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

: Doç. Dr. Yusuf Sinan AKGÜL

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Yakup GENÇ

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Albert Ali Salah

ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Gözün geometrik şeklinin ışık, engellemeler ve konumu nedeniyle değişken olması ve baş pozisyonunun önemi, göz bakış doğrultusunun kestiriminin son 30 yıldır bilgisayarla görme alanında ilgi çeken bir çalışma konusu olmasını sağlamıştır. Problemin her durumda çalışabilir olması için üç boyutlu (3B) baş pozisyonunun ve 3B göz modelinin birlikte kullanılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, başın pozisyonu için basit bir gözlük ve eğitim sırasında ortasında delik olan bir kağıt kullanılarak yeni ve ucuza mal edilebilen 3B göz bakış doğrultusu kestirimi yöntemi geliştirilmiştir. Gözlük ve kağıt üzerinde 3B konumunu belirlemek için 3B konumu bilinen işaretçiler bulunmaktadır. Bu sayede geliştirilen yöntem fazladan kamera ve herhangi bir ışık kaynağı kullanmadan, baş pozisyonunu ve göz bakış doğrultusunu sınırlandırmadan çalışabilmektedir. Yapılan çalışmanın getirmiş olduğu bir takım yenilikler bulunmaktadır. Bunlardan ilki, ortasındaki delikten gerçek dünyadaki bir noktaya bakılan kağıdın eğitim sırasında kalibrasyon hmasını en aza indirmesidir. İkinci yenilik ise kullanıcının kornea merkezinin gözlük koordinat sistemine göre 3B konumunun hesaplanmasıdır. Aynı zamanda yöntem, 3B elipsoit olarak modellenen korneanın yarıçaplarını her bir kullanıcı için hesaplayabilmektedir.

Geliştirilen yöntem, çeşitli kullanıcılarla test edildiğinde literatürdeki benzer yöntemlerle karşılaştırılabilir düşük hata değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Göz Bakış Doğrultusu; Göz Takibi; Baş Pozisyonu; İşaretçiler.

SUMMARY

The geometric shape of eye that varies due to light condition, location of eye and occlusion, and the importance of head pose information have provided the eye gaze estimation problem to be a hot topic research area in computer vision for the last 30 years. For the robust solution of the problem, the three dimensional (3D) head pose and the 3D eye model should be used together.

In this work, a new and cheaper Line of Gaze (LoG) method has been proposed by using a target paper with a hole for training and simple glasses for the head pose estimation. Both the target and the glasses are marked with known 3D position of corners of the fiducial marks for 3D localization. The developed system does not need any extra cameras or IR light sources for the estimation of head pose and the eye gaze, and also it does not impose any restrictions on the user head movements or the LoG orientations. The proposed method includes many novel contributions. The first novelty is that the paper, through which the user looks at the real world point, prevents user calibration errors during the training phase. The second one is that the 3D position of the cornea center can be calculated on glasses coordinate system. The third one is the estimation of the radii of the cornea whose shape is modeled as a 3D ellipsoidal.

By testing over several users, the proposed method is shown to achieve low error rates that are comparable to the state of the art.

Keywords: Line of Gaze; Eye Tracking; Head Pose; Fiducial Marker.

TEŞEKKÜR

Bu tezin bütün süreçlerinde bana her zaman yol gösterici olan ve değerli zamanını benden esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Yusuf Sinan AKGÜL hocama, çalışmalarımı katkı sağlayan Sayın Yrd. Doç. Dr. Yakup Genç hocama ve iş arkadaşımıza ve bana her zaman destek olan kız kardeşim Seyhan KARAHAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca eğitimim süresince bana maddi manevi her türlü desteği sağlayan aileme ve bana hayatlarıyla örnek olan tüm hocalarıma saygı ve sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLOLAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, İçeriği ve Katkısı	3
2. 3B GÖZ MODELİ	4
3. GÖZ BAKIŞ DOĞRULTUSUNUN KESTİRİMİ SİSTEMLERİ	5
3.1. Aktif Sistemler	5
3.2. Pasif Sistemler	7
4. İĞNE DELİKLİ KAMERA MODELİ	9
4.1. Kamera İç Parametrelerinin Hesaplanması	10
4.2. Kamera Dış Parametrelerinin Hesaplanması	13
5. BG'DE KULLANILAN İŞARETÇİLER	18
6. GÖZ BEBEĞİ VE İRİSİN BULUNMASI	19
7. SİSTEM İÇİN TASARLANAN GÖZLÜK ve HEDEF	23
8. SİSTEMİN GEOMETRİSİ	26
9. SİSTEMİN EĞİTİM AŞAMASI	30
9.1. 3B Uzayda Konumu Bilinen 3 Noktadan ve Kornea Merkezinden Geçecek Düzlem Tanımlama	32
9.1.1. Homojen Koordinatlarda Düzlem Tanımlama	32
9.1.2. Düzlem Tanımlayan Noktaların Hesaplanması	34
9.2. Kornea Merkezinin 3B Konumunun Bulunması	36
9.3. Kornea Yarıçaplarının Bulunması	38
10. GÖZ BAKIŞ DOĞRULTUSUNUN KESTİRİMİ	41
11. DENEYLER	44

12. SONUÇ VE ÖNERİLER	54
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	60

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kısaltmalar

°	:	Derece
cm	:	Santimetre
mm	:	Milimetre
2B	:	2 Boyutlu
3B	:	3 Boyutlu
BG	:	Bilgisayarla Görme
BP	:	Baş Pozisyonu
EM	:	Beklenti Maksimizasyonu (Expectation Maximization)
LED	:	Işık Yayan Diyot (Light Emitting Diode)
LLS	:	Doğrusal En Küçük Kareler Yöntemi (Lineer Least-Squares)
LM	:	Levenberg-Marquardt
LoG	:	Göz Bakış Hattı (Line of Gaze)
RANSAC	:	Rastgele Örnek Konsensüsü (Random Sample Consensus)
SVM	:	Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Savfa</u>
1.1: BG ile göz bakış doğrultusunun kestirimi için izlenecek adımlar.	2
2.1: Gözün 3B modeli.	4
3.1: a) Işık kaynağının oluşturduğu parıltı, b) Kornea yansımıası.	5
3.2: Işık kaynağının korneada oluşturduğu parıltı örnekleri.	6
4.1: 3B uzaydaki noktanın görüntü düzlemindeki iz düşümü.	9
4.2: Kamera modeline ait üçgen benzerliğinin dikey kesitteki görüntüsü.	10
4.3: p' noktasının görüntü düzlemindeki piksel konumu.	12
4.4: Kamera iç parametrelerinin tahmininde kullanılan kalibrasyon örbüntüsünün farklı pozisyonlardaki görüntüsü.	13
4.5: Düzlemler kamera arasındaki ilişkiyi gösteren geometri.	15
5.1: ARTag kütüphanesine ait örnek işaretçiler.	18
6.1: Gradyan vektörü ile uzaklık vektörünün aynı doğrultuda a) olmaması, b) olması durumları.	22
7.1: Sistemde kullanılan üzerinde işaretçiler olan gözlük.	23
7.2: Eğitim aşamasında kullanılan üzerinde işaretçilerin ve hedef noktanın olduğu kağıt.	25
7.3: Sistemin uzaktan görüntüsü.	25
8.1: Sistemin eğitim aşamasındaki geometrisi.	26
8.2: Sistemin test aşamasındaki geometrisi.	28
9.1: Eğitim aşamasında sistemin izlediği adımlar.	30
9.2: Kamera-gözlük ve kamera-kağıt arasındaki transformasyonlar.	31
9.3: a) Paralel 3 düzlemin çakışık olma, b) Paralel 3 düzlemin çakışık olmama, c) Sadece 2 paralel düzlemin çakışık olma, d) Sadece 2 paralel düzlemin çakışık olmama, e) Birbirine paralel olmayan 3 düzlemin 1 doğru parçasında kesişmesi, f) Birbirine paralel olmayan 3 düzlemin 3 doğru parçasında kesişmesi, g) Birbirine paralel olmayan 3 düzlemin 1 noktada keşimesi durumları.	37
10.1: Sistemin göz bakışı doğrultusunun kestiriminde izlediği adımlar.	41
10.2: $\vec{v^l}$ vektörünün göz küresini kestiği noktalar.	43
11.1: Sistemin yapmış olduğu hatanın ölçümünün gösterimi.	45

11.2: Yarıçap değerindeki değişimin yapılan hataya olan etkisi.	49
11.3: 1. kullanıcıya ait bazı sonuçlar.	52
11.4: 2. kullanıcıya ait bazı sonuçlar.	53

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Savfa</u>
4.1: Kamera iç parametreleri ve açıklamaları.	11
4.2: Sistemin kullandığı Nikon D5100 kamerasına ait iç parametre değerleri.	12
11.1: 1. kullanıcidan elde edilen görüntülerin baş pozisyonlarına göre sayısı, ortalama yarıçapı ve 3B kornea merkezi.	46
11.2: Eğitim aşamasında herhangi bir optimizasyon uygulanmaması durumunda 1. kullanıcının göz bakışının kestirimindeki hata değerleri.	46
11.3: Eğitim aşamasında LM optimizasyonu uygulanması durumunda 1. kullanıcının göz bakışının kestirimindeki hata değerleri.	47
11.4: 2. kullanıcidan elde edilen görüntülerin baş pozisyonlarına göre sayısı, ortalama yarıçapı ve 3B kornea merkezi.	47
11.5: Eğitim aşamasında LM optimizasyonu uygulanması durumunda 2. kullanıcının göz bakışının kestirimindeki hata değerleri.	48
11.6: Geliştirilen yöntemin literatürdeki benzer yöntemlerle kıyaslanması.	49
11.7: Sadece hedef noktanın yeri değiştirilmesi durumundaki hata.	50
11.8: Sadece göz bebeğinin yeri değiştirilmesi durumundaki hata.	51
11.9: Göz bebeğinin ve hedefin yerlerinin değiştirilmesi durumundaki hata.	51

1. GİRİŞ

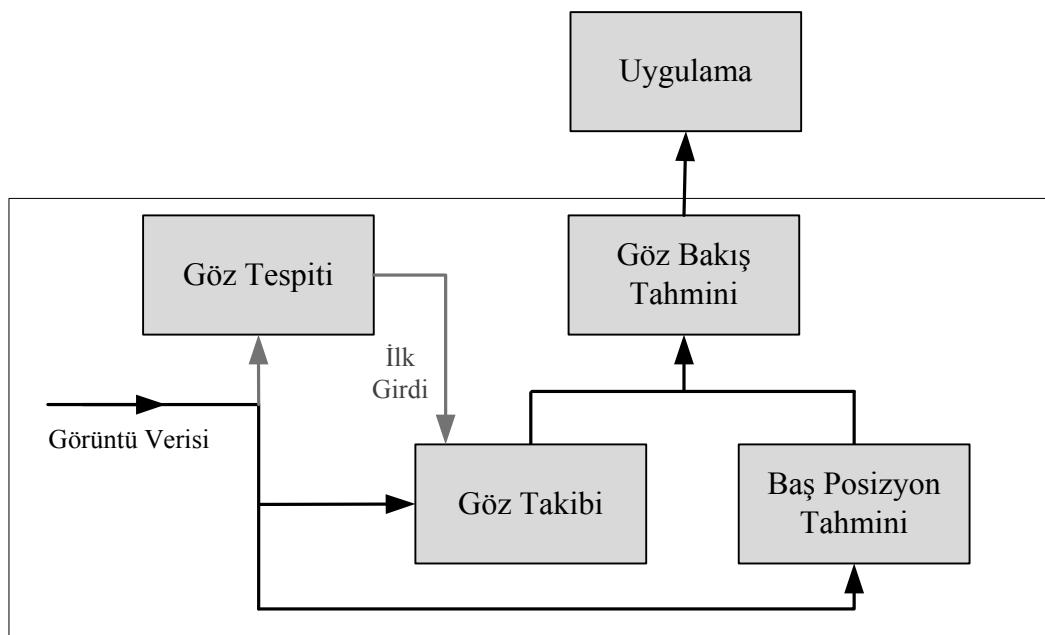
İnsan yüzünün ve gözünün belirgin özelliklerini ve bunların hareketleri insanın isteklerini ve içinde bulundukları duyguları anlatmakta önemli rol oynamaktadır [Hansen and Ji, 2010]. Çünkü insan göz hareketleri sayesinde çevresi ile iletişim kurabilir, çevresinde olup bitenleri tanımlayabilir ve gördüklerinden bilgi toplayabilir. Gözün bu özelliklere sahip olması onu akademik açıdan oldukça cazip kılmış ve bu konu kapsamında literatürde gözün tespiti ve gözün bakış doğrultusunun kestirimi konusunda birçok çalışmanın yer olmasını sağlamıştır. Bu çalışmalar çoğunlukla insan bilgisayar etkileşimi [Zander et al., 2010], insanların duygusal ve kavramsal durumlarının tespiti [Amanda et al., 2006], [Calder et al., 2002], market analizleri [Schiessl et al., 2003], sürücü takip sistemleri [Ahlstrom et al., 2012], engelli kişilerin iletişim kurması [Alberto and Iacoviello, 2009], pilot eğitimi [Sarter et al., 2007] vb. uygulamalarda kullanılmıştır.

Göz, yüzün tespiti ve tanınması işlemlerinde de önemli rol oynamaktadır. Örneğin; yüz tespitinde kullanılan popüler yöntemlerden biri olan Viola ve Jones [Viola and Jones, 2004] algoritmasında kullanılan Haar filtrelerinin en önemlilerinden birisi de gözün bulunduğu alan ile ilgilidir. Aynı zamanda gözlerin pozisyonu yüzde tespit edilebilecek olan diğer yüz özelliklerinin tespitini de kolaylaştırmaktadır [Hansen and Ji, 2010].

Gözün bakış doğrultusunun kestirimi konusunda çalışılan alanları iki parçaya ayıralım. Bunlar, BG (bilgisayarla görme) teknikleri ve göze yerleştirilen çeşitli lens ve elektrotların kullanılmasıdır. Lens vb. yöntemlerin doğruluk oranı yüksektir, ancak çeşitli araç ve gereçler nedeniyle kontrollü ortamlarda yapıldığı için pek tercih edilmeyen bir yöntemdir. BG teknikleri ile yapılan çalışmalar daha çok uygulamaya yönelik ve günlük yaşamda da uygulamaları mevcuttur. Fakat geliştirilen yöntemler imge işlemenin klasik problemleri ile karşılaşacağından her zaman ve her durumda doğru tespitler yapamamaktadır [Hansen and Ji, 2010].

BG ile gözün bakış doğrultusunun kestirimi için gözün özellikleri yanında baş pozisyonu da önemli rol oynamaktadır [Hansen and Ji, 2010]. Örneğin; bir kişi bir noktaya farklı baş pozisyonlarında baktığında, iris göz alanı içerisinde gözün kenarına göre farklı pozisyonlarda bulunur. Bu durum, problemin karmaşıklık derecesinin artmasına neden olmaktadır.

BG yöntemiyle literatürde yer alan çalışmalarda genellikle 2B (iki boyutlu) ve 3B göz modelleri kullanılmaktadır. 2B olarak yapılan çalışmalarda başın pozisyon bilgisine gerek duymadan doğrudan ekran ile göz arasında tanımlanan ilişkiye göre gözün baktığı nokta tespit edilebilmektedir. Fakat bu tarz yöntemlerin düzgün çalışabilmesi için başın çok az hareket etmesine izin verilmesi durumu kullanılırken rahatsızlık hissedilmesine neden olmaktadır. Bu rahatsızlığın giderilebilmesi için 3B göz modelini 3B başın pozisyon bilgisi ile birlikte kullanan çalışmalar da mevcuttur [Hansen and Ji, 2010].



Şekil 1.1: BG ile göz bakış doğrultusunun kestirimi için izlenecek adımlar.

BG ile gözün bakış doğrultusunu bulmak için izlenecek olan adımlar Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi öncelikle gözün görüntü üzerinde doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Daha sonra tespit edilen gözün art arda gelen görüntüler üzerinde takip edilmesi her görüntüde tespit yapmanın önüne geçecek ve hesaplama maliyetini düşürecektir. Görüntü üzerindeki göz bilgisi başın pozisyonu ile birleştirildikten sonra göz bakış doğrultusu kestirilebilmektedir [Hansen and Ji, 2010].

1.1. Tezin Amacı, İçeriği ve Katkısı

Bu çalışmada serbest baş pozisyonunda göz bakış doğrultusu yeni geliştirilen 3B BG yöntemiyle tahmin edilmiştir. Geliştirilen yöntemde, 3B baş pozisyonunu ve 3B göz modelini birlikte kullanmak için üzerinde işaretçiler bulunan basit bir gözlük ve küçük bir kağıt parçası kullanılmıştır. Gözlük ve kağıt üzerinde 3B yerleri bilinen işaretçilerin bilgileri sayesinde 3B gerçek dünya ile kamera arasında transformasyon matrisi (öteleme ve dönüş bilgilerini içeren matris) hesaplanmıştır. Gözlük, sistemin çalışması boyunca 3B kornea merkezinin konumunu ve 3B baş pozisyonunu temsil etmek için de kullanılmıştır. Sistem, eğitim ve test olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Eğitim aşamasında kullanıcıdan kullanıcıya değişen kornea merkezinin 3B konumu ve 3B kornea modelinin yarıçapları hesaplanabilmektedir. Bunu sağlamak için kullanıcıdan ortasında hedef noktası olan kağıdı elle tutarak 3B dünyadaki değişik konumlardaki noktalara baş pozisyonu sınırlaması olmadan bu hedeften bakması istenmiştir. Bu aşamada elde edilen görüntüler kullanılarak göz parametreleri hesaplanmıştır. Eğitim aşamasında herhangi bir düzleme kalibrasyon yapılmadığı için kullanıcı istediği noktaya bakabilmektedir. Test aşamasında 3B kornea merkezinin konumu, göz bebeğinin orta noktasının görüntü düzlemi üzerindeki konumu, 3B elipsoit olarak modellenen gözün yarıçap değerleri ve gözlük de kullanılarak göz bakış doğrultusu tahmin edilmiştir [Karahan et al., 2013].

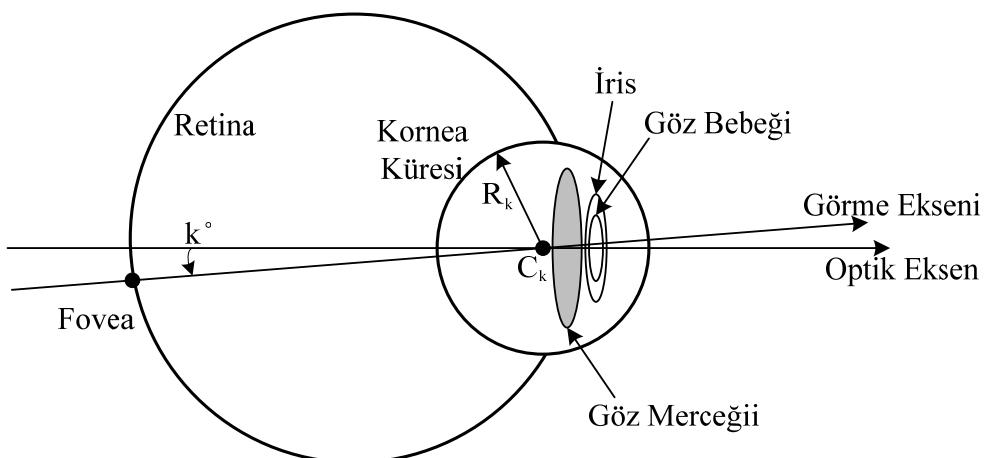
Tasarlanan sistemin en büyük avantajı serbest baş pozisyonunda göz bakış doğrultusunun kestirimini yapabilmesidir. Bir diğer avantajı da fazladan donanıma gerek duymadan, kolaylıkla ve ucuz bir şekilde tasarlanabilir olmasıdır. Aynı zamanda sistem, ortasında delik olan kağıt sayesinde kullanıcının ekranda baktığı noktayı sınırlı olarak kalibrasyon sırasında oluşturabilecek olan hatayı en aza indirmiştir. Son olarak sistem, 3B baş pozisyonunu kamera kalibrasyonu hatası kadar hatayla tahmin etmektedir. Bu bilgi baş işaret dili uygulamalarında kullanılabilir [Špakov and Majaranta, 2012].

2. 3B GÖZ MODELİ

Şekil 2.1'de gözün yapısı ve görmeyi sağlayan bazı kısımları gösterilmiştir. Gözün renkli kısmı olan iris, göz merceğine düşen ve sonrasında retinaya doğru ilerleyen ışığın şiddetini ayarlayan kısımdır. Göze gelen ışık arttığında iris büzülür, göz bebeği ufalır ve içeri giren ışık şiddeti azalır. Tam tersi durum olan ışığın azalmasında ise göz bebeği genişler, büyür ve göze daha fazla ışık girmesini sağlar [Goldstein 2013].

Kornea, gözün en ön kısmında yer alan, ışığı odaklamak ve gözü dış etkenlerden korumak için özelleşmiş şeffaf ve eğimli bir dokudur. Göze gelen ışığın ilk kırıldığı kısımdır. Fakat kornea lens gibi hareketli olmadığı için kırıcılık gücü değişken değildir [Goldstein 2013].

İrisin hemen arkasında yer alan ve şeffaf yapıda olan göz merceği, göze gelen ışınların kırılarak görmemin gerçekleştiği sinir hücrelerine düşmesini sağlar. Hareketli yapıda olan göz merceği uzağı ve yakını görmeyi sağlayan kısımdır. Yakına bakıldığında genişleyen, uzağa bakıldığında ise daralan bu mercek sayesinde insan gözünün objelere odaklanması sağlanır [Goldstein 2013].



Şekil 2.1: Gözün 3B modeli.

Optik eksen, kornea merkezi ile göz bebeğinin merkezini birleştiren eksendir. Görme ekseni ise odaklanan cisimle foveayı birleştiren eksendir. İki eksen arasındaki açıya ise kappa açısı (k°) denir. Sağlıklı bir gözde kappa açısı $2.5^\circ - 3.0^\circ$ arasında değişmekte olup insandan insana farklılık gösterir [Zhu and Ji, 2007].

3. GÖZ BAKIŞ DOĞRULTUSUNUN KESTİRİMİ SİSTEMLERİ

3.1. Aktif Sistemler

Göz bakış doğrultusunun BG yöntemiyle tahmin edilmesi aktif ve pasif olmak üzere 2 farklı yöntemle yapılabilmektedir. Aktif sistemler genellikle fazladan donanım yardımıyla gerçekleştirilen ve yaklaşık 1° hatayla göz bakış doğrultusunun kestirimini yapabilen sistemlerdir [Hansen and Ji, 2010].

Aktif sistemlerde en fazla kullanılan yöntem kornea-yansıma / göz bebeği-merkez yöntemidir. Bu yöntemle yapılan çalışmalarla, sistemin karşısında oturan kullanıcının gözüne bir veya birden fazla kızılıötesi ışık kaynağından gönderilen ışığın göz üzerine düşmesi sağlanır. Bu ışınlar retinaya girer ve yansıyarak göz üzerinde Şekil 3.1'de görüldüğü gibi bir parıltı oluştururken aynı zamanda göz bebeğinin koyu bir disk şeklinde görünmesini sağlar [Zhu and Ji, 2007].



Şekil 3.1: a) Işık kaynağının oluşturduğu parıltı, b) Kornea yansması.

Gözde oluşan parıltının kullanıcının farklı noktalara bakması durumunda oluşabileceği bazı durumlar Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bu yöntem kullanılarak parıltı ve göz bebeği arasındaki vektörel ilişkiyle gözün nereye baktığını tespit eden birçok çalışma literatürde yer almaktadır [Morimoto and Mimica, 2005], [Jacob, 1993], [Morimoto et al., 2000]. Bu çalışmalar, genellikle çenenin üzerine getirilerek başın sabit kalmasını sağlayan fazladan bir donanıma ihtiyaç duymaktadır. Başın sabit tutulmasıyla birlikte göz bebeği ve parıltı arasındaki vektör ile ekran koordinatları arasında eşleştirme yapabilecek farklı dereceden tanımlanan

fonksiyonlarının parametreleri o andaki baş pozisyonuna göre hesaplanmaktadır. Baş pozisyonunun sabit olması durumunda yaklaşık 1° civarında maksimum hata yapılmaktadır. Fakat kişi baş pozisyonunu değiştirdiğinde sistem için önceden yapılan kalibrasyon geçerliliğini yitirecek ve yeniden kalibrasyon yapılması gerekecektir. Farklı baş pozisyonları için tekrar kalibrasyon yapılması ve başın sabit tutulması zorunluluğunun kullanıcıları rahatsız etmesi, serbest baş pozisyonunda göz bakış doğrultusunun kestirimini yapabilen sistemlerin gereğini ortaya çıkarmıştır.

Sabit baş pozisyonu problemine kornea yüzeyini düz kabul ederek çözüm üreten çalışmalar da literatürde yer almaktadır [Preston et al., 1993]. Baş pozisyonunu tahmin etmek için 2 tane kızılıötesi ışık kaynağı kullanılan bu sistemlerde, eğitim aşamasında çeşitli baş pozisyonlarında bakılan düzlem ile düz kabul edilen kornea düzlemindeki göz bebeğinin parıltıyla göre konumu arasında ilişki kurulmuştur. Fakat gözün kenarlara doğru gitmesi durumunda kornea yüzeyinin düzlemsel kabul edilmesi varsayıminin geçerliliğinin azalması bu sistemlerin en önemli dezavantajıdır. Göz bebeği-parıltı arasındaki mesafe vektörü, görüntü üzerinde göz bebeğine yerleştirilen elipsin rotasyonu, parıltının ekrana bakılması durumundaki konumu ve göz bebeği için tanımlanan parametreleri kullanarak göz bakış doğrultusunu yapay sinir ağları yöntemiyle belli bir açı aralığına kadar baş oynamasına izin verecek şekilde çözen çalışmalar da vardır [Zhu and Ji, 2002].



Şekil 3.2: İşık kaynağının korneada oluşturduğu parıltı örnekleri.

Ji ve Zhu tarafından yapılan bir başka çalışmada, baş pozisyonunun sabit kalması problemi iki adet kamera ve bir adet ışık yayan diyon (LED) kullanarak gözün 3B geometrik şekli modellenerek çözülmüştür [Zhu and Ji, 2007], [Zhu et al., 2006]. Bu 3B modelden yararlanarak başın 3B bilgisi hesaplanmış ve göz ile ekran arasındaki eşleştirme işlemine bu bilgi de katılmıştır. Uygulanan yöntem sabit baş pozisyonındaki sistemlerle karşılaşıldığında tek dezavantajı hata oranının biraz yükselmesidir. [Morimoto et al., 2002], [Meyer et al., 2006], [Guestrin and

Eizenman, 2006] çalışmalarında da kornea yansımıma metodu uygulanmış olup, serbest baş pozisyonunda çalışılabilmesi için tek kamera ile birlikte birden fazla ışık kaynağı kullanılmıştır. Sonuçta yaklaşık 1° ile 3° arasında hata değeri ile göz bakış doğrultusunun kestirimi yapılmıştır.

Bir diğer aktif sistem uygulamasında da ikiden fazla kamera ile birlikte basın 3B pozisyon bilgisi hesaplanıp, bu pozisyon bilgisine göre yakınlaşma, uzaklaşılma ve donebilen sisteme sahip özel bir kamera ile gözün bulunduğu alanın görüntüsü elde edilmiştir [Beymer and Flickner, 2003]. Bu sistemin üzerinde bulunan kızılıtesi ışık kaynağının kornea üzerinde oluşturacağı parıltının özel kameradaki görüntüsü baş pozisyonu ile birleştirilerek göz bakış doğrultusu tahmin edilmiştir.

Kornea, göze gelen ışınların bir kısmını yansıtır ve Şekil 3.1'de gösterildiği gibi kornea üzerinde yansımıma oluşturur. Oluşan bu yansımıma, kızılıtesi ışık kaynağının yapmış olduğu parıltı ile karışması nedeniyle normal gün ışığında kornea-yansıma / göz bebeği-merkez yönteminin verimli çalışmasını engeller. Kısacası, bu sistemler ışığın kontrollü olduğu durumlarda daha iyi çalışmaktadır.

Giyilebilir sistemler, genellikle başa takılabilir gözlük ve bu gözlükte yer alan gözün tamamını görecek şekilde yerleştirilmiş kameradan ve kornea üzerinde yansımıma oluşturmak için kullanılan ışık kaynağından oluşmaktadır [Li et al., 2006], [Rantanen et al., 2011], [Ishiguro et al., 2010], [Web 2, 2013], [Boening et al., 2006]. Bu tip sistemler baş ile birlikte hareket ettiği için baş pozisyonunun hesaplanmasıına ihtiyaç olmadan çalışmaktadır. Daha çok ticari olan bu sistemlerin mikro çiplerin küçülmesiyle birlikte Google Glasses, First Vision Person [Kanade and Hebert, 2012] gibi yeni kullanışlı uygulamaları bulunmaktadır.

3.2. Pasif Sistemler

Aktif sistemlerin daha fazla ekipmana gereksinim duyması, her durumda aynı sonuçları vermemesi ve pahalı ticari sistemler olması pasif sistemlerin gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Pasif sistemler genellikle tek kamera ile yapılan, fakat aktif sistemlere göre hata oranının biraz daha fazla olduğu sistemlerdir.

Pasif yöntem olarak geliştirilen bazı çalışmalarda, göz bebeği ile gözün kenarı arasında tanımlanan vektör ekran ile lineer bir şekilde eşleştirilerek gözün bakış

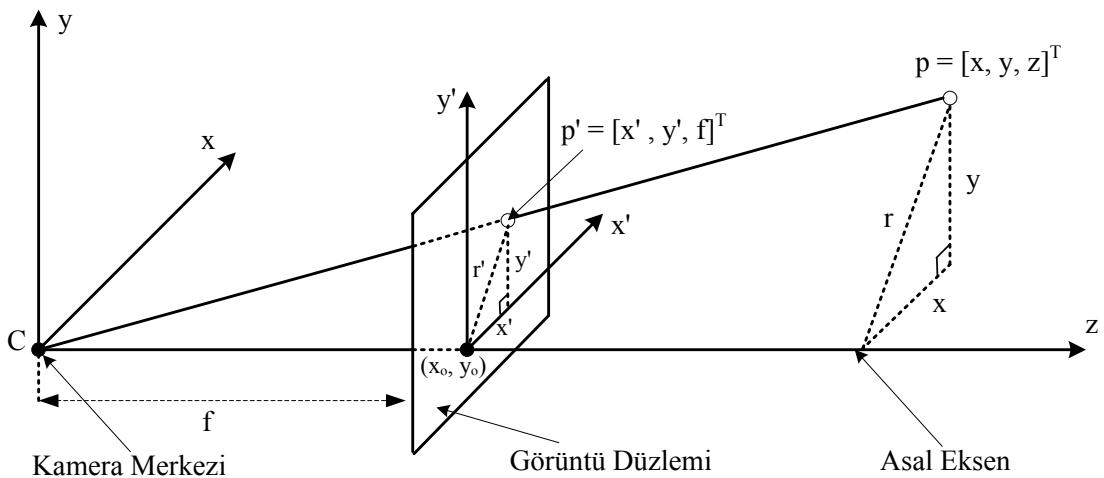
doğrultusu hesaplanmıştır [Valenti et al., 2009]. Bu yöntemde göz bebeği ile korneadan ışığın yansıması sonucu oluşan parıltı yerine gözün kenarı kullanılmıştır. Fakat baş pozisyonu değiştiğinde göz kenarı ile göz bebeği arasındaki uzaklık lineer olarak değişimeyeceği için sistem baş pozisyonu değiştiğinde doğru sonuç vermemektedir.

Pasif sistemlerde fazladan bir ekipman olmadığı için basın pozisyonu ancak yüze yerleştirilen bir modelle hesaplanabilmektedir [Valenti et al., 2012], [Ishikawa et al., 2004], [Heyman et al., 2011]. Bu modeller genellikle yüzde bulunan referans noktaların (ağız, burun, göz, çene vb.) yüz görüntüsündeki konumu ile eşleştirilecek şekilde yüze yerleştirilir. Yerleştirilen bu model sayesinde elde edilen baş pozisyonu, göz kenarı ve göz bebeği gibi iki veya daha fazla referans noktayla birleştirilerek ekran ile bu noktalar arasında bir eşleştirme oluşturulmaktadır.

Bu yöntemle yapılan çalışmalarda gözün 3B modeli oluşturulmadığından basın veya göz bakışının çok fazla yön değiştirmesi sistemin hatasını artırmaktadır. Bu nedenle bazı çalışmalarda basın ve gözlerin bakış doğrultusunun yapabileceği maksimum açılar sınırlandırılmıştır [Heyman et al., 2011].

4. İĞNE DELİKLİ KAMERA MODELİ

Kamera, 3B dünya ile 2B görüntü arasında bir eşlemedir. Bu eşlemenin gerçekleşebilmesi için kamera koordinat sistemindeki 3B dünyadaki noktanın 2B görüntü düzlemine düşmesini sağlayan matematiksel bir model mevcuttur. Bu modele göre, 3B uzaydaki noktaların merkezi iz düşümleri aynı zamanda kamera merkezinden belli bir mesafe uzaklıkta yer alan (görüntüye doğru) düzleme de düşmektedir. Bu düzlem merkezi iz düşüm noktasından $z = f$ kadar uzaklıkta yer alan görüntü düzlemi olarak isimlendirilmiştir. İğne delikli kamera modeline göre uzaydaki koordinatları $p = [x \ y \ z]^T$ olan bir noktanın eşlemesi, p 'den kamera merkezine doğru giden bir doğrunun görüntü düzlemini kestiği $p' = [x' \ y' \ f]^T$ noktasında oluşur [Hartley and Zisserman, 2004] (Bkz. Şekil 4.1).



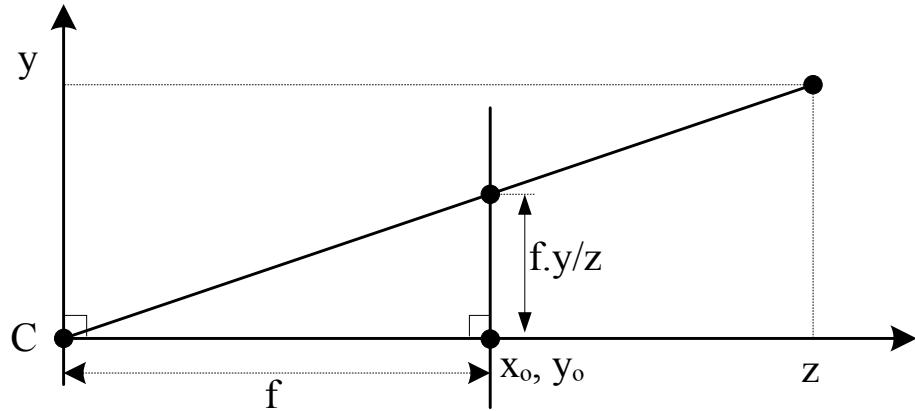
Şekil 4.1: 3B uzaydaki noktanın görüntü düzlemindeki iz düşümü.

Şekil 4.2'de de görüldüğü gibi $p = [x \ y \ z]^T$ noktası üçgen benzerliği kullanılarak $p' = [f \frac{x}{z} \ f \frac{y}{z} \ f]^T = [x' \ y' \ f]^T$ noktasına eşlenebilmektedir. Son görüntü koordinatı ihmali edildiğinde,

$$[x \ y \ z]^T \rightarrow \left[f \frac{x}{z} \ f \frac{y}{z} \right]^T \quad (4.1)$$

ifadesi dünya koordinatlarından görüntü düzlemi koordinatlarına olan eşlemeyi tanımlamaktadır [Hartley and Zisserman, 2004].

İz düşüm merkezi, kamera merkezi veya optik merkez olarak adlandırılır. Kamera merkezinden çıkışip görüntü düzlemini dik kesen doğru kameranın asal eksenini, asal eksenin görüntü düzlemini kestiği nokta asal noktası ve kamera merkezinden geçip görüntü düzlemine paralel olan düzlem kameranın asal düzlemi olarak adlandırılır [Hartley and Zisserman, 2004].



Şekil 4.2: Kamera modeline ait üçgen benzerliğinin dikey kesitteki görüntüsü.

Dünya ve görüntü homojen koordinatları arasındaki lineer eşleme, matris çarpımı formuna getirilip aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} fx \\ fy \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & & 0 \\ & f & 0 \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

p dünya noktası koordinatını ifade eden homojen $[x \ y \ z \ 1]^T$ 4-vektördür. p' görüntü noktasını ifade eden homojen 3-vektördür. K ise 3×4 boyutlarında homojen kamera matrisidir. Yukarıdaki eşitlik daha düzenli olarak $p' = Kp$ şeklinde yazılabilir. Bir sonraki bölümde kamera matrisinin diğer parametreleri detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

4.1. Kamera İç Parametrelerinin Hesaplanması

Bir önceki bölümde anlatılan kamera koordinat sisteminden görüntü koordinat sistemine yapılan eşleme, kamera merkezinden f kadar uzaklığındaki görüntü düzlemindeki konumunu vermektedir. Günümüzde kullanılan kameralarda görüntü

düzleminin lensler sayesinde ayarlanabiliyor olması ve asal eksenin görüntü düzlemini farklı noktalarda kesmesi, gerçek dünyadaki bir noktanın görüntü düzleminde hangi piksele denk geldiğinin hesaplanabilmesi için başka parametrelere ihtiyaç duyulmasına neden olmuştur. Kamera iç parametreleri olarak isimlendirilen bu parametreler Tablo 4.1'de gösterilmiştir [Hartley and Zisserman, 2004].

Tablo 4.1: Kamera iç parametreleri ve açıklamaları.

Parametre	Açıklaması
f	Görüntü düzleminin z eksenine göre kamera merkezine uzaklığı.
s	Lensin sahip olduğu çarpıklık değeri.
x_0 / y_0	Asal eksenin görüntü düzlemini x ve y eksenlerinde kestiği piksel değerleri.
d_{px} / d_{py}	Görüntü düzleminin x ve y eksenlerindeki komşu iki piksel arasındaki mesafe.

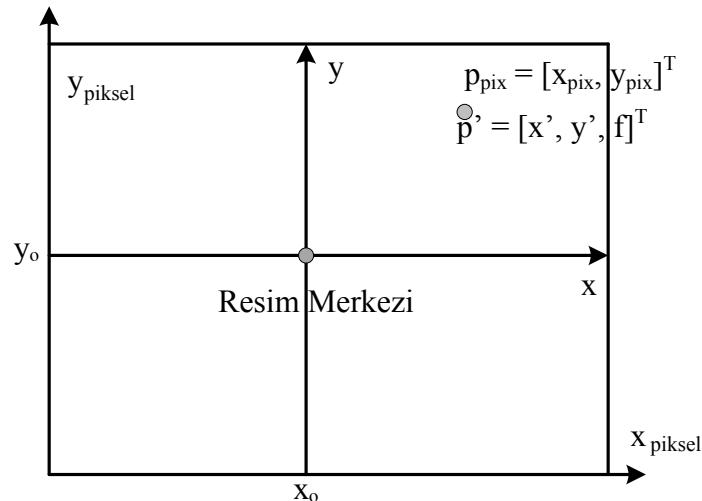
Görüntü koordinat sistemindeki $p' = [x' \ y' \ f]^T$ noktasının görüntü düzleminde denk olduğu piksel noktası (Bkz. Şekil 4.3),

$$x_{pix} = d_{px}f \frac{x}{z} + x_0, \quad y_{pix} = d_{py}f \frac{y}{z} + y_0 \quad (4.3)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanır. Bu ifadeyi lineer denklem formatında yazarsak,

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fd_{px} & s & x_0 & 0 \\ 0 & fd_{py} & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} x_{pix} &= u/w \\ y_{pix} &= v/w \end{aligned} \quad (4.4)$$

ifadesi elde edilir. s parametresi çoğu normal kamerada değeri 0 olarak kabul edilir [Hartley and Zisserman, 2004].

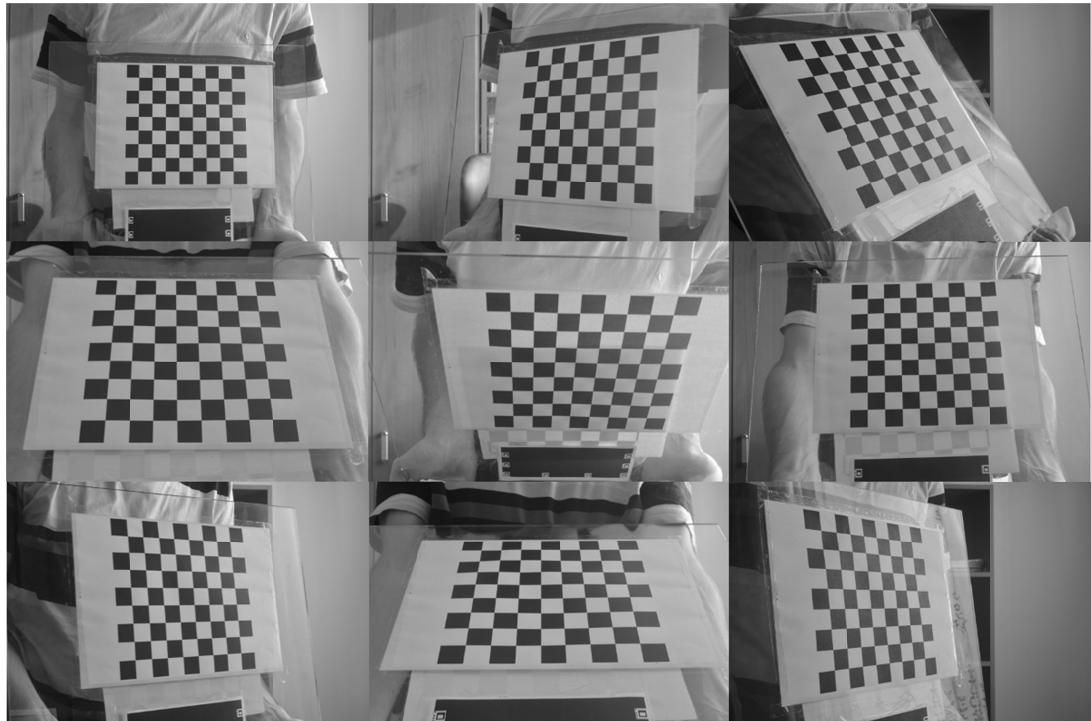


Şekil 4.3: p' noktasının görüntü düzlemindeki piksel konumu.

Tablo 4.2: Sistemin kullandığı Nikon D5100 kamerasına ait iç parametre değerleri.

Parametre	Değeri
f	35 mm
s	0
x_0	1217.9
y_0	811.3
d_{px}	0.0098031 mm
d_{py}	0.0097751 mm

Tablo 4.1'de gösterilen parametrelerin bulanabilmesi için MATLAB kamera kalibrasyonu aracı kullanıldı [Web 3, 2008]. Bu aracın kullanılabilmesi için öncelikle resim düzenleme programında her bir kare uzunluğu bilinen kalibrasyon örüntüsü hazırlandı (Bkz. Şekil 4.4). Bu kalibrasyon örüntüsü düzlem bir yüzeye yerleştirildikten sonra değişik açı ve uzaklıklardan görüntüler elde edildi. Yaklaşık 20 tane olan bu görüntüler kamera kalibrasyon aracına girdi olarak verilip, kamera iç parametrelerinin bulunması sağlandı. Tez kapsamında kullanılan ve 18-55mm f/3.5-5.6G AF-S Zoom-Nikkor lense sahip Nikon D5100 dijital fotoğraf makinesinin tez boyunca kullanılan ayarlardaki kamera iç parametreleri Tablo 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Kamera iç parametrelerinin tahmininde kullanılan kalibrasyon örüntüsünün farklı pozisyonlardaki görüntüsü.

4.2. Kamera Dış Parametrelerinin Hesaplanması

Kamera iç parametreleri, kamera koordinat sistemindeki bir noktanın görüntü düzleminde denk geldiği pikselleri bulmayı sağlar. Fakat gerçek dünyadaki bir noktanın kamera koordinat sistemindeki yerini bulabilmek için o noktanın bulunduğu koordinat sisteminde kamera koordinat sistemine bir dönüşüm tanımlanmalıdır. Bu dönüşümü sağlayan ifade, koordinat sistemleri arasında 3B rotasyonu ve ötelemeye içermelidir. Gerçek dünya koordinat sisteminde verilen bir noktanın (p_s) kamera koordinat sistemindeki yeri (p_c);

$$p_c = R(p_s) + t \quad (4.5)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada $R(\dots)$ rotasyonu, t ise ötelemeye temsil etmektedir. Bu ifadeyi lineer formatta yazarsak,

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

matris işlemi elde edilir [Trucco and Verri, 1998]. Kamera dış parametreleri olan $R(\dots)$ ve t matrislerinin değerlerinin bulunması için gerçek dünyada yerleri bilinen noktalar ve bu noktaların görüntü üzerindeki piksel değerleri arasında eşleme yapılması gereklidir. Bir önceki bölümde anlatılan kamera koordinat sistemindeki noktanın görüntü düzlemindeki pozisyonunu ifade eden denklem, kamera dış parametrelerini de kullanılarak yazılsrsa;

$$\begin{aligned} \frac{x_{pix} - x_0}{f} &= s \frac{r_{11}x_s + r_{12}y_s + r_{13}z_s + t_x}{r_{31}x_s + r_{32}y_s + r_{33}z_s + t_z} \\ \frac{y_{pix} - y_0}{f} &= s \frac{r_{21}x_s + r_{22}y_s + r_{23}z_s + t_y}{r_{31}x_s + r_{32}y_s + r_{33}z_s + t_z} \end{aligned} \quad (4.7)$$

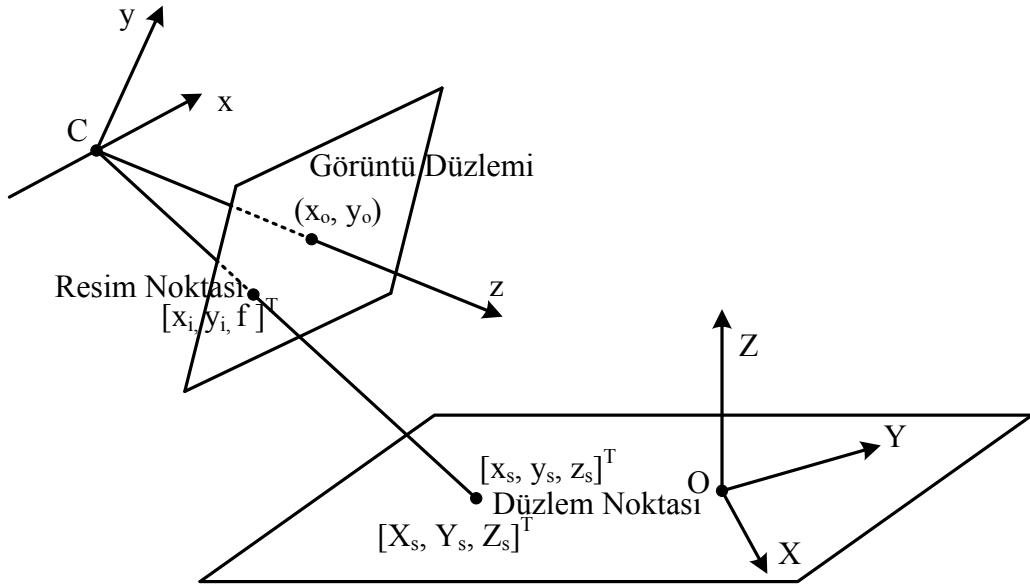
ifadeleri elde edilir. $x_{pix} - x_0$ ifadesi x' ve $y_{pix} - y_0$ ifadesi de y' olarak yazılıp denklem 4.7'deki ifadeler birbirine bölünürse,

$$\frac{x'}{y'} = s \frac{r_{11}x_s + r_{12}y_s + r_{13}z_s + t_x}{r_{21}x_s + r_{22}y_s + r_{23}z_s + t_y} \quad (4.8)$$

denklemi elde edilir. Bu denkleme içler dışlar çarpımı yapıldığında,

$$s(r_{11}x_s + r_{12}y_s + r_{13}z_s + t_x)y' - (r_{21}x_s + r_{22}y_s + r_{23}z_s + t_y)x' = 0 \quad (4.9)$$

eşitliği elde edilir. Bu denklemdeki 8 tane bilinmeyen; $s, r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}$, t_x ve t_y 'dır. 3B uzayda yer alan ve konumu bilinen herhangi bir nokta $[x_s^i \ y_s^i \ z_s^i]^T$ ile bu noktanın görüntü düzleminde denk geldiği piksel noktası $[x_{pix}^i \ y_{pix}^i]^T$ kullanılarak yukarıdaki lineer denklem ifadesinin bir tanesi yazılabilir. Bilinmeyen 8 tane parametrenin lineer denklem sistemi ile çözülebilmesi için en az 7 tane hedef nokta ile piksel değeri eşleşmesi kullanılmalıdır. Fakat daha fazla eşleşme olması denklemlerin çözümnesi sonucu oluşan toplam hatanın karesinin düşmesini sağlar [Tsai, 1987].



Şekil 4.5: Düzlemlerle kamera arasındaki ilişkiyi gösteren geometri.

Çalışma kapsamında kullanılan işaretçiler bir düzlem üzerinde yer almaktadırlar (Bkz. Şekil 4.5). Düzlem üzerinde kullanılan noktaların z eksenindeki konumu düzlemin koordinat sistemine göre $z_s = 0$ olmalıdır. Bu duruma göre denklem 4.7 tekrardan düzenlenirse [Tsai, 1987],

$$\frac{x'}{y'} = \frac{r_{11}x_s + r_{12}y_s + t_x}{r_{21}x_s + r_{22}y_s + t_y} \quad (4.10)$$

olacak şekilde sadeleşir. İfadeye içler dışlar çarpımı yapıldığında,

$$(r_{11}x_s + r_{12}y_s + t_x)y' - (r_{21}x_s + r_{22}y_s + t_y)x' = 0 \quad (4.11)$$

lineer denklem formatında eşitlik elde edilir. Elde edilen eşitliğe göre bilinmeyen 6 tane parametre; r_{11} , r_{12} , r_{21} , r_{22} , t_x ve t_y 'dır. Bu parametrelerin bulunabilmesi için düzlemler koordinat sistemindeki en az 5 noktası ile bu noktaların görüntü düzleminde eşleşmiş oldukları piksel değerlerinin bilinmesiyle elde edilecek lineer sistemin çözülmESİ gereklidir. Daha fazla eşleşme olması denklemelerin çözümESİ sonucu oluşan toplam hatanın karesinin düşmesini sağlar [Tsai, 1987].

$z_s = 0$ ifadesi denklemde bilinmeyen sayısının azalmasında etkili olmuştur. Fakat bu durum r_{13} ve r_{23} değerlerinin 0 olduğu anlamına gelmez. Bu bilinmeyen

değerlerin elde edilebilmesi için rotasyon matrisinin birim dik olduğu varsayılar ve $r_{11}, r_{12}, r_{21}, r_{22}$ değerleri hesaplandıktan sonra bilinmeyen değerler hesaplanır. Buna göre;

$$\begin{aligned} r_{11}^2 + r_{12}^2 + r_{13}^2 &= k^2 \\ r_{21}^2 + r_{22}^2 + r_{23}^2 &= k^2 \\ r_{11}r_{21} + r_{12}r_{22} + r_{13}r_{23} &= 0 \end{aligned} \quad (4.12)$$

denklemleri rotasyon matrisinin elemanları kullanılarak yazılabilir. İlk 2 denklem tek denklem olarak yazılırsa,

$$(r_{11}^2 + r_{12}^2)(r_{21}^2 + r_{22}^2) = (k^2 - r_{13}^2)(k^2 - r_{23}^2) \quad (4.13)$$

ifadesi elde edilir. 4.12'deki 3. denklem de düzenlenirse,

$$(r_{11}r_{21} + r_{12}r_{22})^2 = (r_{13}r_{23})^2 \quad (4.14)$$

eşitliği elde edilir. Denklem 4.13 denklem 4.14'den çıkarılırsa,

$$(r_{11}r_{22} - r_{12}r_{21})^2 = k^4 - k^2(r_{13}^2 + r_{23}^2) \quad (4.15)$$

ifadesi elde edilir. Fakat amaç bilinmeyen r_{13} ve r_{23} değerlerini bulmaktır. Bunun için 4.12 denklemindeki k değeri bulunduğuunda bilinmeyen değerler de bulunmuş olur. Bu kapsamda 4.15 denklemindeki bilinmeyenleri elde etmek için

$$(r_{13}^2 + r_{23}^2) = 2k^2 - (r_{11}^2 + r_{12}^2 + r_{21}^2 + r_{22}^2) \quad (4.16)$$

eşitliğinden yararlanılır. Bu eşitlikteki ifadeyi 4.15 denkleminde yerine yazıldığında,

$$k^4 - k^2(r_{11}^2 + r_{12}^2 + r_{21}^2 + r_{22}^2) + (r_{11}r_{22} - r_{12}r_{21})^2 = 0 \quad (4.17)$$

iki bilinmeyenli denklem sistemi elde edilir. Son durumda bilinmeyen k değeri denklemi kökleri çözülerek bulunur. k değerinin bulunmasıyla birlikte rotasyon

matrisinin bilinmeyen elemanları denklemlerde ilgili yerlere konularak elde edilir [Tsai, 1987].

Son durumda tek bilinmeyen durumunda olan öteleme matrisinin en son elemanı olan t_z 'yi elde etmek için 4.7 denklemine içler dışlar çarpımı yapılır. Elde edilen

$$\begin{aligned} s(r_{11}x_s + r_{12}y_s + r_{13}z_s + t_x)f - x't_z &= (r_{31}x_s + r_{32}y_s + r_{33}z_s)x' \\ s(r_{21}x_s + r_{22}y_s + r_{23}z_s + t_y)f - y't_y &= (r_{31}x_s + r_{32}y_s + r_{33}z_s)y' \end{aligned} \quad (4.18)$$

denklemlerinin çözülmesi bilinmeyen t_z ve f değerlerinin bulunmasını sağlar. Bu denklem sisteminin çözümü için 1 tane görüntü düzlemindeki piksel değeri ile düzlem koordinat sistemindeki noktanın eşleşmesi yeterlidir. Fakat daha fazla eşleşen nokta ile yapmak bütün bilinen eşleşen noktaları temsil ettiği için yapılacak muhtemel hatayı düşürür [Tsai, 1987].

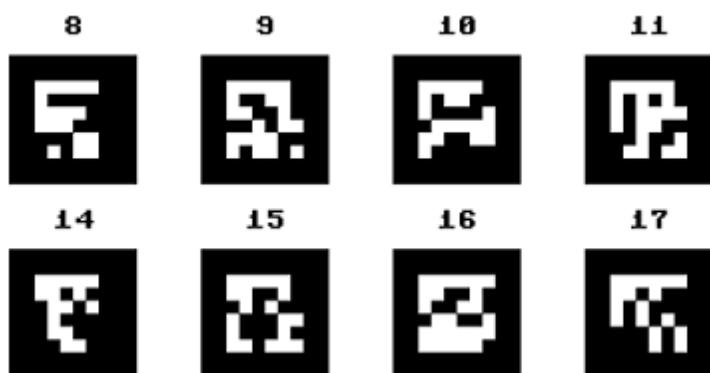
Tüm bu işlemler sonucunda hesaplanan kamera dış parametreleri ve bilinen kamera iç parametreleri kullanılarak hesaplanan 3B uzaydaki bir noktanın denk düşüğü piksel noktası ile gerçek piksel noktası arasında farklılıklar olmaktadır. Ne kadar çok nokta kullanılırsa kullanılsın, fark hiçbir zaman 0 olmamaktadır. Denklem çözümünde kullanılan lineer yöntem sayesinde belli bir dereceye kadar indirgenen hatayı daha da indirmek için Levenberg-Marquardt (LM) lineer olmayan optimizasyon metodu kullanılmıştır. Bu metot, 4.19'da yazılan ifadedeki gibi hesaplanan piksel $[x_p \ y_p]^T$ ile gerçek piksel $[x_i \ y_i]^T$ değerleri arasındaki fark en az olacak şekilde kamera iç ve dış parametrelerinin değerlerini ayarlamaktadır.

$$\sum_i^N (x_{li} - y_{li})^2 + \sum_i^N (x_{pi} - y_{pi})^2 \quad (4.19)$$

5. BG'DE KULLANILAN İŞARETÇİLER

İşaretçiler genellikle bir örüntüden oluşur ve dijital görüntülerde ilgili tespit algoritmalarıyla tespit edilirler. Siyah ve beyaz renklerden oluşan bu işaretçiler kolaylıkla tespit edilebildikleri için BG uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu işaretçilerin en önemli özelliği fazladan ekipmana ihtiyaç duymadan basit bir kamera ile değişik ışık koşullarında hızlı bir şekilde tespit edilebilir olmalarıdır [Fiala, 2005]. Bu özelliği sayesinde gerçek zamanlı uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilirmektedir. Daha çok zenginleştirilmiş gerçeklik uygulamalarında kullanılıp gerçek dünya ile sanal dünya arasında pozisyon ve rotasyon için tercih edilir. Tasarlanan göz bakış doğrultusunun kestirimini sisteminde gözün 3B modellenmesini sağlamak ve birden fazla kameralara ihtiyaç duymadan baş pozisyonunu tahmin etmek için işaretçilerden yararlanılmıştır. Bu işaretçilerin genellikle düzlem yüzeylerde kullanılması tasarlanan gözlüğün ve kağıdın da düzlem olmasındaki nedenlerden birini oluşturmaktadır.

QR koda benzemesine rağmen onun gibi anlam içerecek bir formatta değildir. Genellikle açık kaynak kodlu olan bu işaretçilerin çeşitli tasarımları, bu tasarımlara uygun tespit algoritmaları ve her bir işaretçinin etiketi bulunmaktadır [Fiala, 2005], [Web 4, 2012]. Bu işaretçilerin tespit edilebilmesi için görüntü üzerinde bulunmaları gereken minimum büyülük değerleri vardır. Bu değer tespit algoritmasına göre farklı olup çalışma kapsamında kullanılan tespit algoritmasında en küçük 20x20 piksel büyülüğündeki işaretçiler tespit edilebilmektedir. Şekil 5.1'de bazı işaretçiler ve etiket değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.1: ARTag kütüphanesine ait örnek işaretçiler.

6. GÖZ BEBEĞİ VE İRİSİN BULUNMASI

BG ile yapılan göz bakış doğrultusunun kestirimi yöntemleri göz bebeği veya irisin görüntü üzerindeki konumuna ihtiyaç duyar. Irisin hareketli olması, göz kapağının açılıp kapanması, göze gelen ışığa bağlı olarak gözün açıklığının değişmesi, değişik açıdan bakıldığından irisin geometrik yapısının farklı olması ve gözdeki saydam tabakaya gelen ışıklar nedeniyle oluşan yansımalar göz bebeği ve iris gibi gözün kısımlarını BG yöntemleriyle bulmayı zorlaştırmaktadır. Kısacası, gözdeki bu kısımların anlık olarak görüntüsünün değişmesi problemin oldukça zor olmasına neden olmaktadır.

Gözün bulunması için literatürde uygulanan yöntemler şekil tabanlı ([Timm and Barth, 2011], [Kim and Ramakrishna, 1999], [Kothari and Mitchell, 1996], [Peréz et al., 2003], [Valenti and Gevers, 2008], [Dobeš et al., 2006], [Daugman, 2003], [Hansen and Pace, 2005], [Li et al., 2005], [Yuille et al., 1992], [Edwards et al., 1998], [Lam and Yan, 1996], [Ivins and Porrill, 1998], [Deng and Lai, 1997]), görünüm tabanlı ([Huang et al., 1998], [Samaria and Young, 1994], [Hansen and Hansen, 2006], [Wang et al., 2005]) ve hibrit metodlar ([Xie et al., 1998], [Cristinacce and Cootes, 2006], [Hansen et al., 2003]) olmak üzere 3 ayrı sınıfa ayrılır.

Şekil tabanlı metodlarda en çok kullanılan yöntem, irisin veya göz bebeğinin elipsoit olarak kabul edilip bu elipsoit modelin değişik yöntemlerle kestirimidir. Bu kestirim yöntemleri genellikle oylama ve elips uydurmazdır. Irisin veya göz bebeğinin merkezini tahmin etmek için kullanılan yöntemlerden biri de görüntünün parlaklık değerine eşikleme yöntemi uygulanarak kenarları tespit etmeye çalışmaktadır [Kim and Ramakrishna, 1999], [Peréz et al., 2003]. Fakat kornea üzerindeki yansımaların değişik ışık şiddetinde değişmesi, eşikleme yöntemi için kısıtlamaları beraberinde getirmektedir. Hough transformasyonu da şekil tabanlı yöntemlerden birisidir [Dobeš et al., 2006]. Bu yöntem gözün dairesel şekilde olması durumunda çalışmaka olup göz kapağının kapalı olması durumunda gözün dairesel şekli bozulduğundan her zaman ve her durumda doğru çalışmamaktadır.

Irisin gradyan değerine oylama uygulayarak göz bebeğinin merkezinin bulunması yöntemi probleme başka bir yaklaşım açısındandır [Kothari and Mitchell, 1996], [Timm and Barth, 2011]. Benzer şekilde bir başka çalışmada da gradyan

değerine değil eş aydınlichkeit eğrisi oylanarak irisin merkezi tahmin edilmiştir [Valenti and Gevers, 2008]. Oylama yönteminin en büyük problemi gözler biraz kapalı olduğunda kirpiklerinde oylamada yer alması ve gürültü oluşturmasıdır. Elips uydurma için RANSAC (rastgele örnek konsensüsü) ve EM (beklenti maksimizasyonu) gibi optimizasyon yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalarda literatürde mevcuttur [Hansen and Pace, 2005], [Li et al., 2005].

Elipsoit sekilden başka kompleks şeklin göze uydurulmasıyla da göz bebeği ve irisin görüntü üzerindeki yerlerini kestiren metotlar bulunmaktadır. Şekli değiştirebilen göz modeli görüntüye, gözdeki köşeleri tepe oluşturacak olan noktaları ve çukuru hesaba katan enerji fonksiyonu ile yerleştirilmiştir [Yuille et al., 1992]. Aynı şekilde yılan algoritması kullanılarak göze kompleks şekil uydurulmuştur [Lam and Yan, 1996]. Göze kompleks model yerleştirebilen bir başka çalışma da video üzerinde irisin 3B hareketinin takip edilmesidir [Ivins and Porrill, 1998]. Tanımlanan kompleks modelin parametreleri öteleme, rotasyon, ölçektekleme ve göz bebeğinin ışık şiddetine göre büyüp küçülmesini de hesaba katarak geliştirilmiştir. Fakat sistemin yüksek çözünürlükte görüntü üzerinde çalışıyor olması bir dezavantaj olarak değerlendirilmektedir. Elipsoit model ile kompleks modelin birleştirilmesiyle irisin tespitinin daha hızlı ve daha doğru olduğunu iddia eden çalışmalar da literatürde yer almaktadır [Deng and Lai, 1997]. Kompleks göz şeklinin göze uydurulması gözün değişken yapıda olması sebebiyle daha doğru bir model olmasına rağmen bazı kısıtlamaları vardır. Bunlar; hesaplama maliyeti, yüksek çözünürlükteki görüntülere ihtiyaç duyulması, baş pozisyon açısının fazla olması durumunda modelin göze yerleştirilememesi ve gözün ışık nedeniyle kapalı olmasıdır.

Görünüm tabanlı yöntemler görüntü üzerindeki piksellerin şiddetini kullanarak gözü bulmak veya takip etmek için çeşitli istatistiksel modeller kullanmaktadır. Destek vektör makineleri (SVM) [Huang et al., 1998], saklı markov zincirleri [Samaria and Young, 1994] ve adaboost [Hansen and Hansen, 2006] gibi öğrenme tabanlı algoritmaları kullanarak gözü tespit eden çalışmalar literatürde mevcuttur. Adaboost yönteminin öğrenme aşamasının uzun süre alması ve fazla hafiza kullanmasını engelleyebilecek özyinelemeli parametrik olmayan öznitelik ayıracı kullanan çalışmalarda yapılmıştır [Wang et al., 2005]. Bazı öğrenme yöntemlerinde de öznitelik sayısının temel bileşenler yöntemiyle düşürülmesiyle performansın ve doğruluğun artması amaçlanmıştır.

Hibrit metotlar her durumda doğru sonuç vermeyen yöntemlerin avantajlarının bir arada kullanarak sahip oldukları eksikliklerin üstesinden gelmeyi amaçlamaktadır. Şekil tabanlı metot ile piksellerin yoğunluğuna göre tespit yapan metodun birleştirilmesiyle oluşturulan hibrit yöntemler bulunmaktadır [Xie et al., 1998]. Bu hibrit yöntemde irisin daire modeliyle, göz kapağıının piksel yoğunluğunun dağılımı kullanılarak gözün konumu hesaplanmaktadır. Gözün bulunduğu alanı yüze yerleştirilen 3B yüz modeli ile bulup, irisin veya göz bebeğinin bulunduğu alana Hough transformasyonu gibi çeşitli yöntemlerle model yerleştirerek tespit eden çalışmalar da literatürde yer almaktadır [Cristinacce and Cootes, 2006], [Hansen et al., 2003], [Ishikawa et al., 2004].

Göz bakış doğrultusunun kestiriminde kullanılan kızılıtesi ışık kaynağı göz bebeğinin bulunmasını oldukça kolaylaştırmaktadır. Çünkü göze gelen ışık ile kameranın optik ekseninin birbirine yakın olması durumunda çekilen görüntülerde göz bebeğinin koyu görünmesi, görüntü üzerindeki konumunun kolaylıkla tespit edilmesini sağlar. Fakat iki eksen bir birinden uzaklaşıkça göz bebeği o kadar koyu görünmez. 3. bölümde anlatılan kornea-yansıma yöntemi ile göz bakış doğrultusunu hesaplayan çalışmalarда bu yöntem kullanılmaktadır. Gözün açılıp kapanmasını ve irisin hareketini kullanarak yüzü ve gözü tespit eden yöntemlerde bulunmaktadır [Grauman et al., 2001], [Kawato and Tetsutani, 2002], [Tian et al., 2000]. Bu çalışmaların bazlarında baş pozisyonları sabit kabul edilip, iki görüntü arasındaki farka bakarak hareket tespit edilmiştir.

Göz bebeğinin veya irisin görüntü üzerinde tespiti konusunda anlatılan yöntemlerden probleme en uygun olanın seçilmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmalardan herhangi birisinin diğerine bariz bir üstünlüğü bulunmamaktadır. Göz bakış doğrultusunun kestiriminin gerçek zamanlı çalışabilmesi gerekliliği ve bu nedenle hızlı ve en doğru şekilde gözün ilgili kısımlarının tespit edebilmesine ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada tercih edilen yöntem, Bart ve Timm [Timm and Barth, 2011] tarafından yapılan göz bebeğinin orta noktasının göz alanının gradyan değerinin oylanmasıyla bulunmaktadır. Daha doğru ve hızlı bir yöntem bulunduğu siteme basit bir şekilde entegre edilerek kullanılabilir. Çalışmada göz alanı gözlük üzerinde yerleri bilinen işaretçilerin konum bilgisi kullanılarak kolaylıkla elde edilebilmektedir.

Bart ve Timm çalışmalarının ilk aşamasında hem x ekseninde hem de y ekseninde göz alanının yer aldığı ilgili görüntü alanının türevini almaktadır. Her bir

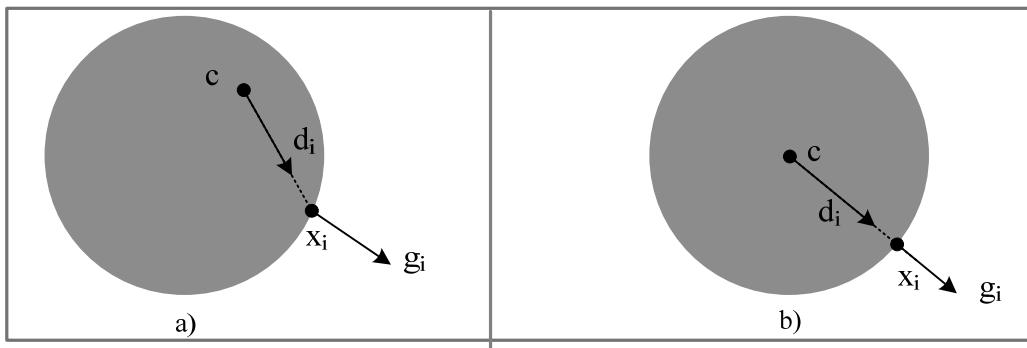
a_i piksel konumu için x ve y eksenlerindeki türev değerleri kullanılarak g_i isminde gradyan vektörü tanımlanır. Bu vektörün ışiktan ve kontrasttan etkilenmemesi için birim vektör olması sağlanır. a_i piksel konumunun oy vereceği c noktasına olan x ve y eksenlerindeki uzaklığı d_i vektörü ile gösterilir. Bu vektör,

$$d_i = \frac{x_i - c}{\|x_i - c\|_2} \quad (6.1)$$

ifadesiyle her bir nokta için normalleştirilir. d_i vektörü ile g_i vektörünün noktasal çarpımları iki vektör arasındaki açı değerini verecektir. Bu değerin maksimum olması aradaki açının 0'a yaklaşması ve iki vektörün de aynı doğrultuya yakın olması anlamına gelmektedir. Oylama yapılacak olan herhangi bir c noktası için yazılan,

$$c' = \arg \max_c \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_c (d_i^T \cdot g_i)^2 \right\} \quad (6.2)$$

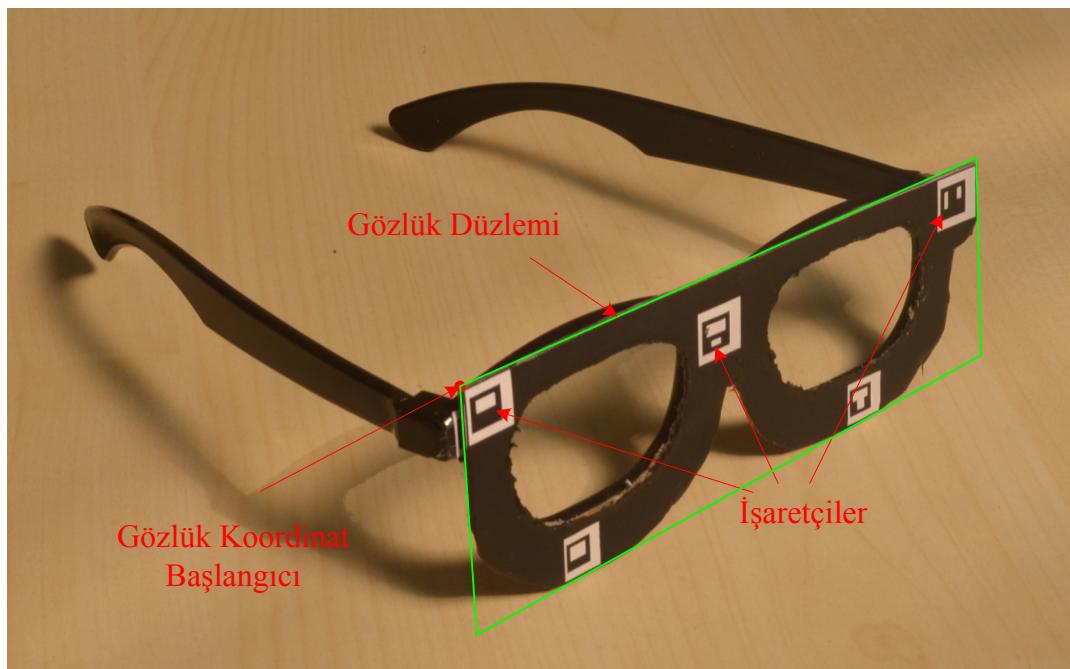
ifadesi o noktanın diğer noktalardan almış olduğu oyu göstermektedir. c' değeri en çok oy alan noktayı göstermektedir. Bu noktanın göz bebeğinin orta noktasına denk gelmesi beklenmektedir. Bu yöntemlerin en büyük problemi olan göz kapağının ve kirpiklerin oylamada etkin olmasını engellemek ve koyu noktalara daha fazla ağırlık vermek amacıyla oylanınan noktanın ağırlık derecesi için w_c değişkeni tanımlanmıştır. Bu durum göz bebeğinin daha doğru bulunması konusunda etkili olmuştur. Şekil 6.1'de oylama yapılan c noktası için olası durumlar gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi üzere algoritma göze en uygun olan daire şeklini uydurmaktadır.



Şekil 6.1: Gradyan vektörü ile uzaklık vektörünün aynı doğrultuda a) olmaması, b) olması durumları.

7. SİSTEM İÇİN TASARLANAN GÖZLÜK ve HEDEF

3. bölümde bahsedilen göz bakış doğrultusunun kestirimi çalışmalarında, göz kadar baş pozisyonun da önemli olduğu anlatılmıştı. 3B baş ve göz modeli için birden fazla kamera ve ışık kaynağı kullanılarak veya yüze 3B model yerleştirilerek başın serbest hareketine izin veren çalışmaların dezavantajlarına ilgili bölümde değinilmiştir. Tek kamera ve ışık kaynağı olmadan herkes tarafından basit bir şekilde kurulumu yapılip kullanılabilecek göz bakış doğrultusunun kestirimi sistemi tasarlamak için basit bir gözlüğün üzerine işaretçiler yerleştirme fikrinden yararlanılmıştır. Bunun için öncelikle ön yüzeyi düz olan, 3B film için kullanılan, ucuza mal edilmiş bir gözlük tercih edildi. Ön yüzeyin düz olmasının avantajı, üzerine yerleştirilen işaretçilerin konumlarını daha kolay ve doğru ölçmektir. Aksi takdirde, ölçüm sırasında yapılacak olan milimetrik hatalar oluşacak olan hatayı daha da artırmaktadır. Camları çıkarılan gözlüğün üzerine çeşitli şekillerde işaretçiler yerleştirildi. İşaretçilerin tespit edilmesinin yanı sıra etiketleri de elde edilebilmektedir. Bu bilgi, gözlüğün neresinde hangi işaretçinin olduğunun bilinmesini sağlamaktadır. Şekil 7.1'de de görüleceği gibi sistemde gözlüğün sağ üst köşesi gözlük koordinat sisteminin başlangıç noktası kabul edilmiştir.



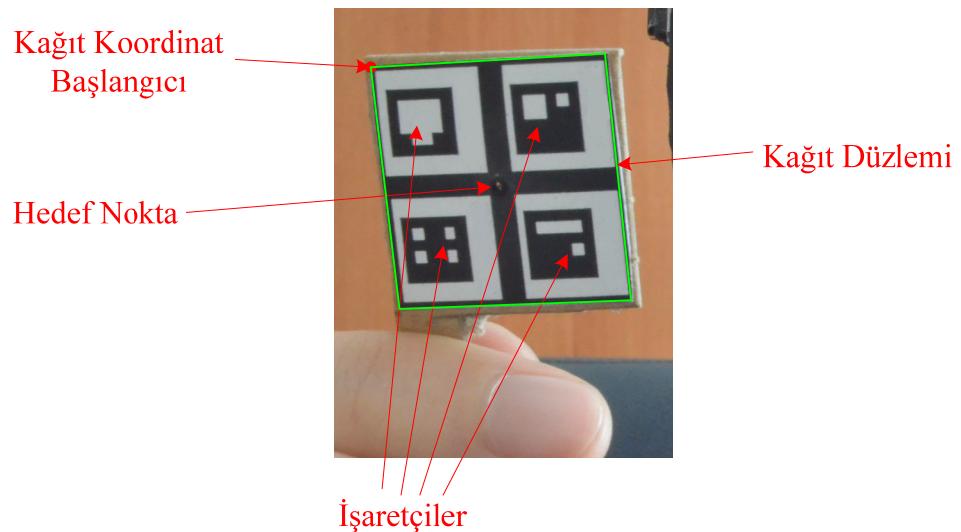
Şekil 7.1: Sistemde kullanılan üzerinde işaretçiler olan gözlük.

İşaretçilerin köşelerinin bilinen 3B konumu ve görüntü düzlemindeki hesaplanan eşleşmeler kullanılarak kamera ile gözlük arasında transformasyon (rotasyon ve öteleme) bilgisi elde edilmektedir. Transformasyon bilgisile birlikte gözlüğün başta oynamadığı varsayılarak sabit kamera pozisyonunda elde edilen başın 3B pozisyonu gözlük düzleminin 3B pozisyonuna denk gelmektedir. Sistem bu sayede sadece göz bakış doğrultusunun kestirimini değil kameraya göre 3B baş pozisyonu bilgisini de elde edebilmektedir. Tasarlanan bu gözlük eğitim aşamasında göz parametrelerinin hesaplanması ve test aşamasında da bu parametrelerin gözlük koordinat sisteminde kullanılmasını sağlar.

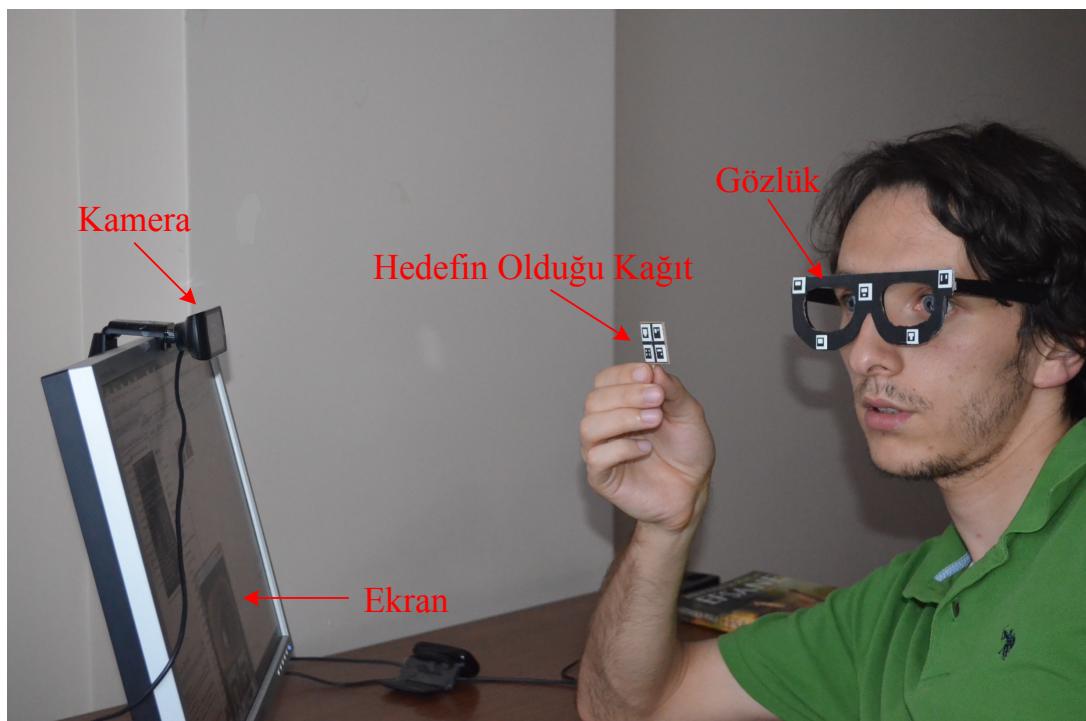
Göz bakış doğrultusunun kestirimi konusunda yapılan çalışmalarda, ekran ile göz arasında eşleme yapmak için sistemin eğitilmesi ve kalibrasyon amaçlı kullanıcının farklı noktalara bakması istenir. Fakat insan gözünün istenilen noktaya tam olarak odaklanamayıp yakın ama değişik yönlere odaklanması sistemin hata yapmasına sebep olmaktadır [Hansen and Ji, 2010]. Bu düşünceyle kullanıcının bakışı sınırlandırılarak ilgili noktaya bakıldığından emin olması için kağıdın orta noktasında yer alan küçük bir delikten uzaydaki herhangi bir noktaya bakması istenmiştir (Bkz. Şekil 7.2). Bu deliğin 3B konumu göz yarıçaplarının kestiriminde kullanılabilmesi için basit ve hafif kalın bir kağıt üzerine gözlüktekiyle aynı tarz işaretçiler yerleştirildi. Bu hedef noktanın 3B konum bilgisi, hedefin merkezinin kağıt başlangıç koordinatı olarak kabul edilen sağ üst köşeye olan uzaklığıdır.

Gözlük ve kağıt üzerinde kullanılan işaretçilerin birbirinden farklı olması sağlanarak, 3B konum bilgisi ve görüntü düzlemindeki konumlarıyla birlikte kameraya göre olan transformasyon matrisi kolaylıkla hesaplanmıştır. Bu matris, ileriki bölümlerde anlatılan hedef noktanın gözlük koordinat sistemindeki konumunun hesaplanması da kullanılmıştır.

Gözlük ve kağıt üzerine yerleştirilen işaretçilerin geleceği pozisyonlar cetvelle başlangıç koordinatına göre önce belirlendi. Daha sonra resim düzenleme programında ölçüm gereci sayesinde ilgili alan kadar bir resim oluşturuldu. Bu resim üzerine cetvelle yerleri ölçülen işaretçiler yerleştirildikten sonra köşe noktalarının mm cinsinden başlangıç noktasına göre x ve y eksenlerindeki uzunlukları elde edildi. Elde edilen görüntünün kağıt baskısı alınarak ilgili düzleme yapıştırıldı. Resim düzenleme programıyla köşe noktaları elde etmek cetvelle yapılacak olan hatayı minimize etmiştir.

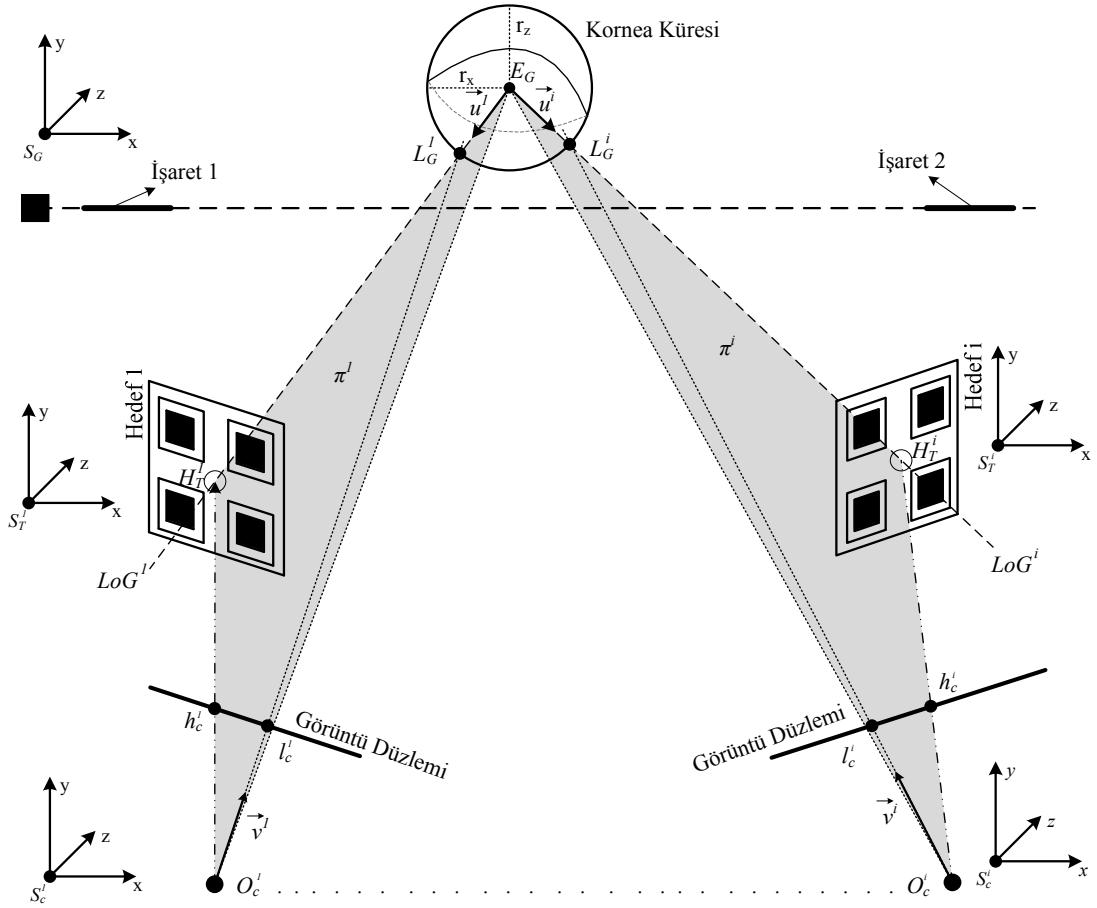


Şekil 7.2: Eğitim aşamasında kullanılarak üzerinde işaretçilerin ve hedef noktanın olduğu kağıt.



Şekil 7.3: Sistemin uzaktan görüntüsü.

8. SİSTEMİN GEOMETRİSİ



Şekil 8.1: Sistemin eğitim aşamasındaki geometrisi.

Göze ait parametrelerin tahmin edildiği öğrenme aşamasındaki kamera, üzerinde işaretçiler bulunan gözlük ve hedef olarak kullanılan kağıt arasındaki geometri Şekil 8.1'de gösterilmiştir. Gözlük koordinat sistemi S_G olarak isimlendirildi. S_G referans koordinat sistemi kabul edilip diğer koordinat sistemlerindeki 3B konumlarının kamera dış parametreleri sayesinde bu sisteme dönüştürülmesi sağlanır. Gözlüğün sağ üst köşesi S_G koordinat sisteminin başlangıç noktası kabul edilir ($x_G = 0, y_G = 0, z_G = 0$). Gözlük üzerinde kullanılan işaretçilerin köşe noktalarının başlangıç noktasına x ve y eksenlerindeki uzaklıklarını, S_G koordinat sisteminde x ve y değerleri olarak kabul edilir. Gözlüğün düzlemsel olarak tasarlanması, üzerine yerleştirilen işaretçilerin köşe noktalarının z eksenindeki değerinin 0 olmasını sağlar. Gözlüğün sistem boyunca başta yer değiştirmediği varsayıldığından S_G koordinat sistemi kullanıcı farklı noktalara baktığında veya

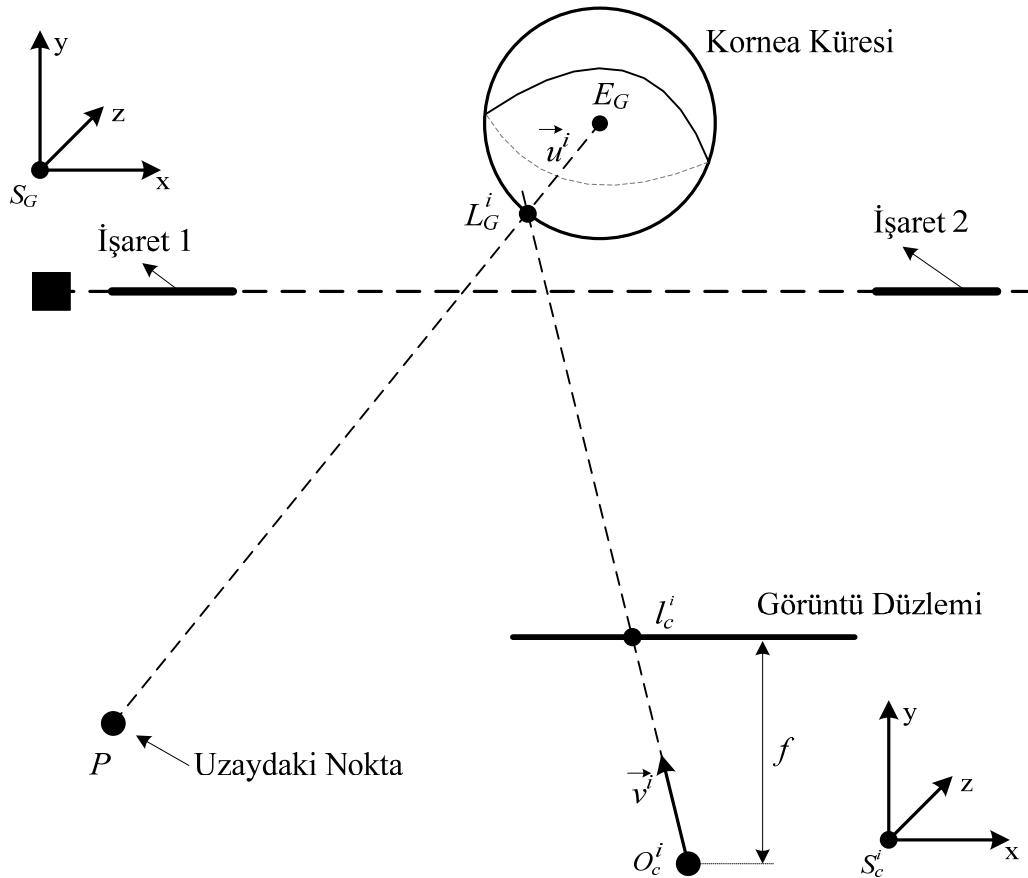
kameranın yerinin değişmesi durumunda hep aynıdır. Kornea merkezinin 3B konumu olan E_G ve göz bebeğinin 3B konumu olan L_G^i , sistemin çalışması süresince S_G koordinat sisteminde temsil edilmiştir. Sistem geometrisindeki isimlendirmelerde kullanılan üslü i ifadesi, yer aldığı noktanın veya koordinat sisteminin, kullanıcının her seferinde farklı noktaya bakmasıyla birlikte kameranın, başın ve hedefin yer değiştirmesi durumlarından en az birinin gerçekleşmesi sonucunda referans koordinat sistemi kabul edilen S_G 'ye göre değişmesi nedeniyle bu şekilde isimlendirilir. Şekil 8.1'de gösterilen r_x ve r_z değeri elipsoit olarak modellenen kornea yarıçapının x ve z eksenlerindeki değerini temsil etmektedir.

Hedefin bulunduğu kağıdın koordinat sistemi S_T^i olarak isimlendirilip, kağıdın sağ üst köşesi S_T^i de başlangıç noktası kabul edilir ($x_T^i = 0, y_T^i = 0, z_T^i = 0$). Kağıt üzerinde yer alan işaretçilerin köşe noktalarının ve hedef nokta olan H_T^i 'nin başlangıç noktasına x ve y eksenlerindeki uzaklıkları, S_T^i koordinat sisteminde x ve y değerleri olarak kabul edildi. Kağıdın düzlemsel yapıda olması işaretçilerin köşe noktalarının z eksenindeki değerinin 0 olmasını sağlar.

Kameranın sahip olduğu koordinat sistemi S_C^i ve kameranın iz düşüm merkezi olan noktanın S_C^i 'deki 3B konumu O_C^i ile isimlendirilir. O_C^i noktası S_C^i 'de başlangıç noktası olarak kabul edildi ($x_C^i = 0, y_C^i = 0, z_C^i = 0$). Sistemin çalışması sırasında odak uzaklığı f 'in değişmediği kabul edilip, S_C^i koordinat sisteminde O_C^i noktasından z ekseni yönünde f kadar uzaklıkta görüntü düzlemi yer almaktadır. Kamera iç parametreleri kısmında anlatılan görüntü merkez noktaları olan x_0 ve y_0 piksellerinin S_C^i koordinat sistemindeki 3B konumu $x_C^i = 0, y_C^i = 0, z_C^i = f$ olmalıdır. Kameranın 3B dünyada gördüğü göz bebeğinin ve kağıt üzerinde yer alan hedefin görüntü düzleminde eşleştiği noktalar l_C^i ve h_C^i olarak isimlendirilmiştir. Sistem çalışma sırasında işaretçilerin köşe noktalarının 3B konum bilgisini kullanarak S_T^i ve S_G koordinat sistemlerinden S_C^i koordinat sistemine kamera dış parametreleri olarak da isimlendirilen transformasyon matrislerini hesaplar.

Kullanıcının uzaydaki herhangi bir noktaya H_T^i hedef noktasından bakması durumunda, 3B göz bakış doğrultusu vektörü olan LoG^i (göz bakış hattı) kornea merkezi, göz bebeğinin merkezinden ve hedef noktasından geçecek doğrultuda oluşur. Bu 3B vektörün birim vektörü \vec{u}^i olarak isimlendirilmektedir. Kameranın gördüğü L_G^i noktasının görüntüsü görüntü düzleminde l_C^i noktasında, H_T^i noktasının

görüntüsü de h_G^i noktasında oluşmaktadır. O_G^i noktasından L_G^i 'ye doğru olan ve görüntü düzlemindeki l_G^i piksel değerinden geçen 3B vektörün birim vektörü \vec{v}^i olarak isimlendirilir. l_G^i , h_G^i ve O_G^i noktalarının S_G koordinat sistemindeki yerlerinin kamera parametreleri sayesinde bulunmasıyla yerleri bilinen bu 3 nokta kullanılarak uzayda π^i isminde düzlem tanımlanmaktadır. Bu düzlem uzayda göz bebeğinden, kornea merkezinden, hedef noktadan ve hedef nokta aracılıyla uzayda bakılan noktadan geçmektedir. Sistemden elde edilen görüntülerde düzlem tanımlayan 3 noktada değişeceği için her bir görüntü farklı bir π^i düzlemi tanımlamayı sağlar. Bu π^i düzlemlerinin en temel özelliği, gözlüğün oynamadığının varsayılmaması durumunda her birinin S_G koordinat sistemine göre kornea merkezinden geçiyor olmasıdır.



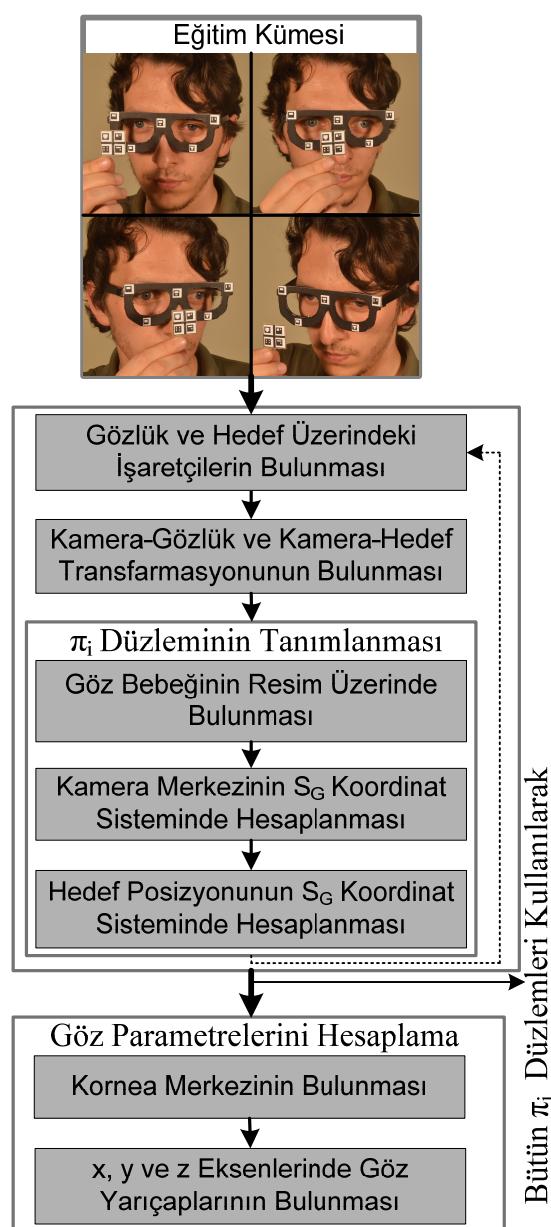
Şekil 8.2: Sistemin test aşamasındaki geometrisi.

Sistemin test aşamasındaki geometrisi Şekil 8.2'de gösterilmiştir. Burada bilinen noktalar kornea merkezinin 3B konumu olan E_G , göz bebeğinin görüntüsü olan l_G^i ve kamera iz düşüm merkezi olan O_G^i 'dir. Aynı zamanda kamera iz düşüm

merkezinden göz bebeğine doğru olan ve göz bebeğinin görüntüsünün 3B pozisyonundan geçen birim vektör \vec{v}^l 'de bilinmektedir. Sonraki bölümlerde bu bilinenlerden bilinmeyen değerlerin çıkarılıp gözün bakış doğrultusununkestirimi hesabı detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

9. SİSTEMİN EĞİTİM AŞAMASI

Kornea merkezinin 3B konumu ve 3B elipsoit olarak modellenen gözün her bir eksendeki yarıçapının bulunması işlemleri, geliştirilen sistemin getirmiş olduğu yeniliklerdir. Bu parametrelerin bulunması için sistemin eğitilmesi gerekmektedir. Çünkü göz parametreleri kişiden kişiye değişmekte ve aynı zamanda sistemdeki gözlüğün her takılması ve oynaması durumunda kornea merkezinin referans noktaya göre farklı konumda olması aynı kişide değerlerin farklımasına sebep olur.

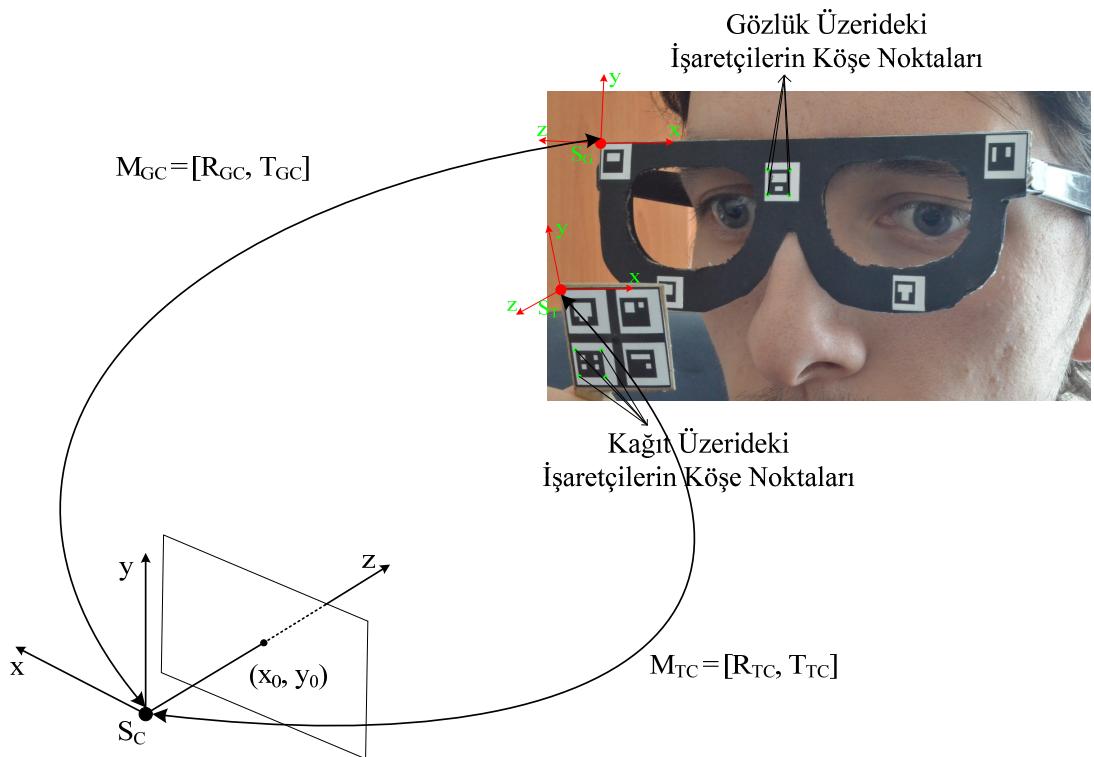


Şekil 9.1: Eğitim aşamasında sistemin izlediği adımlar.

Eğitim aşamasında yapılacak olan işlemlerin akış şeması Şekil 9.1'de gösterilmiştir. Sistemin ilk olarak gözlük ve hedefin yer aldığı kağıt üzerinde 3B yerleri bilinen işaretçilerin köşe noktalarının görüntü üzerindeki yerlerinin bulması gerekmektedir. İşaretçilerin 3B ve görüntü üzerindeki konum bilgileri kullanılarak kamera koordinat sistemi S_C^i ile gözlük koordinat sistemi S_G ve hedefin bulunduğu kağıdın koordinat sistemi S_T^i arasında rotasyon ve öteleme bilgilerini içeren transformasyon matrisleri hesaplanır (Bkz. Şekil 9.2). Transformasyon matrisi,

$$M_{AC}^i = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \quad (9.1)$$

3x4'lük olup, gözlük kamera arasındaki M_{GC}^i ve hedef kamera arasındaki M_{TC}^i ile isimlendirilmektedir. Kamera dış parametresi olarak da isimlendirilen bu matrisin nasıl hesaplanacağı 4.bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.



Şekil 9.2: Kamera-gözlük ve kamera-kağıt arasındaki transformasyonlar.

İşaretçilerin köşe noktalarının 3B konum bilgilerinin doğru bir şekilde sisteme girildiği ve işaretçilerin yerleştirdikleri yüzeyin düzlem olduğunu varsayırsak,

sistemin baş pozisyonunun hesaplanması sırasında yapmış olduğu hata, kamera dış parametrelerinin hesaplanması sırasında yapılan hata kadardır.

9.1. 3B Uzayda Konumu Bilinen 3 Noktadan ve Kornea Merkezinden Geçecek Düzlem Tanımlama

9.1.1. Homojen Koordinatlarda Düzlem Tanımlama

3B uzaydaki bir nokta homojen koordinatlarda $X = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4]^T$ 4 elemanlı homojen vektörle gösterilir. Bu noktanın homojen olmayan koordinatlardaki karşılığının $X' = [X \ Y \ Z]^T$ olabilmesi için $X_4 \neq 0$ olmalıdır. Çünkü homojen koordinatın homojen olmayan koordinata olan dönüşümü sağlayan

$$X = \frac{X_1}{X_4}, \quad Y = \frac{X_2}{X_4}, \quad Z = \frac{X_3}{X_4} \quad (9.2)$$

ifadesine bakıldığında $X_4 = 0$ olması durumunda noktanın sonsuzda olduğu görülmektedir [Hartley and Zisserman, 2004].

3B uzaydaki bir düzlem,

$$\pi_1 X + \pi_2 Y + \pi_3 Z + \pi_4 = 0 \quad (9.3)$$

denklemi ile ifade edilmektedir. $\pi = [\pi_1 \ \pi_2 \ \pi_3 \ \pi_4]^T$ katsayıları homojen koordinat sisteminde 3B uzaydaki serbestlik derecesi 3 olan düzlemi temsil etmektedir. Bu durumda π düzlemi üzerinde yer alan noktanın homojen koordinatlardaki değeri düzlem denklemine yazıldığında,

$$\pi_1 X_1 + \pi_2 X_2 + \pi_3 X_3 + \pi_4 X_4 = 0 \quad (9.4)$$

ifadesi elde edilir. Buna göre homojen koordinatlarda verilen bir noktanın düzlem üzerinde yer alması durumu

$$\pi^T X = 0 \quad (9.5)$$

denklemi ile gösterilir. π katsayılarının ilk üçü olan $n = [\pi_1 \ \pi_2 \ \pi_3]^T$ öklid geometrisinde düzlemin normaline karşılık gelmektedir. Homojen olmayan koordinatlardaki düzlem denklemi $nX' + d = 0$ şeklinde düzenlenliğinde $d = \pi_4$ eşitliği elde edilir. Düzlemin orijinden olan uzaklıği da $d/\|n\|$ skalar bölme işlemi ile hesaplanır [Hartley and Zisserman, 2004].

3B uzaydaki düzlemin serbestlik derecesi 3 olduğundan düzlem tanımlamak için homojen koordinatlarda yerleri bilinen 3 nokta yeterlidir [Hartley and Zisserman, 2004]. Bu 3 noktanın da tanımladığı düzlem üzerinde olması gerektiği,

$$\begin{bmatrix} X_1^T \\ X_2^T \\ X_3^T \end{bmatrix} \pi = 0 \quad (9.6)$$

ifadesiyle gösterilir. Bu 3 noktanın da birbirine göre lineer bağımsız olması gerekip ki bağımsızlık derecesi ile noktaların oluşturduğu 3×4 'luk matrisin mertebe değeri birbirine eşit olsun. Bu ifadenin çözümü için X_1, X_2, X_3 noktaları ile bu noktaların lineer kombinasyonu olabilecek ve tanımlanan düzlem üzerinde yer alabilecek olan herhangi X noktasının olması durumunda yazılacak olan $Q = [X \ X_1 \ X_2 \ X_3]$ matrisinin determinant değeri $\det Q = 0$ olmalıdır. X kolonunun determinant ifadesi açılırsa,

$$\det Q = x_1 D_{234} - x_2 D_{134} + x_3 D_{124} - x_4 D_{123} \quad (9.7)$$

denklemiyle Q 'nın determinant değeri elde edilir. Burada X noktası homojen koordinatlarda $[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ ile homojen noktaların oluşturacağı 4×3 'lük $[X_1 \ X_2 \ X_3]$ matrisinin jkl satırına ait determinant ifadeside D_{jkl} ile gösterilir. X noktasının tanımlanan düzlem üzerinde yer alması durumu göz önüne alındığında düzlem için π katsayıları,

$$\pi = [D_{234} \ -D_{134} \ D_{124} \ -D_{123}]^T \quad (9.8)$$

şeklinde yazılır.

9.1.2. Düzlem Tanımlayan Noktaların Hesaplanması

Kornea merkezinin hesaplanması sırasında kullanılacak olan düzlemleri tanımlayan 3B noktalar, kamera iz düşüm merkezi O_C^i , göz bebeğinin ve hedef noktanın görüntü düzlemindeki yeri olan l_C^i ve h_C^i 'dir (Bkz. Şekil 8.1). Bu noktaların kamera koordinat sistemi S_C^i 'deki yerleri kamera iç parametreleri kullanılarak bulunabilmektedir. Fakat kornea merkezinin gözlük koordinat sistemi S_G 'de temsil edildiği için noktaların S_G 'ye taşınması gerekmektedir. S_G 'den S_C^i 'ye olan transformasyon matrisi M_{GC}^i , işaretçiler kullanılarak hesaplanan kamera dış parametrelerdir. S_C^i 'den S_G 'ye yapılacak olan transformasyon için M_{GC}^i matrisinin tersi kullanılır.

Kornea merkezinin üzerinde yer aldığı düzlemi tanımlayan ilk nokta kameranın iz düşüm merkezidir. Bu noktanın konumu S_C^i 'de $O_c^i = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ homojen vektörü olarak gösterilmektedir. Buna göre bu noktanın gözlük koordinat sistemindeki yeri olan O_G^i noktasını gözlük kamera arası transformasyonu M_{GC}^i ile S_C^i 'ye taşıındığında O_G^i noktası elde edilir. Bu transformasyon operasyonu

$$M_{GC}^i O_G^i = 0 \quad (9.9)$$

şeklinde ifade edilir [Hartley and Zisserman, 2004]. $O_G^i = [X/T \ Y/T \ Z/T \ 1]^T$ noktasının elde edilebilmesi için,

$$\begin{aligned} X &= \det([m_2 \ m_3 \ m_4]), Y = \det([m \ m_3 \ m_4]) \\ Z &= \det([m_1 \ m_2 \ m_4]), T = \det([m_1 \ m_2 \ m_3]) \end{aligned} \quad (9.10)$$

ifadeleri kullanılır. Bu ifadelerde yer alan m_j vektörü M_{GC}^i matrisinin j^{th} kolonunu temsil etmektedir.

Düzlem tanımlamada kullanılacak olan ikinci nokta, göz bebeğinin görüntü düzleminde denk olduğu piksel değerinin 3B konumudur. 6. bölümde nasıl bulunduğu anlatılan göz bebeğinin görüntü düzleminde x ve y eksenlerindeki karşılığı l_x^i ve l_y^i olan pikselin S_C^i koordinat sistemindeki 3B konumu olan $l_C^i = [(l_x^i - x_0)/d_{px} \ (l_y^i - y_0)/d_{py} \ f \ 1]^T$ noktası, 4. bölümde anlatılan kamera iç

parametreleri kullanılarak hesaplanır. S_G koordinat sistemindeki konumu l_G^i olan bu noktanın S_C^i koordinat sistemine transformasyonu,

$$M_{GC}^i l_G^i = l_C^i \quad (9.11)$$

matris çarpımı ile gösterilir. Her iki tarafında kamera gözlük arası hesaplanan M_{GC}^i transformasyon matrisinin tersi ile çarpılmasıyla

$$(M_{GC}^i)^{-1} M_{GC}^i l_G^i = l_C^i (M_{GC}^i)^{-1} \quad (9.12)$$

bilinmeyen l_G^i noktası hesaplanır. Yukarıdaki ifadede yer alan $(M_{GC}^i)^{-1} M_{GC}^i = I$ ifadesinin sonucu birim matris olacağından lineer sistem,

$$l_G^i = l_C^i \begin{pmatrix} M_{GC}^i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \quad (9.13)$$

olarak sadeleşir. M_{GC}^i matrisinin 3x4'lük olduğundan tersi alınabilmesi için son satırda $[0 \ 0 \ 0 \ 1]$ vektörü eklenir.

Düzlemi tanımlamada kullanılan son nokta, kalibrasyon sırasında kullanılan kağıt üzerinde yer alan hedef noktanın görüntü düzlemindeki 3B konumudur. Bu noktanın görüntü düzlemindeki yerinin S_G koordinat sisteminde bilinmesi gereklidir. Fakat gelinen noktaya kadar kağıt-kamera ve gözlük-kamera aralarındaki koordinat dönüşümlerini sağlayan kamera dış parametreleri ve kağıt üzerindeki hedef noktası H_T^i 'nin S_T^i koordinat sistemindeki yeri bilinmektedir. Bilinenlerden yola çıkarak S_T^i koordinat sistemindeki 3B konumu bilinen hedefin S_C^i koordinat sistemindeki yeri olan H_C^i noktasını,

$$M_{TC}^i H_T^i = H_C^i \quad (9.14)$$

ifadesinde de görüldüğü gibi kağıt-kamera arasındaki M_{TC}^i transformasyon matrisi ile hesaplanır. 4. bölümde anlatılan S_C^i koordinat sistemindeki bir noktanın görüntü düzlemine izdüşümü yöntemiyle H_C^i noktasının görüntüsünün x ve y eksenlerindeki

karşılığı h_x^i ve h_y^i olarak elde edilir. Bu pikselin S_C^i koordinat sistemindeki 3B konumu olan $h_C^i = [(h_x^i - x_0)/d_{px} \quad (h_y^i - y_0)/d_{py} \quad f \quad 1]^T$ noktası, kamera iç parametreleri kullanılarak hesaplanır. S_C^i koordinat sistemindeki yeri hesaplanan h_C^i noktasının S_G 'deki yerini bulmak için 9.13 numaralı denklemden faydalanan. Sonuç olarak hedef nokta, S_G ve S_T^i ile transformasyona sahip S_C^i aracılığıyla düzlemin tanımlanacağı S_G 'ye taşınır.

Elde edilen bu 3 nokta Şekil 8.1'deki sistem geometrisinde görüldüğü gibi 3B uzayda kamera iz düşüm merkezinden, göz bebeğinin merkezinden, kornea merkezinden ve hedef noktadan geçmektedir. Bir sonraki bölümde her bir görüntüden elde edilen düzlemlerden kornea merkezinin nasıl bulunacağı anlatılacaktır.

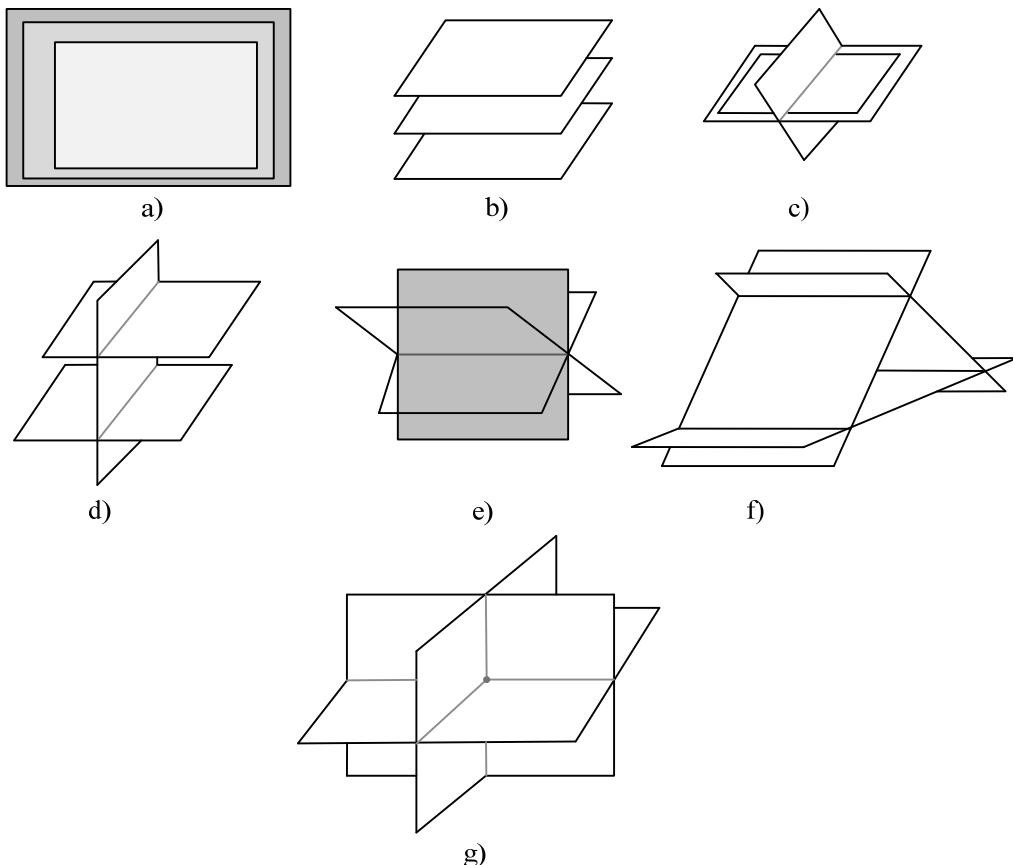
9.2. Kornea Merkezinin 3B Konumunun Bulunması

Eğitim kümesindeki görüntülerde gözlüğün başta hareket etmediği varsayıldığında tanımlanan düzlemlerin geçtiği noktalardan S_G 'ye göre konumu değişmeyen tek nokta kornea merkezinin 3B yeridir. Bu noktanın bulunabilmesi için 9.15 denkleminde gösterilen 3B uzayda tanımlanan 3 düzlemin X noktasında kesiştiği fikrinden yararlanılır [Hartley and Zisserman, 2004] (Bkz. Şekil 9.3 g)). Fakat 3 düzlem her zaman bir noktada kesişmeyebilir. Olası kesişimler düzlemlerin durumlarına göre şu şekilde olabilir [Foley, 1996]:

- 3 düzlemin de normallerinin birbirine göre noktasal çarpım değeri 0 ise bu düzlemler birbirine paraleldir. Eğer herhangi bir düzlem üzerindeki bir nokta diğer düzlemlerde de aynı düzleme aittiyse düzlemler bir düzlemden kesişirler (Bkz. Şekil 9.3 a)). Aksi takdirde birbirlerini kesmezler (Bkz. Şekil 9.3 b)).
- 3 düzlemden herhangi ikisinin normallerinin noktasal çarpım değeri 0 ise bu düzlemlerden 2 tanesi birbirine paraleldir. Paralel olan düzlemler ortak bir noktaya sahipse 3 düzlem bir doğru üzerinde kesişir (Bkz. Şekil 9.3 c)). Paralel olan düzlemler csak bir düzlemden kesişir (Bkz. Şekil 9.3 d)).
- 3 düzlemin normalleriyle yazılacak olan $n_1 \cdot (n_2 \times n_3)$ ifadesinin değeri 0 ise düzlemler 1 doğru parçası (Bkz. Şekil 9.3 e)) veya 3 doğru parçasında kesişirler (Bkz. Şekil 9.3 f)).

- 3 düzlemin normalleriyle yazılacak olan $n_1 \cdot (n_2 \times n_3)$ ifadesinin değeri 0 değilse düzlemler bir noktada kesişirler (Bkz. Şekil 9.3 g)).

$$\begin{bmatrix} \pi_1^T \\ \pi_2^T \\ \pi_3^T \end{bmatrix} X = 0 \quad (9.15)$$



Şekil 9.3: a) Paralel 3 düzlemin çakışık olma, b) Paralel 3 düzlemin çakışık olmama, c) Sadece 2 paralel düzlemin çakışık olma, d) Sadece 2 paralel düzlemin çakışık olmama, e) Birbirine paralel olmayan 3 düzlemin 1 doğru parçasında kesişmesi, f) Birbirine paralel olmayan 3 düzlemin 3 doğru parçasında kesişmesi, g) Birbirine paralel olmayan 3 düzlemin 1 noktada kesişmesi durumları.

Tüm bu olası durumlar göz önünde bulundurulduğunda, sistem modeline göre elde ettiğimiz düzlemlerin ortak olan kornea merkezinde kesişmesi fikri, olası durumlardan sonuncu olanı kullanmamızı gerekli kılmıştır. 9.15 denklemindeki 3×4 'lük olan düzlemlerin oluşturduğu matrisin sağ sıfır uzayı bize X noktasının homojen koordinatlardaki yerini vermektedir. Fakat eğitim kümesindeki 3 görüntü kullanmak sistemin eğitimi için yeterli değildir. Sistemin düzlem tanımlarken yapmış

olduğu küçük hataları düşürebilmesi için kullanıcının farklı baş pozisyonlarında ve farklı göz bakış doğrultularında baktığı durumdaki görüntüler gerekmektedir. Kullanıcı tarafından sistemin eğitimi için hazırlanan görüntüler olabilecek durumları ne kadar iyi şekilde temsil ederse oluşabilecek olan hatanın yaklaşık bir değerde kalması sağlanır. Bu nedenle kullanıcıların sistemin eğitimi için değişik senaryolarda en az 10 görüntü en çok 20 görüntü oluşturmaları gerekmektedir.

Eğitim kümelerinden elde edilen $\pi_i, i = 1 \dots n$ düzlemlerinin kesişim noktasının kornea merkezi olan $E_G = [E_{Gx}/E_{Gt} \quad E_{Gy}/E_{Gt} \quad E_{Gz}/E_{Gt} \quad 1]^T$ noktasında kesiştiği,

$$\begin{bmatrix} \pi_1^T \\ \pi_2^T \\ \vdots \\ \pi_n^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{Gx}/E_{Gt} \\ E_{Gy}/E_{Gt} \\ E_{Gz}/E_{Gt} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (9.16)$$

matris çarpım ifadesinde görülür. Bu denklem sistemi doğrusal en küçük kareler (LLS) yöntemi ile çözülebilir. Bu çözüm sırasında hesaplanan hata elde edilen E_G noktasının her bir düzleme vektörel olarak çarpımı sonrasında hesaplanan cebirsel uzaklık değeridir. Elde edilen bu cebirsel uzaklık değerlerinin karelerinin toplamını en aza indirgeyen değerler çözüm kümesini oluşturur. E_G noktasının LLS yöntemine göre hesaplanması sonucunda oluşan cebirsel hata 0 olmaz. Hata değerini düşürmek için kornea merkezinin 3B konumunu daha iyi tespit etmekte kullanılan lineer olmayan optimizasyon yöntemi bir sonraki bölümde anlatılmıştır.

9.3. Kornea Yarıçaplarının Bulunması

Sistemin 3B göz bebeğinin konumunu bulabilmesi için hesaplanan kornea merkezinin 3B konumundan genliği $r = [r_x \quad r_y \quad r_z]^T$ olan birim vektör \vec{u} kadar uzaklıktaki noktayı bulması gerekmektedir (Bkz. Şekil 8.1). Birim vektörün genliği olan $r = [r_x \quad r_y \quad r_z]^T$ ifadesi elipsoit olarak modellenen korneanın x , y ve z eksenlerindeki yarıçaplarını temsil etmektedir. Göz kusurları ve sistemin yaptığı hatalardan dolayı kornea her zaman tam küre olmayabilir. Düşünülen elipsoit model

tam küre olması durumunu da kapsamaktadır. Kornea merkezinin 3B pozisyonunun hesaplandığı eğitim kümesindeki görüntüler r vektörünü hesaplamada da kullanılacaktır.

Şekil 8.1'e bakıldığında kornea merkezinden çıkan ve kağıt üzerindeki hedef noktadan geçen LoG^i vektörü aynı zamanda göz bebeğinin 3B konumu olan L_G^i noktasından da geçmektedir. Bu vektörün S_G koordinat sisteminde hesaplanabilmesi için H_T^i noktasının S_G 'deki yeri bilinmelidir. Bunun için H_T^i noktası önce S_C^i koordinat sistemine kağıt ile kamera arasındaki transformasyon kullanılarak,

$$M_{TC}^i H_T^i = H_C^i \quad (9.17)$$

ifadesiyle taşınır. Elde edilen noktanın S_G 'deki yerini hesaplamak için 9.13 numaralı denklemdeki gibi S_G 'den S_C^i 'ye uygulanan transformasyonun tersi uygulanır.

$$H_G^i = H_C^i \begin{pmatrix} M_{GC}^i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \quad (9.18)$$

E_G noktasından başlayan ve H_G^i noktasından geçen LoG^i vektörünün birim vektörü olan \vec{u}_i 'nin r kadar uzaklıktaki noktası, göz bebeğinin 3B konumunu verir. Aynı şekilde O_G^i noktasından başlayan ve görüntü düzleminde l_G^i noktasından geçen \vec{v}_i birim vektörünün a_i kadar uzaklıktaki noktası, göz bebeğinin 3B konumunu verir. Bunu matematiksel olarak yazacak olursak,

$$E_G + r \cdot \vec{u}_i = O_G^i + a_i \cdot \vec{v}_i \quad (9.19)$$

eşitliğini elde ederiz. Bu ifadedeki \cdot operatörü eleman eleman vektör çarpımını ifade etmektedir. Bu denklem bütün eğitim kümesindeki görüntüler için yazıldığından bütün denklemelerde r bilinmeyeni aynı olup $a_i, i = 1..n$ sayısal değeri her denklemde farklı bir değerdedir. 9.19 denklemi n tane görüntü için yazıldığından,

$$\begin{bmatrix} u_x^1 & 0 & 0 & v_x^1 & \dots & 0 & E_{Gx} - O_{Gx}^1 \\ 0 & u_y^1 & 0 & v_y^1 & \dots & 0 & E_{Gy} - O_{Gy}^1 \\ 0 & 0 & u_z^1 & v_z^1 & \dots & 0 & E_{Gz} - O_{Gz}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_x^i & 0 & 0 & 0 & \dots & v_x^i & E_{Gx} - O_{Gx}^i \\ 0 & u_y^i & 0 & 0 & \dots & v_y^i & E_{Gy} - O_{Gy}^i \\ 0 & 0 & u_z^i & 0 & \dots & v_z^i & E_{Gz} - O_{Gz}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_i \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (9.20)$$

lineer sistemi elde edilir. Bu sistemdeki denklem sayısı x , y ve z eksenleri için ayrı ayrı yazılıacağı için $3n$ tanedir. Sistemin LLS çözümü bize bilinmeyen r vektörünü verir.

Kornea merkezinin ve yarıçaplarının hesaplandığı denklem sistemlerinin LLS çözümleri tam bir çözüm üretmez. Bu nedenle sistemin eğitim aşamasında yapmış olduğu hatayi düşürmek için lineer olmayan çok değişkenli optimizasyon yöntemi olan ve kamera parametrelerinin tahmin edilmesinde de kullanılan LM algoritması kullanılmaktadır. 2. türev sayesinde en uygun çözüme ulaşan bu algoritma, diğer optimizasyon algoritmalarına göre daha kararlı ve daha hızlıdır. Algoritmayı kullanabilmek için ilk değerler, ulaşımak istenen değer ve hata değerlerini hesaplamaya yarayan bir fonksiyon tanımlanmalıdır [Web 1, 2013].

Eğitim aşamasında sistemin yapmış olduğu hatayi düşürmek için algoritmada ilk değer olarak 9.16 ve 9.20 numaralı denklemelerin LLS ile elde edilen çözüm kümesi, ulaşımak istenen değer olarak da her bir görüntüden hesaplanan bakış doğrultusunun gerçek göz bakış doğrultusu ile arasındaki açı değerlerinin farkının toplamının 0 olması ve fonksiyon olarak da göz bakış doğrultusununkestirimini yapan 10.3 numaralı denklem ile iki nokta arasındaki açıyı hesaplama işlemi kullanılmıştır. LM algoritmasında her bir görüntüde 3 tane yarıçap ve 3 tane de kornea merkezinin konum değerleri olmak üzere 6 tane parametre, gerçek ile hesaplanan bakış doğrultusu arasındaki açı farklarının toplamını 0'a yaklaşırıacak şekilde güncellenmiştir. Farkların toplamı bir eşik değerin altına düştüğünde veya sisteme girilen maksimum adım sayısına gelindiğinde algoritmanın bulduğu son değer en uygun değer çözüm olmaktadır. Fakat sistemdeki küçük kalibrasyon hatalarından dolayı hiçbir zaman açı farklarının toplamı 0 olarak bulunamadı. Ama LLS yönteminin ürettiği değere göre göz bakış doğrultusununkestirimi yapıldığında toplam hata değerinin düştüğü gözlemlenmiştir.

10. GÖZ BAKIŞ DOĞRULTUSUNUN KESTİRİMİ

Sistemin gözün bakış doğrultusunun kestirimini yapabilmesi için eğitim aşamasında kornea merkezi E_G ve kornea yarıçap vektörü $r = [r_x \ r_y \ r_z]$ hesaplanmış olmalıdır. Eğitim aşamasında takılı olan gözlüğün baştaki pozisyonu değiştirilmediği varsayılarak test aşamasında hedefin olduğu kağıt olmadan Şekil 10.1'deki adımlara izlenerek göz bakış doğrultusunun kestirimi hesaplanacaktır.



Şekil 10.1: Sistemin göz bakışı doğrultusunun kestiriminde izlediği adımlar.

Şekil 8.2'de sistemin test aşamasındaki geometrisi gösterilmiştir. 9.19 numaralı denklemde kullanılan noktalar, şekildeki geometride de olduğundan göz bakış doğrultusunun kestirimi için bu denklemden yararlanılacaktr. Fakat şekildeki \vec{u}^i birim vektörünü hesaplamak için test aşamasında 3B uzayda konumu bilinen kağıt

üzerindeki hedef kullanılmıştı. Test sırasında hedef olmadığından \vec{u}^i birim vektörünün hesaplanması sırasında tek denklemle sistemi çözmek için \vec{u}^i 'nin birim vektör olması özelliğinden yararlanılacaktır. Bu kapsamda 9.19 numaralı denklemde yapılan değişiklikle \vec{u}^i vektörü yalnız bırakılırsa,

$$(O_G^i - E_G + a_i \cdot \vec{v}_i)/r = \vec{u}^i \quad (10.1)$$

ifadesi elde edilir. Denklemde yer alan / operatörü vektörel bölmeyi göstermektedir. $|\vec{u}_i|$ değerinin 1 olduğundan $|(O_G^i - E_G + a_i \cdot \vec{v}_i)/r|$ ifadesinin değeri de 1 olmalıdır. Bu bilgiden yararlanarak yazılan,

$$\frac{(O_{Gx}^i - E_{Gx} + a_i \cdot v_{ix})^2}{r_x^2} + \frac{(O_{Gy}^i - E_{Gy} + a_i \cdot v_{iy})^2}{r_y^2} + \frac{(O_{Gz}^i - E_{Gz} + a_i \cdot v_{iz})^2}{r_z^2} = 1 \quad (10.2)$$

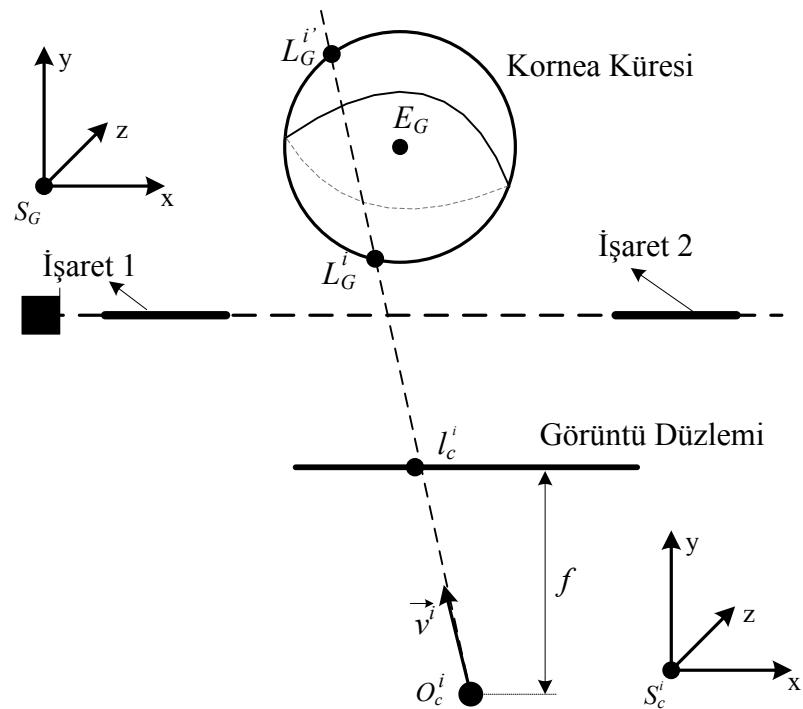
ifadesiyle birlikte bilinmeyen sadece sayısal a_i değeridir. Bu ifade açıldığında 2. dereceden bilinmeyen

$$\begin{aligned} & a_i^2(v_{ix}^2 r_y^2 r_z^2 + v_{iy}^2 r_x^2 r_y^2 + v_{iz}^2 r_x^2 r_y^2) + 2a_i^2(v_{ix} r_y^2 r_z^2 (O_{Gx}^i - E_{Gx}) + \\ & v_{iy} r_x^2 r_z^2 (O_{Gy}^i - E_{Gy}) + v_{iz} r_x^2 r_y^2 (O_{Gz}^i - E_{Gz})) + (O_{Gx}^i - E_{Gx})^2 r_y^2 r_z^2 + \\ & (O_{Gy}^i - E_{Gy})^2 r_x^2 r_z^2 + (O_{Gz}^i - E_{Gz})^2 r_x^2 r_y^2 - r_x^2 r_y^2 r_z^2 = 0 \end{aligned} \quad (10.3)$$

denklemi elde edilir. Bu denklemin vermiş olduğu 2 tane reel çözüm denklemde ilgili yere konulduğunda, kamera iz düşüm merkezinden çıkan \vec{v}_i vektörünün kornea küresini L_G^i ve L_G^{ii} noktalarında kestiği Şekil 10.2'de gösterilmektedir. Bu durumda gözlük düzlemine en yakın olan L_G^i noktası göz bebeğinin 3B konumu kabul edilir.

Fakat bu denklem sisteminin çözümü her zaman reel sayı üretmeyebilir. Eğer denklemin çözüm kümesi kompleks sayı olması \vec{v}_i vektörünün doğrultusunun kornea küresini hiçbir noktada kesmediğini göstermektedir. Bu vektörün doğrultusu kornea küresinden uzaklaşıkça kompleks sayının sanal kısmının büyüdüğü gözlemlenmiştir. Belki bu bilgi daha sonraki aşamalarda elde edilen vektörün kornea küresine ne kadar yakın olduğunu ölçümede kullanılabilir. Fakat sistem bu durumda gözlüğün

başta hareket ettiğini anlamasına rağmen tekrar eğitilmesi gerektiği bilgisini verebilmektedir.



Şekil 10.2: \vec{v}^i vektörünün göz küresini kestiği noktalar.

11. DENEYLER

Sistemin kurulumu için bir kamera, üzerinde işaretçiler olan yüzeyi düzlem bir gözlük ve gözlükle aynı özelliklere sahip ortasında hedefin bulunduğu kağıt hazırlandı. Kullanılan kameranın iç parametrelerinin nasıl hesaplandığı 4. bölümde, gözlük ve kağıt üzerinde yer alan işaretçilerin nasıl hazırlanıp yerleştirildiği de 7. bölümde anlatılmıştı. Kullanıcının eğitim aşamasında bakması için belli aralıklarla yerleştirilen noktalardan oluşan bir görüntü hazırlandı.

Kullanıcı yaklaşık olarak kameradan 50 cm uzakta olacak şekilde bir monitörün karşısına oturtulup, onun tam yüzünü görecek şekilde kamera ayarlandı. Hazırlanan görüntü kullanıcının göreceği şekilde ekranda kullanıcıya gösterilir hale getirildi. Kullanıcının ekranda gösterilen noktalara tek tek elinde tuttuğu ve ortasında hedef olan kağıt ile bakması istendi. Bazı noktalara başını sağa sola çevirerek ve aşağı yukarı hareket ettirerek değişik pozisyonlarda bakması sağlandı. Bütün görüntülerde gözlük ve kağıdın tamamıyla görülebileceği şekilde her bir kullanıcının ortalama 30 tane fotoğrafı çekildi.

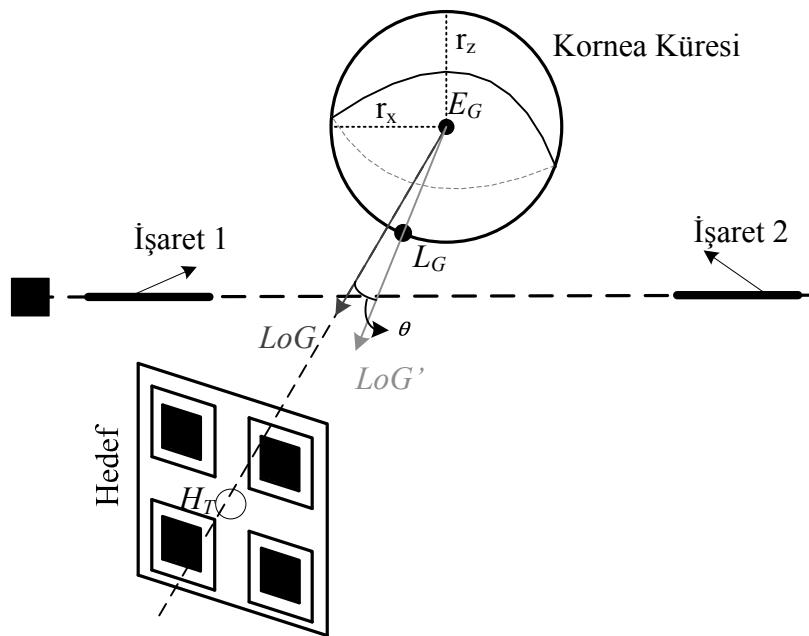
Test aşamasında hedefin bulunduğu kağıda gerek olmadığı söylenilmişti. Fakat yapılan hatayı tespit etmek için gerçek dünyada yeri bilinen bir noktaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple 3B uzayda yeri bilinen hedefin yer aldığı görüntülerden faydalandı. Bu görüntülerden bir tanesi test amaçlı seçilip, diğer görüntüler eğitim aşamasında göz parametrelerin tahmin edilmesi için kullanıldı. Eğitim amaçlı kullanılan görüntülerden elde edilen parametreler, test için seçilen görüntüde kullanılarak göz bakış doğrultusunun tespiti yapılmıştır. Bu işlem çekilen bütün görüntülere uygulanarak sistemin yapmış olduğu ortalama hata tespit edilmiştir. Deneyler boyunca gösterilen hata değeri bu yöntem sonucunda elde edilen hata değeridir.

Sistemin yapmış olduğu hatayı tespit etmek için hesaplanan kornea merkezinin 3B konumu ile kağıt üzerindeki hedef nokta arasındaki vektör doğru bakış açısı kabul edildi. Sistem tarafından kestirimi yapılan göz bakış doğrultusu ise kornea merkezi ile göz bebeği arasındaki vektördür. Şekil 11.1'de gösterilen bu iki vektör arasındaki açı da sistemin yapmış olduğu hata değeridir. Şekil 11.1'de gösterilen *LoG* vektörü doğru göz bakış doğrultusu kabul edilen, *LoG'* ise sistemin hesaplamış

olduğu göz bakış doğrultusunu gösteren vektörlerdir. Bu iki vektörün arasındaki açı sistemin yapmış olduğu hatayı gösteren θ değeri olup,

$$\theta = \cos^{-1}(LoG \cdot LoG' / (|LoG||LoG'|)) * \frac{180}{\pi} \quad (11.1)$$

ifadesiyle hesaplanmıştır. Bu ifadede yer alan \cdot operatörü nokta çarpımını göstermektedir. Sonucun derece biriminde olması için sondaki ifade dereceye dönüşümü göstermektedir.



Şekil 11.1: Sistemin yapmış olduğu hatanın ölçümünün gösterimi.

Sistemde testi gerçekleştirilen 1. kullanıcıya ait görüntülerdeki baş pozisyonlarının yapmış oldukları yatay açı değerine göre Tablo 11.1'de sınıflandırılmış sayıları, ortalama kornea merkezinin gözlük koordinat sistemindeki 3B konumu ve elipsoit kornea modelinin yarıçap değerleri gösterilmiştir. Her üç baş pozisyonu aralığındaki ortalama kornea yarıçap değeri ve kornea merkezinin 3B konumları birbirine yakın çıktıgı ve maksimum 0.03 mm değişiklik olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 11.1: 1. kullanıcidan elde edilen görüntülerin baş pozisyonlarına (BP) göre sayısı, ortalama yarıçapı ve 3B kornea merkezi.

Açı Aralığı (Derece)	Kornea Merkezi (x, y, z) cm	Yarıçap (r _x , r _y , r _z) cm	Görüntü Sayısı
-10° < BP < +10°	(3.32, 1.80, 4.22)	(1.38, 1.27, 1.31)	9
-20° < BP < +20°	(3.31, 1.80, 4.25)	(1.40, 1.29, 1.33)	13
-∞° < BP < +∞°	(3.32, 1.80, 4.24)	(1.38, 1.28, 1.33)	13

1. kullanıcıya ait görüntülerden hesaplanan göz bakış doğrultusununkestirim hataları Tablo 11.2 ve Tablo 11.3'de yer almaktadır. Tabloda sisteminkestirim hataları minimum, maksimum, ortalama ve ortanca değer olmak üzere gözbebeği otomatik olarak tespit edildiğinde bütün görüntülerde ve değişik baş pozisyonlarında ve gözbebeğinin elle işaretlenmesi durumlarındaki hata değerleri gösterilmiştir. Bunun yanında Tablo 11.2'de sisteme optimizasyon uygulanmaması durumundaki, Tablo 11.3'de de sisteme optimizasyon uygulanması durumundaki hata değerleri gösterilerek LM algoritmasının uygulamanın önemi vurgulanmıştır.

Tablo 11.2: Eğitim aşamasında herhangi bir optimizasyon uygulanmaması durumunda 1. kullanıcının göz bakışının kestirimindeki hata değerleri.

Test Durumu	Hata Değeri (Derece)			
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Ortanca
Göz Bebeğinin Tespiti [Timm and Barth, 2011]	0.3°	6.9°	3.7°	3.4°
-10° < BP < +10°	2.7°	6.6°	4.9°	4.9°
-20° < BP < +20°	1.0°	6.9°	3.5°	3.0°
-∞° < BP < +∞°	0.3°	5.2°	3.2°	3.4°
Göz Bebeğinin İşaretlenmesi	0.4°	6.8°	3.6°	3.5°

Tablo 11.2 ve Tablo 11.3'deki sonuçlara bakıldığından LM optimizasyonunun ortalama hata değerini düşürdüğü gözlemlenmektedir. Bunun yanında göz tespiti için kullanılan algoritma her zaman gözbebeğinin tam orta noktasını bulamamaktadır. Bu nedenle gözbebeğini yaklaşık olarak en iyi şekilde bulunduğu durumda sistemin yapmış olduğu hatayı ölçmek için gözbebeği elle işaretlendi. Elle işaretlenen göz

bebeğinin pozisyonu kullanıldığında sistemin yapmış olduğu hatanın daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 11.3'de 1. kullanıcının görüntülerine ait bazı sonuçlar gösterilmiştir.

Tablo 11.3: Eğitim aşamasında LM optimizasyonu uygulanması durumunda 1. kullanıcının göz bakışının kestirimindeki hata değerleri.

Test Durumu	Hata Değeri (Derece)			
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Ortanca
Göz Bebeğinin Tespiti [Timm and Barth, 2011]	0.3°	6.8°	3.5°	3.4°
-10° < BP < +10°	2.0°	6.6°	4.8°	5.1°
-20° < BP < +20°	0.7°	6.8°	3.3°	3.0°
-∞ < BP < +∞	0.3°	5.0°	2.8°	3.3°
Göz Bebeğinin İşaretlenmesi	0.6°	6.4°	3.3°	3.2°

Tablo 11.4'de ve Tablo 11.5'de 2. kullanıcıya ait görüntülerin, baş pozisyonlarının yapmış oldukları açı değerine göre sınıflandırılması ve hesaplanan göz bakış doğrultusunun kestirim hataları yer almaktadır. 2. kullanıcıda hatanın fazla olmasının nedeni, y eksenindeki yarıçap değerinin olması gereken değerden daha küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 11.4'de 2. kullanıcıya ait görüntülerin bazı sonuçlar gösterilmiştir.

Tablo 11.4: 2. kullanıcının elde edilen görüntülerin baş pozisyonlarına göre sayısı, ortalama yarıçapı ve 3B kornea merkezi.

Açı Aralığı (Derece)	Kornea Merkezi (x, y, z) cm	Yarıçap (r _x , r _y , r _z) cm	Görüntü Sayısı
-5° < BP < +5°	(3.71, 1.96, 4.28)	(1.13, 0.77, 1.12)	11
-10° < BP < +10°	(3.71, 1.96, 4.28)	(1.12, 0.76, 1.11)	8
-∞ < BP < +∞	(3.72, 1.96, 4.30)	(1.12, 0.77, 1.12)	13

Genel olarak sonuçlara bakıldığındá maksimum hata, kullanıcının baş pozisyon doğrultusu ile göz bakış doğrultusu arasındaki açının maksimum olduğu durumlarda gözlemlenmiştir. Gözün kenarlara doğru yönelmesi durumunda göz bebeğinin eliptik

şeklinin değişmesinden dolayı bulunan noktadan hesaplanan 3B göz bebeğinin konumu tam olarak istenilen noktayı vermemektedir. Çünkü böyle bir durumda kamera iz düşüm merkezinden çıkan birim vektör eliptik olarak modellenen korneayı 3B dünyada kameraya daha yakın bir noktada kesmektedir.

Tablo 11.5: Eğitim aşamasında LM optimizasyonu uygulanması durumunda 2. kullanıcının göz bakışının kestirimindeki hata değerleri.

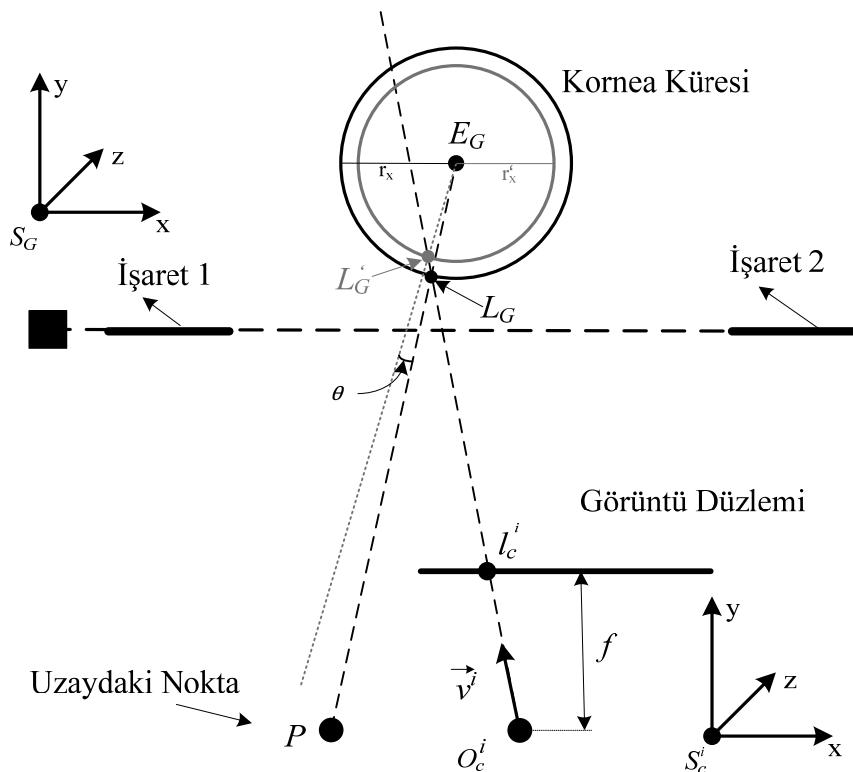
Test Durumu	Hata Değeri (Derece)			
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Ortanca
$-5^\circ < BP < +5^\circ$	2.4°	8.5°	4.8°	3.8°
$-10^\circ < BP < +10^\circ$	0.5°	6.8°	3.2°	3.1°
$-\infty < BP < +\infty$	1.3°	9.0°	4.2°	3.0°
Göz Bebeğinin İşaretlenmesi	0.5°	9.0°	4.1°	3.7°

Yöntemde hesaplanan kornea yarıçap değerlerinin çok fazla etkisi olduğu görülmüştür. İlk başta küresel olarak modellendiğinde toplam hatanın biraz daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bunun üstesinden gelmek için 3B elipsoit model kullanılarak hata değerinde bir miktar azalma sağlanmıştır. Kornea yarıçap değerlerine senaryoya göre farklı değer verildiğinde hata değerinin biraz daha azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, eğitim kümesinde hesaplanan kornea yarıçap değerinin milimetrik değişmesiyle yarıçapı küçük olan bir alanda 3B elipsoit model üzerindeki göz bebeğinin konumunda ciddi değişme olmasıdır (Bkz. Şekil 11.2).

Geliştiren yöntem fazladan donanıma ihtiyaç duymayan literatürde yer alan diğer yöntemlerle kıyaslanması Tablo 11.6'da gösterilmiştir. Tabloda aynı zamanda kıyaslanan yöntemlerin baş pozisyonunu göz önüne alıp olmadığı ve 3B olarak göz modeli kullanım bilgileri de gösterilmiştir. Bu yöntemlerin dezavantajlarından 3. bölümde bahsedilmiştir.

Tablo 11.6: Geliştirilen yöntemin literatürdeki benzer yöntemlerle kıyaslanması.

Yöntem	Hata Değerleri	Baş Pozisyonu	3B Göz Modeli
Valenti et. al., 2009	5.0°	x	x
Heyman et. al., 2011	5.6°	✓	x
Valenti et. al., 2012	2.0° - 5.0°	✓	x
Önerilen Yöntem	3.3° - 4.1°	✓	✓



Şekil 11.2: Yarıçap değerindeki değişimin yapılan hataya olan etkisi.

Sistemin yaptığı hatanın kullanıcının hedef noktaya tam olarak baktaması ve/veya görüntü üzerinde tespit edilen göz bebeğinin merkez noktasının yanlış tespit edilmesi durumlarından kaynaklanıp kaynaklanmadığını anlamak için bu noktaların yerleri Gauss normal dağılımına göre değiştirilerek sistemdeki hata değişimi gözlemlenmiştir. Bu noktaların yerlerini değiştirmek için MATLAB'da yer alan *randn* fonksiyonundan yararlanılmıştır [Web 5, 2013]. Bu fonksiyon Gauss normal dağılımına göre varyans değeri 1 olan ve ortalaması 0 olan rastgele sayılar üretir. Fonksiyon,

$$randn(m, n) * sqrt(sigma) + ort \quad (11.2)$$

şeklinde çağrıldığında varyans değeri sigma ve ortalaması *ort* olan $m \times n$ 'lik rastgele sayı matrisi oluşturur. Bulunan noktaların rastgele yerini değiştirmek için yukarıdaki ifadede, *ort* değeri 0 olacak şekilde varyans değerleri değiştirilerek değerler üretildi. Göz bebeğinin piksel değerini değiştirecek olan değerleri üretmek için 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 ve 4.0 varyans değerleri ve hedef noktanın kağıt üzerindeki 3B yerinin *x* ve *y* eksenlerindeki konumunu cm olarak değiştirmek için de 0.02, 0.05, 0.1, 0.2 ve 0.5 varyans değerleri kullanıldı. Tablo 11.7'de hedef noktasının 3B pozisyonunun *x* ve *y* eksenlerinde verilen varyans değerine göre yer değiştirmesi durumunda yapmış olduğu hata değerleri gösterilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi varyans değeri artıkça ortalama hata değeri de artmıştır. Eğer kullanıcı tam olarak hedef noktasına bakmasaydı, bazı varyans değerlerinde hata değerinin düşük olması beklenirdi.

Tablo 11.7: Sadece hedef noktanın yeri değiştirilmesi durumundaki hata.

Varyans Değeri	Hata Değeri (Derece)			
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Ortanca
Sigma 0.0	0.6°	6.4°	3.3°	3.2°
Sigma 0.02	0.2°	6.9°	3.4°	3.1°
Sigma 0.05	0.6°	8.2°	3.7°	3.6°
Sigma 0.1	0.9°	6.8°	3.7°	3.7°
Sigma 0.2	0.8°	8.7°	3.9°	3.8°
Sigma 0.5	0.7°	9.5°	4.1°	4.1°

Tablo 11.8'de göz bebeğinin görüntü üzerinde tespit edilen piksel değerinin *x* ve *y* eksenlerinde verilen varyans değerine göre yer değiştirmesi durumunda yapmış olduğu hata değerleri gösterilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi varyans değeri 1.0 iken ortalama hata değerinde 0.1'lik bir azalma gözlemlenirken, diğer durumlar için ortalama hata değeri artmıştır. Fakat bu küçük azalma hatanın göz bebeğinin yanlış tespit edilmesinden kaynakladığını göstermekte yetersiz kalmaktadır. Tablo 11.9'da da göz bebeğinin piksel noktasının ve hedef noktasının 3B konumunun çeşitli varyans

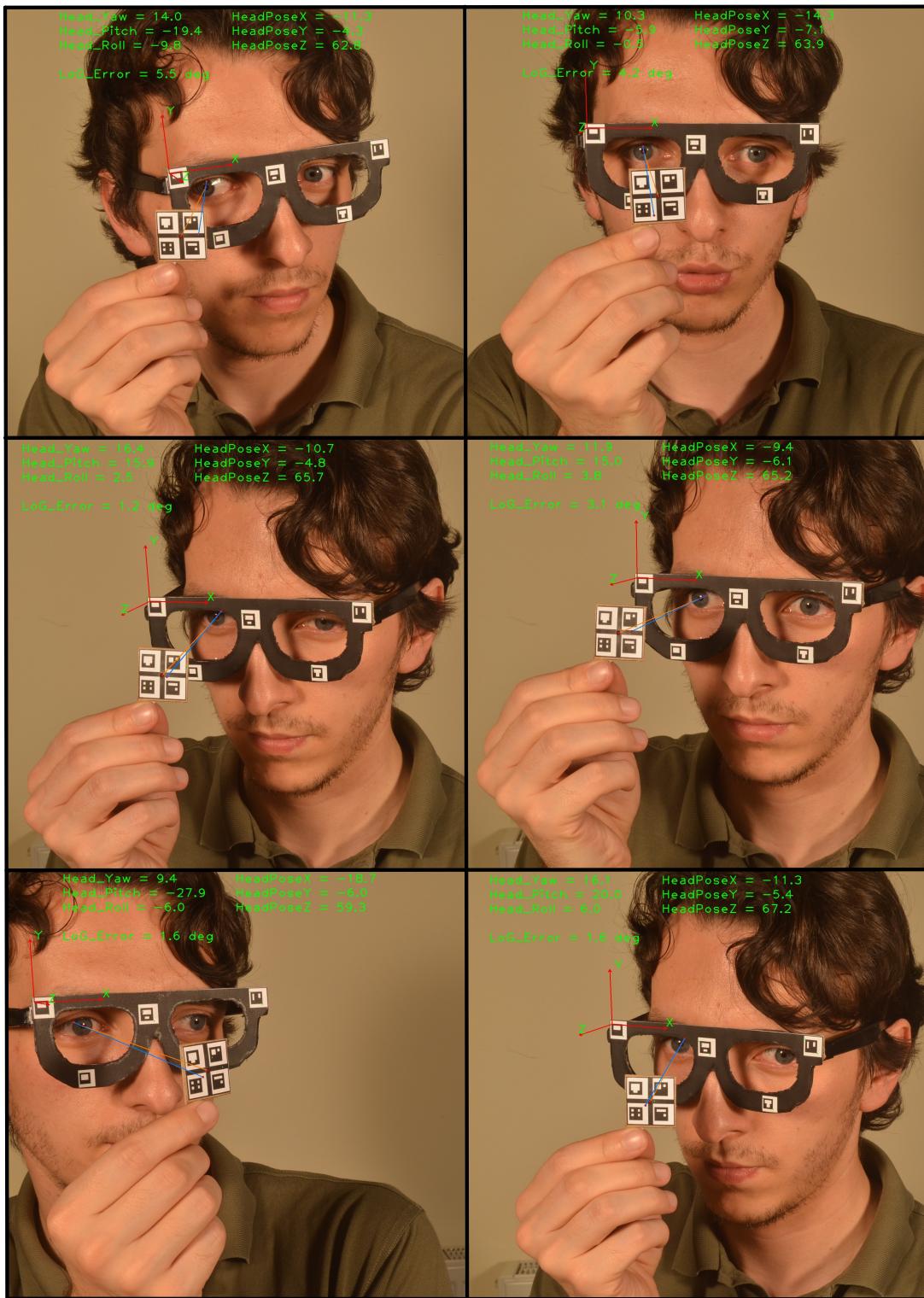
değerlerine göre aynı anda değiştirilmesi durumunda oluşacak olan ortalama hata değerleri gösterilmiştir. Tabloya bakıldığında yapılan değişikliğin hata değerlerinde bir azalmaya neden olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum hatanın büyük bir kısmının tasarlanan göz modelinden ve kalibrasyon hatalarından kaynaklandığını göstermektedir.

Tablo 11.8: Sadece göz bebeğinin yeri değiştirilmesi durumundaki hata.

Varyans Değeri	Hata Değeri (Derece)			
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Ortanca
Sigma 0.0	0.6°	6.4°	3.3°	3.2°
Sigma 0.5	0.3°	6.6°	3.4°	3.2°
Sigma 1.0	0.2°	6.7°	3.2°	3.2°
Sigma 2.0	0.5°	7.1°	3.6°	3.4°
Sigma 3.0	0.7°	9.3°	4.4°	4.0°
Sigma 4.0	0.6°	13.5°	6.4°	5.8°

Tablo 11.9 : Göz bebeğinin ve hedefin yerlerinin değiştirilmesi durumundaki hata.

Ortalama Hata	Göz Bebeğine Eklenen Hatanın Sigma Değeri				
	Sigma 0.5	Sigma 1.0	Sigma 2.0	Sigma 3.0	Sigma 4.0
Sigma 0.02	3.4°	3.8°	3.7°	4.0°	4.3°
Sigma 0.05	3.3°	3.6°	3.6°	3.9°	4.0°
Sigma 0.1	3.7°	4.1°	4.0°	4.4°	4.5°
Sigma 0.2	4.4°	4.8°	4.6°	5.2°	5.1°
Sigma 0.5	6.5°	7.1°	6.4°	7.2°	9.7°



Şekil 11.3: 1. kullanıcıya ait bazı sonuçlar.



Şekil 11.4: 2. kullanıcıya ait bazı sonuçlar.

12. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında fazladan bir donanıma ihtiyaç duymadan ucuza mal edilebilecek göz bakış doğrultusunu kestiren bir sistem geliştirilmiştir. Sistem, üzerinde işaretçiler bulunan basit bir gözlük yardımıyla tek kamera ile 3B baş pozisyonunu ve rotasyonunu ve 3B elipsoit olarak modellenen korneanın merkezini ve yarıçaplarını hesaplamaktadır. Hesaplanan kornea merkezinin görüntü üzerinde denk geldiği piksel değeri hesaplanarak doğru bulunduğu teyit edilmiştir. Sistem, herhangi bir baş pozisyonunda ve bakış doğrultusunda kısıtlama olmadan çalışabilmektedir. Eğitim aşamasında kullanılan ve üzerinde küçük bir delik olan kağıt, kullanıcının tam olarak doğru yere baktığından emin olmasını sağlayarak olusabilecek olan kalibrasyon hatalarını en aza indirmektedir. Aynı zamanda geliştirilen yöntem gözlük koordinat sistemine bağlı olduğundan Google Glasses ve First Person Vision [Kanade and Hebert, 2012] gibi gerçek dünya uygulamalarında kullanılabilir.

Sistem farklı kullanıcılarla, farklı baş pozisyonlarında test edildiğinde literatürde yer alan donanıma ihtiyaç duymayan yöntemlerle karşılaştırılabilen hata değerleri elde edilmiştir. Eğitim aşamasında hesaplanan göz parametreleri LM ile optimize edildiğinde hata oranında önemli derecede bir düşüş gözlemlenmiştir. Gözün kenarda olduğu görüntülerde hatanın daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada ele alınan göz bakış doğrultusunun kestirimi problemi oldukça popüler ve gerçek dünyada birçok uygulaması olan bir problemdir. Bu nedenle sistemin geliştirilerek elde edilecek olan hatanın en aza indirilmesi ve bazı eksikliklerin giderilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda öncelikle başta sabit kabul edilen gözlüğün hareket etmesi durumunda parametrelerin kullanıcıyı en az rahatsız edecek şekilde güncellenmesi gerekmektedir. Sistemin normal bir gözlük kullanarak çalışabilir olması da yapılması düşünülenlerden biridir. Göz bebeğini tespit eden her zaman her yerde doğru sonuçlar verebilecek bir yöntem geliştirilebilir. Son olarak, sistem farklı yaş, cinsiyet ve göz yapısına sahip olan kişiler üzerinde değişik ışık koşullarında denenerek gerçek hayatı uygulanabilir olması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Ahlstrom C., Wege C., Steinmetz E., (2012), “Processing of eye/head-tracking data in large-scale naturalistic driving data sets”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 13 (2), 553-564.
- Alberto S., Iacoviello D., (2009), “Robust real time eye tracking for computer interface for disabled people”, Computer Methods and Programs in Biomedicine, 96 (1), 1-11.
- Amanda H., Richards A., Green S., (2006), “Anxiety and sensitivity to eye gaze in emotional faces”, Brain and Cognition, 60 (3), 282-294.
- Beymer D., Flickner M., (2003), “Eye gaze tracking using an active stereo head”, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 451–458, Madison, Wisconsin, USA, 16-22 June.
- Boening G., Bartl K., Dera T., Bardins S., Schneider E., Brandt T., (2006), “Mobile eye tracking as a basis for real-time control of a gaze driven head-mounted video camera”, Symposium on Eye Tracking Research and Applications, 56, San Diego, California, USA, 27-29 March.
- Calder A. J., Lawrence A. D., Keane J., Scott S. K., Owen A. M., Christoffels I., Young A. W., (2002), “Reading the mind from eye gaze”, An International Journal in Behavioural and Cognitive Neuroscience, 40 (8), 1129-1138.
- Cristinacce D., Cootes T., (2006), “Feature detection and tracking with constrained local models”, 17th British Machine Vision Conference, 929-938, Edinburgh, Scotland, 4-7 September.
- Daugman J., (2003), “The importance of being random: statistical principles of iris recognition”, Pattern Recognition, 36 (2), 279-291.
- Deng J. Y., Lai F., (1997), “Region-based template deformation and masking for eye-feature extraction and description”, Pattern Recognition, 30 (3), 403-419.
- Dobeš M., Martineka J., Skoupila D., Dobešová Z., Pospíšil J., (2006), “Human eye localization using the modified Hough transform”, International Journal for Light and Electron Optics, 117 (10), 468-473.
- Edwards G. J., Cootes T. F., Taylor C. J., (1998), “Face recognition using active appearance models”, 5th European Conference on Computer Vision, 581-595, Freiburg, Germany, 2-6 June.
- Fiala M., (2005), “ARTag, a fiducial marker system using digital techniques”, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 590-596, San Diego, CA, USA, 20-26 June.

Foley J. D., (1996), “Computer graphics: Principles and practice, in C”, 2nd Edition, Addison-Wesley Professional.

Goldstein E. B., (2013), “Sensation and perception”, 9th Edition, Cengage Learning.

Grauman K., Betke M., Gips J., Bradski G. R., (2001), “Communication via eye blinks: Detection and duration analysis in real time”, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1010–1017, Kauai, HI, USA, 8-14 December.

Guestrin E. D., Eizenman M., (2006), “General theory of remote gaze estimation using the pupil center and corneal reflections”, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 53 (6), 1124–1133.

Hansen D. W., Hansen J. P., (2006), “Robustifying eye interaction”, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 152-158, New York, NY, USA, 17-22 June.

Hansen D. W., Hansen J. P., Nielsen M., Johansen A. S., Stegmann M. B., (2003), “Eye typing using markov and active appearance models”, 6th IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, 132–136, Orlando, FL, USA, 4 December.

Hansen D. W., Ji Q., (2010), “In the eye of the beholder: A survey of models for eyes and gaze”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 32 (3), 478-500.

Hansen D. W., Pece A. E. C., (2005), “Eye tracking in the wild”, Computer Vision and Image Understanding, 98 (1), 155-181.

Hartley R., Zisserman A., (2004), “Multiple View Geometry in Computer Vision”, 2nd Edition, Cambridge University Press.

Heyman T., Spruyt V., Ledda A., (2011), “3D face tracking and gaze estimation using a monocular camera”, 2nd International Conference on Positioning and Context-Awareness, 23-28, Brussels, Belgium, 24 March.

Huang J., Shao X., Wechsler H., (1998), “Face pose discrimination using support vector machines (SVM)”, 14th International Conference on Pattern Recognition, 154–156, Brisbane, Queensland, Australia, 20 August.

Ishiguro Y., Mujibiya A., Miyaki T., and Rekimoto J., (2010), “Aided eyes: eye activity sensing for daily life”, 1th Augmented Human International Conference, 1-7, Megève, France, 2-4 April.

Ishikawa T., Baker S., Matthews I., Kanade T., (2004), “Passive driver gaze tracking with active appearance models”, 11th World Congress on Intelligent Transportation Systems, Nagoya, Japan, 18-22 October.

Ivins J. P., Porrill J., (1998), “A deformable model of the human iris for measuring small 3-dimensional eye movements”, *Machine Vision and Applications*, 11 (1), 42–51.

Jacob R. J. K., (1993), “Eye-movement-based human-computer interaction techniques: Towards non-command interfaces”, *Advances in Human-Computer Interaction*, 4, 151-190.

Kanade T., Hebert M., (2012), “First person vision”, *Proceedings of the IEEE*, 100 (8), 2442-2453.

Karahan S., Genc Y., Akgul Y. S., (2013), “A New 3D Line of Gaze Estimation Method with Simple Marked Targets and Glasses”, 3rd International Workshop on Pervasive Eye Tracking and Mobile Eye-Based Interaction, Lund, Sweden, 13 August.

Kawato S., Tetsutani N., (2002), “Detection and tracking of eyes for gaze-camera control”, *Image and Vision Computing*, 22 (12), 1031-1038.

Kim K. N., Ramakrishna R. S., (1999), “Vision-based eye-gaze tracking for human computer interface”, *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 324-329, Tokyo, Japan, 12-15 October.

Kothari R., Mitchell J. L., (1996), “Detection of eye locations in unconstrained visual images”, *IEEE International Conference on Image Processing*, 519-522, Lausanne, Switzerland, 19 September.

Lam K. M., Yan H., (1996), “Locating and extracting the eye in human face images”, *Pattern Recognition*, 29 (5), 771-779.

Li D., Babcock J., and Parkhurst D. J., (2006), “openEyes: a low-cost head-mounted eye-tracking solution”, *Symposium on Eye Tracking Research and Application*, 95-100, San Diego, California, USA, 27-29 March.

Li D., Winfield D., Parkhurst J. D., (2005), “Starburst: A hybrid algorithm for video-based eye tracking combining feature-based and model-based approaches”, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 79-86, San Diego, CA, USA, 20-26 June.

Meyer A., Böhme M., Martinetz T., Barth E., (2006), “A single-camera remote eye tracker”, *Perception and Interactive Technologies*, 4021, 208-211.

Morimoto C. H., Amir A., Flickner M., (2002), “Detecting eye position and gaze from a single camera and 2 light sources”, *16th International Conference on Pattern Recognition*, 314-317, Quebec City, Quebec, Canada, 11-15 August.

Morimoto C. H., Koons D., Amir A., Flickner M., (2000), “Pupil detection and tracking using multiple light sources”, *Image and Vision Computing*, 18 (4), 331–335.

Morimoto C. H., Mimica M. R. M., (2005), "Eye gaze tracking techniques for interactive applications", Computer Vision and Image Understanding, 98 (1), 4-24.

Peréz A., Córdoba M. L., Garcia A., Méndez R., Muñoz M. L., Pedraza J. L., Sanchez F., (2003), "A precise eye-gaze detection and tracking system", 11th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, 105-108, Plzen, Czech Republic, 3-7 February.

Preston W. K., Jr., Hutchinson T. E., Carley J. M., (1993), "Spatially dynamic calibration of an eye-tracking system", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 23 (4), 1162–1168.

Rantanen V., Vanhala T., Tuisku O., Niemenlehto P. H., Verho J., Surakka V., Juhola M., Lekkala J., (2011), "A wearable, wireless gaze tracker with integrated selection command source for human-computer interaction", IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 15 (5), 795-801.

Samaria F., Young S., (1994), "HMM-based architecture for face identification", Image and Vision Computing, 12 (8), 537-543.

Sarter N. B., Mumaw R. J., Wicknes C. D., (2007), "Pilots' monitoring strategies and performance on automated flight decks: An empirical study combining behavioral and eye-tracking data", Human Factors, 49 (3), 347-357.

Schiessl M., Duda S., Thölke A., Fischer R., (2003), "Eye tracking and its application in usability and media research", MMI-Interaktiv Journal, 6, 41-50.

Špakov O., Majaranta P., (2012), "Enhanced gaze interaction using simple head gestures", 2nd International Workshop on Pervasive Eye Tracking and Mobile Eye-Based Interaction, 705-710, Pittsburgh, Pennsylvania, United States, 8 September.

Tian Y. L., Kanade T., Cohn J. F., (2000), "Dual-state parametric eye tracking", 14th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, 110-115, Grenoble, France, 28-30 March.

Timm F., Barth E., (2011), "Accurate eye centre localisation by means of gradients", International Conference on Computer Vision Theory and Applications, 125-130, Vilamoura, Algarve, Portugal, 5-7 March.

Trucco E., Verri A., (1998), "Introductory techniques for 3-D computer vision", 1st Edition, Prentice Hall.

Tsai R., (1987), "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses", IEEE Journal of Robotics and Automation, 3 (4), 323-344.

Valenti R., Gevers T., (2008), "Accurate eye center location and tracking using isophote curvature", IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1-8, Anchorage, AK, USA, 23-28 June.

Valenti R., Sebe N., Gevers T., (2012), “Combining head pose and eye location information for gaze estimation”, IEEE Transactions on Image Processing, 21 (2), 802-815.

Valenti R., Staiano J., Sebe N., Gevers T., (2009), “Webcam-based visual gaze estimation”, 15th International Conference on Image Analysis and Processing, 662-671, Mare, Italy, 8-11 September.

Viola P., Jones M. J., (2004), “Robust real-time face detection”, International Journal of Computer Vision, 57 (2), 137-154.

Wang P., Green M. B., Ji Q., Wayman J., (2005), “Automatic eye detection and its validation”, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 164-171, San Diego, CA, USA, 25-25 June.

Web 1, (2013), “<http://quantlib.svn.sourceforge.net/viewvc/quantlib/branches/DevCycle/Rev14441/QuantLib/ql/math/optimization/lmdif.cpp?revision=10026>”, (Erişim Tarihi: 10/04/2013).

Web 2, (2013), “<http://www.eyetracking-glasses.com/>”, (Erişim Tarihi: 10/04/2013).

Web 3, (2008), “http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/”, (Erişim Tarihi: 12/02/2013).

Web 4, (2012), “<http://www.uco.es/investiga/grupos/ava/node/26>”, (Erişim Tarihi: 15/03/2013).

Web 5, (2013), “<http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/randn.html>”, (Erişim Tarihi: 03/07/2013).

Xie X., Sudhakar R., Zhuang H., (1998), “A cascaded scheme for eye tracking and head movement compensation”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 28 (4), 487-490.

Yuille A. L., Hallinan P. W., Cohen D. S., (1992), “Feature extraction from faces using deformable templates”, International Journal of Computer Vision, 8 (2), 99-111.

Zander T., Gaertner M., Kothe C., Vilimek R., (2010), “Combining eye gaze input with a brain-computer interface for touchless human-computer interaction”, International Journal of Human-Computer Interaction, 27 (1), 38-51.

Zhu Z., Ji Q., (2002), “Eye and gaze tracking for interactive graphic display”, Machine Vision and Applications, 15 (3), 139-148.

Zhu Z., Ji Q., (2007), “Novel eye gaze tracking techniques under natural head movement”, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 54 (12), 2246-2260.

Zhu Z., Ji Q., Bennett K.P., (2006), “Nonlinear eye gaze mapping function estimation via support vector regression”, 18th International Conference on Pattern Recognition, 1132-1135, Hong Kong, 20-24 August.

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Giresun'da doğan Şamil KARAHAN ilk, orta ve lise öğrenimini Giresun'da tamamladı. 2005 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Bölümüne başladı ve 2010 yılında mezun oldu. 2010 Şubat ayında CTech firmasında iş hayatına başladığı görevini 5 ay yarı zamanlı, 5 ay da tam zamanlı olarak sürdürdü. Ardından Aralık ayında TÜBİTAK Gebze yerleşkesindeki BİLGEM'de araştırmacı olarak çalışmaya başladığı görevini hala sürdürmektedir.