

FOTOMETRİK STEREO TABANLI ÜÇ BOYUTLU YÜZ TANIMA

Ebubekir TEMİZKAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİLGİSAYAR BİLİMLERİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2011

ANKARA

Ebubekir TEMİZKAN tarafından hazırlanan FOTOMETRİK STEREO TABANLI ÜÇ BOYUTLU YÜZ TANIMA adlı bu tezin Yüksek Lisans olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Hasan Şakir BİLGE
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Suat ÖZDEMİR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hasan Şakir BİLGE

Üye : Yrd. Doç. Dr. Göksel GÜNLÜ

Tarih : 13/06/2011

Bu tez, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ebubekir TEMİZKAN

FOTOMETRİK STEREO TABANLI ÜÇ BOYUTLU YÜZ TANIMA**(Yüksek Lisans Tezi)****Ebubekir TEMİZKAN****GAZİ ÜNİVERSİTESİ****BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ****MAYIS 2011****ÖZET**

Literatürde 2B ve 3B yüz tanıma ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. 2B yüz tanıma teknikleri pozdan, aydınlanmadan, yüz ifadelerinden ve makyajdan olumsuz etkilenmektedir. 3B yüz tanıma teknikleri poz, aydınlanma ve makyajdan bağımsız çalışabilmekte, diğer problemlere de kısmi çözüm getirmektedir. Gerçek uygulamalarda 3B tarayıcılarla 3B yüzlerin elde edilmesi pratik olarak gerçekleştirilememektedir. Fotometrik stereo ile farklı yönlerden aydınlatılmış en az üç adet 2B yüz görüntüsü kullanılarak 3B yüz verileri oluşturulabilmektedir. Bu yöntem, 3B yüz verilerinin hızlı bir şekilde üretilmesini sağlayan maliyet verimli ve kullanışlı yöntemlerden birisidir. Bu tezde 2B görüntülerden fotometrik stereo ile oluşturulmuş 3B veriler kullanılarak 3B yüz tanıma sistemi önerilmiştir. Yapılan deneylerde 64 farklı aydınlanma yönü altında görüntülenmiş 38 bireyin görüntülerinin bulunduğu Yale B ve genişletilmiş Yale B yüz veritabanları kullanılmıştır. Bütün 2B yüz görüntüleri maskelenerek 3B veri oluşturma işleminden önce yüz dışı bölgeler ve 3B oluşturma işleminde hata oluşturabilecek saç gibi öğeler çıkarılmıştır. Her bireyin 2B görüntülerinden deneysel olarak farklı aydınlatma açılarına sahip 3'lü 10 grup oluşturulmuş ve bu görüntüler kullanılarak 3B test yüz verileri elde edilmiştir. Ek olarak genetik algoritma ile 3B referans görüntüye yakın 3B test verisinin üretilebileceği farklı aydınlatma açılarına sahip 3'lü 5

grup seçilmiş, bu gruplar kullanılarak da 3B test yüz verileri elde edilmiştir. Yüz tanıma safhasında çeşitli algoritmalar bu 3B yüz verileri ile test edilmiştir. İlk olarak farkların karesinin toplamının karekökü ve 2B ilinti doğrudan yükseklik haritası üzerinde denenmiştir. Sonra yükseklik haritası nokta bulutuna dönüştürülerek iteratif en yakın nokta metodu uygulanmıştır. Yüzey normalleri ise test ve referans yüzlerin normalleri arasındaki açılarının ortalaması alınarak yüz tanımada kullanılmıştır. Yüzey özelliklerinin tanımlanmasını sağlayan temel yüzey eğrilikleri ve türevleri; ortalama, Gaussian, eğilmişlik ve şekil indisi de yüz tanıma işleminde kullanılmıştır. Şekil indisi haritalarından SIFT tanımlayıcıları çıkarıldıktan sonra bu tanımlayıcıları eşleştirme yöntemi de yüz tanıma safhasında kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde şekil indisi haritalarının ilintisi ve farkları yöntemlerinin %99 üzerinde tanıma sonucu verdiği gözlenmiştir. Ek olarak yüz tanıma, yüzlerin herhangi bir kısmının olmadığı durumlarda herhangi bir kayıtlama işlemi uygulamadan şekil indisi haritalarından SIFT tanımlayıcılarını eşleştirme yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ağız bölgesi ve burun ucunun olduğu bölge diğer yüz bölgelerine göre daha başarılı sonuçlar vermiştir. Son olarak yüz parçaları bazı açılarda döndürülerek de test edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde şekil indisi haritalarından çıkarılan SIFT tanımlayıcılarını eşleştirme yönteminin 90 derecelik dönmelere karşı çok az miktarda etkilendiği görülmüştür.

Bilim Kodu : 902.1.067
Anahtar Kelimeler : 2B görüntülerden 3B görüntü oluşturma, fotometrik stereo, üç boyutlu yüz tanıma
Sayfa Adedi : 77
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Hasan Şakir BİLGE

PHOTOMETRIC STEREO BASED 3D FACE RECOGNITION

(M.Sc. Thesis)

Ebubekir TEMİZKAN

GAZİ UNIVERSITY

INFORMATICS INSTITUTE

MAY 2011

ABSTRACT

There are many studies about 2D and 3D face recognition in the literature. 2D face recognition techniques are adversely affected by pose, illumination, expression and make up. 3D face recognition techniques are invariant to posing, illumination and make up. These techniques also solve partially other problems. Reconstruction of 3D face image is practically difficult with 3D scanners in real applications. 3D face images can be acquired with photometric stereo method that uses at least three images that are captured under different illumination conditions. This method is a useful and cost-efficient method that produces 3D face image quickly. In this thesis, easy to use and successful 3D face recognition system that uses 3D face images reconstructed from 2D images using photometric stereo technique is proposed. Yale B and extended Yale B face databases that contain 38 people face images that are captured under 64 illumination directions are used in the experimental studies. All 2D face images have been masked before 3D face reconstruction thus external zone of face and regions that can be created computational errors such as hair have been discarded. 10 image groups were empirically organized with combination of three different 2D images with different illumination directions and 3D test face data has been produced using these images. 5 image groups that 3D data can be

produced close to reference 3D image were also selected with combination of three different 2D images with different illumination directions by using Genetic algorithm and 3D test face data has also been produced using these 5 groups. Different face recognition algorithms were tested with these 3D face data in face recognition phase. Firstly, square root of sum of square of differences and 2B correlation methods were implemented directly on height map. Next, ICP algorithm was implemented after converting height map to point cloud. Face surface normal was used by calculating mean of angles between normal of test and reference faces for face recognition. Principal curvatures and their derivatives; mean, Gaussian, curvedness and shape index that described of surface features were used in face recognition process. After SIFT descriptors were extracted from shape index map, these descriptors were matched for recognition phase. When the experimental results were examined, difference and correlation between shape index maps methods achieved over %99 recognition rate. In addition, face recognition were performed with matching SIFT descriptors that were extracted from shape index map without any registration operation in case of absence of some part of the face. According to the results obtained, mouth and nose tip part of the face gave better recognition results than the other face parts. Lastly, recognition tests were made by rotating face parts in some angles. When test results were analyzed, it could be seen that matching SIFT descriptors that were extracted from shape index map were affected little by 90 degree rotations.

Science Code : 902.1.067

Key Words : 3D reconstruction from 2D images, photometric stereo, 3D face recognition

Page Number : 77

Adviser : Assist. Prof. Dr. Hasan Şakir BİLGE

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, başlangıcından sonuna kadar, gerekli bütün yardım, tavsiye ve yönlendirmeleri yapan, karşılaştığım problemlerin çözümünde deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Hasan Şakir BİLGE'ye ve katkılarından dolayı sayın Yrd. Doç. Dr. Göksel GÜNLÜ'ye teşekkür ederim. Değerli çalışma arkadaşlarım Dr. Ufuk SAKARYA, Soner BÜYÜKATALAY ve A. Oğuz ÖZTÜRK'e yardımlarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca aileme, özellikle biricik kızım Zeynep Zümra'ya ve sevgili eşim Reyhan TEMİZKAN'a gösterdikleri özveri ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. 2B GÖRÜNTÜLERDEN 3B GÖRÜNTÜ ELDE ETME YÖNTEMLERİ	4
2.1. Stereo Görüntüleme	4
2.2. Yapısal Işık Kaynağı Tabanlı Yöntemler	8
2.3. Gölgeden Şekil Elde Etme	12
2.4. Fotometrik Stereo.....	14
2.4.1. Yansıma modelleri	15
2.4.2. Fotometrik stereo yönteminin matematiksel olarak incelenmesi.....	18
2.4.3. Yüzey normallerinden gradyan uzayına geçiş.....	24
2.4.4. Yüzey derinliklerinin hesaplanması	24
2.4.5. Fotometrik stereo yönteminin problemleri	26
2.4.6. Fotometrik stereo yönteminin avantajları	27
2.4.7. Fotometrik stereo yönteminin uygulanması	28
3. GENEL LİTERATÜR TARAMASI.....	32
4. GELİŞTİRİLEN 3B YÜZ TANIMA SİSTEMİ	38
4.1. Farkların Karesinin Toplamının Karekökü	42
4.2. 2B İlinti	43
4.3. İteratif En Yakın Nokta	43
4.4. Yüzey Normalleri Arasındaki Açıların Ortalaması	44
4.5. Yüzey Temel Eğriliklerine Göre İnceleme.....	45
4.6. Ortalama ve Gauss Eğriliklerine Göre İnceleme	49
4.7. Yüzey Eğilimi ve Şekil İndis Haritası Tabanlı Karşılaştırma	50
4.8. Şekil İndis Haritaları ve Ölçekten Bağımsız Öznitelik Dönüşümü	52

Sayfa

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	56
5.1. Yale B ve Genişletilmiş Yale B Yüz Veritabanları	56
5.2. Yüz Karşılaştırmada Kullanılacak 3B Yüz Verilerinin Oluşturulması	58
5.3. Yüz Tanıma Sonuçları	61
6. SONUÇ	69
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ	77

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Çeşitli eğrilik temelli yöntemler ve yüz tanıma sonuçları	36
Çizelge 3.2. Yale B ve genişletilmiş Yale B veritabanını kullanan çalışmaların tanıma sonuçları	37
Çizelge 5.1. Aydınlanma açılarına göre deneysel olarak oluşturulmuş üç adet 2B görüntü içeren gruplar	59
Çizelge 5.2. Her bir kromozomun yapısı	61
Çizelge 5.3. Genetik algoritma ile aydınlanma açılarına göre oluşturulmuş üç adet 2B görüntü içeren gruplar	61
Çizelge 5.4. Deneysel olarak oluşturulmuş gruplardan oluşturulan 3B yüz verileri üzerinde uygulanan yüz tanıma metotlarının yüz tanıma başarı oranları (%).....	62
Çizelge 5.5. Genetik algoritma ile oluşturulmuş gruplardan üretilen 3B yüz verileri üzerinde uygulanan şekil indisi ilintisi metodunun yüz tanıma başarı oranları (%)	63
Çizelge 5.6. Deneysel olarak oluşturulmuş 2B görüntü gruplarından oluşturulan 3B yüz verileri üzerinde şekil indisinden çıkarılan SIFT tanımlayıcılarını eşleştirme yöntemi ile kısmi yüz tanıma başarı oranları (%).....	65
Çizelge 5.7. Genetik algoritma ile oluşturulmuş 2B görüntü gruplarından oluşturulan 3B yüz verileri üzerinde şekil indisinden çıkarılan SIFT tanımlayıcılarını eşleştirme yöntemi ile kısmi yüz tanıma başarı oranları (%).....	66
Çizelge 5.8. Deneysel olarak oluşturulmuş 2B görüntü gruplarından oluşturulan 3B yüz verilerindeki ağız ve burun ucunun olduğu parçanın belli açılarda döndürülerek şekil indisinden çıkarılan SIFT tanımlayıcıları eşleştirme yöntemi uygulanması ile elde edilmiş yüz tanıma başarı oranları (%).....	67

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.9. Genetik algoritma ile oluşturulmuş 2B görüntü gruplarından oluşturulan 3B yüz verilerindeki ağız ve burun ucunun olduğu parçanın belli açılarda döndürülerek şekil indisinden çıkarılan SIFT tanımlayıcıları eşleştirme yöntemi uygulanması ile elde edilmiş yüz tanıma başarı oranları (%)	68

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Epipolar geometri	5
Şekil 2.2. Epipolar geometrinin ayrıntılı gösterimi	6
Şekil 2.3. Örnek stereo görüntüleri ve aykırılık haritası	7
Şekil 2.4. Örnek stereo yüz görüntüleri	7
Şekil 2.5. Yapısal ışık kaynağı örüntü örnekleri	8
Şekil 2.6. Yapısal ışık kaynağı tabanlı sistemler	9
Şekil 2.7. Tek kamera ve yapısal ışık kaynağı kullanılan yöntemin geometrisi	10
Şekil 2.8. Yapısal ışık kaynağı ile 3B görüntü oluşturma	11
Şekil 2.9. İki kameralı yapısal ışık kaynağı tabanlı sistemle alınmış görüntüler	11
Şekil 2.10. Işık kaynağı örüntüsünün görüntüler üzerindeki oluşturduğu çizgilerin çıkarılması	12
Şekil 2.11. İki kameralı yapısal ışık kaynağı kullanılarak elde edilmiş 3B görüntünün farklı yönlerden gösterilmesi	12
Şekil 2.12. Gölgeden şekil elde etme geometrisi	13
Şekil 2.13. Fotometrik stereo görüntü alma sistemi	15
Şekil 2.14. Işık yansımaya geometrisi	16
Şekil 2.15. Lambert yüzey yansımaya	17
Şekil 2.16. Aydınlatma geometrisi ve azimut - zenit açılarının gösterilmesi	18
Şekil 2.17. Speküler yansımaya	18
Şekil 2.18. Aydınlanma vektörü (1, 0.5, 1) olan ışık kaynağı ile a) aydınlatılmış şekil ve b) yansımaya haritası	20
Şekil 2.19. Aydınlanma vektörü (-1, -0.5, -1) olan ışık kaynağı ile a) aydınlatılmış şekil ve b) yansımaya haritası	20
Şekil 2.20. Yansımaya haritaları ile fotometrik stereo probleminin çözümünün gösterilmesi	21
Şekil 2.21. Üç görüntü kullanılan fotometrik stereo görüntüleme geometrisi	22
Şekil 2.22. Yüzey normal verisinin gradyan uzay alanına taşınması	24

Şekil	Sayfa
Şekil 2.23. Gölgeleme ve speküler etkinin oluştuğu durumlar	27
Şekil 2.24. Farklı aydınlanma yönleri altında alınmış Beethoven görüntüleri	28
Şekil 2.25. Fotometrik stereo yönteminin Beethoven görüntülerin üzerinde uygulanması	29
Şekil 2.26. Farklı aydınlanma yönleri altında alınmış küre görüntüleri	29
Şekil 2.27. Fotometrik stereo yönteminin küre görüntülerin üzerinde uygulanması	30
Şekil 2.28. Farklı aydınlanma yönleri altında alınmış insan yüzü görüntüleri	30
Şekil 2.29. Fotometrik stereo yönteminin insan yüzü görüntülerin üzerinde uygulanması	31
Şekil 3.1. 3B yüz tanıma teknikleri	33
Şekil 4.1. Geliştirilen 3B yüz tanıma sisteminin diyagramı	38
Şekil 4.2. 2B görüntülerin maskelenmesi	39
Şekil 4.3. Veritabanındaki 3B referans yüzlerin oluşturulması	40
Şekil 4.4. 38 farklı birey için farklı sayıda görüntünün kullanılması ile elde edilmiş 3B verileri arasındaki farkların ortalaması ve standart sapması	42
Şekil 4.5. Yüzey normalinin gösterilmesi	44
Şekil 4.6. Örnek bir 3B yüz üzerindeki normallerin gösterilmesi	45
Şekil 4.7. Temel eğriliklerin yönleri	46
Şekil 4.8. Örnek bir yüzün temel eğrilik değerlerinin oluşturduğu temel eğrilik haritaları	48
Şekil 4.9. Örnek bir yüzünün ortalama ve gauss eğrilik haritaları	49
Şekil 4.10. Örnek bir yüzün yüzey eğilimlik haritası	50
Şekil 4.11. Bilinen dokuz tip şekil tipi ve şekil indisi aralıkları	51
Şekil 4.12. Dokuz şeklin temsil edilmesi ve şekil indisi değerleri	51
Şekil 4.13. Örnek bir yüzün şekil indisi haritası	52
Şekil 4.14. Yükseklik haritasından çıkarılan SIFT öznitelik vektörleri ve eşleşme örneği	54

Şekil	Sayfa
Şekil 4.15. Yükseklik haritasından oluşturulan şekil indislerini kullanarak SIFT özniteliklerinin bulunma diyagramı	54
Şekil 4.16. Şekil indisi haritasından çıkarılan SIFT öznitelik vektörleri ve eşleşme örneği.....	54
Şekil 4.17. Tüm yüz ile yüzün bir bölümünün SIFT yöntemi ile eşleştirilmesi.....	55
Şekil 4.18. Yüzün ağız kısmının bulunduğu yarısının döndürülerek eşleştirilmesi.....	55
Şekil 5.1. Yale B ve genişletilmiş Yale B yüz veritabanlarının görüntüleme sistemi	56
Şekil 5.2. Yale B ve genişletilmiş Yale B yüz veritabanlarını oluşturan bireyler	57
Şekil 5.3. 64 farklı aydınlatma altında görüntülenmiş insan yüzü görüntüleri	57
Şekil 5.4. Bakış ve azimut açılarının gösterilmesi	58
Şekil 5.5. Örnek görüntüler ve aydınlanma açıları.....	60
Şekil 5.6. Örnek test ve referans 3B yüz görüntüleri	60
Şekil 5.7. Yüzün dikey ve yatay olarak dört parçaya ayrılması	64
Şekil 5.8. Çeşitli yüz parçalarının yükseklik haritaları	64
Şekil 5.9. Çeşitli yüz parçalarının şekil indisi haritaları	64
Şekil 5.10. Yüzün ağız kısmının bulunduğu yarısının şekil indislerinin saat yönünün tersi yönde 45° açı ile döndürülmesi	66

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı kısaltmalar açıklamalarıyla beraber aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklama
2B	İki Boyutlu
3B	Üç Boyutlu
SIFT	Scale Invariant Feature Transform (Ölçekten Bağımsız Öznelik Dönüşümü)
CCD	Charge Coupled Device (Yüklenme İliştirilmiş Araç)
BRDF	Bidirectional Reflection Distribution Function (Çift Yönlü Yansıma Dağılım Fonksiyonu)
FRVT	Face Recognition Vendor Test (Yüz Tanıma Sağlayıcı Testi)
EGI	Extended Gaussian Image (Genişletilmiş Gauss Görüntüsü)
ICP	Iterative Closest Point (İteratif En Yakın Nokta)
PCA	Principal Component Analysis (Temel Bileşen Analizi)
LDA	Linear Discriminant Analysis (Doğrusal Ayrım Analizi)
ICA	Independent Component Analysis (Bağımsız Bileşen Analizi)
SVM	Support Vector Machine (Destek Vektör Makinesi)
DoG	Difference of Gaussian (Gaussların Farkı)
FMTD	Fast Marching on Triangulated Domains (Üçgen Bölgede Hızlı İlerleme)

1. GİRİŞ

Biyometrik kimlik doğrulama, kişisel kimlik belirlemenin otomatikleştirilmesindeki artan ihtiyaç nedeniyle son yıllarda büyük dikkat çekmiştir. İmza ve el yazısı kullanılmış en eski biyometriklerdendir. Yüz görüntüsü, parmak izi ve iris güncel biyometrikler arasındadır ve günümüzde güvenlik uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Biyometrik özellikler her kişiye özgü fiziksel, kimyasal ve davranışsal özelliklerdir ve bu nedenle değiştirilmesi çok zordur. Bu niteliğinden dolayı birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ve yüksek güvenlik gerektiren uygulamalara duyulan ihtiyaçtan dolayı biyometrik üzerinde yapılan çalışmalar artmaktadır. Özellikle son yıllarda biyometrik olarak insan yüzünü kullanan ve yoğun olarak araştırılan konulardan bir tanesi yüz tanımadır. Yüz tanıma sistemleri sayısal bir görüntüden kişinin otomatik olarak belirlenmesini sağlayan bilgisayar destekli uygulamalardır. Parmak izi, avuç içi ve iris kullanan diğer biyometrik yöntemlerle karşılaştırıldığında yüz tanıma yöntemi önemli avantajlara sahiptir [1, 2]. Yüz görüntüleri insan yüzüne hiçbir temas olmadan alınabilmekte ve tanıma işlemi insan ile hiçbir etkileşime geçmeden yapılabilmektedir. Yüz tanıma genel olarak, sorgulanan bir yüzün veritabanındaki kayıtlı bilinen yüz veya yüzlerle karşılaştırılması sonucu, sorgulanan yüzün kimliğini doğrulamak veya bu yüzün kimliğini belirlemek olarak tanımlanabilir. Kimlik doğrulama işleminde bire bir karşılaştırma yapılarak “aynı kişi mi?” sorusuna cevap aranır. Kimlik belirleme işleminde ise çoklu karşılaştırma yapılarak “bu kişi kim?” sorusu cevaplanmaya çalışılır [3].

Yüz tanıma görüntü analizi, örüntü tanıma ve bilgisayarla görme alanının en önemli araştırma konularından bir tanesidir. Şimdiye kadar birçok yüz tanıma sistemi geliştirilmiştir. İlk olarak geliştirilen sistemler daha çok 2B yüz tanıma yöntemleridir [4]. 2B yüz tanıma yöntemlerinin bazı nedenlerden dolayı başarısı sınırlı olmuştur. İnsan yüzü doğası gereği sabit bir yapıya sahip değildir. Yüz ifadeleri ve mimiklerin değişmesi özellikle 2B yüz tanıma sistemlerinde problem oluşturmaktadır. 2B yüz tanıma sistemlerine problem oluşturan diğer bir durum ise 2B görüntülerin ışıklandırmaya karşı çok hassas olmasıdır. Ortam ışığı 2B görüntülerin yoğunluk

değerlerini değiştirdiğinden dolayı 2B yüz tanıma işleminde olumsuzluklara yol açmaktadır. 2B yüz tanıma sistemlerinde kullanılan görüntüler genellikle karşı cepheden düzgün bir şekilde alınmış görüntüler olmaktadır. Bundan dolayı görüntüleme esnasındaki poz değişimleri 2B sistemlerin başarısını oldukça düşürmektedir. Ayrıca insanların yüzlerine uyguladıkları makyaj gibi işlemler 2B görüntülerin nokta değerlerini değiştirmesi nedeniyle 2B yüz tanıma sisteminin performansını da düşürecektir. Bazı durumlarda insanların yüzleri tamamıyla görüntülenememiş olabilir. Yani insan yüzünün göz, burun veya ağız bölgesinden herhangi bir kısmı bir sebeple görüntü üzerinde görünmeyebilir. Bu durumda da 2B yüz tanıma sistemleri kötü etkilenmektedir. Bu problemlerden minimum derecede etkilenmek için 3B yüz tanıma sistemleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Özellikle 3B veri oluşturma teknolojilerinin ortaya çıkması ve gelişmesi ile birlikte 3B yüz tanıma yöntemleri hızla artmış ve bu problemler çözülmeye başlamıştır [3].

3B yüz tanıma sistemlerinin başarılı olabilmesi için öncelikle oluşturulan 3B yüz verileri kesinlik ve doğruluk bakımından uygun olmalıdır. Yani oluşturulan 3B veri ne kadar gerçeğe yakın ise yüz tanıma sisteminin başarısı da o derece iyi olacaktır. Çeşitli 3B görüntü elde etme teknikleri vardır. Bunlar içerisinde sıkça kullanılan yöntemler 2B görüntülerden 3B elde etme yöntemleridir. 2B insan yüzü görüntülerinden 3B yüz görüntüsü oluşturma yöntemleri insan yüzünün şekil özellikleri ve karmaşıklığından dolayı genel 3B şekil oluşturma yöntemlerinden ayrı olarak ele alınmakta ve üzerinde daha detaylı olarak durulmaktadır. 3B yüz modellemesi normal 3B modelleme yazılımları ile bile zorlukla yapılabilmektedir. Bu yüzden 2B görüntülerden kesin ve gerçekçi bir şekilde 3B yüz oluşturulması çok daha karmaşık bir işlemdir. İnsan yüzünün her kişiye göre değişen, derinin yansıma özellikleri ve yüz bölümlerinin gerçek derinliklerinin bilinme zorluğu gibi nitelikleri, bu karmaşıklığı daha da arttırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı 3B yüz görüntüsü oluşturma konusu bilgisayarla görme alanının en temel problemlerinden birisidir. 2B görüntülerden 3B yüz görüntüleri oluşturmak için çeşitlik yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler incelendiğinde fotometrik stereo yöntemi uygulanması kolay ve kullanışlı bir yöntem olarak göze çarpmaktadır. Bu yöntem ile hızlı ve gerçeğe yakın bir

şekilde 3B yüz verileri oluşturulabilmektedir. Donanım ihtiyacı ve maliyeti dikkate alındığında diğer yöntemlere göre uygun olmaktadır.

Bu tez çalışmasında fotometrik stereo kullanarak basit ve etkili bir 3B yüz tanıma sistemi geliştirilmiştir. Fotometrik stereo ile 2B yüz görüntülerinden oluşturulan 3B yüz verileri çeşitli algoritmalar ile tanıma işlemine tabi tutulmuş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre 3B yüz verilerinden elde edilen şekil indisi (shape index) [5] haritalarının yüz tanımada daha başarılı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca yüzün tamamının olmadığı durumlarda da karşılaştırma işlemi yapılmıştır. Bu karşılaştırma işleminde de yüzün belirli kısımlarından elde edilmiş şekil indisi haritaları üzerinde ölçekten bağımsız öznitelik dönüşümü (SIFT) [6] metodu uygulanarak iki şekil indisi haritasının benzer özellikleri çıkarılmıştır. En fazla benzer özelliği olan yüz çiftleri tanımanın gerçekleştirildiği yüzler olmaktadır. Önerilen yöntem Yale Face Database B ve genişletilmiş Yale Face Database B [7] veritabanlarının içerdiği 38 farklı insan yüzü üzerinde denenmiştir. Veritabanları içerisinde her insana ait farklı yönlerden aydınlatılarak görüntülenmiş 64 adet 2B yüz görüntüsü vardır. Test 3B yüz verileri 3 adet 2B görüntü kullanılarak elde edilmiştir. Deneysel çalışmada test 3B verilerini oluşturmak için aydınlanma açılarına göre her insana ait 3 adet 2B görüntü içeren 10 grup deneysel olarak 5 grup da genetik algoritma ile oluşturulmuş ve açıların yüz tanımaya etkisi de böylece incelenmiştir.

Tez genel olarak giriş bölümü de dâhil 6 bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde 2B görüntülerden 3B yüz görüntüsü elde etmek için kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir. Bu tezde kullanılan 3B yüz verilerini üretmek için kullanılan fotometrik stereo metodunun matematiksel olarak ifadesi verilmiş ve bu metot ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Üçüncü bölümde 3B yüz tanıma ile ilgili yapılmış bilimsel çalışmalar incelenmiş özellikle bu tezde değinilmiş konulara benzeyen çalışmalar incelenmiştir. Dördüncü bölümde farklı yüz tanıma yöntemleri ve önerilen çeşitli 3B yüz tanıma yöntemleri matematiksel ifadeleri ile birlikte ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Beşinci bölümde ise gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve bunların analiz ve sonuçları verilmiş altıncı ve son bölümde ise yapılan çalışma ile ilgili son bir değerlendirme yapılmıştır.

2. 2B GÖRÜNTÜLERDEN 3B GÖRÜNTÜ ELDE ETME YÖNTEMLERİ

Bilgisayar teknolojilerinin hızlı gelişimiyle birlikte 3B yüz verilerine duyulan ihtiyaç artmış ve günümüzde sana gerçeklik simülasyonları, plastik cerrahi simülasyonları, 3B oyunlar, insan-bilgisayar etkileşimi, animasyonlar, yüz dönüşümü ve yüz tanıma gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır [8]. Özellikle son yıllarda kritik uygulamalardaki yüksek güvenlik talebinden dolayı yüz tanıma sistemleri üzerinde yapılan araştırmalar daha da artmıştır. 3B yüz oluşturma teknolojilerindeki son gelişmeler ve 3B geometrinin daha da iyi anlaşılması sayesinde yüz tanıma metotları üzerindeki odaklanma 2B metotlardan 3B yüz tanıma metotlarına kaymıştır [1].

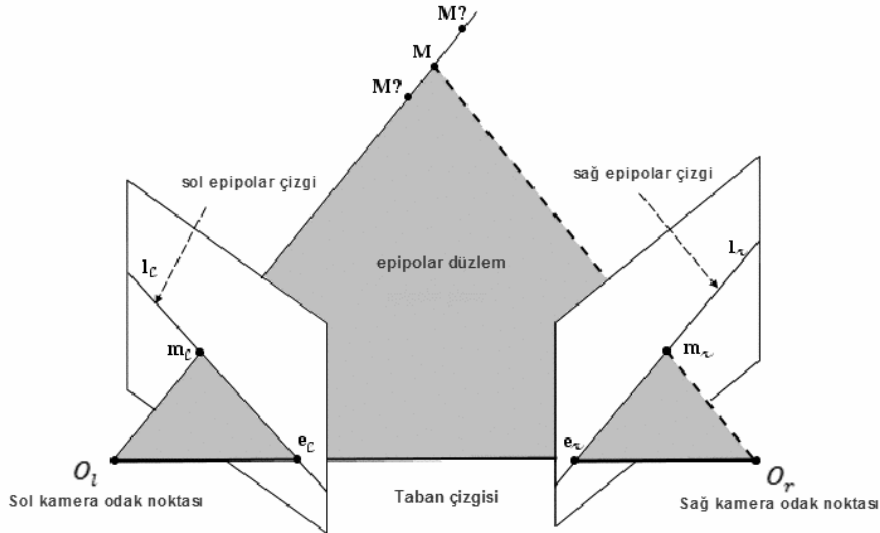
Günümüzde 2B görüntülerden 3B verinin oluşturulmasını sağlayan çeşitli teknikler bulunmaktadır ve yüz tanıma sıklıkla kullanılmaktadır. Tez çalışmasının bu bölümünde fotometrik stereo yöntemi ayrıntılı olmak üzere 2B görüntülerden 3B görüntü oluşturmak için kullanılan metotlar incelenmiştir.

2.1. Stereo Görüntüleme

Stereo görüntülemede amaç gözlenen bir sahnenin derinliğini ölçmektir. İnsanın görme sistemi farklı nesnelerin birbirlerine olan uzaklıklarını ve derinliklerini algılama yeteneğine sahiptir. İnsan gözleri aynı hizada bulunmaktadır ve iki gözden gelen sinyaller beyinde aynı görüntüyü oluşturmaktadır. Fakat bir görüntü diğerine göre kaymaktadır. Sahnedeki her nesne fiziksel uzaklığına göre farklı şekilde kaymaktadır. Beyin de bu kayma miktarlarına göre derinlik bilgisini algılamaktadır. Aynen insanın görme sistemi gibi stereo görüntüleme kullanarak, iki kamera ile bir nesnenin veya sahnenin derinlik bilgisi hesaplanabilmektedir. Stereo görüntüleme sistemi iki veya daha fazla kamera ile oluşturulabilmektedir. Eğer sistemde iki kamera kullanılırsa bu sistem iki gözlü (binocular) stereo olarak adlandırılmaktadır [9].

İki kamera iki farklı noktadan bir 3B nesneyi görüntülediğinde, görüntülenen 3B nesne, kamera merkezleri ve o nesnenin kameralar üzerindeki izdüşümü arasında geometrik bir ilişki vardır. Bu geometrik ilişkiye Şekil 2.1’de gösterilmiş epipolar geometri denmektedir [9]. Epipolar geometri incelenecek olursa, iki kameranın odak

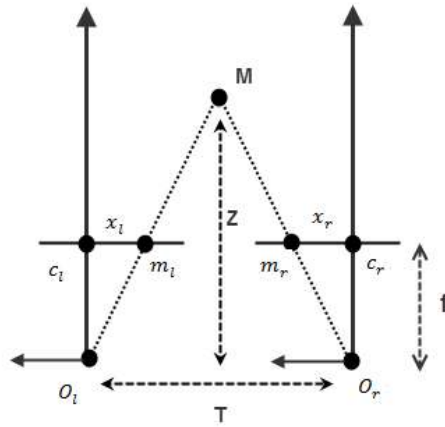
noktası ve görüntülenen nesne bir düzlem oluşturmaktadır. Bu düzleme epipolar düzlem denilmektedir. Kameraların odak noktalarını birleştiren çizgi ise taban çizgisi olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi M noktası sol kamera ile görüntülendiğinde bu noktanın görüntüsü m_c noktasında oluşmaktadır. Görüntülenen noktanın derinliği sadece sol kamera ile görüntülendiğinde bilinmemektedir. Aynı M noktası farklı bir yerde bulunan başka bir kamera ile görüntülendiğinde epipolar geometri kullanılarak M noktasının derinliği bulunabilmektedir. M noktasının sol kamera üzerinde bulunan izdüşümü sağ kamerada farklı bir noktada olmaktadır. Bu nokta Şekil 2.1’de gösterilen epipolar olarak adlandırılan bir çizgi üzerinde yer değiştirmiştir. Yani noktanın izdüşümü bu çizgi üzerinde kaymıştır.



Şekil 2.1. Epipolar geometri

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi bir M noktası odak noktaları O_l ve O_r , odak uzaklığı f olan iki kamera ile görüntülenmiştir. Görüntüleme sonucu M noktasının bu kameralardaki izdüşümü m_l ve m_r olmaktadır. İzdüşüm noktalarının odak eksenlerinden kayma miktarları ise x_l ve x_r ’dir. T, kameraların odak noktaları arasındaki mesafedir. X_l ve X_r görüntülenen noktanın sırasıyla sol ve sağ kameranın odak noktalarına olan yatay mesafedir. Z hesaplanmak istenen derinlik, d ise aykırılık olarak adlandırılan ve görüntülenen noktanın kameralardaki kayma miktarıdır. Bütün noktadaki aykırılık değerleri ise aykırılık haritası olarak tanımlanmaktadır.

Üçgen benzerliğinden yola çıkarak Eş. 2.1 ve Eş. 2.2 bulunabilir. Eş. 2.3, Eş. 2.4, Eş. 2.5 ve Eş. 2.6 yardımıyla Eş. 2.7'ye ulaşılmaktadır. Bu eşitlikte aykırılık değeri yardımıyla derinlik bilgisi olan Z değeri hesaplanmaktadır. Bu bilgiler kullanılarak Şekil 2.3'deki gibi farklı açılardan görüntülenmiş iki adet görüntü kullanılarak yine Şekil 2.3'deki aykırılık haritası oluşturulmuştur. Şekil 2.4'de ise stereo sistemi ile alınmış sol ve sağ görüntü kullanılarak elde edilmiş 3B yüz görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Epipolar geometrinin ayrıntılı gösterimi

$$x_l = f \frac{X_l}{Z_l} \quad 2.1$$

$$x_r = f \frac{X_r}{Z_r} \quad 2.2$$

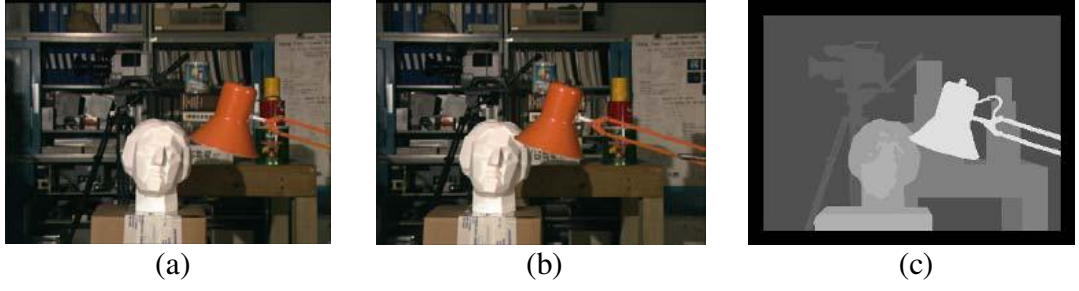
$$\frac{x_l Z}{f} - T = \frac{x_r Z}{f} \quad 2.3$$

$$X_r = X_l - T \quad 2.4$$

$$Z = Z_r = Z_l \quad 2.5$$

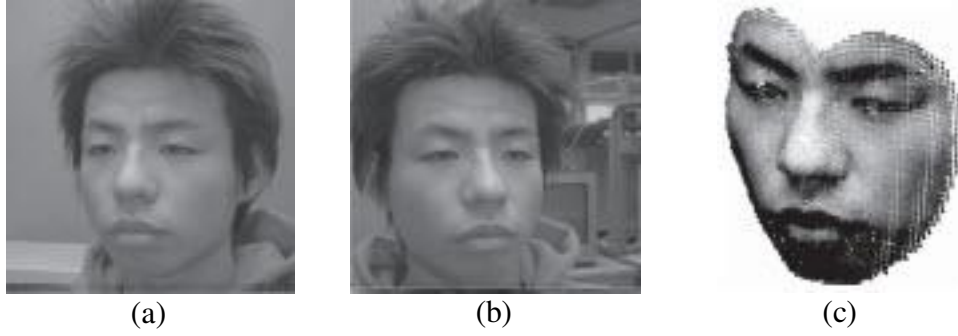
$$d = X_l - X_r \quad 2.6$$

$$Z = \frac{Tf}{d} \quad 2.7$$



Şekil 2.3. Örnek stereo görüntüleri ve aykırılık haritası

- a) Sol kamera ile alınan görüntü b) Sağ kamera ile alınan görüntü
c) Aykırılık haritası



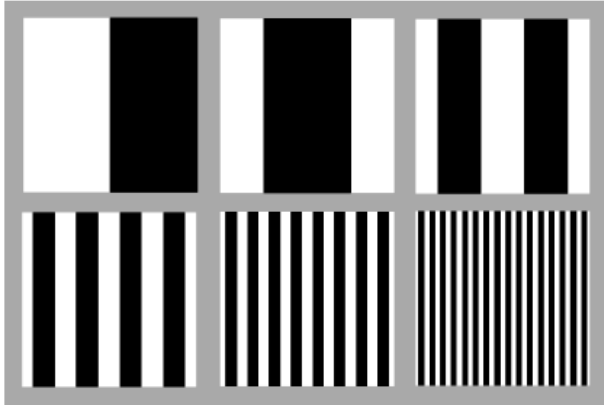
Şekil 2.4. Örnek stereo yüz görüntüleri [10]

- a) Sol kameradan alınan görüntü b) Sağ kameradan alınan görüntü
c) 3B yüz görüntüsü

Stereo görüntülemde en önemli problem kameralardan biri tarafından alınmış görüntüdeki noktanın diğer kamera ile alınmış görüntü üzerinde hangi noktaya karşılık geldiğidir. Birçok stereo sisteminin yapılandırılmasında iki noktanın eşlendiği noktayı bulabilmek için iki boyutlu bir arama uzayı kullanılmaktadır. Arama uzayının tek boyuta indirilmesi için epipolar rektifiye [11] adı verilen bir işlem yapılmaktadır. Eğer rektifiye işlemi yapıp, kameralar eş düzlemli olursa, arama uzayı bir boyuta indirgenerek, arama taban çizgisine paralel bir hat üzerinde gerçekleştirilebilmektedir. Yapısal bir ışık kaynağı kullanmak stereo görüntüleme sisteminin problemi olan nokta eşleme problemine çözüm getirmektedir. Yapısal ışık kaynağı kullanan yöntemler Bölüm 2.2' de detaylı olarak anlatılacaktır.

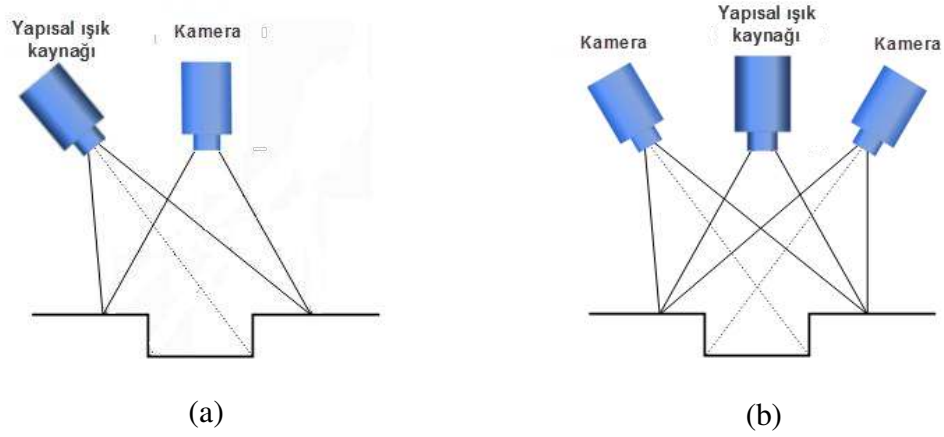
2.2. Yapısal Işık Kaynağı Tabanlı Yöntemler

İki boyutlu görüntülerden 3B görüntü elde etme yollarından bir tanesi de yapısal ışık kaynağı tabanlı yöntemdir. İki kameralı stereo görüntüleme ile bir sahnenin kesin olmayan derinlik haritası çıkarılabilmektedir. Yapısal ışık kaynağı tabanlı yöntemler ile daha kesin derinlik bilgisine ulaşılabilmektedir. Yapısal ışık kaynağı tabanlı sistemlere görüntülenen sahne üzerine yapısal bir ışığın düşürülmesi nedeniyle aktif stereo görüntüleme sistemleri de denilmektedir. Bu yapısal ışık kaynağı projektör veya lazer ünitesi olabilmektedir. Yapısal ışık kaynağı tabanlı sistemler sahne üzerine düşürülen Şekil 2.5'deki gibi ışık örüntüleri yardımıyla nesnenin 3B görüntüsünün elde edilmesini sağlamaktadır. Yapısal ışık kaynağından çıkan ışık demeti örüntüsü düşürülen sahnenin şekline bağlı olarak bozulmaya uğramaktadır. Sahnenin kamera tarafından alınan görüntüsü üzerindeki bu örüntü, yüzeyin 3B modeli için birçok bilgi barındırmaktadır.



Şekil 2.5. Yapısal ışık kaynağı örüntü örnekleri

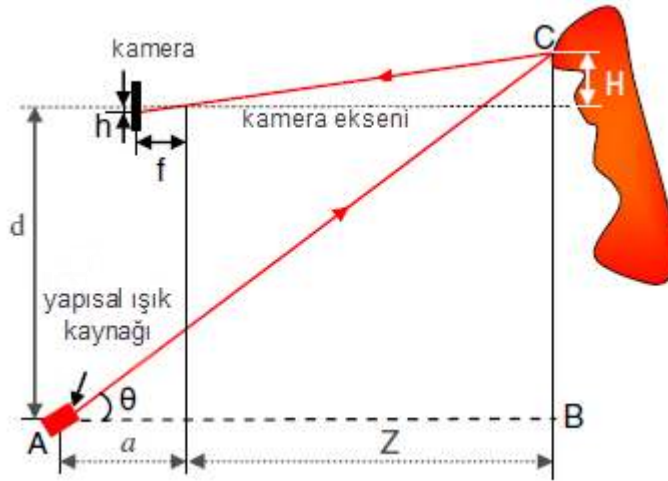
Yapısal ışık kaynağı tabanlı sistemler Şekil 2.6'da görüldüğü gibi genel olarak tek kameralı ve iki kameralı olmak üzere iki şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 2.6. Yapısal ışık kaynağı tabanlı sistemler

- a) Tek kamera ve yapısal ışık kaynağı kullanan sistem
- b) İki kamera ve yapısal ışık kaynağı kullanan sistem

Tek kamera ve yapısal ışık kaynağının kullanıldığı sistemlerde amaç, 3B görüntüsü bulunmak istenen nesnenin üzerine düşürülen ışık demetinin oluşturduğu düzlemlerin açılarını ve bu düzlemler ile nesnenin kesişme noktalarını kullanarak nesnenin derinlik bilgisine ulaşabilmektir. Tek kameralı ve yapısal ışık kaynağının kullanıldığı sistemin geometrisi Şekil 2.7’de gösterilmektedir. Bu sistemde kullanılan θ , ışık demetinin kamera düzlemiyle yaptığı açıyı; d kameranın optik eksenini ile yapısal ışık kaynağı arasındaki mesafeyi; f , kameranın odak uzaklığını; a ise kameranın odak noktası ile yapısal ışık kaynağı arasındaki yatay mesafeyi temsil etmektedir. Derinliği hesaplanmak istenen nesnenin üzerine ışık demeti veya görüntüsü düşürüldükten sonra yapısal ışık kaynağı ve nesnenin kesişme noktası üçgen benzerliği ve trigonometrik ifade kullanarak Eş. 2.8 ve Eş. 2.9 yardımıyla bulunabilmektedir. Bu eşitliklerde kullanılan h , kesişim noktasının kamera CCD’si üzerindeki izdüşümü ile CCD merkezi arasındaki dikey mesafeyi; H ise kesişim noktasının kamera optik eksenine olan yüksekliğini ifade etmektedir. Eş. 2.8 ve Eş. 2.9 birleştirilerek Z değeri, Eş. 2.10’daki gibi hesaplanabilmektedir. Fakat hesaplanan Z değeri, noktanın yüksekliği değil kameranın odak noktasına olan uzaklığıdır. Noktaların yüksekliklerini bulabilmek için Z değerlerinin en büyüğü 0 olarak referans alınıp diğer Z değerleri bu referans değerine göre bulunabilmektedir.



Şekil 2.7. Tek kamera ve yapısal ışık kaynağı kullanılan yöntemin geometrisi [12]

Bu denklemlere dikkat edilecek olursa Z değerinin bulunabilmesi için θ açısı değerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu açı çeşitli tekniklerle bulunabilmektedir. Strat ve Oliveira'nın [12] yaptığı çalışmada bu açı değerleri önceden başka bir nesne yardımıyla elde edilmekte daha sonra bu açılar nesnelerin 3B görüntülerinin bulunması sırasında kullanılmaktadır. Başka bir çalışmada [13] ise nesnenin 3B görüntüsü oluşturulması sırasında görüntülenene nesnenin yüksekliğine eş düz bir tabla kullanarak bu açılar hesaplanmakta eş zamanlı olarak bu açılara göre nesnenin bütün noktalarının yükseklikleri hesaplanarak 3B görüntüsü çıkarılmaktadır.

$$\frac{h}{H} = \frac{f}{Z} \quad 2.8$$

$$\tan \theta = \frac{d+H}{a+Z} \quad 2.9$$

$$Z = \frac{a \tan \theta - d}{\frac{h}{f} - \tan \theta} \quad 2.10$$

Tek kameralı yapısal ışık kaynağı metodu farklı nesnelerin 3B verisine ulaşmak için kullanılmaktadır. Bu teknik yardımıyla, görüntülenmiş 2B insan yüzü görüntüsünden oluşturulan 3B yüz görüntüsü Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 2.8. Yapısal ışık kaynağı ile 3B görüntü oluşturma [14]

- a) Yapısal ışık demeti düşürülmüş 2B yüz görüntüsü
- b) Elde edilmiş 3B yüz görüntüsü

İki kameralı yapısal ışık kaynağı tabanlı sistemlerde ise amaç iki gözlü stereo görüntülemenin nokta eşleme problemine çözüm getirebilmektir. Bölüm 2.1’de anlatıldığı gibi iki kameralı stereo görüntüleme sistemlerinde nokta eşleme problem olmaktadır. Özellikle nesnenin homojen bölgelerinde örneğin bu nesne insan yüzü olarak düşünülecek olursa yüzün yanak ve alın gibi bölgelerinin derinlik bilgisinin hesaplanması sorun oluşturmaktadır [15]. Bu sorunu ortadan kaldırmak için yapısal ışık kaynağı kullanılabilmektedir. Şekil 2.9’da görüldüğü gibi yapısal ışık kaynağı görüntüsü insan yüzü üzerine düşürülmüş ve sol ve sağ kamera ile görüntüsü alınmıştır. Alınan bu görüntüler üzerindeki yapısal ışık kaynağı tarafından oluşturulan çizgiler ise Şekil 2.10’da görüldüğü gibi çıkarılmıştır. Çizgilerin çıkarılma işleminden sonra aykırılık haritası bulma işleminde iki görüntü üzerindeki çizgi indislerinin aynı olmasından yararlanılarak nokta eşleme problemine çözüm getirilmektedir.



(a)

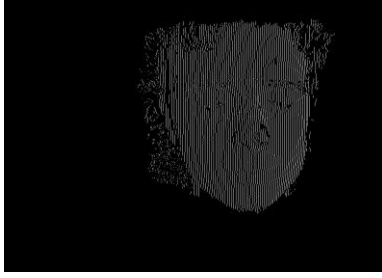


(b)

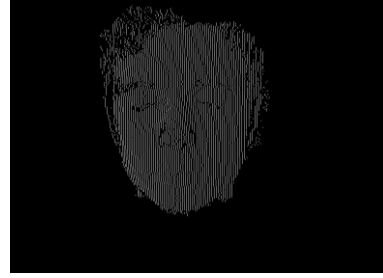
Şekil 2.9. İki kameralı yapısal ışık kaynağı tabanlı sistemle alınmış görüntüler [15]

a) Sol kamera ile alınmış görüntü

b) Sağ kamera ile alınmış görüntü



(a)



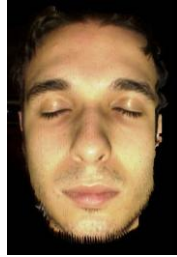
(b)

Şekil 2.10. Işık kaynağı örüntüsünün görüntüler üzerindeki oluşturduğu çizgilerin çıkarılması [15]

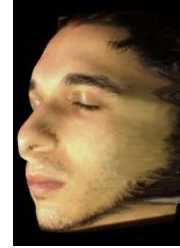
a) Sol görüntü üzerindeki çizgilerin belirlenmesi

b) Sağ görüntü üzerindeki çizgilerin belirlenmesi

Aykırlık değerleri bulunduktan sonra 3B oluşturma işlemi gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.9’da görüntüler kullanılarak oluşturulmuş 3B görüntü Şekil 2.11’de farklı yönlerden gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.11. İki kameralı yapısal ışık kaynağı kullanılarak elde edilmiş 3B görüntünün farklı yönlerden gösterilmesi [15]

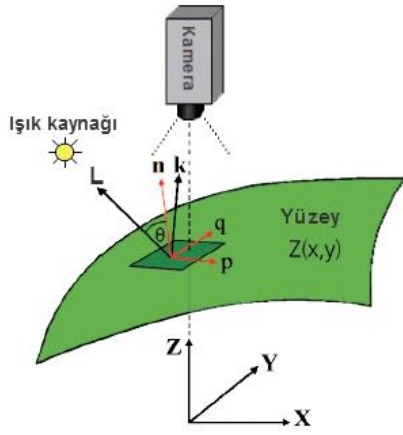
a) 3B görüntünün önden gösterilmesi

b) 3B görüntünün yandan gösterilmesi

2.3. Gölgeden Şekil Elde Etme

Gölgeden şekil elde etme yöntemi sadece bir görüntü düzlemindeki piksel yoğunluklarından bir nesnenin şeklinin belirlenmesi ile ilgilenmektedir. Bu alanda ilk çalışmalar Horn [16] tarafından yapılmıştır. Bilgisayarla görme alanındaki iyi tanımlanmamış problemlerden birisidir. Fakat uygulanması için çok az veri gerektirdiğinden dolayı üzerinde yoğun olarak çalışılan popüler konulardan birisidir. Görüntü üzerindeki gölgelenme farklılıkları yüzeyin 3B bilgisi hakkında önemli bilgiler vermektedir. Görüntü üzerindeki her bir noktanın yoğunluk değeri birkaç

faktör tarafından belirlenir. Bu üç faktör; görüntülenen nesnenin yüzey özelliği, aydınlanma yönü ve yüzey eğimleri yani yüzeyin normal değerleridir. Şekil 2.12’de görüldüğü gibi Z ile temsil edilen yüzey, yönü L ile ifade edilen ışık kaynağı ile aydınlatılmıştır. Yüzeye gelen ışık, yüzey normali olan n vektörü ile θ açısı yaparak yansımış ve k vektörü yönünde kameraya ulaşmıştır. Her yüzey noktası kamera üzerinde I(x,y) ile ifade edilen görüntü noktası olarak kaydedilmiştir. Görüntülenen tek görüntü I ve ışık kaynağı yönü L kullanılarak gölgeden şekil elde etme yöntemi gerçekleştirilmektedir. Görüntünün x ve y yönündeki yüzey yönelimlerini ifade eden p ve q değerleri kullanılarak varsayılan yansıma fonksiyonu R(p,q) şeklinde yazılabilmektedir. Bu iki fonksiyonun eşitliği ise Eş. 2.11 gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Gölgeden şekil elde etme geometrisi [17]

Gölgeden şekil elde etme yönteminde genel olarak Lambert yansıma modeli kullanılmaktadır. Bu durum ise eşitlik Eş. 2.12’de bulunmaktadır. İki vektör arasındaki açının vektörlerle tanımlanması ise Eş. 2.13’te gösterilmektedir. Eş. 2.12, Eş. 2.14’te ayrıntılı bir şekilde yazılacak olursa, $\rho(x,y)$ değeri yüzeyin yansıtabilirlik değerini gösteren albedo değerini, θ değeri gelen ışık ile yüzey normali arasındaki açıyı, n ile temsil edilen ve $[p, q, 1]$ vektörü yüzey normalini, $[ps, qs, 1]$ vektörü ise aydınlanma yönünü tanımlamaktadır. Eş. 2.15 ve Eş. 2.16’daki Z değeri yüzeyin derinlik bilgisini temsil etmektedir.

$$I(x,y)=R(p,q) \quad 2.11$$

$$I(x,y)=\rho \cos \theta \quad 2.12$$

$$\cos\theta = \frac{n \cdot L}{\|n\| \|L\|} \quad 2.13$$

$$I(x,y) = \rho(x,y) \frac{1 + pp_s + qq_s}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1} \sqrt{p_s^2 + q_s^2 + 1}} \quad 2.14$$

$$p = \frac{\partial Z}{\partial x} \quad 2.15$$

$$q = \frac{\partial Z}{\partial y} \quad 2.16$$

Gölgeden şekil elde etme yönteminde 3B verinin oluşturulması genel olarak iki basamakta yapılmaktadır. İlk olarak yüzey gradyanları olan p ve q değerleri hesaplanır daha sonra ise gradyan değerlerinin integralleri alınarak derinlik bilgisine ulaşılabilmektedir. Fakat tek bir noktadaki aydınlık değerlerinin ölçümünde tek bir değişken elde edilirken yüzey gradyan değerlerinin bilinmesi için en az iki değişken gerekmektedir. Yani yeni varsayımlar yapılmadığı sürece zor çözülebilecek problem olmaktadır.

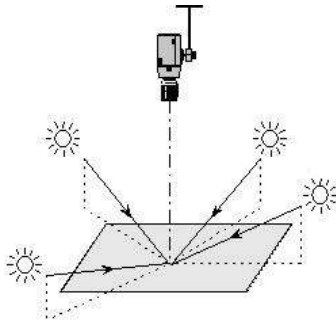
Gölgeden şekil elde etme yöntemleri genel olarak dört grup altında incelenmektedir. Bunlar minimizasyon yaklaşımları, yayılım yaklaşımları, yerel yaklaşımlar ve doğrusal yaklaşımlardır ve literatürde bunlarla ilgili yapılmış çalışmalar mevcuttur [18].

Bu bölümde de değinildiği gibi gölgeden şekil elde etme yöntemi Lambert yansıma modelini kullanmaktadır. Lambert ve diğer yansıma modelleri Bölüm 2.4’de ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

2.4. Fotometrik Stereo

Bu tez çalışması kapsamında değinilecek 2B görüntülerden 3B görüntü elde yöntemlerinden sonuncusu Fotometrik Stereo’dur. Farklı yönlerden ışıklandırılmış yüzey görüntüleri kullanıldığı için bu yöneme fotometrik stereo denilmektedir. Gölgeden şekil elde etme yönteminin gelişmiş hali sayılmaktadır. Bölüm 2.3’te de

değinildiği gibi iyi tanımlanmamış bir problem olan gölgeden şekil elde etme yöntemine çözüm getirmektedir. Bu yöntem ilk defa 1980 yılında Woodham tarafından önerilmiştir [19]. Fotometrik stereo yöntemi ile belirli kurallara göre çekilmiş bir dizi yüzey fotoğrafı kullanılarak tekrardan yüzeyin 3 boyutlu bilgisine ulaşmayı amaçlanmaktadır. Yüzeyin $z=f(x,y)$ olarak ifade edildiği düşünülecek olursa bu yöntemle yüzeyin derinlik bilgisi yani z değeri hesaplanabilmektedir. Fotometrik stereo yöntemi, genel olarak Şekil 2.13'deki gibi farklı yönlerden ışıklandırılmış yüzeyin sabit bir görüntüleme sistemi ile elde edilmiş fotoğrafları kullanılarak gerçekleştirilir. Elde edilen bu fotoğraflar ve yüzey ışıklandırma yönleri fotometrik stereo algoritmasına sokularak yüzeyin yeniden 3 boyutlu görüntüsü elde edilebilmektedir.



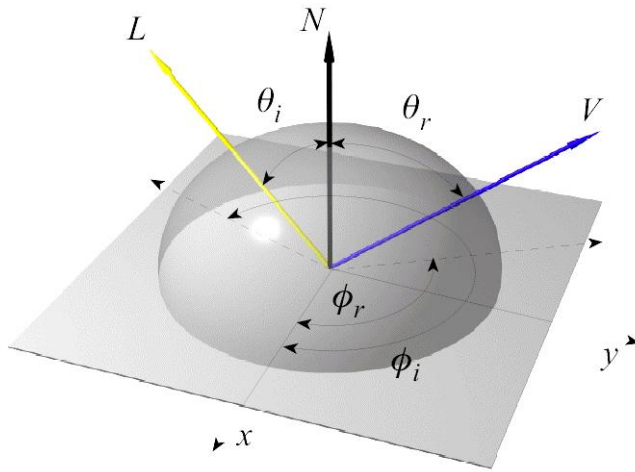
Şekil 2.13. Fotometrik stereo görüntü alma sistemi [20]

Fotometrik stereo metodu Lambert yansıma modelini temel alarak geliştirilmiştir. Bu nedenle Lambert ve diğer yansıma modellerini incelemek faydalı olacaktır.

2.4.1. Yansıma modelleri

Yansıyan ışığın yoğunluğu, ışık kaynağının büyüklüğü ve yoğunluğu, yüzeyin özelliği ve yansıma yeteneğine bağlıdır. Bir yüzeyin görüntüsü, yüzeyde yansıyan ışığın görüntüleme sensörü üzerine düşmesi ile oluşmaktadır. Görüntü üzerinde herhangi bir noktadaki piksel yoğunluğu yüzeyin ilgili noktasındaki yansıma özelliği ile yakından ilgilidir. Bu nedenle görüntü piksel yoğunluklarının tahmini ya da yorumlanması açısından yansıma işlemindeki farklı mekanizmaların anlaşılması gerekmektedir. Bu nedenle yansıma özelliklerinin incelenmesi faydalı olmaktadır.

Bilgisayarla görme alanında farklı yansım modelleri geliştirilmiştir. Genel olarak yansım modelleri fiziksel modeller ve geometrik modeller olmak üzere iki kategoride toplanmıştır. Fiziksel modeller gelen ışığın yansımını analiz etmek için elektromanyetik dalga teorisini kullanmıştır. Pürüzlü yüzeylerde ve daha pürüzsüz yüzeylerdeki yansımalar geometrik modellerle tanımlanabilmektedir. Fakat fiziksel modeller makine ile görme de pek de uygun olamamaktadır. Diğer yandan geometrik modeller basit fonksiyon formlarına sahiptir ve yüzey aydınlatma geometrilerini analiz etme de kullanılabilir.

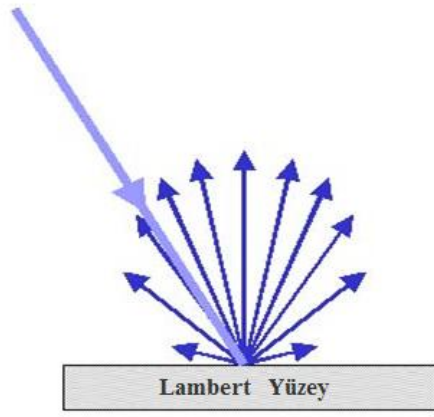


Şekil 2.14. Işık yansım geometrisi [20]

Bir yüzeyde yansıyan ışığın geometrisi Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Yansım modelleri genel olarak iki yönlü yansım dağılım fonksiyonu olan çift yönlü yansım dağılım fonksiyonu (BRDF) ile temsil edilmektedir. BRDF yüzeye aydınlatma yönünde ulaşan enerjinin yansıyarak gözlemcide oluşturduğu yoğunlukla ilgilidir. İki yönlü yansım dağılım fonksiyonu $BRDF(\lambda, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$ incelenecek olursa λ gelen ışığın dalga boyunu, θ_i ve ϕ_i gelen ışığın yönünü, θ_r ve ϕ_r ise yansıyan ışığın yönünü temsil etmektedir.

Fotometrik stereo yöntemi incelendiğinde Lambert yansım modelini kullandığı görülmektedir. Fakat diğer yansım modelleri ile de çalışabilmektedir. Bu yüzden bazı yansım modellerini incelemek faydalı olacaktır. Lambert yansım modeline sahip yüzeyler hangi yönden aydınlatma olursa olsun her yönden aynı değerde yansımının görüldüğü yüzeylerdir. Başka bir deyişle yansıyan ışık yoğunluğu

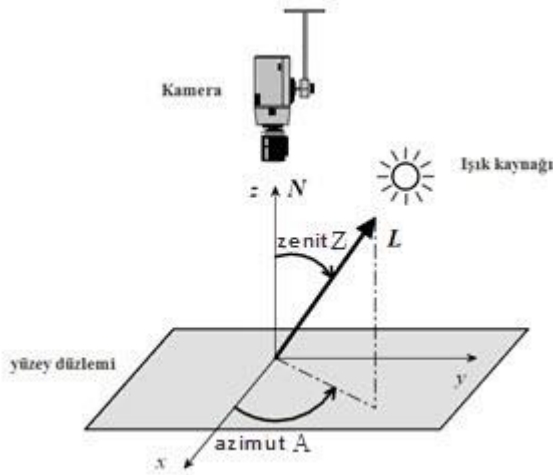
görüntüleme yönünden bağımsız olmaktadır. Şekil 2.15’de görüldüğü gibi gelen ışık yönüne bağlı olmadan yüzey her yöne yansıma oluşturmuştur. Lambert yansıma modelinde yansıyan ışınlılık (radiance) yönden bağımsız ve sabittir. Ayrıca BRDF’de sabittir. Bu özelliği gösteren yüzeylere pamuk elbiseler, birçok halı, mat kâğıt ve mat boyalar örnek verilebilir. Fakat görüntünün yoğunluk değeri ışık kaynağının yüzeye göre durumuna bağlı olmaktadır. Matematiksel olarak aydınlatma vektörü ile yüzey normal vektörünün skaler çarpımı ile ifade edilebilir ve Eş. 2.17 Lambert yansıma modelini oluşturmaktadır.



Şekil 2.15. Lambert yüzey yansıması

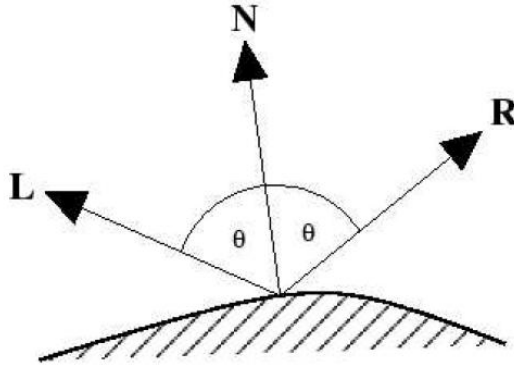
$$I(x,y)=\rho k(N.L)=\rho k \frac{-p \cos A \sin Z - q \sin A \sin Z + \cos Z}{\sqrt{p^2+q^2+1}} \quad 2.17$$

Eş. 2.17’deki değişkenler incelenecek olursa; $I(x,y)$, (x,y) noktasındaki görüntü piksel yoğunluğunu, $N = \left(\frac{-p}{\sqrt{p^2+q^2+1}}, \frac{-q}{\sqrt{p^2+q^2+1}}, \frac{1}{\sqrt{p^2+q^2+1}} \right)$, (x,y) noktasındaki $z(x,y)$ yüzeyine doğru gelen birim yüzey normal vektörünü tanımlamaktadır. $p = \frac{\partial s(x,y)}{\partial x}$, $q = \frac{\partial s(x,y)}{\partial y}$ eşitlikleri ise sırasıyla x ve y yönlerindeki kısmi türevleri temsil etmektedir. $L = (\cos A * \sin Z, \sin Z * \sin A, \cos Z)$ ışık kaynağına doğru olan birim vektördür. A ve Z , Şekil 2.16’da görüldüğü gibi aydınlatma vektöründeki azimut ve zenit açılarıdır. ρ yüzey albedo değeridir, k ise ışık kaynağının gücüdür.



Şekil 2.16. Aydınlatma geometrisi ve azimut - zenit açılarının gösterilmesi [20]

Bir diğer yansıma modeli speküler yansımadır. Yüzeyin speküler yansıma özellik göstermesi sadece ışık kaynağının Şekil 2.17'deki gibi geliş açısı ile yansıma açısının birbirine eşit olduğu durumda gerçekleşir. Yani yüzey bu durumda bir ayna gibi özellik gösterir. Speküler yansımalar boyanmış metal gibi parlak yüzeylerde görülmektedir. Mat yüzeylerde ise speküler yansımalar az görülmektedir. Speküler yansıma yapan yüzeyler fotometrik stereo yönteminde problemler oluşturmaktadır. Çünkü fotometrik stereo yöntemi Lambert yansıma modelini temel almıştır.



Şekil 2.17. Speküler yansıma

2.4.2. Fotometrik stereo yönteminin matematiksel olarak incelenmesi

Daha önceki bölümlerde de değinildiği gibi kamera tarafından görüntülenen 3B yüzeyler kamerada 2B yüzeyler haline dönüştürülmektedir. Fotometrik stereo yönteminde ise amaç farklı yönlerden aydınlatılmış 3B yüzeyin, kamera ile görüntülenmesi ile oluşan 2B görüntüler kullanılarak tekrardan 3B yüzey bilgisini elde etmektir. Yani görüntüleme sırasındaki işlemin tersi yapılmaya çalışılmaktadır.

3B bir yüzey Eş. 2.18'deki gibi tanımlanabilmektedir. Eş. 2.18 düzenlenerek Eş. 2.19'daki hale getirilebilmektedir. Burada x ve y yönündeki yüzey gradyan değerleri p ve q sırasıyla Eş. 2.20 ve Eş. 2.21'deki gibi elde edilebilmektedir. Bu değerler kullanılarak da yüzey normali, p ve q cinsinden Eş. 2.22'deki gibi ifade edilebilmektedir.

$$ax+by+cz+d=0 \quad 2.18$$

$$\frac{a}{c}x+\frac{b}{c}y+z+\frac{d}{c}=0 \quad 2.19$$

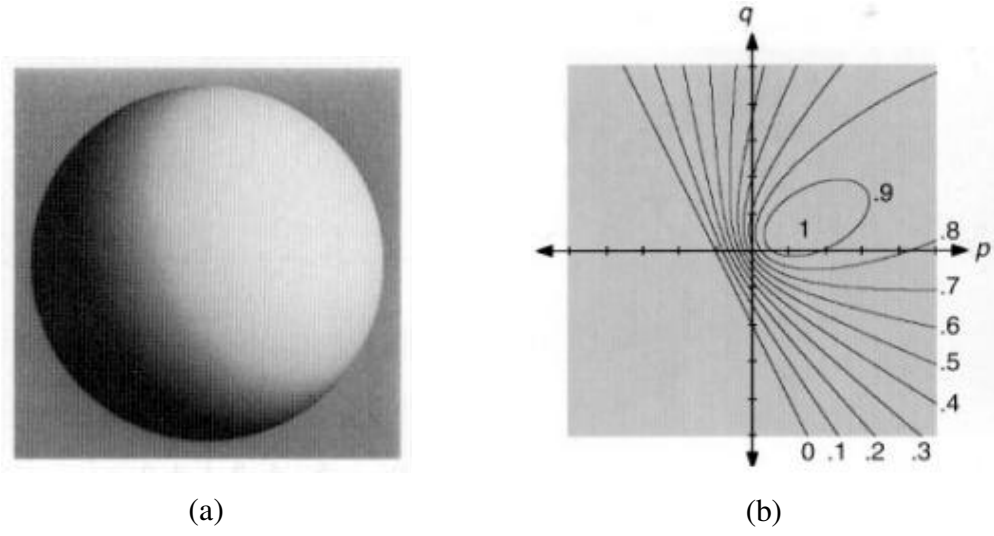
$$-\frac{\partial z}{\partial x}=\frac{a}{c}=p \quad 2.20$$

$$-\frac{\partial z}{\partial y}=\frac{b}{c}=q \quad 2.21$$

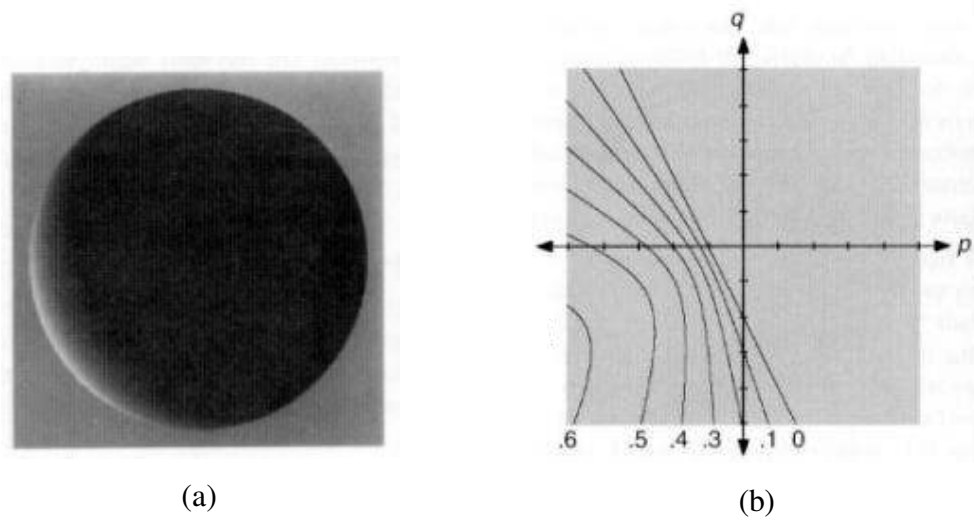
$$N=\left(\frac{a}{c}, \frac{b}{c}, 1\right)=(p, q, 1) \quad 2.22$$

$$R(p, q) = I(x, y) = \rho(x, y) \frac{1 + pp_s + qq_s}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1} \sqrt{p_s^2 + q_s^2 + 1}} \quad 2.23$$

Yukarıdaki eşitlikler ışığında, yüzeyin 3B bilgisine ulaşılabilmek için yüzey normallerinin hesaplanması gerekmektedir. Yüzey normallerini hesaplamak için Bölüm 2.4.1'de anlatılan ve Eş. 2.23'deki gibi tanımlanan Lambert yansıma modeli esas alınarak fotometrik stereo yaklaşımı kullanılabilmektedir. Eş. 2.23'e göre her bir x, y noktasındaki piksel yoğunluk değeri R(p, q) ile temsil edilen yansıma değerine eşit olmaktadır. Yani (p_s, q_s, 1) vektörü ile temsil edilmiş ışık kaynağı altında görüntülenen bir yüzeyin görüntü değeri, gradyan değerleri kullanılarak R(p, q) ile temsil edilebilmektedir. Görüntüdeki bütün noktaların R(p, q) değerleri kullanılarak bütün yansıma değerleri eş yoğunluk eğrileri ile gösterilebilmektedir. Bu gösterime yansıma haritası denilmektedir. Şekil 2.18 ve Şekil 2.19'da farklı yönlerden aydınlatılmış şekillere ve oluşan yansıma haritalarına örnekler verilmiştir.



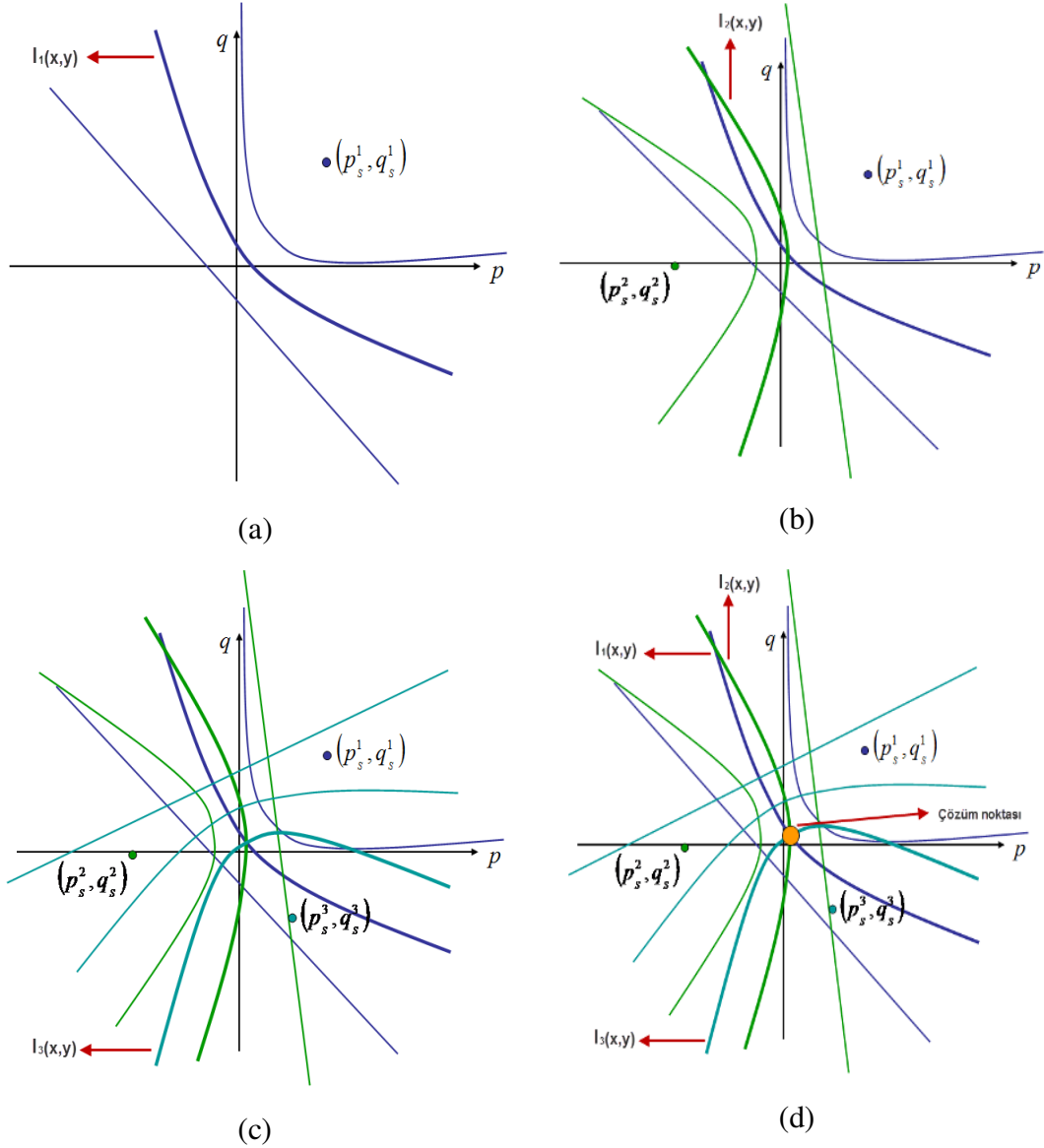
Şekil 2.18. Aydınlanma vektörü $(1, 0.5, 1)$ olan ışık kaynağı ile a) aydınlatılmış şekil ve b) yansım haritası



Şekil 2.19. Aydınlanma vektörü $(-1, -0.5, -1)$ olan ışık kaynağı ile a) aydınlatılmış şekil ve b) yansım haritası

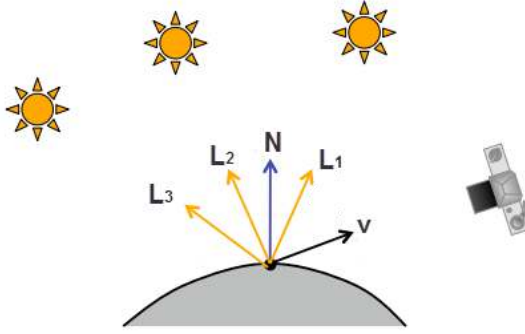
Eş. 2.23 bilinen aydınlatma yönü yerine konularak bir nokta için çözüldüğünde çok sayıda p ve q değerlerine erişilmekte, tek bir p , q değeri bulunamamaktadır. Fakat başka bir aydınlatma yönü altında görüntülenmiş ikinci bir görüntü kullanıldığında ikinci bir çözüm denklemi elde edilmektedir. İki denklem kullanılarak iki elemanlı bir çözüme ulaşılabilmektedir. Başka bir aydınlatma yönü altında görüntülenmiş üçüncü bir görüntü kullanıldığında ise tek elemanlı bir çözüm kümesi oluşturulabilmektedir. Bu durum Şekil 2.20’de gösterilmiştir. Bu şekilde sırasıyla bir, iki ve üç ışık ile farklı yönlerden aydınlatılmış bir yüzeyin yansım haritaları ve bu haritalar ile oluşturulan çözüm noktası gösterilmiştir. Burada anlatılan kısaca

özetlenecek olursa fotometrik stereo yönteminde doğrusal bir çözüm elde edebilmek için aydınlatma yönleri bilinen farklı yönlerden aydınlatılmış en az üç görüntü kullanılması gerekmektedir.



Şekil 2.20. Yansımalar haritaları ile fotometrik stereo probleminin çözümünün gösterilmesi

- Tek ışık kaynağı ile elde edilen yansımalar haritası
- İki ışık kaynağı ile elde edilen yansımalar haritası
- Üç ışık kaynağı ile elde edilen yansımalar haritası
- Yansımalar haritası ile elde edilen çözümün gösterilmesi



Şekil 2.21. Üç görüntü kullanılan fotometrik stereo görüntüleme geometrisi

Fotometrik Stereo, Şekil 2.21'deki gibi farklı yönlerden aydınlatılmış yüzeyin aynı bakış açısına sahip kamera ile alınmış birden çok görüntüsü kullanılarak yüzey derinliğinin tahmin edilmesini sağlamaktadır. Bu yöntem, ancak aydınlatma sisteminin bilindiği ve kontrol edilebildiği durumlarda uygulanabilmektedir. Daha önce de değinildiği gibi Lambert yansıma modeline göre görüntüdeki yoğunluk değerleri Eş. 2.24'deki gibi oluşmaktadır. Bu eşitlikte I görüntüyü, ρ albedo değerini, k ışık kaynağının gücünü, θ yüzey gelen ışık ile yüzey normali arasındaki açıyı, L fotometrik aydınlatma vektörünü, N yüzey normalini temsil etmektedir. Bu eşitlik farklı aydınlatma açıları altında görüntülenmiş her bir görüntü için sırasıyla Eş. 2.25, Eş. 2.26 ve Eş. 2.27'deki gibi yazılabilmektedir. Bu eşitlikler matris formatına dönüştürülecek olursa Eş. 2.28' deki denklem elde edilmektedir. Eş. 2.29 incelendiğinde matris boyutları işlemin yapılması için uygun olmaktadır. Fotometrik aydınlatma matrisi L tekil olmadığı için tersi alınabilmekte ve Eş. 2.30'daki hale getirilebilmektedir. Eş. 2.31'deki $L^{-1} \cdot I$ çarpımının vektörel olarak uzunluğu ρ değerini yani yüzeyin albedo katsayısını ifade etmektedir. Eş. 2.32 kullanılarak bulunan albedo değeri, $L^{-1} \cdot I$ çarpımının sonucuna bölünerek yüzey normali oluşturulmaktadır.

$$I = \rho k \cos \theta = \rho N L \quad 2.24$$

$$I_1 = \rho N \cdot L_1 \quad 2.25$$

$$I_2 = \rho N \cdot L_2 \quad 2.26$$

$$I_3 = \rho N \cdot L_3 \quad 2.27$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \rho \begin{bmatrix} L_1^T \\ L_2^T \\ L_3^T \end{bmatrix} N \quad 2.28$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1^T \\ L_2^T \\ L_3^T \end{bmatrix} \rho N \quad 2.29$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix}}_{3*1} = \underbrace{\begin{bmatrix} L_1^T \\ L_2^T \\ L_3^T \end{bmatrix}}_{3*3} \underbrace{\rho N}_{3*1} \quad 2.30$$

$$L^{-1}I = \rho N \quad 2.31$$

$$\rho = |L^{-1}I| \quad 2.32$$

$$N = \frac{L^{-1}I}{\rho} \quad 2.33$$

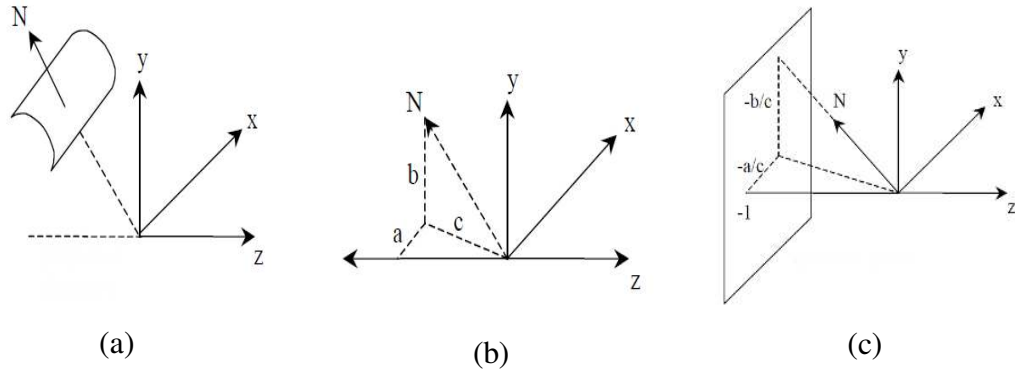
Eğer görüntü sayısı üçten fazla olursa Eş. 2.33'deki matris formatı oluşturulur. Burada n kullanılan görüntü sayısını ifade etmektedir. Yüzey normallerinin bulunması için ise Eş. 2.34'deki sözde ters alma işlemi yapılarak yüzey normalleri bulunabilmektedir.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} I_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ I_n \end{bmatrix}}_{n*1} = \underbrace{\begin{bmatrix} L_1^T \\ \cdot \\ \cdot \\ L_n^T \end{bmatrix}}_{n*3} \underbrace{\rho N}_{3*1} \quad 2.34$$

$$N = (L^T L)^{-1} L^T I \quad 2.35$$

2.4.3. Yüzey normallerinden gradyan uzayına geçiş

Yüzey $z = f(x, y)$ ile temsil edilmektedir ve yüzeydeki her bir nokta görüntü düzlemine iz düşürülerek görüntü oluşturulmaktadır. Bu iz düşüm paralel (ortografik) bir iz düşümdür. Bu noktaların her biri yüzey normallerine sahiptir ve ikili uzayda yüzey normal yönelimi temsil edilebilmektedir. Bu uzaya gradyan uzay denilmektedir. Şekil 2.22’de yüzey normali ile gradyan uzay arasındaki ilişki gösterilmektedir. Yüzeydeki bir noktanın normali N ile gösterilmiştir. Yüzey üzerindeki tüm noktaların yüzey normalleri negatif z bileşenlerine sahiptir. Bu normalleri ikili uzayda temsil edebilmek için Şekil 2.22’de görüldüğü gibi vektörü orijine taşımak ve a , b , c değerlerini atamak gerekmektedir. $z = -1$ ’de pozisyon almış z eksenine bir yüzey düzlemi düşünülürse vektör, (p, q) koordinatında bu düzlem ile kesişir [20]. Burada $p = -\frac{a}{c}$ ve $q = -\frac{b}{c}$ hesabı yapılır. Yüzey $z = f(x, y)$ ise yüzey normali $(\partial f / \partial x, \partial f / \partial y, -1)$ vektörü ile ifade edilir. Burada $p = \partial f / \partial x$ ve $q = \partial f / \partial y$ olmaktadır.



Şekil 2.22. Yüzey normal verisinin gradyan uzay alanına taşınması [20]

- a) Bir noktanın yüzey normali
- b) Yüzey normalinin (a, b, c) koordinatlarına atanması
- c) Yüzey normalinin gradyan uzayda gösterilmesi

2.4.4. Yüzey derinliklerinin hesaplanması

3B yüzeylerin elde edilmesinde derinlik çıkarma ana problemlerden birisidir. Fotometrik stereo ve gölgeden şekil elde etme gibi birçok derinlik çıkarma yöntemi gradyan değerlerinin bulunmasını sağlar. Bölüm 2.4.2’de yüzey gradyan değerlerinin

yüzeyin kısmi türevleri alınarak bulunduğu değinilmiştir. Yüzeyin derinlik bilgisini ya da yüksekliğini çıkarmak için ise türev işleminin tersi olan integral alma işleminin yapılması gerekmektedir. Yani gradyan değerleri üzerinde integral alma işlemi gerçekleştirilerek yüzeyin derinlik bilgisine ulaşılabilmektedir. Yüzey fonksiyonunun $z(x,y)$ olduğu farz edilirse x,y noktasındaki kısmi türevleri $p(x,y) = \frac{\partial z(x,y)}{\partial x} = z_x$ ve $q(x,y) = \frac{\partial z(x,y)}{\partial y} = z_y$ olmaktadır. Genel olarak $p(x,y)$ ve $q(x,y)$ değerlerinden $z(x,y)$ değerine ulaşmak için genel olarak literatürde bilinen iki tip yaklaşım bulunmaktadır. Bu yaklaşımlar yerel integral alma ve genel integral alma olmak üzere iki sınıfta toplanmaktadır. Çizgisel integral alma olarak da bilinen yerel integral alma tekniklerinde bir hat boyunca yükseklik değerlerinin yerel hesaplamaları yapılmaktadır. Bu teknikte ana düşünce yüzey yüksekliğinin x ve y yönlerindeki küçük değişimlerini veren gradyan değerlerini kullanmak ve bir hat boyunca yükseklikteki bu değişimleri toplayarak yüzeyin yükseklik haritasını elde etmektir. Yerel teknikler integrasyon yoluna ve farklı komşuluk şekillerine göre farklılık göstermektedir. Coleman ve Jain [21] bilgisayarla görme alanında iki nokta metodu olarak bilinen bir teknik kullanmaktadır. Healey ve Jain [22], Coleman ve Jain metodunu biraz genişleterek sekiz nokta metodunu kullanmıştır. Yüzey derinliği, ilgili noktanın 2 ve 8 komşuluğundaki noktaların normal vektörleri ve ortalama tanjantları kullanılarak, yüzey derinliği ve yüzey normallerinin interpolasyonundan elde edilebilmektedir. Wu ve Li [23] ise eşitlik x' deki çizgisel integral metodunu önermiştir. Burada γ değeri geliş güzel alınmış (x_0, y_0) 'den (x,y) 'e belirli integral değeridir. Yerel metotların bilinen karakteristik özelliği başlangıç bir yükseklik değeri olarak hesaplamaları bu değer üzerinden yapmasıdır. Eş. 2.35'de görüldüğü gibi $z(x_0, y_0)$ başlangıç değeri olarak alınmıştır.

$$z(x,y)=z(x_0,y_0)+\int_{\gamma} p(x,y)dx+q(x,y)dy \quad 2.35$$

Yerel integral alma teknikleri genel olarak uygulaması kolay ve çalışma hızı olarak da verimli tekniklerdir. Fakat yerel hesaplamalar verinin doğruluğuna olan

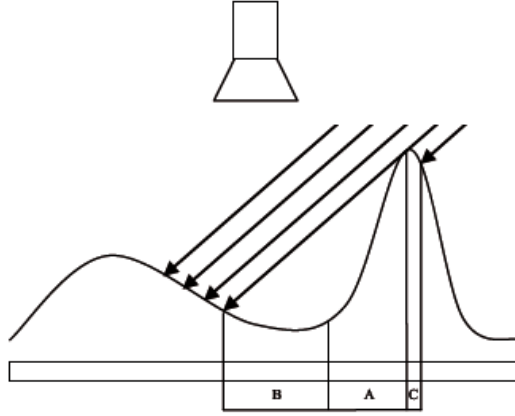
bağımlılığı arttırmaktadır. Bu yüzden yerel teknikler verinin gürültü taşıdığı durumda başarısız olmaktadır.

Gradyan değerlerinden yüzeyin yükseklik haritasına ulaşabilmek için kullanılan diğer yaklaşım genel integral alma teknikleridir. Bu yaklaşım optimizasyon problemi olarak da düşünülmektedir. Genel olarak bu teknikler Eş. 2.36'daki verilen fonksiyonun minimize edilmesini esas almaktadır. Buradaki p ve q hesaplanan yüzey gradyan değerlerini $\tilde{p}$ ve $\tilde{q}$ değerleri ise bilinmeyen, idealde olması gereken gradyan değerleridir. Literatürde en çok bilinen teknikler Horn ve Brooks [24] , Frankot ve Chellappa [25] teknikleridir. Bu tez çalışmasında da kullanılmış olan Frankot ve Chellappa tarafından geliştirilen teknik iyi sonuçlar vermektedir. Bu teknik için geliştirilen algoritma, her iterasyonunda integrallenemeyen yüzeylerin dik izdüşüm vasıtasıyla frekans alanında integrallenebilir şekle getirerek derinlik bilgisine ulaşmayı amaçlamaktadır.

$$f(\tilde{p}, \tilde{q}) = \iint_{\Omega} \left[|p(x,y) - \tilde{p}(x,y)|^2 + |q(x,y) - \tilde{q}(x,y)|^2 \right] dx dy \quad 2.36$$

2.4.5. Fotometrik stereo yönteminin problemleri

Fotometrik stereo yönteminin Lambert yansıma modelini temel alarak oluşturulduğu daha önceki bölümde anlatılmıştı. Fakat her yüzey Lambert yansıma özelliğini göstermez. Eğer nesne yüzeyi parlak ise yüzey speküler yansıma özelliği gösterebilir. Şekil 2.23' deki C bölgesinde olduğu gibi yansıyan ışık görüntüleme yönüne doğru gelirse parlamalar oluşabilir. Buna ek olarak yüzey dikmesi gelen ışık arasındaki açı 90^0 ' den büyük ise Şekil 2.23' deki A bölgesindeki gibi kendini gölgeleme oluşur. Bu durumda yüzey hiç ışık alamamaktadır. Başka yükseltilerin ışık kaynağı önüne geçmesi ile de Şekil 2.23'deki B bölgesindeki gibi düşürülmüş gölgeleme oluşur [26]. Gölgeleme ve parlamalar nesnenin şeklini çıkarma da zorluklar çıkarmaktadır. Speküler oluşumlar ve gölgeler Lambert yüzeyinin basit yaklaşımı nedeniyle Woodham tarafından geliştirilen 3 ışıklı fotometrik stereo tekniği için doğal zorluklar oluşturmaktadır. Speküler etkiler ve gölgelenmeler giriş değerlerinde sapmalara yol açar. Daha hassas modeller tasarlanarak bu problemler çözülebilmektedir.



Şekil 2.23. Gölgeleme ve speküler etkinin oluştuğu durumlar [26]

2.4.6. Fotometrik stereo yönteminin avantajları

Önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi 2B görüntülerden 3B görüntü oluşturmak için çeşitlik teknikler vardır. Diğer teknikler ile karşılaştırıldığında fotometrik stereo tekniğinin çeşitli avantajları vardır. Fotometrik stereo az maliyetli [27], hızlı ve doğruya yakın 3B veri üreten bir yöntemdir [28, 20]. Bu yöntem ek ışıklandırma ve kabul edilebilir hesaplama maliyeti ile başarılı sonuçlar vermektedir [20]. Stereo görüntüleme sisteminde nokta eşleme problemi oluşmaktadır fakat fotometrik stereo yönteminde böyle bir problem ile uğraşılmamaktadır. Yapısal ışık kaynağı tabanlı sistemlerde yüz üzerine projektör veya lazer örüntüleri düşürülürken fotometrik stereo yöntemi basit aydınlatma sistemi ile kullanılmaktadır. Gölgeden şekil elde yönteminden farklı olarak yüzeyin düzgünlüğü ile ilgili varsayım yapmamaktadır. Farklı aydınlatma yönleri altında görüntülenmiş her bir görüntü kendi yansıma haritasını da beraberinde getirmektedir [20]. Fotometrik stereo yöntemi ile yüzey gradyan değerleri p , q dışında yüzey albedo değeri de oluşturulmaktadır. Ayrıca bu yöntem çok yüksek çözünürlükte yüzey dikmesi oluşturulmasını sağlamaktadır [26].

İnsan yüzünün birçok parçası Lambert yansıma özelliği göstermektedir [29]. Yukarıdaki avantajlar ve fotometrik stereo yönteminin Lambert yansıma modelini temel aldığı düşünüldüğünde bu yöntem insan yüzünün 3B görüntüsünün oluşturulmasında ilgi çekmektedir. Fotometrik stereo ile oluşturulan 3B yüz görüntüleri de 3B yüz tanımada başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [28]. Bu

çalışmada yüz tanıma işleminde kullanılacak 3B görüntüler de fotometrik stereo kullanılarak oluşturulmuştur.

2.4.7. Fotometrik stereo yönteminin uygulanması

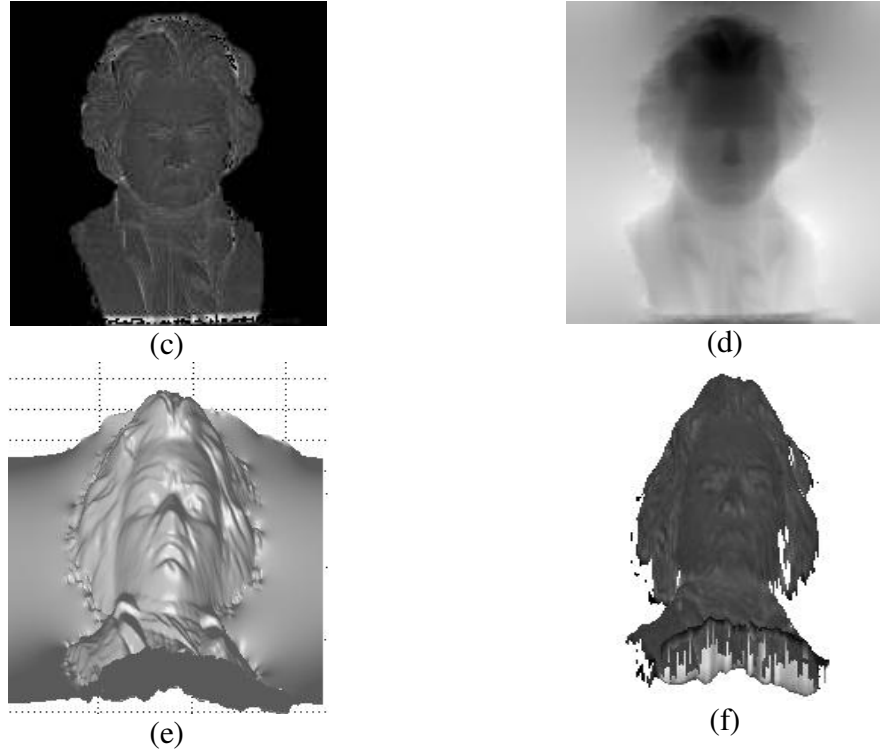
Fotometrik stereo yöntemi çeşitli örnek görüntüler üzerinde denenmiştir. Yönteme aydınlanma yönleri bilinen görüntüler girdi olarak verilmekte ve çeşitli çıktılar oluşturulmaktadır. Oluşturulan çıktılar sırasıyla albedo değeri, x yönündeki gradyan değeri p ve y yönündeki gradyan değeri q'dür. Frankot ve Chellappa [25] tekniği kullanılarak da p ve q değerlerinden yükseklik haritası oluşturulmuştur. Bu şekilde sırasıyla Şekil 2.24, Şekil 2.26 ve Şekil 2.28 farklı aydınlatma yönleri altında alınmış 2B Beethoven, küre ve insan yüzü görüntüleri kullanılarak 3B görüntüler elde edilmiştir. Fotometrik stereo sonucunda 3B görüntülerin yanında Beethoven, küre ve insan için sırasıyla Şekil 2.25, Şekil 2.27 ve Şekil 2.29'daki çıktılar elde edilmiştir.



Şekil 2.24. Farklı aydınlanma yönleri altında alınmış Beethoven görüntüleri

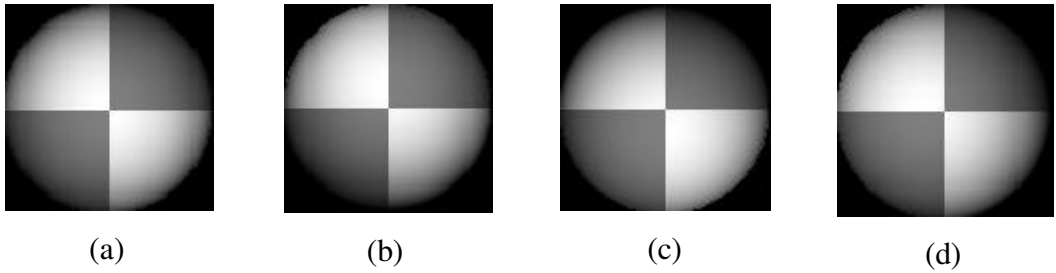
- a) Aydınlanma vektörü (0.27, -0.10, -1.0)
- b) Aydınlanma vektörü (0.01, 0.20, -1.0)
- c) Aydınlanma vektörü (-0.26, -0.08, -1.0)





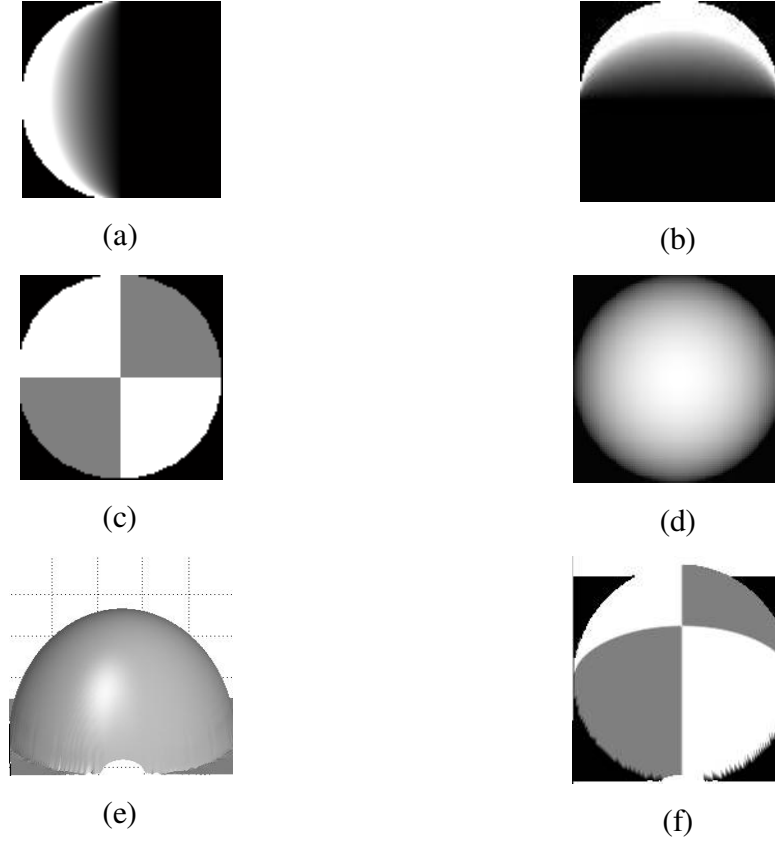
Şekil 2.25. Fotometrik stereo yönteminin Beethoven görüntülerin üzerinde uygulanması

- a) x yönündeki gradyan değeri (p)
- b) y yönündeki gradyan değeri (q)
- c) albedo değeri
- d) Yükseklik haritası
- e) Yükseklik haritası kullanılarak oluşturulan 3B görüntü
- f) Albedo görüntüsünün 3B görüntü üzerine doku olarak kaplanması



Şekil 2.26. Farklı aydınlanma yönleri altında alınmış küre görüntüleri

- a) Aydınlanma vektörü (0, 0, 1.0)
- b) Aydınlanma vektörü (0, 0.1961, 0.9806)
- c) Aydınlanma vektörü (0, -0.1961, 0.9806)
- d) Aydınlanma vektörü (0.1961, 0, 0.9806)



Şekil 2.27. Fotometrik stereo yönteminin küre görüntülerin üzerinde uygulanması

- a) x yönündeki gradyan değeri (p)
- b) y yönündeki gradyan değeri (q)
- c) Albedo değeri
- d) Yükseklik haritası
- e) Yükseklik haritası kullanılarak oluşturulan 3B görüntü
- f) Albedo görüntüsünün 3B görüntü üzerine doku olarak kaplanması



Şekil 2.28. Farklı aydınlanma yönleri altında alınmış insan yüzü görüntüleri

- a) Aydınlanma vektörü (0, 0, 1.0)
- b) Aydınlanma vektörü (0.2432, 0.3420, 0.9077)
- c) Aydınlanma vektörü (-0.2432, 0.3420, 0.9077)



(a)



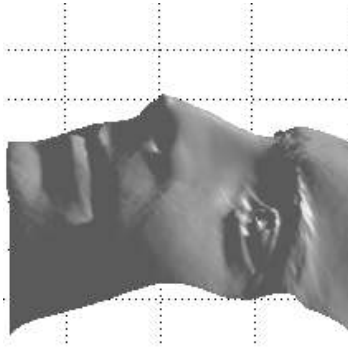
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 2.29. Fotometrik stereo yönteminin insan yüzü görüntülerinde uygulanması

- a) x yönündeki gradyan değeri (p)
- b) y yönündeki gradyan değeri (q)
- c) Albedo değeri
- d) Yükseklik haritası
- e) Yükseklik haritası kullanılarak oluşturulan 3B görüntü
- f) Albedo görüntüsünün 3B görüntü üzerine doku olarak kaplanması

3. GENEL LİTERATÜR TARAMASI

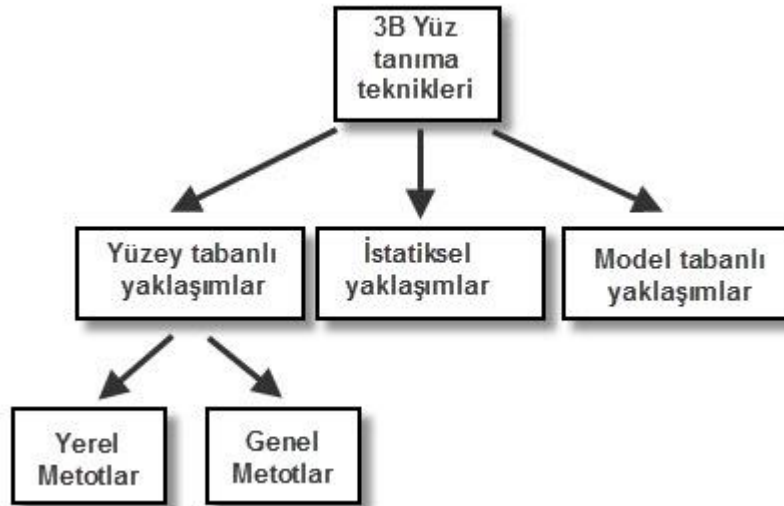
Bu tezde 2B görüntülerden 3B görüntü elde etme yöntemi olan fotometrik stereo ile oluşturulan 3B yüz verilerinin kullanılmasıyla oluşturulmuş bir yüz tanıma sistemi geliştirilmiştir. Bu nedenle yüz tanıma ile ilgili yapılmış çalışmalara kısa bir girişten sonra hem fotometrik stereo hem de diğer 2B'den 3B görüntü elde etme yöntemlerini kullanarak geliştirilmiş yüz tanıma sistemlerini incelemek faydalı olacaktır. Ayrıca bu tezde de kullanılmış temel yüzey eğrilikleri ve türevlerinin ve SIFT yönteminin kullanıldığı bazı çalışmalar da incelenecektir. Son olarak bu tezdeki deneylerin yapıldığı yüz veritabanını kullanan daha önce yapılmış bir takım çalışmaların sonuçlarına da yer verilecektir.

Otomatik veya yarı otomatik yüz tanıma ile ilgili ilk çalışmaların [30] yapıldığı 1960'lı yıllardan günümüze kadar birçok yüz tanıma tekniği geliştirilmiştir. İlk olarak geliştirilmiş ve halen geliştirilen yüz tanıma tekniklerinde elde edilmesi ucuz ve kolay olması nedeniyle yoğun olarak 2B yüz görüntüleri kullanılmaktadır. 2002 yılında ışığın kontrol edilebildiği durumlarda, gelişmiş 2B yüz tanıma algoritmaları kullanılarak yapılan FRVT adlı testin sonuçlarına göre % 90'ın üzerinde başarı elde edilmiştir [1]. Fakat gerçek dünya şartlarında 2B tanıma tekniklerinin performansını, aydınlanma ve poz değişimleri, yüz ifadeleri, yaşlanma ve yüzün bir kısmının örtülmesi (occlusion) gibi nedenler etkilemektedir [4].

Xu ve arkadaşları [31] yüzün derinlik bilgisinin ışıklandırma etkisinden az etkilenmesi nedeniyle nokta yoğunluk değerlerine göre yüzü temsil etmede daha gürbüz olduğu sonucuna varmıştır. 3B yüz verisinin 2B yüz tanımadaki problemlerin bazılarının çözülmesine yardımcı olması ve 3B görüntüleme sistemlerinin artmasıyla yüz tanıma ile ilgili yapılan çalışmalar 2B'den 3B'ye kaymıştır [3].

3B yüz tanıma konusu ile ilgili yapılmış birçok çalışma mevcuttur. [1, 3, 32, 33, 34] çalışmalarında 3B yüz tanıma ile ilgili geniş taramalar bulunmaktadır. Papatheodorou ve Rueckert [35] 3B yüz algoritmalarını genel olarak Şekil 3.1'deki gibi yüzey tabanlı, istatistiksel ve model tabanlı yaklaşımlar olmak üzere 3 sınıfta toplamıştır. Yüzey tabanlı yaklaşımlar ise yerel ve genel olmak üzere iki kategoride

toplanmıştır. Yerel metotlarda yüzey karakteristiğini tanımlayıcı elemanlar kullanılır. Yüzey eğrilikleri, genişletilmiş Gauss görüntüleri (EGI) ve nokta belirteçleri bunlardan bazılarıdır. Genel metotlarda yüz tanıma işlemine tüm yüz girdi olarak verilir. Yüzleri maks. ve min. eğriliklerle temsil eden metotlar, 3B yüzler arasındaki uzaklığı Hausdorff uzaklık ölçüsüne bakarak hesaplayan metotlar ve iteratif en yakın nokta (ICP) metotları global metotlara örnek olarak verilebilir. İstatistiksel yaklaşımlar ortalama ve kovaryans gibi istatistiksel bazı araçlar kullanılarak gerçekleştirilir. Temel bileşen analizi (PCA), doğrusal ayırtaç analizi (LDA) ve bağımsız bileşen analizi (ICA) yoğunlukla kullanılan istatistiksel tekniklerdendir. 3B yüz tanıma için model tabanlı yaklaşımlar ise genel olarak biçimlenebilir (morphable) modeli temel alır [35].



Şekil 3.1. 3B yüz tanıma teknikleri

3B yüz tanıma algoritmalarının daha yoğun olarak kullanılması 3B görüntüleme sistemlerinin gelişimiyle hızlanmıştır. Özellikle 2B görüntülerden 3B görüntü elde etme yöntemleri sıkça kullanılmaktadır. Wei ve Lee [36] stereo görüntüler kullanan PCA tabanlı bir 3B yüz tanıma metodu önerdiler. Stereo kamera kullanarak elde ettikleri görüntülerden yüz öznitelikleri çıkardılar. Çıkarılan öznitelik noktalarının stereo görüntüleme yaklaşımı ile derinlik bilgisini hesapladılar. Hesaplanan derinlik bilgileri ile 3B yüz kafesini (mesh) oluşturdular. Son olarak önerdikleri PCA algoritması ile veritabanındaki kafes 3B yüz verileri ile karşılaştırma yaparak %95 başarı sağladılar. Wu ve arkadaşları [37] stereo görüntüler kullanarak elde ettikleri 3B veriyi eğitim, fotometrik stereo görüntülerinden elde ettikleri veriyi ise test

verileri olarak kullanarak PCA algoritmasını uyarladılar. Aydınlanma ve poz değişimine karşı dayanıklı olan yöntemleri sayesinde % 96,2 başarı elde ettiler. Diğer bir çalışmada Kosov ve arkadaşları [38] tarafından geliştirilen yüz tanıma sisteminde 2B görüntüler ve stereo görüntüleme ile elde edilen derinlik bilgileri PCA uzayına dönüştürüldü. Test edilen 3B yüz verileri de PCA uzayında tanımlanarak Mahalanobis uzaklığı ile iki yüz verisi arasındaki ölçüm ile eşleştirme sağlanmış %90'ı aşan tanıma sonuçlarına ulaşılmıştır.

Tsalakanidou ve arkadaşları [39] diğer bir 2B'den 3B elde etme yöntemi olan yapısal ışık kaynağı tabanlı yöntem ile 2B ve 3B verinin beraberce kullanıldığı çok modellenli bir yüz tanıma sistemi önerdiler. Onlar gerçek zamanda yapısal ışık kaynağı tabanlı 3B ve renk bilgisini elde eden bir sistem kullanmıştır. Sınıflandırma işleminden önce poz ve aydınlanma etkilerinden kurtuldular. Daha sonra görünüm tabanlı bir yüz tanıma algoritması kullanarak sınıflandırmayı gerçekleştirdiler ve % 95 civarında başarı sağladılar. Yapısal ışık kaynağı kullanılarak yapılan diğer bir çalışmada Choudhury [40] direk olarak 3B yüz görüntüsünü üretmeksizin yapısal ışık kaynağı örüntülerini kullanarak bir yöntem önerdi. Her yüzden bu örüntüleri kullanarak o yüzü temsil eden bir imza çıkardı. İmza çıkarma işleminden sonra çapraz ilinti algoritması ile yüzlerin karşılaştırma işlemini gerçekleştirdi. Song ve arkadaşları [41], yapısal ışık kaynağı tabanlı yaklaşım ile elde ettikleri 3B yüz verilerinden şekil indisleri haritalarını çıkarmış ve dinamik programlama ile yüz tanıma işlemini gerçekleştirerek %96,8 başarı sağladılar. Başka bir çalışmada Shin ve Sohn [42] yapısal ışık kaynağı tabanlı yöntem ile 3B yüz verilerini oluşturduktan sonra şekil indislerini üretmiş ve farklı algoritmalar ile karşılaştırma yaparak %98,6'ya varan başarı sonuçları elde etmiştir.

Smith ve Hancock [43] ise gölgeden şekil elde etme yöntemi ile oluşturduğu iğne (needle) haritalarından yüzey ortalama ve Gauss eğriliklerini hesapladılar. Bu eğriliklerin histogramları arasındaki uzaklığı Bhattacharyya uzaklık ölçüsü ile bularak %94'e varan tanıma sonucu ile poz değişimleri altında kullanılabilen bir yüz tanıma tekniği önerdiler. Yang ve arkadaşları [44] yine gölgeden şekil elde etme yöntemi ile yüzlerin yüzey normallerini buldular. Yüzey normallerini normallerinden

skaler çarpım, eğilmişlik ve şekil indisi değerlerini hesapladılar. Bu değerleri kullanarak gerçekleştirdikleri yüz tanıma yönteminde eğilmişlik ve şekil indisi değerlerini kullanan tekniklerin %96 civarında sonuç verdiğini gözlemlediler. PCA yöntemi ile karşılaştırıldığında bu tekniklerin daha başarılı olduğunu gösterdiler.

Bu tezde 3B yüz görüntüsü oluşturmak için kullanılan yöntem olan fotometrik stereo da yüz tanıma sistemlerinde kullanılmıştır. Kee ve arkadaşları [29] aydınlanmadan bağımsız bir yüz tanıma yöntemi geliştirdiler. Onlar farklı aydınlama açıları altında görüntülenmiş 2B görüntüleri kullanarak eğitim için yüzey ve albedo bilgisini fotometrik stereo kullanarak ürettirtiler. 2B test görüntüsünün aydınlanma yönünü kestirerek bu kestirime göre galeri yüz görüntülerini sentezlediler. Test görüntüsü ile galeri görüntüleri arasındaki ortalama mutlak farka göre tanıma işlemini gerçekleştirdiler ve %96 kümülatif tanıma oranı elde ettiler. Diğer bir çalışmada Bronstein ve çalışma arkadaşları [28] yüzün yüzey bilgisini bulmak için fotometrik stereo yönteminden yararlandılar. Üçgen bölgede hızlı ilerleme (FMTD) algoritması ile yüzey noktaları arasındaki jeodezik uzaklıkları hesaplayarak yüz tanıma işleminde kullandılar. Fotometrik stereo kullanılan başka bir çalışmada Hansen ve Atkinson [45] ise PCA yaklaşımında olduğu gibi boyut indirgeme yöntemi kullanılarak verinin azaltılmasının yüz tanıma etkisini incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre verinin % 90 azaltılması 2B görüntü kullanımında yüz tanıma performansını %61 azaltırken yüzey normallerinin kullanımı %24 azaltmıştır. Ayrıca Hansen ve Atkinson yüzey normallerinin yüz tanımadaki başarısının 2B görüntülerden çok daha iyi olduğunu göstermiştir. 2B görüntüler kullanarak elde ettikleri sonuç %91,2’de kalırken yüzey normalleri ile edilen sonuç ise %97,5’e kadar çıkmıştır.

Literatürde bu çalışmada da kullanılan eğrilik bilgileri ile geliştirilmiş çeşitli çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmalar ve sonuçları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Çizelge 3.1’de verilen çalışmalar incelendiğinde Lu ve diğerleri poz ve aydınlanma değişimleri altında çalışabilen bir yüz tanıma sistemi önerdiler. Yalnız ICP kullanarak %95,6 başarı sağlarken şekil indisi ve ICP’yi beraber kullanarak başarı oranını arttırdılar. Moreno ve diğerleri yüz noktalarını ortalama ve Gauss eğrilikleri değerlerine göre yüzü belli bölgelere ayırdılar ve bu bölgelerden öznetelikler

çıkardılar bu öznelikleri de PCA ve SVM gibi sınıflandırıcılarla sınıflandırarak kontrolsüz ve kontrollü şartlar altında %76,2-90,16 arasında tanıma sonuçları ürettirler. Mahoor ve Mottaleb, yükseklik haritasından maks. temel eğrilik değerini kullanarak çizgi görüntüleri oluşturdular. Karşılaştırma safhasında ise bu çizgi görüntüler arasındaki uzaklığı ölçmek için Hausdorff uzaklığı ölçüsü kullandılar. Son olarak Yunqi ve arkadaşları ortalama ve Gaussian eğrilik değerleri ile SCI adını verdikleri yüzey sınıflandırma görüntüsünü elde ettiler. Bu görüntüleri PCA ile sınıflandırarak tanıma işlemini gerçekleştirdiler.

Çizelge 3.1. Çeşitli eğrilik temelli yöntemler ve yüz tanıma sonuçları

Çalışmayı Yapan	Yıl	Yöntem	Sonuç(%)
Lu ve diğer. [46]	2004	Şekil indisleri + iteratif en yakın nokta (ICP)	96,50
Moreno ve diğer. [47]	2005	Ortalama ve Gauss eğrilikleri + PCA SVM	90,16
Mahoor ve Mottaleb [48]	2007	Temel eğrilikler + Hausdorff uzaklığı	93,50
Yunqi ve diğer. [49]	2009	Ortalama ve Gauss eğrilikleri + PCA	94,50

Ayrıca araştırmacılar tarafından SIFT yöntemi kullanılarak yapılmış çeşitli çalışmalar da mevcuttur. Zhang ve arkadaşları [50] SIFT kullanarak çıkardıkları öznelikleri SVM ile sınıflandırarak bir 2B yüz tanıma sistemi önerdiler. Çeşitli veritabanları üzerinde denedikleri bu sistem ile % 99'a varan tanıma sonuçları elde ettiler. SIFT tabanlı diğer bir yüz tanıma çalışmasında Majumdar ve Ward [51] önceki SIFT tabanlı çalışmalara göre hesaplama miktarını 4 kat düşürdüler aynı zamanda tanıma doğruluğunu da % 1 oranında arttırarak % 90 üzerinde başarı elde ettiler. Berretti ve arkadaşları [52] tarafından yapılan bir çalışmada ise yine SIFT ve SVM'yi birlikte kullanarak yüz ifadelerinin bulunduğu 3B yüz verileri üzerinde ortalama % 77,5 yüz tanıma sonucu elde ettiler. Huang ve çalışma arkadaşları [53] ise yükseklik haritasını kullanarak çok ölçekli yerel ikili örüntü (multi scale local binary pattern) haritasını ve şekil indisi haritalarını oluşturdular. Bu haritalardan

SIFT yöntemi ile öznitelikler çıkararak iki harita ile elde edilen eşleme sonuçlarını birleştirdiler ve % 96 üzerinde sonuç elde ettiler. Ayrıca yüzün belirli parçalarının olmadığı durumlarda da % 88 civarında tanıma sonucu elde ettiler.

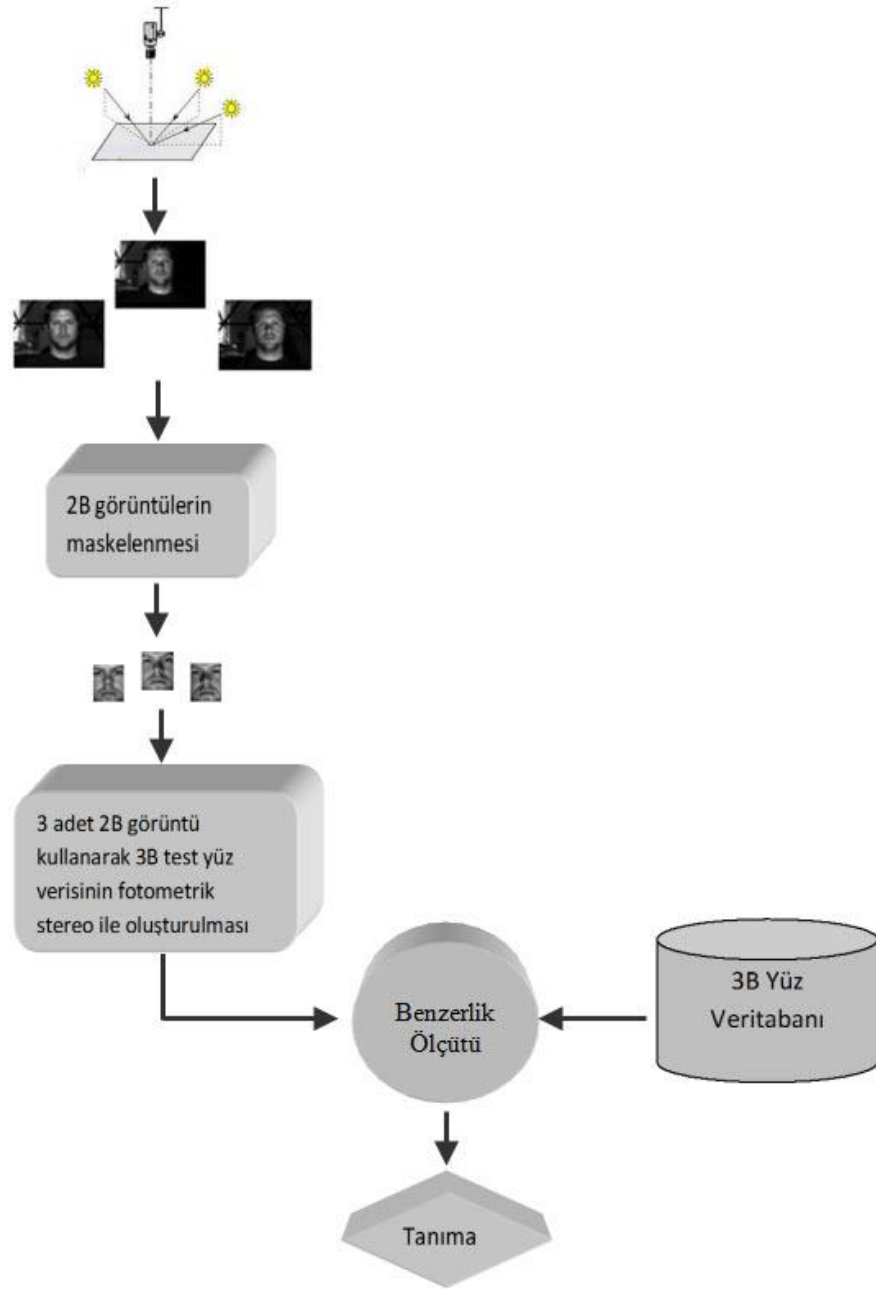
Ek olarak, bu tezde deneysel çalışmaların yapıldığı veritabanı ile aynı veritabanını kullanan bazı çalışmaların sonuçları da Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Bu çalışmalarda Yale B ve genişletilmiş Yale B veritabanının içerdiği toplam 38 farklı bireyin yüzleri kullanılmıştır. Petpon ve diğerleri yerel çizgi ikili örüntü (Local line binary pattern) ve LDA ile yüz ifadelerine ve aydınlanma etkisine karşı dayanıklı bir yüz tanıma yöntemi geliştirdiler. Krizaj ve arkadaşları SIFT tabanlı bir yüz tanıma metodu önerdiler. Bu metot ile PCA, LDA ve orijinal SIFT yöntemlerinden daha iyi sonuç elde etmiştir. Nabatchian ve diğerleri ise SVM ve k-en yakın komşu sınıflandırıcıları ile aydınlanmadan bağımsız bir yöntem geliştirdiler.

Çizelge 3.2. Yale B ve genişletilmiş Yale B veritabanını kullanan çalışmaların tanıma sonuçları

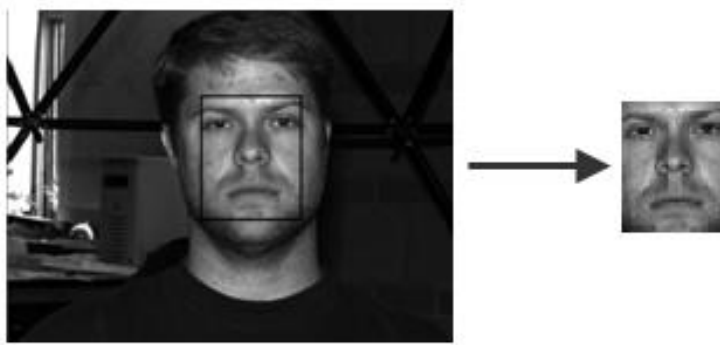
Çalışmayı Yapan	Yıl	Yöntem	Sonuç (%)
Petpon ve diğer. [54]	2009	Yerel çizgi ikili örüntü + LDA	%89,71
Krizaj ve diğer. [55]	2010	SIFT tabanlı	%91,42
Nabatchian ve diğer. [56]	2010	SVM+k en yakın komşu	%97,11

4. GELİŞTİRİLEN 3B YÜZ TANIMA SİSTEMİ

Bu çalışmada Şekil 4.1’de genel çalışma diyagramı sunulan basit ve etkili bir 3B yüz tanıma sistemi geliştirilmiştir. İlk önce farklı aydınlanma açıları altında görüntülenmiş 2B yüz görüntüleri Şekil 4.2’deki gibi maskelenerek 3B görüntü oluşturmada hata oluşturabilecek saç ve yüz dışındaki bölgeler çıkarılmıştır. Böylece veritabanındaki bütün yüzlerin büyük oranda hizalanması sağlanmış ve herhangi bir kayıtlama işlemi uygulanmamıştır.

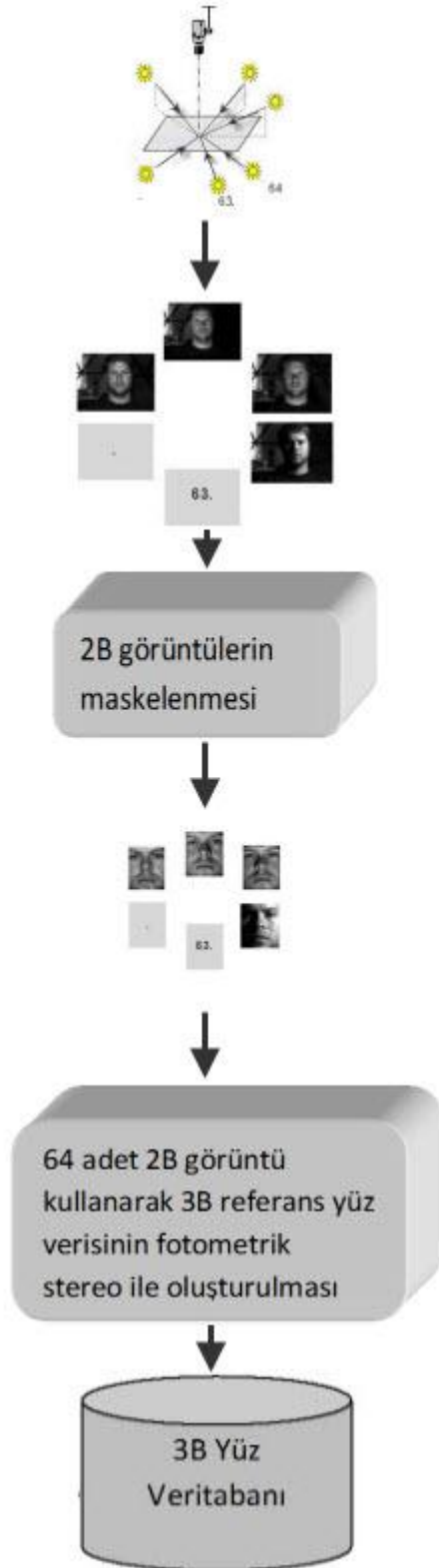


Şekil 4.1. Geliştirilen 3B yüz tanıma sisteminin diyagramı



Şekil 4.2. 2B görüntülerin maskelenmesi

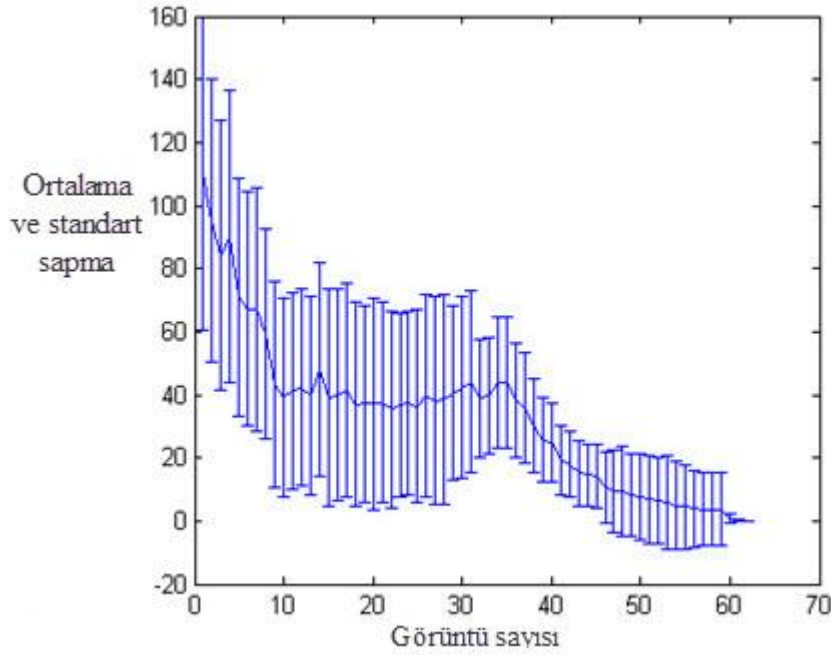
2B görüntülerin maskelenme işleminden sonra bu görüntüler kullanılarak 3B yüz görüntüsü oluşturma safhasına geçilmektedir. Geliştirilen 3B yüz tanıma sistemindeki 3B test yüz verileri, fotometrik stereo yöntemi kullanılarak 2B yüz görüntülerinden oluşturulmuştur. Test verileri için farklı aydınlatma açıları altında kaydedilmiş üç adet 2B görüntünün yanında onların azimut ve bakış açısından oluşan aydınlanma açıları kullanılmıştır. Elde edilen test yüz verileri veritabanındaki referans yüzlerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.3. Veritabanındaki 3B referans yüzlerin oluşturulması

Yüz tanıma sistemindeki karşılaştırmayı gerçekleştirebilmek için referans verilere yani veritabanındaki her bir bireyin yüzünü temsil eden referans 3B verilere ihtiyaç duyulmuştur. Bu veriler karşılaştırma işleminde kullanılacak her birey için Şekil 4.3’de görüldüğü gibi oluşturularak veritabanına kaydedilmiştir. Referans 3B verilerin oluşturulma işleminde farklı aydınlanma açıları altında görüntülenmiş 64 adet 2B görüntü kullanılmıştır. İlk önce test verilerinde olduğu gibi tüm 2B görüntüler maskelenmiştir. Daha sonra maskelenmiş görüntüler aydınlanma yönleri ile birlikte fotometrik stereo algoritmasına girdi olarak verilerek 3B referans veriler oluşturulmuştur.

Fotometrik stereo yönteminde farklı aydınlatma açılarından görüntülenmiş 2B görüntü sayısı arttıkça genel olarak gerçeğe daha yakın bir 3B veri oluşmaktadır. Kullanılan veritabanındaki 38 farklı bireyin 64 görüntüsü kullanılarak elde edilmiş 3B verisi ile sırasıyla 3 görüntü ile oluşturulan 3B veriden başlayarak sırasıyla 64’e kadar olan bütün görüntüler kullanılarak elde edilmiş 3B veri arasındaki farkların ortalaması ve standart sapması hesaplanmıştır. Şekil 4.4’de görüldüğü gibi görüntü sayısı arttıkça oluşturulan 3B veriler arasındaki fark genel olarak azalmıştır. 64 görüntü ile oluşturulan 3B yüz verisi gerçek 3B yüz verisine en yakın veri olarak bulunduğu görülmektedir. Böylece 64 görüntü ile elde edilmiş 3B verinin referans veri olarak kullanılabileceği görülmüştür.



Şekil 4.4. 38 farklı birey için farklı sayıda görüntünün kullanılması ile elde edilmiş 3B verileri arasındaki farkların ortalaması ve standart sapması

3B verilerin oluşturulmasından sonra farklı yüz tanıma algoritmaların kullanıldığı benzerlik ölçütleri ile yüzlerin karşılaştırılması yapılmış ve yüz tanıma işlemi gerçekleştirilmiştir. Fotometrik stereo yöntemi ile oluşturulan 3B yüz verileri, 2B görüntünün her bir pikselinde yükseklik değeri varmış gibi düşünülebilir bu nedenle bu görüntülere yükseklik haritası da denilmektedir. Literatürde yükseklik haritası, 2.5B görüntü veya derinlik görüntüsü (range image) olarak da adlandırılmaktadır bu nedenle bu tezde bu terimler birbirleri yerine kullanılmaktadır.

4.1. Farkların Karesinin Toplamının Karekökü

Farkların karesinin toplamının karekökü en basit karşılaştırma tekniklerinden biridir. Eş. 4.1'de görüldüğü gibi R_{ij} ile temsil edilen i, j noktasındaki 3B referans verinin yükseklik değeridir. T_{ij} ise 3B test verisinin i, j noktasındaki yükseklik değeridir. Eş. 4.1'de 3B referans ve test verisinin yükseklik haritası üzerindeki bütün noktalar arasındaki farkın karesi toplanıp karekökü alınarak F ile temsil edilen değer oluşturulur. En küçük F değerinin bulunduğu iki 3B yüz verisi, tanımanın gerçekleştirildiği yüzler olmaktadır.

$$F = \sqrt{\sum_i \sum_j (|R_{ij}| - |T_{ij}|)^2} \quad 4.1$$

4.2. 2B İlinti

İlinti (correlation), istatistiksel bir tekniktir ve genel olarak iki veri arasındaki doğrusal ilişkinin gücünü göstermektedir. Eş. 4.2’de R_{ij} ile temsil edilen i, j noktasındaki 3B referans verinin yükseklik değeri, T_{ij} ise 3B test verisinin i, j noktasındaki yükseklik değeridir. Eş. 4.3 ve Eş. 4.4’deki $\bar{R}$ ve $\bar{T}$ sırasıyla referans ve test yükseklik değerlerinin ortalaması, n ise her bir yükseklik haritasındaki toplam nokta sayısıdır. Eş. 4.2 ile 3B yüz referans ve test verileri arasındaki ilinti hesaplanmakta ve ilinti katsayısı c ’yi vermektedir. Buradaki c değeri ne kadar büyük olursa iki veri arasındaki ilinti o kadar fazla olmaktadır. Yani ilinti değerinin en fazla olduğu yüzler benzer yüzler olmaktadır.

$$c = \frac{\sum_i \sum_j (R_{ij} - \bar{R}) (T_{ij} - \bar{T})}{\sqrt{\left(\sum_i \sum_j (R_{ij} - \bar{R})^2\right) \left(\sum_i \sum_j (T_{ij} - \bar{T})^2\right)}} \quad 4.2$$

$$\bar{R} = (\sum_i \sum_j R_{ij})/n \quad 4.3$$

$$\bar{T} = (\sum_i \sum_j T_{ij})/n \quad 4.4$$

4.3. İteratif En Yakın Nokta

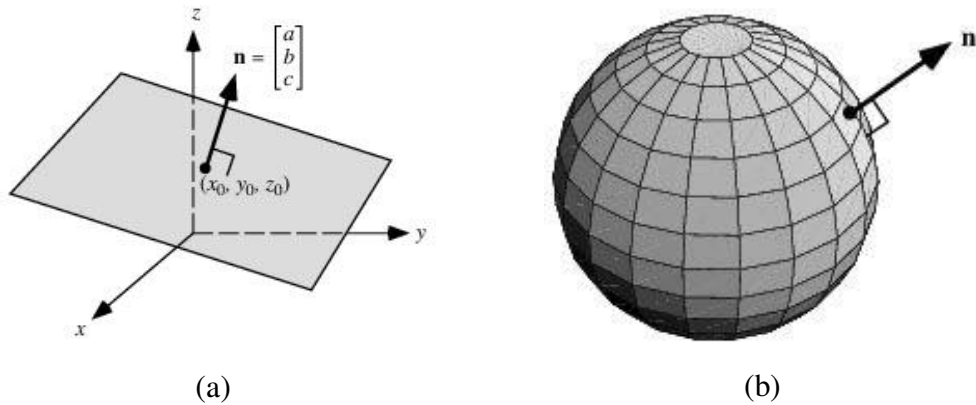
İteratif en yakın nokta algoritması (ICP) Besl ve McKay tarafından geliştirilmiştir [57]. Bu algoritma nokta bulutundaki koordinat sisteminde (x, y, z) ile temsil edilen iki noktanın kayıtlanmasını yani çakıştırılmasını sağlamaktadır. Algoritma farklı nesnelerde uygulandığı gibi yüz üzerinde de uygulanabilmektedir. Fotometrik stereo ile yükseklik haritası olarak adlandırılan veriler oluşturulabilmektedir. Bu veriler nokta bulutlarına çevrilerek ICP algoritmasında kullanılmaktadır. ICP algoritması nokta bulutlarını kullanarak kayıtlama işlemini iteratif olarak yapmaktadır. İterasyonun her adımında, algoritma dönme ve öteleme değerlerini hesaplayarak en yakın noktaları seçmektedir. Amaç Eş. 4.5’de görüldüğü gibi r ve t değerleri için E değerini minimize etmektir. Bu denklemde bulunan T ve R sırasıyla test ve referans

yüzlerin nokta bulutlarını, N_T ve N_R sırasıyla test ve referans yüzlerin nokta sayılarını i ve j ise her bir noktanın indis değerlerini, r ve t ise dönme ve öteleme değerlerini ifade etmektedir. Algoritma E değerinin artık değişmediği iterasyonda veya istenen bir durumda kesilerek sonlandırılabilir. Minimum E değerinin sağlandığı noktalar karşılaştırılmanın yapıldığı noktalar olmaktadır. Çakıştırma işleminden sonra elde edilen yeni noktaların oluşturduğu nokta bulutu ile referans nokta bulutları arasındaki fark hesaplanarak yüz tanıma işlemi gerçekleştirilmektedir. En küçük farkın hesaplandığı yüzler tanımanın yapıldığı yüzler olmaktadır.

$$E(r, t) = \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_T} \|R_i - (rT_j + t)\|^2 \quad 4.5$$

4.4. Yüzey Normalleri Arasındaki Açıların Ortalaması

Genellikle normal olarak adlandırılan normal vektörü yüzeye dik olan vektördür. Şekil 4.5’de görüldüğü gibi yüzey normali x , y , z yönlerinde a , b , c bileşenlerine sahiptir. İki yüzeyin karşılaştırılmasında normal vektörleri kullanılabilir. Aynı sayıda noktadan oluşmuş yüzeylerin sahip oldukları vektörler arasındaki açılar hesaplanarak, iki yüzeyin benzeyip benzemediğine karar verilebilir.

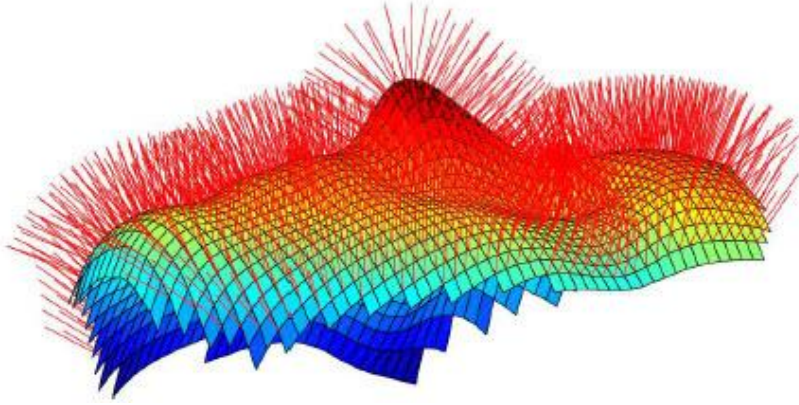


Şekil 4.5. Yüzey normalinin gösterilmesi

- a) Normal vektörünün bileşenleri
- b) Normal vektörünün küresel bir yüzeyde gösterilmesi

İnsan yüzünün de 3B bir yüzey olduğu düşünülürse Şekil 4.6’da görüldü gibi yüzeydeki her bir noktanın normal vektörü yüz tanıma işleminde kullanılabilir [58].

Yüzlerin yükseklik haritalarından normal vektörleri tekrardan kolayca elde edilebilir. Elde edilen normal vektörleri arasındaki açının kosinüs değeri ise Eş. 4.6 ile bulunabilir. Bu denklemde bulunan v_R ve v_T sırasıyla referans ve test yüzlerinin her bir noktasındaki normal vektörleridir. Referans ve test yüzlerindeki bütün noktalar üzerindeki normallerin kosinüs değerleri bu şekilde bulunabilir. Daha sonra elde edilen kosinüs değerleri Eş. 4.7 ile derece cinsinden θ açısına dönüştürülür. Bütün normal vektörleri arasındaki açı değerlerinin ortalaması ise Eş. 4.8 ile hesaplanabilir. Karşılaştırılan yüzler arasında ortalama açı değerinin en az olduğu yüz ikilisi tanımanın sağlandığı yüzler olarak tespit edilir.



Şekil 4.6. Örnek bir 3B yüz üzerindeki normallerin gösterilmesi [58]

$$\cos \theta = \frac{v_R \cdot v_T}{\|v_R\| \|v_T\|} \quad 4.6$$

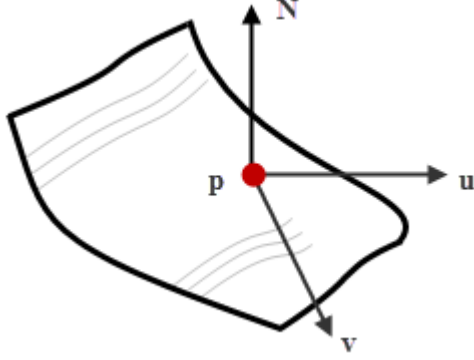
$$\theta = \arccos(\cos \theta) * 180/\pi \quad 4.7$$

$$\bar{\theta} = (\sum_i \sum_j \theta_{ij})/n \quad 4.8$$

4.5. Yüzey Temel Eğriliklerine Göre İnceleme

3B bir yüzeyin eğrilikleri yerel bükülmelerin ölçüsünü vermektedir. Eğrilik temelli tanımlayıcılar, eğriliklerin dönmelerden etkilenmemesi nedeniyle ilgi çekmektedir. Bir yüzeyin bir noktası üzerinde bu noktadan geçen birçok eğri bulunmaktadır ve bunların her biri eğrilik değerlerine sahiptir. Bu eğriler arasında iki değer vardır ki sınır eğriliklerini barındırır ve temel eğrilikler olarak adlandırılır. Bu eğriliklere, minimum (K_1) ve maksimum (K_2) eğrilikler denmektedir [59]. Yüzey üzerindeki her bir nokta sahip olduğu bu maksimum ve minimum eğriliklerine ve onların yönlerine

göre karakterize edilebilir. Şekil 4.7'deki u ve v değerleri bu eğriliklerin yönlerini göstermektedir ve sırasıyla K_1 ve K_2 eğrilik değerlerine sahiptir.



Şekil 4.7. Temel eğriliklerin yönleri

Bir yüzeyin temel eğrilik değerleri, Hessian matrisinin eigen değerleridir. Bu nedenle öncelikle yüzeyi tanımlayan fonksiyonun Hessian matrisinin bulunması gerekmektedir. H ile temsil edilen Hessian matrisi Eş. 4.9'daki gibi karesel (quadratic) bir fonksiyonun Eş. 4.10'daki gibi x ve y 'ye göre ikinci dereceden kısmi türevleri alınarak Eş. 4.11' deki denklem elde edilir.

$$z(x,y)=ax^2+by^2+cxy+dx+ey+f \quad 4.9$$

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \end{bmatrix} \quad 4.10$$

$$H = \begin{bmatrix} 2a & c \\ c & 2b \end{bmatrix} \quad 4.11$$

Elde edilen H değeri kullanılarak Eş. 4.12' deki determinant çözümü yapılarak temel eğriliklere ulaşılmaktadır. Burada bulunan K değeri temel eğrilik çözümlerinin elde edileceği değerdir. I ise birim matristir. Eş. 4.13 determinant denkleminin genişletilmiş halidir. Bu denklem çözümlenerek Eş. 4.14'deki hale getirilir. Eş. 4.14 ikinci dereceden denklem formatına dönüştürülerek Eş. 4.15 oluşturulur. Son olarak Eş. 4.16 çözülür ve temel eğrilik değerleri K_1 ve K_2 bulunur.

$$\det(H-KI) = 0 \quad 4.12$$

$$\det \begin{bmatrix} 2a-K & c \\ c & 2b-K \end{bmatrix} = 0 \quad 4.13$$

$$4ab - 2aK - 2bK + K^2 - c^2 = 0 \quad 4.14$$

$$K^2 - 2(a+b)K + (4ab - c^2) = 0 \quad 4.15$$

$$K_{1,2} = (a+b) \pm \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 - 2ab} \quad 4.16$$

Temel eğriliklerin matematiksel olarak çözümü yukarıda yapılmıştır. Bu denklemler esas alınarak var olan bir yükseklik haritası kullanılıp K_1 ve K_2 değerleri bulunabilir. Eş. 4.9'da $z(x, y)$ ile ifade edilen (x, y) noktasındaki derinlik değeri Eş. 4.17'deki i , x yönündeki nokta indis değeri, j ise y yönündeki nokta indis değeri olmak üzere $h(i, j)$ yükseklik değerine karşılık gelmektedir. Eş. 4.17 matris formatına çevrilerek Eş. 4.18 elde edilebilir [60]. Yükseklik haritası üzerindeki her bir noktanın yükseklik değeri için temel eğrilikler hesaplanırken o nokta $w \times w = n$ pencere boyutlu karesel bir çerçevenin ortasına oturtularak etrafındaki noktalar da hesaba katılmaktadır [61]. Bu pencere bütün yükseklik değerleri üzerinde kaydırılarak tüm yükseklik değerleri için K_1 ve K_2 değerleri hesaplanır.

$$h(i, j) = ai^2 + bj^2 + cij + di + ej + f \quad 4.17$$

$$\begin{bmatrix} i_1^2 & j_1^2 & i_1j_1 & i_1 & j_1 & 1 \\ i_2^2 & j_2^2 & i_2j_2 & i_2 & j_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ i_n^2 & j_n^2 & i_nj_n & i_n & j_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix} \quad 4.18$$

Eş. 4.18, Eş. 4.19'daki gibi yazılabilir, Eş. 4.20'de en küçük kareler kestirimi kullanılarak çözülebilir. Çözüm sonucu bulunan X değeri Eş. 4.17'deki a , b , c değerlerini barındıran bir vektördür. Bu değerler Eş. 4.16 yardımıyla kullanılıp K_1 ve K_2 değerlerine erişilmektedir.

$$YX = S \quad 4.19$$

$$X = ((Y^T Y)^{-1} Y^T) S \quad 4.20$$

İnsan yüzü karesel fonksiyona sahip bir yüzey olarak düşünülürse eğrilik değerleri hesaplanabilir. Fotometrik stereo sonucu elde edilen yükseklik haritalarından temel eğrilik değerleri bulunarak yüzlerin karşılaştırılması yapılabilir. Yükseklik haritasının her bir noktası için bulunan temel eğrilik değerlerinden aynen 2B görüntüler gibi görüntünün her bir noktası, K_1 ve K_2 olmak üzere Şekil 4.8'deki gibi iki farklı görüntü oluşturulabilir ve bunlara temel eğrilik haritaları da denilebilir. Bu görüntüler yüz tanımda benzerlik ölçütü olarak kullanılabilir.



Şekil 4.8. Örnek bir yüzün temel eğrilik değerlerinin oluşturduğu temel eğrilik haritaları

- a) Her bir noktasında K_1 değerlerinin bulunduğu temel eğrilik haritası
- b) Her bir noktasında K_2 değerlerinin bulunduğu temel eğrilik haritası

Test ve referans yükseklik haritalarının her biri kullanılarak oluşturulan K_1 ve K_2 değerleri arasındaki fark Eş. 4.21 ile hesaplanabilir. Buradaki i ve j indis değerleri olmak üzere $[K_1^R]$ referans yüzün, $[K_1^T]$ test yüzünün minimum temel eğrilik haritalarıdır. $[K_2^R]$, referans yüzün, $[K_2^T]$ ise test yüzün maksimum temel eğrilik haritalarıdır. Bulunan fark değeri ise D 'dir. Test yüzünün bütün referans yüzlerle farkı alınır ve minimum farkın bulunduğu yüz ikilisi tanımanın belirlendiği yüzler olarak tespit edilir.

$$D = \sqrt{\sum_i \sum_j (|K_1^{R_{ij}}| - |K_1^{T_{ij}}|)^2} + \sqrt{\sum_i \sum_j (|K_2^{R_{ij}}| - |K_2^{T_{ij}}|)^2} \quad 4.21$$

İki yüzün benzerliğinin tespiti işleminde kullanılacak diğer bir yöntem ise temel eğrilikler değerleri üzerinde ilinti işleminin uygulanmasıdır. Eş. 4.22'deki C

fonksiyonu Eş. 4.2'deki ilinti katsayısını veren fonksiyon olarak düşünülürse test ve referans yüzlerin temel eğriliklerinin toplam ilinti katsayısı R bulunabilir. R değerinin en fazla olduğu yüzler benzer yüzler olarak nitelendirilebilir.

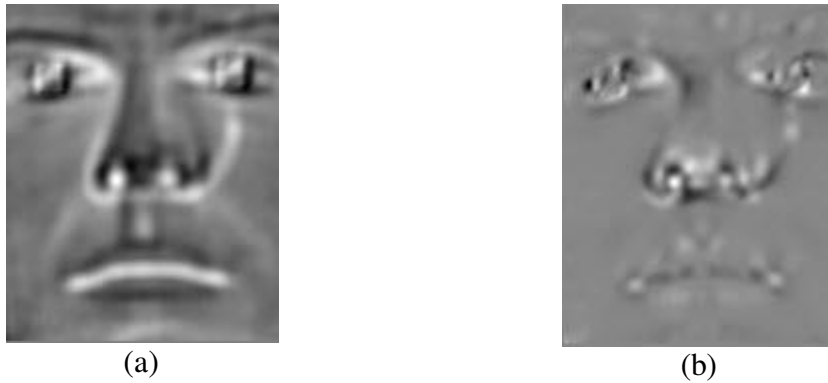
$$R = C([K_1^R], [K_1^T]) + C([K_2^R], [K_2^T]) \quad (4.22)$$

4.6. Ortalama ve Gauss Eğriliklerine Göre İnceleme

Temel eğriliklerin (K_1 , K_2) nasıl bulunduğu Bölüm 4.5'de anlatılmıştı. Yüzey eğriliklerinden başka ortalama ve Gauss eğrilikleri de yüzey özelliklerini tanımlamada sıklıkla kullanılmaktadır. Temel yüzey eğrilikleri K_1 ve K_2 olmak üzere sırasıyla H ve K ortalama ve Gauss eğrilikleridir [59] ve Eş. 4.23, Eş. 4.24'deki gibi bulunabilir. Bu işlemler yüz üzerinde denendiğinde bulunan bu eğrilik değerleri yüzün yükseklik haritasındaki her bir nokta için hesaplanarak Şekil 4.9'deki gibi ortalama ve Gauss eğrilik görüntüleri veya haritaları oluşturulabilir.

$$H = \frac{K_1 + K_2}{2} \quad (4.23)$$

$$K = K_1 K_2 \quad (4.24)$$



Şekil 4.9. Örnek bir yüzün ortalama ve gauss eğrilik haritaları

a) Ortalama eğrilik haritası b) Gauss eğrilik haritası

Ortalama ve Gauss eğrilik haritaları kullanılarak yüzlerin karşılaştırılma işlemi yapılabilir. Test ve referans yüzlerin bu eğrilik değerleri hesaplanır ve aralarındaki fark Eş. 4.25'deki gibi bulunabilir. Burada H^R ve H^T sırasıyla referans ve test ortalama eğrilik haritasını i ve j ise haritalardaki her bir noktanın yatay ve dikey

yöndeki indis değerlerini ifade etmektedir. Aynı şekilde Gauss eğrilik haritaları arasındaki fark da hesaplanabilir. Ek olarak hem ortalama hem de Gauss eğrilik arasındaki ilintiye bakılarak bir karşılaştırma ölçütü bulunabilir. Bu ilinti işlemi de 4.22'deki C fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilebilir.

$$D = \sqrt{\sum_i \sum_j (\|H^R_{ij}\| - \|H^T_{ij}\|)^2} \quad 4.25$$

4.7. Yüzey Eğilmişliği ve Şekil İndis Haritası Tabanlı Karşılaştırma

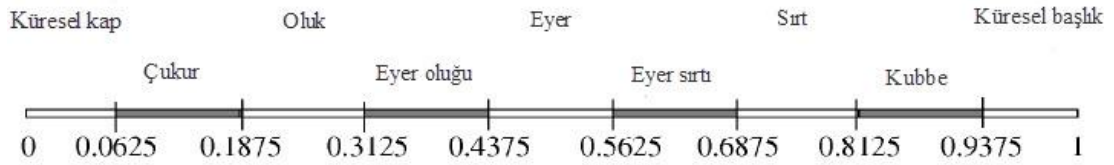
Ortalama ve Gauss eğrilikleri yüzeyin fiziksel özelliği ile ilgili fazla bilgi vermemektedir. Koenderink ve Doorn [5] yüzey için kullanışlı tanımlayıcılar sunmuşlardır. Bunlar eğilmişlik (curvedness) ve şekil indisidir (shape index). Eş. 4.26'da temel eğrilikler (K_1 , K_2) kullanılarak eğilmişlik değeri C hesaplanmaktadır. Yükseklik haritası üzerindeki bütün noktalar için sırasıyla eğilmişlik değerleri hesaplanarak Şekil 4.10'daki gibi bir eğilmişlik haritası oluşturulabilir. Test ve referans yüzlerin benzerliği bu haritalar arasındaki fark bulunarak tespit edilebilir. Bu haritalar arasındaki fark Eş. 4.25'deki H^R ve H^T yerine test ve referans yüzlerin eğilmişlik haritaları olan C^R ve C^T konularak elde edilir. Ayrıca bu eğilmişlik değerlerinin arasındaki ilinti katsayı değeri de bu yüzlerin benzerlik ölçüsünü verebilir. Bu ilinti işlemi de yine 4.22'deki C fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilebilir.

$$C = \log \sqrt{\frac{K_1^2 + K_2^2}{2}} \quad 4.26$$

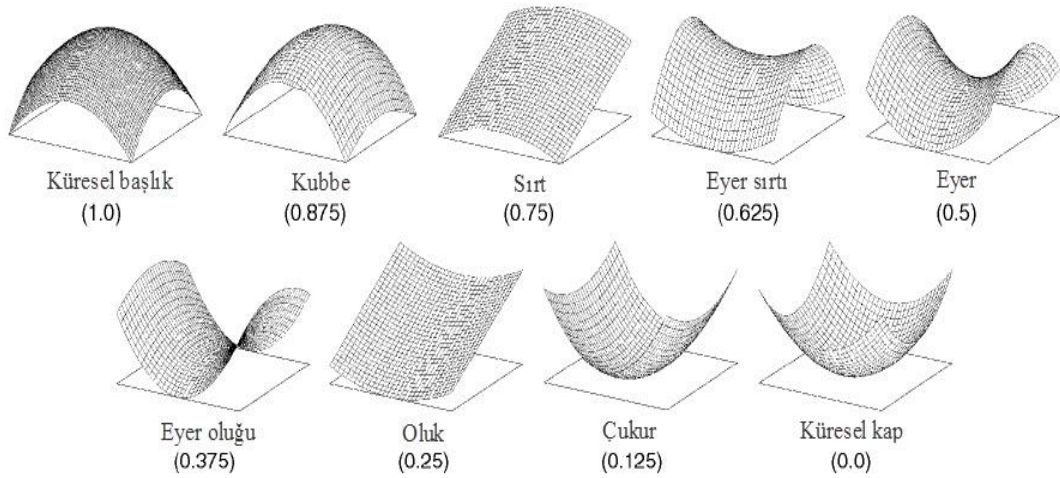


Şekil 4.10. Örnek bir yüzün yüzey eğilmişlik haritası

Yüzey özelliklerini iyi bir şekilde tanımlayan diğer bir yüzey tanımlayıcısı şekil indisleridir. Şekil indisi öteleme, ölçekleme ve dönmelere karşı değişimsiz özellik göstermektedir [62]. Temel yüzey eğrilikleri K_1 ve K_2 olmak üzere $K_1 \leq K_2$ olduğu durumda her bir yükseklik değeri için şekil indis değerleri Eş. 4.27’deki gibi hesaplanmaktadır. Elde edilen şekil indisi değerleri 0 ile 1 arasında değer almaktadır. Bu değerler Şekil 4.11’de görüldüğü gibi bilinen dokuz şekil tipi altında sınıflandırılmaktadır [63]. Bu şekil tipleri ise Şekil 4.12’deki gibi temsil edilmektedir.



Şekil 4.11. Bilinen dokuz tip şekil tipi ve şekil indisi aralıkları [63]



Şekil 4.12. Dokuz şeklin temsil edilmesi ve şekil indisi değerleri [63]

Yükseklik haritasındaki her bir yükseklik değeri için şekil indisi değerleri hesaplanarak Şekil 4.13’deki gibi şekil indisi haritası oluşturulur. Test ve referans yüzler için oluşturulan şekil indisi haritaları SI^T ve SI^R arasındaki fark ve ilinti aynen eğilmişlik haritalarında hesaplandığı gibi hesaplanmaktadır.



Şekil 4.13. Örnek bir yüzün şekil indisi haritası

$$SI = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \frac{K_1 + K_2}{K_1 - K_2} \quad K_1 \leq K_2 \quad 4.27$$

4.8. Şekil İndis Haritaları ve Ölçekten Bağımsız Öznitelik Dönüşümü

Görüntüler arasındaki benzer bölgelerin bulunabilmesi için araştırmacılar tarafından birçok teknik önerilmiştir. Bu amaç için son yıllarda en çok kullanılan tekniklerden birisi Lowe tarafından geliştirilen ölçekten bağımsız öznitelik dönüşümüdür (SIFT) [6]. Bu yöntemin rağbet görmesinin nedeni görüntülerin boyutundan ve dönmelerinden, görüntünün alındığı kameranın bakış açısından ve kısmi olarak çevresel aydınlanmadan etkilenmemesidir. Her öznitelik için çıkarılan 128 boyutlu vektör ile benzer öznitelikler kolayca bulunabilmektedir. Algoritma ölçek uzayındaki uç noktaların tespiti, anahtar noktaların belirlenmesi, yönelimlerin tespit edilmesi ve betimleyici vektörlerin tanımlaması olmak üzere genel olarak 4 adımdan meydana gelmektedir.

Uç noktaların tespiti: Bu adımda ölçek uzayda sabit noktalar olan ölçek uzayı uç noktaları aranarak olması mümkün öznitelikler çıkartılır. Ölçek uzayı L , Eş.4.29'da görüldüğü gibi I ile ifade edilen görüntünün G ile temsil edilen Gauss filtresinden geçirilmesi ile oluşturulmuştur. Gauss filtre fonksiyonu ise Eş. 4.28'de verilmiştir.

$$G(x,y,\sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} * e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad 4.28$$

$$L(x,y) = G(x,y,\sigma) * I(x,y) \quad 4.29$$

Değişmeyen özniteliklerin bulunması için Eş. 4.30'daki Gausslar farkı (DoG) fonksiyonu kullanılmaktadır.

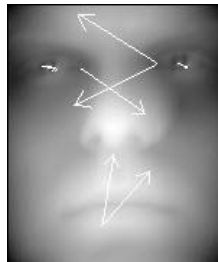
$$\begin{aligned} D(x,y,\sigma) &= (G(x,y,k\sigma) - G(x,y,\sigma)) * I(x,y) \\ &= L(x,y, k\sigma) - L(x,y, \sigma) \end{aligned} \quad 4.30$$

Kilit noktaların tespiti: Görüntüde tespit edilen öznitelik değerleri karşıtlık değerlerine veya kenarlarda olup olmasına bakılarak elenir. Çünkü düşük karşıtlık değerli veya kenarlarda bulunan öznitelikler iyi tanımlayıcı özelliklere sahip olmamaktadır.

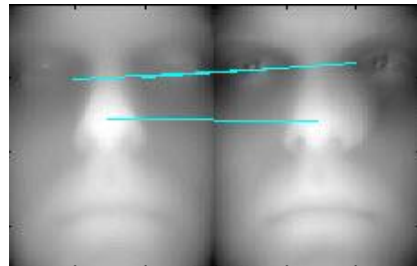
Yönelimlerin Tespit Edilmesi: Belirlenen öznitelik değerlerinin uzamsal türevleri alınarak her birinin yönelimleri bulunur. Bu yönelimler ile bir yönelim histogramı oluşturulur. Bu histogramda tepe yapan yönelimler öznitelik için yönelim vektörü olarak belirlenir. Bu işlem ile öznitelik dönmelerden bağımsız hale getirilmiş olur.

Betimleyici vektörlerin tanımlanması: Kilit noktaların etrafındaki bölge 4*4'lük alt bölgeye ayrılır. Her alt bölge için 8 adet binden oluşan histogram oluşturulur ve eşit yönelimler Gauss penceresi tarafından ağırlıklandırılır. Son olarak öznitelikler için 4*4*8 olmak üzere 128 boyutlu betimleyici vektörler çıkarılır.

SIFT yöntemi herhangi iki 2B görüntüdeki benzer bölgelerin bulunmasında kullanıldığı gibi 2.5B olarak da adlandırılan görüntülerin benzerliklerini tespit etmede de kullanılmaktadır [64]. Fotometrik stereo sonucu elde edilen 2.5B veri ya da yükseklik haritaları üzerinde SIFT yöntemi uygulandığında Şekil 4.14'deki öznitelik vektörü elde edilmektedir ve iki yüzün karşılaştırılmasında bu öznitelikler kullanılarak eşleşen noktalar bulunmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4.14. Yükseklik haritasından çıkarılan SIFT öznitelik vektörleri ve eşleşme örneği

- a) SIFT ile elde edilen öznitelik vektörlerinin gösterilmesi
- b) İki yüz üzerindeki eşleşmiş SIFT öznitelikleri

Şekil indisi haritaları da birer görüntü olmasından dolayı SIFT yöntemi, bunlar üzerinde kolayca uygulanabilmektedir [62]. Şekil 4.15’de görüldüğü gibi yükseklik haritasından şekil indisi haritası oluşturulur ve SIFT yöntemi uygulanır.



Şekil 4.15. Yükseklik haritasından oluşturulan şekil indislerini kullanarak SIFT özniteliklerinin bulunma diyagramı

Yükseklik haritasından şekil indis haritası oluşturulduktan sonra SIFT yönteminin uygulanması ile de Şekil 4.16’deki öznitelik vektörleri oluşturulmuştur. Öznitelik vektörlerinin artması ile de eşleşen noktalar fazlalaşmaktadır. Bu da yüz tanıma sisteminin performansını büyük ölçüde arttırmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4.16. Şekil indisi haritasından çıkarılan SIFT öznitelik vektörleri ve eşleşme örneği

- a) SIFT ile şekil indisinden elde edilen öznitelik vektörlerinin gösterilmesi
- b) İki yüzün şekil indisi haritaları üzerindeki eşleşmiş SIFT öznitelikleri

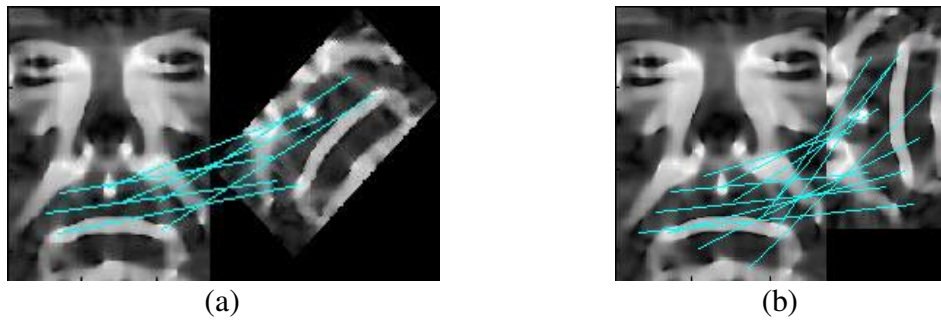
Ayrıca bazı durumlarda karşılaştırmanın yapılacağı yüzün tamamı olmayabilir. Yani görüntüleme esnasında test görüntüsünün sadece bir bölümü görüntülenebilir. Bu

durumda veritabanındaki referans yüzler ile test yüzü aynı boyutta olmayabilir. Bu nedenle öncelikle yüzün hangi bölümünün görüntülendiğinin tespiti yapılmalıdır. Yani iki yüzün benzer parçalarının karşılaştırılması gerekmektedir. Bu da zor bir durumdur. Bu bölümde de anlatıldığı gibi SIFT öznitelikleri görüntünün boyutundan, ölçekten, dönmelerden bağımsızlığı ve ışık etkilerinden de kısmi bağımsızlığı nedeniyle yüzün tamamının olmadığı durumlarda kullanılabilir. Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de görüldüğü gibi yüzün tamamı ile bir kısmının şekil indislerinden çıkarılan SIFT öznitelikler ile herhangi bir karşılaştırma işlemi uygulanmadan eşleştirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Tüm yüz ile yüzün bir bölümünün SIFT yöntemi ile eşleştirilmesi

- a) Yüzün gözlerin bulunduğu yarısının eşleştirilmesi
- b) Yüzün ağız kısmının bulunduğu yarısının eşleştirilmesi



Şekil 4.18. Yüzün ağız kısmının bulunduğu yarısının döndürülerek eşleştirilmesi

- a) Yüz parçasının saat yönünün tersinde 45° döndürülerek eşleştirilmesi
- b) Yüz parçasının saat yönünün tersinde 90° döndürülerek eşleştirilmesi

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışması sürecinde farklı yüz tanıma algoritmaları fotometrik stereo ile oluşturulan 3B yüz verileri üzerinde denenmiştir. Bu bölümde öncelikle üzerinde deneylerin yapıldığı yüz veritabanı yapısı anlatılmıştır. Daha sonra bu veritabanı kullanılarak test ve referans 3B yüz görüntüleri oluşturulmuş ve bu görüntüler gösterilmiştir. Oluşturulmuş 3B veriler ile çeşitli yüz tanıma algoritmaları test edilmiş ve tanıma sonuçları detaylı olarak verilmiştir.

5.1. Yale B ve Genişletilmiş Yale B Yüz Veritabanları

Bu çalışmada 10 farklı kişinin yüz görüntülerinin bulunduğu Yale B ve 28 farklı kişinin yüz görüntülerinin bulunduğu genişletilmiş Yale B veritabanları [7] kullanılmıştır. Şekil 5.1'deki görüntüleme sistemi ile Şekil 5.2'de görülen toplamda 38 kişinin yüz görüntüleri Şekil 5.3'deki gibi 64 farklı yönden tek tek aydınlatılarak alınmıştır. Her bir görüntü 640 * 480 boyutunda ve gri seviyelidir.



Şekil 5.1. Yale B ve genişletilmiş Yale B yüz veritabanlarının görüntüleme sistemi



Şekil 5.2. Yale B ve genişletilmiş Yale B yüz veritabanlarını oluşturan bireyler



Şekil 5.3. 64 farklı aydınlatma altında görüntülenmiş insan yüzü görüntüleri

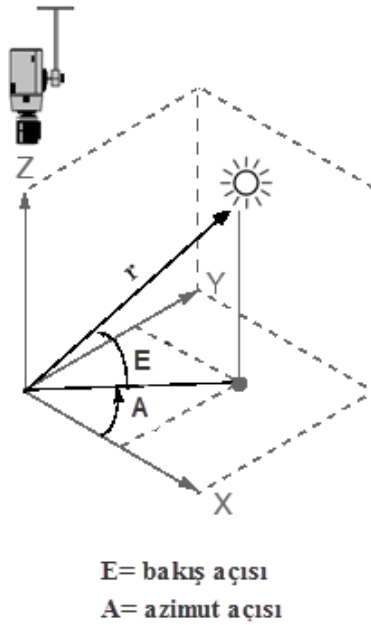
Bölüm 2.4’de anlatıldığı gibi fotometrik stereo yönteminde aydınlatma yönlerinin bilinmesi gerekmektedir. Yale B ve genişletilmiş Yale B yüz veritabanlarında bulunan görüntülerle beraber aydınlatma yönleri de verilmektedir. Bu aydınlatma yönleri Şekil 5.4’de görüldüğü gibi küresel koordinatları temsil eden bakış ve azimut açılarından oluşmaktadır. Aydınlatma yönlerinin fotometrik stereo yönteminde

kullanılabilmesi için küresel koordinatların kartezyen koordinatlara dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm Eş. 5.1, Eş. 5.2 ve Eş. 5.3 ile gerçekleştirilerek (x,y,z) ile temsil edilen kartezyen koordinatlar oluşturulmuştur.

$$x=r*\cos(E)*\cos(A) \quad 5.1$$

$$y=r*\cos(E)*\sin(A) \quad 5.2$$

$$z=r*\sin(E) \quad 5.3$$



Şekil 5.4. Bakış ve azimut açılarının gösterilmesi

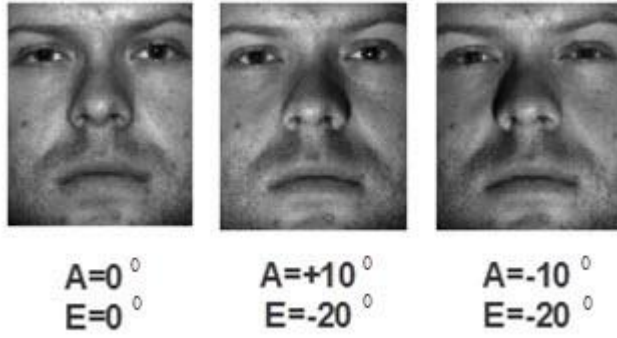
5.2. Yüz Karşılaştırmada Kullanılacak 3B Yüz Verilerinin Oluşturulması

Yapılan çalışmada her bir insan yüzüne ait 64 farklı görüntüden bakış ve azimut açılarına göre Çizelge 5.1'deki gibi deneysel olarak oluşturulmuş 10 farklı grup ele alınmıştır. Her bir grupta farklı aydınlatma açıları altında elde edilmiş Şekil 5.5'deki gibi 3 farklı görüntü bulunmaktadır.

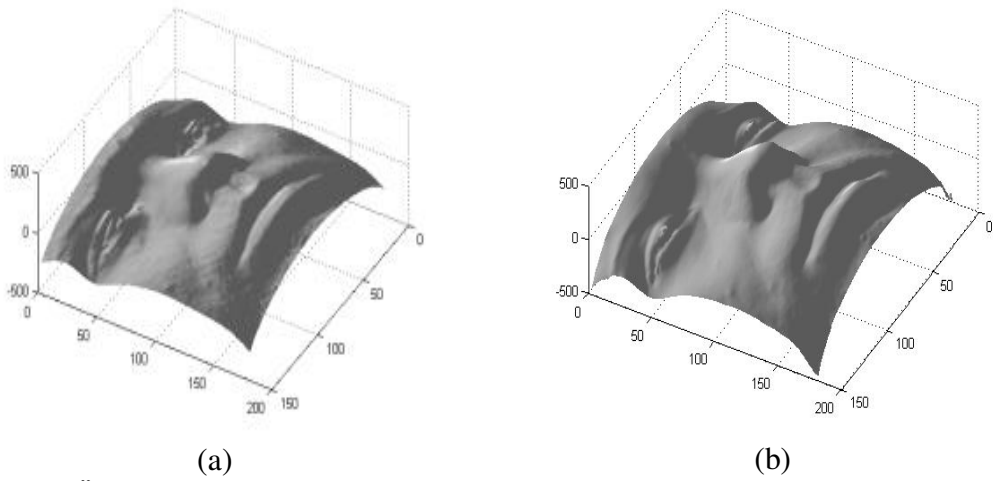
Çizelge 5.1. Aydınlanma açılarına göre deneysel olarak oluşturulmuş üç adet 2B görüntü içeren gruplar

Grup No	Azimet açısı (A) ^o	Bakış açısı (E) ^o
1	-5	-10
	+5	-10
	0	0
2	-10	-20
	+10	-20
	0	0
3	-15	+20
	+15	+20
	0	0
4	-20	-40
	+20	-40
	0	0
5	-20	+10
	+20	+10
	0	0
6	-20	-40
	0	0
	+20	+10
7	-20	+10
	0	0
	+15	+20
8	-35	-20
	+35	-20
	0	0
9	+10	-20
	+35	-20
	0	0
10	-20	-10
	+20	-40
	0	0

Çizelge 5.1’de bulunan her grup için 38 bireyin 3B test yüz görüntüleri Şekil 5.6’daki gibi oluşturulmuştur. Ayrıca 38 bireyin her birisini temsil edecek referans 3B görüntüler de oluşturularak yüz tanıma işlemine geçilmiştir.



Şekil 5.5. Örnek görüntüler ve aydınlanma açıları



Şekil 5.6. Örnek test ve referans 3B yüz görüntüleri

- a) Test 3B yüz görüntüsü
- b) Referans 3B yüz görüntüsü

Yale B ve genişletilmiş Yale B veritabanlarında her bir birey için farklı aydınlatma altında görüntülenmiş 64 adet 2B görüntü bulunmaktadır. Bu görüntülerden referans 3B veriye fotometrik stereo ile en yakın 3B veri üretilebilecek 3 adet 2B görüntünün seçilmesi için bütün 3'lü kombinasyonların denenmesi yerine genetik algoritma ile optimum şekilde 3'lü görüntülerin bulunması amaçlanmıştır. Azimut ve bakış açıları ile temsil edilmiş her bir görüntü bir gen olarak düşünülmüş 3 adet görüntünün birleşmesi ile de Çizelge 5.2'de görüldüğü gibi kromozomlar oluşturulmuştur. Kromozomlar üzerinde çaprazlama ve mutasyon işlemleri uygulanmıştır. Seçme işlemi ise rulet tekerleği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygunluk fonksiyonu olarak şekil indislerinin benzerlik ölçütü kullanılmıştır. Bu şekilde genetik algoritma çalıştırılmış ve Çizelge 5.3'de aydınlanma yönleri azimut ve bakış açıları ile verilmiş

5 görüntü grubu oluşturulmuştur. Bu görüntü gruplarından fotometrik stereo ile 3B veriler oluşturulmuş ve 3B yüz tanıma işleminde kullanılmıştır.

Çizelge 5.2. Her bir kromozomun yapısı

$A^{\circ}=0$	$A^{\circ}=+20$	$A^{\circ}=-35$
$E^{\circ}=-20$	$E^{\circ}=+10$	$E^{\circ}=+15$

Çizelge 5.3. Genetik algoritma ile aydınlanma açılarına göre oluşturulmuş üç adet 2B görüntü içeren gruplar

Grup No	Azimut açısı (A) $^{\circ}$	Bakış açısı (E) $^{\circ}$
1	0	-20
	+20	+10
	-35	+15
2	+20	+10
	-15	+20
	-20	-40
3	+20	+10
	-20	+10
	-20	-40
4	-15	+20
	+50	0
	0	-35
5	-20	+10
	+20	-40
	+35	+15

5.3. Yüz Tanıma Sonuçları

3.Bölümdeki yüz tanıma yöntemleri Bölüm 5.2’de deneysel olarak oluşturulmuş 10 grup ve genetik algoritma ile oluşturulmuş 5 grup üzerinde denenmiştir. Deneysel olarak oluşturulmuş gruplar kullanılarak elde edilmiş tanıma sonuçları Çizelge 5.4’de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre yükseklik haritalarının farklarının karesinin toplamının karekökü yöntemi en düşük sonucu vermiştir. ICP yönteminin başarısı biraz daha yüksek olmasına rağmen yeterli olamamıştır. 2B ilinti yöntemi basit bir karşılaştırma yöntemi olmasına rağmen ICP yönteminden daha başarılı sonuç vermiştir. Yüzey normallerine bakılarak yapılan karşılaştırmanın başarı yüzdesi çok yüksek olmuştur. Buradan yola çıkarak yüzey normallerinin yüzeyi temsil etmede

başarılı bir yöntem olduğu söylenebilmektedir. Yüzey özelliklerinin tanımlayan temel yüzey eğrilikleri ve türevlerinin yüz tanımadaki performansı incelendiğinde temel eğriliklerin ikisinin de kullanıldığı yöntemlerin başarı sonucu %84-89 arasında değişmiştir. Ortalama eğriliklerin kullanılması ile elde edilen tanıma sonuçları %90'lara kadar çıkarken Gauss eğriliklerinin verdiği sonuç düşük düzeylerde kalmıştır. Koenderink ve Doorn [5] tarafından önerilen eğilmişlik ve şekil indislerinin yüz tanımda kullanılması sonucu eğilmişlik değerlerinin kullanıldığı yöntemde başarı sonucu %85 civarında kalırken şekil indisi haritalarının arasındaki ilintiye bakılarak yapılan karşılaştırma yöntemi en başarılı sonucu vermiştir.

Çizelge 5.4. Deneysel olarak oluşturulmuş gruptan oluşturulan 3B yüz verileri üzerinde uygulanan yüz tanıma metodlarının yüz tanıma başarı oranları (%)

Grup Yöntem	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama
Farkların karesinin toplamının karekökü	34,21	44,74	18,42	44,74	26,32	36,84	26,32	39,47	47,37	44,74	36,32
İteratif en yakın nokta	68,40	71,00	68,4	65,70	71,00	36,80	71,00	52,60	47,30	26,30	57,85
2B İlinti	57,89	76,32	84,21	68,42	89,47	71,05	86,84	68,42	81,58	81,58	76,58
Normaller arasındaki açının ort.	94,73	97,36	97,36	94,73	100	94,73	97,36	94,73	94,73	94,73	96,04
Temel eğrilikler farkı	78,94	86,84	81,57	78,94	81,57	84,21	81,57	76,31	76,31	84,21	81,04
Temel eğrilikler ilintisi	81,57	92,10	89,47	89,47	92,10	89,47	92,10	84,21	86,84	89,47	88,68
Ortalama eğrilik farkı	78,95	86,84	84,21	84,21	81,58	84,21	84,21	81,58	81,58	86,84	83,42
Ortalama eğrilik ilintisi	84,21	89,47	94,74	86,84	89,47	92,11	94,74	86,84	89,47	92,11	90,00

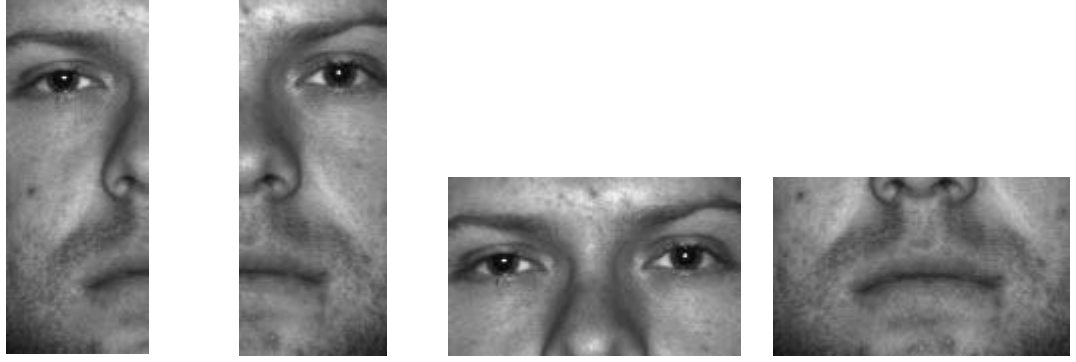
Gauss eğriliği farkı	44,74	52,63	57,89	47,37	65,79	31,58	55,26	50,00	36,84	52,63	49,47
Gauss eğriliği ilintisi	63,16	76,32	78,95	76,32	68,42	57,89	73,68	71,05	68,42	76,32	71,05
Eğilmişlik farkı	65,79	89,47	73,68	84,21	65,79	68,42	76,32	55,26	63,16	81,58	72,37
Eğilmişlik ilintisi	81,58	94,74	92,11	86,84	86,84	89,47	92,11	68,42	76,32	86,84	85,53
Şekil indisi farkı	97,30	100	100	100	100	100	100	100	97,30	100	99,46
Şekil indisi ilintisi	97,30	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,73
Şekil indisi-SIFT	57,89	97,37	97,37	97,37	89,47	81,58	97,37	78,95	73,68	89,47	86,05

Genetik algoritma ile Bölüm 5.2’de bulunmuş 5 grup 2B görüntüden fotometrik stereo ile üretilen 3B yüz verileri üzerinde, Çizelge 5.4’de en iyi sonuçların alındığı şekil indisi ilintisi yöntemi uygulanmıştır. Çizelge 5.5’de görüldüğü gibi %100’lük başarı elde edilmiştir. 3B test yüz verilerinin referans 3B görüntüye olan yakınlığının artması yüz tanıma sonuçlarına olumlu etki yapmıştır.

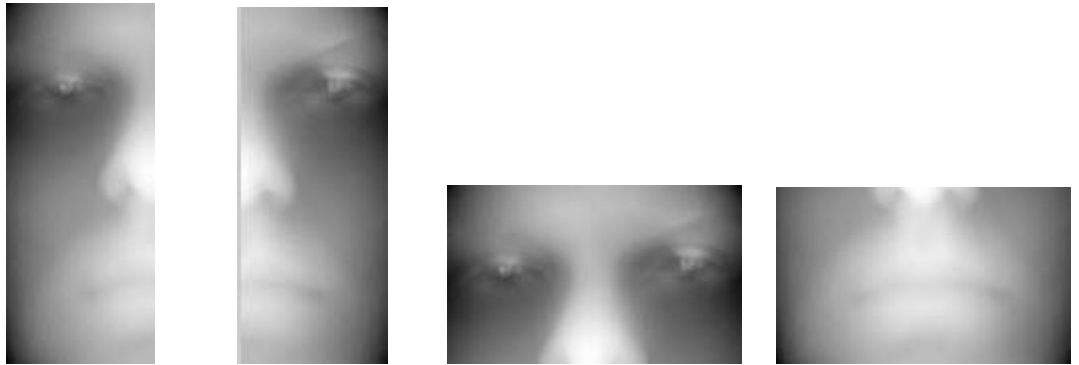
Çizelge 5.5. Genetik algoritma ile oluşturulmuş gruplardan üretilen 3B yüz verileri üzerinde uygulanan şekil indisi ilintisi metodunun yüz tanıma başarı oranları (%)

Grup Yöntem	1	2	3	4	5	Ortalama
Şekil indisi ilintisi	100	100	100	100	100	100

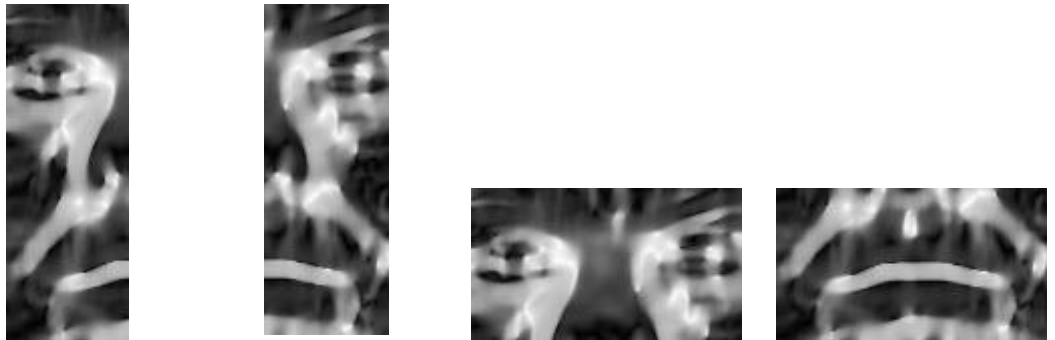
Ayrıca yüz görüntülerinin tamamının olmadığı durumlar da test edilmiştir. Bu durumu test etmek için yüz Şekil 5.7'deki gibi dikey ve yatay olmak üzere 4 parçaya ayrılmıştır. Her bir parçanın Şekil 5.8'de görülen yükseklik haritasından Şekil 5.9'daki şekil indisi haritaları oluşturulmuştur.



Şekil 5.7. Yüzün dikey ve yatay olarak dört parçaya ayrılması



Şekil 5.8. Çeşitli yüz parçalarının yükseklik haritaları



Şekil 5.9. Çeşitli yüz parçalarının şekil indisi haritaları

Şekil indisi haritalarından çıkarılan SIFT özneteliklerini eşleştirme işlemi yapılarak deneysel olarak oluşturulmuş 10 gruptan üretilen 3B veriler üzerinde parça yüzler tam referans yüzlerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu Çizelge 5.6'da verilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde göz bölgesinin bulunduğu yüz yarısının başarısız sonuçlar verdiği ağız bölgesinin ve burun ucunun bulunduğu yarının ise daha başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Gözdeki parlamalar, kirpik ve kaş gibi öğeler fotometrik stereo yöntemi ile 3B oluşturma işleminde hatalar oluşturabilmektedir. Bu da 3B verinin doğruluğunu azaltabilen bir etken olabilmektedir. 3B yüz verisi oluşturmada ağız ve burun ucu bölgesinin göz bölgelerine göre daha az hataya neden olmaktadır. Bu nedenle burada ağız ve burun ucu bölgesi daha başarılı sonuçlar vermiştir.

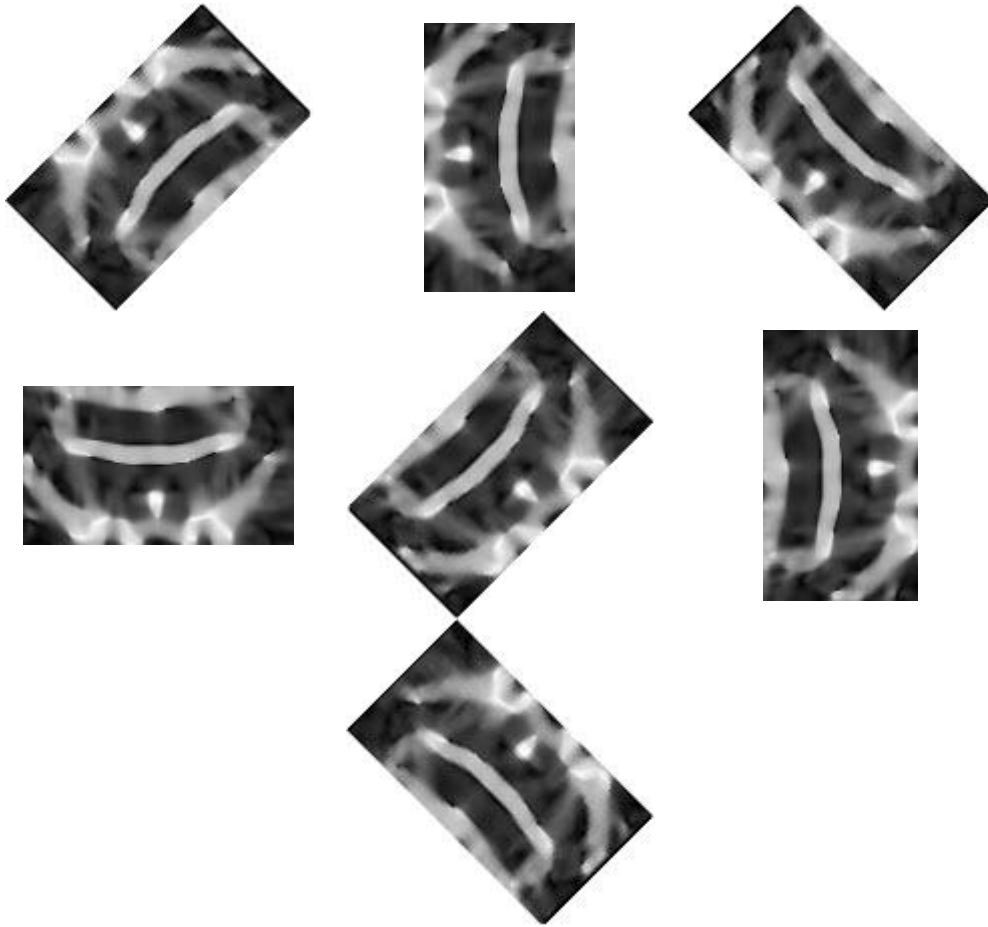
Çizelge 5.6. Deneysel olarak oluşturulmuş 2B görüntü gruplarından oluşturulan 3B yüz verileri üzerinde şekil indisinden çıkarılan SIFT tanımlayıcılarını eşleştirme yöntemi ile kısmi yüz tanıma başarı oranları (%)

Grup Bölge	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama
Sol dikey yarı	28,95	89,47	63,16	73,68	47,37	34,21	73,68	50,00	34,21	63,16	55,79
Sağ dikey yarı	39,47	73,68	76,32	73,68	57,89	47,37	71,05	50,00	36,84	65,79	59,21
Üst yatay yarı	13,16	36,84	42,11	26,32	28,95	15,79	36,84	15,79	0	23,68	23,95
Alt yatay yarı	50,00	86,84	89,47	92,11	89,47	73,68	97,37	84,21	68,62	89,47	82,11

Genetik algoritma ile Bölüm 5.2'de bulunmuş 5 grup kullanılarak üretilmiş 3B test görüntüleri üzerinde de parçalı yüz karşılaştırma işlemi test edilmiştir. Çizelge 5.7'deki deneysel sonuçlar incelendiğinde 3B yüz verilerinin gerçeğe olan yakınlığının artması sonuçları olumlu etkilemiştir. Göz bölgesinin karşılaştırmadaki başarı sonuçları artmıştır. Ağız ve burun ucunun olduğu parçada ise yüksek başarı oranının elde edildiği gözlenmiştir.

Çizelge 5.7. Genetik algoritma ile oluşturulmuş 2B görüntü gruplarından oluşturulan 3B yüz verileri üzerinde şekil indisinden çıkarılan SIFT tanımlayıcılarını eşleştirme yöntemi ile kısmi yüz tanıma başarı oranları (%)

Grup Bölge	1	2	3	4	5	Ortalama
Sol dikey yarı	60,53	78,95	84,21	94,74	81,58	80,00
Sağ dikey yarı	78,95	81,58	84,21	47,37	76,32	73,68
Üst yatay yarı	44,74	63,16	53,63	44,74	44,74	50,00
Alt yatay yarı	97,37	97,37	100	92,11	100	97,37



Şekil 5.10. Yüzün ağız kısmının bulunduğu yarısının şekil indislerinin saat yönünün tersi yönde 45° açı ile döndürülmesi

Deneysel olarak oluşturulan 10 grup 2B görüntünün kullanılması ile üretilmiş 3B yüz verilerinden elde edilmiş yüz parçalarının döndürülerek gerçekleştirilen yüz karşılaştırma işleminde Çizelge 5.8’de görüldüğü gibi 90° ve katlarındaki döndürmelerde başarı sonuçları çok değişiklik göstermezken 45° ve katlarındaki döndürmelerde başarı sonuçları bir miktar düşmektedir.

Çizelge 5.8. Deneysel olarak oluşturulmuş 2B görüntü gruplarından oluşturulan 3B yüz verilerindeki ağız ve burun ucunun olduğu parçanın belli açılarda döndürülerek şekil indisinden çıkarılan SIFT tanımlayıcıları eşleştirme yöntemi uygulanması ile elde edilmiş yüz tanıma başarı oranları (%)

Grup Açı°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama
45°	47,37	86,84	76,32	86,84	68,42	47,37	76,32	68,42	52,63	73,68	68,42
90°	44,74	94,74	94,74	94,74	86,84	76,32	92,11	84,21	68,42	86,84	82,37
135°	47,37	86,84	78,95	89,47	60,53	52,63	76,32	71,05	55,26	73,68	69,21
180°	44,74	94,74	92,11	92,11	86,84	76,32	92,11	76,32	63,16	84,21	80,26
225°	47,37	84,21	73,68	81,58	65,79	55,26	76,32	71,05	50,00	76,32	68,16
270°	50,00	89,47	94,74	94,74	89,47	71,05	92,11	86,84	68,42	81,58	81,84
315°	47,37	86,84	76,32	86,84	68,42	52,63	76,32	65,79	50,00	68,42	67,89

Genetik algoritma ile oluşturulan 5 grup 2B görüntünün kullanılmasından üretilen 3B yüz verilerinden elde edilmiş yüz parçaları döndürülerek Çizelge 5.9’da görülen tanıma sonuçları oluşturulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde yine 90° ve katlarındaki döndürmelerde başarı oranları çok az değişirken 45° ve katlarındaki döndürmelerde başarı oranları bir miktar düşmüştür.

Çizelge 5.9. Genetik algoritma ile oluşturulmuş 2B görüntü gruplarından oluşturulan 3B yüz verilerindeki ağız ve burun ucunun olduğu parçanın belli açılarda döndürülerek şekil indisinden çıkarılan SIFT tanımlayıcıları eşleştirme yöntemi uygulanması ile elde edilmiş yüz tanıma başarı oranları (%)

Grup Açı°	1	2	3	4	5	Ortalama
45°	86,84	86,84	92,11	71,05	86,84	84,74
90°	94,74	97,37	100	86,84	97,37	95,26
135°	81,58	86,84	89,47	73,68	92,11	84,74
180°	94,74	94,74	92,11	86,84	97,37	93,16
225°	84,21	81,58	89,47	71,05	89,47	83,16
270°	97,37	94,74	94,74	81,58	97,37	93,16
315°	84,21	81,58	92,11	65,79	92,11	83,16

6. SONUÇ

Bu tezde kullanımı kolay, etkili ve yüksek başarı sağlayan bir 3B yüz tanıma yöntemi önerilmiştir. 2B yüz tanıma sistemlerinin zorlu şartlarda tam olarak başarılı olamaması durumlarında 3B yüz tanıma sistemleri tercih edilmektedir. Yapılan deneylerde 64 farklı aydınlanma açısı altında görüntülenmiş toplam 38 bireyin görüntülerini bulunduran Yale B ve genişletilmiş Yale B veritabanları kullanılmıştır. 3B test verileri için aydınlanma açılarına göre her bireye ait 3 görüntü içeren 10 grup deneysel olarak 5 grup ise genetik algoritma ile oluşturulmuştur. Bu gruplar kullanılarak 3B test verileri fotometrik stereo yöntemi ile hızlı ve gerçeğe yakın bir şekilde üretilmiştir. Elde edilen 3B veriler farklı 3B yüz tanıma teknikleri ile test edilmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Farkların karesinin toplamının karekökü metodu doğrudan yükseklik haritaları üzerinde test edilmiş ve çok düşük sonuçlar vermiştir. Birçok 3B yüz tanıma çalışmasında kullanılan ICP metodunun başarısı da sınırlı olmuştur. Basit bir yöntem olan 2B ilinti yönteminin performansının çok da düşük olmadığı görülmüştür. Yüzey normallerinin arasındaki açıların kullanıldığı metotta yüksek başarı elde edilmiştir. Temel yüzey eğriliklerinin beraberce kullanıldığı metot, ortalama eğriliklerin kullanıldığı metotlara göre düşük sonuç verirken Gauss eğriliklerinden daha yüksek başarı sonucu vermiştir. Koenderink ve Doorn'un [5] yüzey karakteristiğini daha iyi tanımladığını belirttiği yöntemlerden ilki olan eğilmişlik değerlerinin kullanıldığı yüz tanıma işleminde ortalama eğrilik değerlerinin kullanıldığı yöntemin sonucuna göre yüksek başarı elde edilememiştir. Fakat önerdiği diğer tanımlayıcı olan şekil indislerinin kullanıldığı yüz tanıma performansının diğer tekniklerin performansına göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Ayrıca yüzün tamamı olmadan da yüz tanıma işleminin gerçekleştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tezde ihtiyacı karşılayacak bir yöntem önerilmiştir. Yüz parçasının 3B verisinden şekil indisleri oluşturulmuş ve şekil indisi haritasından SIFT yöntemi kullanılarak öznitelikler çıkarılmıştır. Kısmi yüz ile referans yüzlerin öznitelik eşleştirilmesi yapılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar analiz edildiğinde ağız bölgelerinin ve burun ucunun bulunduğu yüz parçalarının tanıma sonuçlarının daha başarılı olduğu görülmüştür. Literatürdeki çalışmalar

incelendiğinde ise burun bölgelerinin yüz tanıma daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür [65, 66]. Bu tezde kullanılan veritabanlarındaki [7] yüz görüntüleri, fotometrik stereo gereği, sabit görüntüleme sistemi ile hareketsiz olarak alındığı için ağız bölgelerinde ifadeler bulunmamaktadır. Bu durumun ağız bölgelerinin başarısının yüksek olmasında bir etken olduğu düşünülmektedir. Göz kısımlarının fotometrik stereo ile 3B oluşturma işleminde parlamalardan, kirpik ve kaş gibi öğelerden daha fazla olumsuz etkilenmesinden dolayı tanıma işleminde performansı düşük olmuştur. Genetik algoritma ile oluşturulmuş görüntü gruplarından fotometrik stereo ile elde 3B yüz verilerinin başarı oranları, 3B yüz verilerinin referans 3B veriye daha yakın olmasından dolayı yüksek olmuştur. Ek olarak parçalı yüzler belirli açılarda döndürülerek de yüz tanıma işlemi gerçekleştirilmiştir. 90° ve katlarındaki döndürmelerde yüz tanıma sonuçları az değişiklik gösterirken 45° ve katlarındaki döndürmelerde yüz tanıma performansı bir miktar düşmüştür. Yöntemin dönmelere karşı dayanıklı olması, SIFT ve shape index metotlarının dönmelerden minimum oranda etkilenmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Bu tezde ele alınmış yüz tanıma yöntemleri 38 bireyin görüntülerinin bulunduğu bir veritabanı [7] üzerinde denenmiştir. Bu yöntemleri daha çok bireyin görüntülerinin bulunduğu geniş veritabanları üzerinde denemek daha faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Abate, A. F., Nappi, M., Riccio, D., Sabatino, G., "2D and 3D face recognition: a survey", *Pattern Recognition Letters*, 28 (14): 1885–1906 (2007).
2. Li, S. Z., Jain, A. K., "Handbook of Face Recognition", *Springer Verlag*, 1-2 (2005).
3. Smeets, D., Claes, P., Vandermeulen, D., Clement, J. G., "Objective 3D face recognition : evolution, approaches and challenges", *Forensic Science International*, 201: 125-132 (2010).
4. Patil, A. M., Kolhe, S.R., Patil, P. M., "2D face recognition techniques: A survey", *International Journal of Machine Intelligence*, 2 (1): 74-83 (2010).
5. Koenderink J. J., Van Doorn, A. J., "Surface shape and curvature scales", *Image and Vision Computing*, 10: 557-565 (1992).
6. Lowe, D. G., "Distinctive image features from scale-invariant keypoints", *International Journal of Computer Vision*, 60 (2): 91-110 (2004).
7. Internet: Yale University, "Yale Face Database B and Extended Yale Face Database B", <http://cvc.yale.edu/projects/yalefacesB/yalefacesB.html>, (2010).
8. Widanagamaachchi, W. N., Dharmaratne, A. T., "3D face reconstruction from 2D images A survey", *Digital Image Computing: Techniques and Applications*, 365-371 (2008).
9. Takaya, K., "Stereo disparity measurement for binocular stereo video systems", *International Joint Conference on Instrumentation, Control and Information Technology*, 2648-2651 (2009).
10. Uchida, N., Shibahara, T., Aoki, T., Nakajima, H., Kobayashi, K., 3D face recognition using passive stereo vision, *Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing*, 950-953 (2005).
11. Oram, D., "Rectification for any epipolar geometry", *British Machine Vision Conference*, (2001).
12. Strat, A. K., Oliveira, M. M., "A point-and-shoot color 3D camera", *Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 483- 490 (2003).
13. Ozturk, A. O., Buyukatalay, S., Birgul, O., "Generating height map of cartridge case by using single camera and single structured light source", *IEEE 18th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 340-343 (2010).

14. Wickramaratne, V. K. D. W., Ryazanov, V. V., Vinogradov, A. P., "Accurate reconstruction of 3D model of a human face using structured light", ***Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Math. Theory Appl.***, 18 (32): 442 (2008).
15. Ozturk, A. O., Halici, U., Ulusoy, I., Akagunduz, E., "3D face reconstruction using stereo images and structured light," ***IEEE 16th Signal Processing, Communication and Applications Conference***, 1-4 (2008).
16. Horn, B. K. P., "Shape from shading: A method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view", ***Massachusetts Inst. of Technology Artificial Intelligence Laboratory***, 37 – 43 (1970).
17. Söll, S., Roithe, B., Moritz, H., "Three-dimensional surface test with shape-from- shading", ***Photonik International-Image Capture and Processing***, 74-76 (2006).
18. Zhang, R., Tsai, P. S., Cryer, J.E., Shah, M., "Shape from shading: A survey", ***IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence***, 21(8): 690-706 (1999).
19. Woodham, R. J., "Photometric method for determining surface orientation from multiple images", ***Optical Engineering***, 19 (1) 139–144 (1980).
20. Wu, J., "Rotation invariant classification of 3D surface texture", Doktora Tezi, ***Heriot-Watt University***, Edinburgh (2002).
21. Coleman, Jr. N. E., Jain, R. "Obtaining 3-dimensional shape of textured and specular surfaces using four-source photometry", ***Proc. Int. Conf. Color in Graphics and Image Processing (CGIP)***, 18: 309-328 (1982).
22. Healey, G., Jain, R., "Depth recovery from surface normals", ***International Conference on Pattern Recognition (ICPR)***, 894–896 (1984).
23. Wu, Z., Li, L., "A line-integration based method for depth recovery from surface normals", ***9th International Conference on Pattern Recognition***, 43: 53-66 (1988).
24. Horn, B. K. P., Brooks, M. J., "The variational approach to shape from shading", ***Computer Vision, Graphics, and Image Processing***, 33: 174–208 (1986).
25. Frankot, R. T., Chellappa, R., "A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms", ***IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence***, 10: 439–451 (1988).

26. Buyukatalay, S., Birgul, O., Halici, U., "Iterative photometric stereo with shadow and specular region detection for 3D reconstruction", *IEEE 17th Signal Processing and Communications Applications Conference*, 305-308 (2009).
27. Thiele, H., Klette, R. "Integration techniques for 3D surface reconstruction", *Computer Graphics International (CGI)*, 575 (1998).
28. Bronstein, A., Bronstein, M., Spira, A., Kimmel, R., "Face recognition from facial surface metric", *Proc. European Conference on Computer Vision*, 225-237 (2004).
29. Kee, S., Lee K., Lee, S., "Illumination invariant face recognition using photometric stereo", *IEICE Trans. Inf & Syst*, 83(7): (2000).
30. Bledsoe, W. W., "The model method in facial recognition", *Technical report PRI 15, Panoramic Research Inc.*, Palo Alto (1964).
31. Xu, C., Wang, Y., Tan, T., Quan, L., "Depth vs. intensity: Which is more important for face recognition? ", *Proc. 17th Internat. Conf. On Pattern Recognition (ICPR 2004)*, 4: 342-345 (2004).
32. Bowyer, K. W., Chang, K. Y., Flynn, P., "A survey of 3D and multi-modal 3D+2D face recognition", *Journal of Computer Vision and Image Understanding*, 1 (101): 1-15 (2006).
33. Scheenstra, A., Ruifrok, A., Veltkamp, R. C., "A survey of 3D face recognition methods", *International Conference on Audio- and Video-based Biometric Person Authentication*, 891-899 (2005).
34. Jaiswal, S., Bhadauria, S., Jadon, R., Divakar, T., "Brief description of image based 3D face recognition methods", *Computer Imaging, Vision, Pattern Recognition and Graphics*, 1(4): 1-15 (2010).
35. Papatheodorou, T., Rueckert, D., "3D Face Recognition", *I-Tech*, 417 - 446 (2007).
36. Wei, L., Lee, E. J., "3D face recognition using face feature points based on parallel stereo vision", *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, 4 (1): 86-95 (2010).
37. Wu, X., Dai, C., Liu, J., "A novel approach for face recognition based on stereo image processing algorithm", *International Conference on Audio, Language and Image Processing*, 1245 - 1249 (2008).
38. Kosov, S., Scherbaum, K., Faber, K., Thormahlen, T., Seidel, H. P., "Rapid stereo-vision enhanced face recognition", *Proceedings of 2010 IEEE 17th International Conference on Image Processing*, 7-10 (2010).

39. Tsalakanidou, F., Forster, F., Malassiotis, S., Strintzis, M.G., "Real-time acquisition of depth and color images using structured light and its application to 3D face recognition", *Real-Time Imaging, Special Issue on Multi-Dimensional Image Processing*, 11: 358-369 (2005).
40. Choudhury, D., "Three-dimensional face recognition using shape codes extracted from projected structured light patterns", *IET International Conference*, 161 - 166 (2006).
41. Song, H., Yang, U., Lee, S., Sohn, K., "3D face recognition based on facial shape indexes with dynamic programming", *In Proceedings of ICB*, 3832: 99-105 (2006).
42. Shin, H., Sohn, K., "3D face recognition with geometrically localized surface shape indexes", *9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, 1 - 6 (2006).
43. Smith, W. A. P., Hancock, E. R., "Face recognition using shape from-shading," *13th British Machine vision Conference*, 2: 597-606 (2002).
44. Yang, G., Xue, F., Feng, G., Suen, C. Y., "Robust face recognition under varying light based on 3D recovery", *Journal of WSCG*, (2008).
45. Hansen, M. F., Atkinson, G. A., "Biologically inspired 3D face recognition from surface normals", *Proceedings of the International Conference and Exhibition on Biometrics Technology*, 2: 26-34 (2010).
46. Lu, X., Colbry, D., Jain, A.K., "Three-dimensional model based face recognition", *17th Internat. Conf. on Pattern Recognition*, 362–366 (2004).
47. Moreno, A.B., Sanchez, A., Velez, J., Diaz, J., "Face recognition using 3D local geometrical features: PCA vs. SVM", *Proceedings of the 4th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, 185 – 190 (2005).
48. Mahoor, M. H., Mottaleb, M. A., "3D face recognition based on 3D ridge lines in range data", *IEEE International Conference on Image Processing*, (2007).
49. Yunqi, L., Dongjie, C., Meiling, Y., Qingmin, L., Zhenxiang, S., "3D face recognition by surface classification image and PCA", *Second International Conference on Machine Vision*, 145-149 (2009).
50. Zhang, L. C., Chen, J. W., Lu, Y., Wang, P. "Face recognition using scale invariant feature transform and support vector machine", *9th International Conference for Young Computer Scientists*, 1766-1770 (2008).

51. Majumdar, A., Ward, R. K., “Discriminative SIFT features for face recognition”, *In Proc. of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 27-30 (2009).
52. Berretti, S., Del Bimbo, A., Pala, P., Ben Amor, B., Daoudi, M., “Selected SIFT features for 3D facial expression recognition”, *20th International Conference on Pattern Recognition*, 4125-4128 (2010).
53. Huang, D., Zhang, G., Ardabilian, M., Wang, Y., Chen, L., “3D face recognition using distinctiveness enhanced facial representations and local feature hybrid matching”, *Fourth IEEE International Conference on Biometrics: Theory Applications and Systems (BTAS)*, 1-7 (2010).
54. Petpon, A., Srisuk, S., “Face recognition with local line binary pattern”, *Fifth International Conference on Image and Graphics*, 533-539, (2009).
55. Krizaj, J., Struc, V., Pavesic, N., “Adaptation of SIFT features for face recognition under varying illumination”, *Proceedings of the 33rd International Convention*, 691-694 (2010).
56. Nabatchian, A., Abdel R. E., Ahmadi, M., “An efficient method for face recognition under illumination variations”, *International Conference High Performance Computing and Simulation*, 432-435 (2010).
57. Besl, P. J., McKay, N. D., “A method for registration of 3D shapes”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, 14 (2): 239-256 (1992).
58. Gökberk, B., “Three dimensional face recognition”, Doktora Tezi, *Boğaziçi Üniversitesi*, İstanbul (2006).
59. Gordon, G. G., “Face recognition from depth maps and surface curvature”, *Geometric Methods in Computer Vision*, 1570: (1991).
60. Krsek, P., Lukács, G., Martin, R. R., “Algorithms for computing curvatures from range data”, *Mathematics of Surfaces VIII*, 3: 1–16 (1998).
61. Sakarya, U., “A method for analysis and comparison of criminologically useful marks that are created by metal-metal interaction”, *International patent*, (2009).
62. Bayramoglu, N., Alatan, A. A., “Shape index SIFT: Range image recognition using local features”, *20th International Conference Pattern Recognition (ICPR)*, 352-355 (2010).
63. Dorai, C., Jain, A., “Cosmos - a representation scheme for 3d free-form objects”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19 (10): 1115–1130 (1997).

64. Lo, T., Siebert, J. P., “Local feature extraction and matching on range images: 2.5D SIFT”, *Computer Vision and Image Understanding*, 113 (12): 1235-1250 (2009).
65. Chang, K. I., Bowyer, K. W., Flynn, P. J., “Multiple nose region matching for 3D face recognition under varying facial expression”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1695–1700 (2006).
66. Alyuz, N., Gokberk, B., Akarun, L., “Regional registration and curvature descriptors for expression resistant 3D face recognition, ”*IEEE 17th Signal Processing and Communications Applications Conference*, 544-547 (2009).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TEMİZKAN, Ebubekir
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 06.08.1982 Kayseri-Yahyalı
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 284 47 13
 e-mail : ebekirtemizkan@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/ Bilgisayar Bilimleri	2011
Lisans	Maltepe Üniversitesi/ Bilgisayar Mühendisliği	2007
Lise	Yahyalı Yahyagazi Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008- Devam ediyor	TÜBİTAK Uzak Tekn. Araştırma Enst.	Araştırmacı
2007- 2008	TÜBİTAK MAM Bilişim Teknolojileri Enst.	Araştırmacı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Temizkan, E. , Bilge, H.Ş. , “Fotometrik Stereo Kullanarak Şekil İndisi Tabanlı 3B Yüz Tanıma”, IEEE 17. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, Antalya (2011).
2. Temizkan, E. , Önal, K. , ”A Design for Practical Fault Tolerance in Java Accessing Native Code”, 2nd International Symposium on Computing in Science and Engineering, Kuşadası (2011).

Hobiler

Masa Tenisi, Futbol