

**YÜZ İFADELERİNİN DUYGUSAL OLARAK DEĞİŞİKLİĞE UĞRATILIP
ÜÇ BOYUTLU YÜZ CANLANDIRMASI ÜRETİLMESİ VE SİSTEMİN
İMGE EŞLEME İLE GELİŞTİRİLMESİ**

YUSUF OSMANLIOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2009

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Doç. Dr. Erdoğan DOĞDU
Anabilim Dalı Başkanı

Yusuf OSMANLIOĞLU tarafından hazırlanan YÜZ İFADELERİNİN DUYGUSAL OLARAK DEĞİŞİKLİĞE UĞRATILIP ÜÇ BOYUTLU YÜZ CANLANDIRMASI ÜRETİLMESİ VE SİSTEMİN İMGE EŞLEME İLE GELİŞTİRİLMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. M. Fatih DEMİRCİ
Tez Danışmanı

Prof. Dr. Bülent ÖZGÜÇ
İkinci Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Oğuz ERGİN

Üye : Yrd. Doç. Dr. M. Fatih DEMİRCİ

Üye : Doç. Dr. Kemal BIÇAKÇI

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.

Yusuf OSMANLIOĞLU

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Bilgisayar Mühendisliği
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. M. Fatih DEMİRCİ
İkinci Tez Danışmanı : Prof. Dr. Bülent ÖZGÜÇ
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Ağustos 2009

Yusuf OSMANLIOĞLU

**YÜZ İFADELERİNİN DUYGUSAL OLARAK DEĞİŞİKLİĞE UĞRATILIP
ÜÇ BOYUTLU YÜZ CANLANDIRMASI ÜRETİLMESİ VE SİSTEMİN
İMGE EŞLEME İLE GELİŞTİRİLMESİ**

ÖZET

Bu tez çalışmasında, üç boyutlu bir sanal yüz ifadesi canlandırma sistemi tanıtılmıştır. Önerilen sistem, işaretçi tabanlı olarak elde mevcut bulunan performans bilgisinden faydalanarak, sisteme sağlanan üç boyutlu sanal kafa modeli üzerinde yüz ifadelerinin canlandırmasını oluşturmaktadır. Oluşturulan canlandırma yüz ifadeleri, göz ve göz kapağı hareketleri, kafanın konum değiştirme ve dönme hareketlerinden oluşmaktadır. Geliştirilen sistemde, canlandırmanın oluşturulması sırasında kullanılan yüz ifadelerinin duygusal olarak değiştirilmesine olanak sağlanmaktadır. Oluşturulan canlandırmaya sınırlı olma, şaşırma, üzgün olma, uykulu olma ya da mutlu olma halleri eklenerek, bir performans verisinden farklı yüz canlandırmaları elde edilebilmektedir. Çalışma sırasında bir de nesne eşleme yöntemi geliştirilmiştir. Nesne eşleme, görüntü işleme alanındaki temel problemlerdendir. Geliştirilen yöntem ile nesne eşleme problemi çizge eşleme problemine dönüştürülerek çözülmektedir. Önerilen yöntemde, aralarında eşleme bulunacak olan çizgelerin l_1 normuna gömülmesi ile oluşan iki dağılım arasında Toprak Taşıyıcı Mesafesi algoritması kullanılarak benzerlik değeri bulunmaktadır. Geliştirilen sistemin ve nesne eşleme yönteminin başarımları tezde sunulmuştur. Bu tez çalışmasında ayrıca, geliştirilen yüz ifadesi canlandırma sistemi ve nesne eşleme yönteminin birlikte kullanılmasıyla oluşturulacak bir sistemin tasarımı önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüz canlandırması, Performans yakalama, Nesne eşleme, İmge eşleme

University : TOBB Economics and Technology University
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Computer Engineering
Supervisor : Assistant Professor Dr. M.Fatih DEMİRCİ
Co – advisor : Professor Dr. Bülent ÖZGÜÇ
Degree Awarded and Date : M.Sc. – August 2009

Yusuf OSMANLIOĞLU

**PRODUCING THREE-DIMENSIONAL FACIAL ANIMATION BY
MODIFYING FACIAL EXPRESSIONS EMOTIONALLY AND IMPROVING
THE SYSTEM WITH IMAGE MATCHING**

ABSTRACT

In this thesis study, a three-dimensional virtual facial expression animation system is presented. The proposed system produces facial animation on a three-dimensional head model that is supplied to the system. The animation is driven by an existing performance data based on marker positions. The generated animation includes facial expressions, eye and eyelid movements, and head's translation and rotation movements. The proposed system enables user to modify the facial expressions emotionally while generating a facial animation. The produced animation is allowed to be generated in neutral, angry, astonished, sad, sleepy, and happy emotional states. This way, the system facilitates the user to produce different facial animation from one facial motion capture data. During the thesis study, a novel object matching method is developed. Object matching is a major problem studied in computer vision. The proposed method solves the object matching problem by reformulating it to a graph matching problem. The proposed method first embeds two graphs to l_1 norm for generating point distributions. Then the similarity value between the two distributions is calculated by the Earth Mover's Distance algorithm. Furthermore, design of the structure of a hybrid system is proposed in this thesis study. The proposed hybrid method is a composition of the developed facial animation system and the object matching method. Performance analysis of the facial expression animation system and the object matching method is presented in the end.

Keywords: Facial animation, Performance capture, Object matching, Image matching.

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez çalışmam süresince beni yönlendiren değerli danışmanlarım Yrd. Doç. Dr. M. Fatih DEMİRCİ ve Prof. Dr. Bülent ÖZGÜÇ' e teşekkürü bir borç bilirim. Görüntü işleme ve bilgisayar grafiği alanlarındaki isabetli yönlendirmeleriyle ortaya çıkan bu tezde en büyük pay kuşkusuz onlara ait.

Yüksek lisans çalışmalarım sırasında beni destekleyen ve cesaret veren kıymetli hocam Yrd. Doç. Dr. Bülent TAVLI' ya ve gerek akademik hayattaki tecrübelerini paylaşmada, gerekse donanım alanındaki çalışmalarımda beni yönlendirmede desteğini esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Oğuz ERGİN' e teşekkür ederim.

Tez komitemde bulunarak beni onurlandıran Doç. Dr. Kemal BIÇAKÇI' ya teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın ve akademik araştırmalarımın merkezinde bulunan bilgisayar grafiğini bana ortaokul yıllarımda tanıtan ve sevdiren kıymetli büyüğüm Erkan AÇIKGÖZ' e teşekkür ederim. Üzerine akademik araştırma yapılabilecek bir hobi edinmemi sağlamasıyla, bu alanda keyif alarak çalışmamda önemli pay sahibi oldu.

Tez çalışmam sırasında hakkında teknik bilgiden yoksun olduğum insan yüzü anatomisi hakkında bana ışık tutan, bundan daha önemlisi çalışmanın zora girdiği anlarda psikolojik olarak bana destek olan değerli ablam Dr. Şeyma OSMANLIOĞLU' na teşekkür ederim.

Her zaman arkamda olan ve sınırsız desteklerini her an yanımda hissettiğim sevgili aileme sonsuz şükranlarımı sunarım. Onların başarımdaki rollerini ifade etmek için belki bir kitap yazmalıyım, şayet kelimeler kifayet edecekse...

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xiv
SEMBOL LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Önerilen Çözüm.....	3
1.2. Sistemin Yapısı.....	4
1.3. Tezin Organizasyonu	5
2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR	7
2.1. Ara Şekil Bulunması (Shape Interpolation).....	9
2.2. Yüz Hareketi Kodlama Sistemi (FACS – Facial Action Coding System) ..	10
2.3. Deformasyon Tabanlı Yaklaşımlar	11
2.4. Fizik Tabanlı Modelleme.....	12
2.5. Ses Tabanlı Konuşma Canlandırması	13
2.6. Performans Tabanlı Sistemler.....	14
2.6.1. İşaretçi Uygulanan Sistemler.....	15
2.6.2. İşaretçi Uygulanmayan Sistemler.....	17
2.6.3. Video Verisinden Yüz İfadelerinin Çıkarılması.....	22
3. İNSAN YÜZÜ CANLANDIRMASI	28
3.1. Yüz İfadesi İşaretçi Verileri.....	28

3.2.	Kafa Modeli ve Sanal İşaretçiler	29
3.3.	İşaretçi Eşleme ve Komşuluk Algoritması	31
3.3.1.	Komşuluk Algoritması	33
3.3.2.	Noktaların Sanal İşaretçilere Atanması	36
3.3.3.	İşaretçi Verisinin Oranlanması	38
3.4.	Kafa Hareketi	38
3.4.1.	Yer Değiştirme	38
3.4.2.	Çevirme	42
3.5.	Yüz İfadelerinin Modele Aktarılması	43
3.5.1.	İşaretçi Bilgilerinin Kararlı Hale Getirilmesi	43
3.5.2.	Yüz İfadelerinin Canlandırılması	46
3.6.	Yüz İfadelerinin Duygusal Olarak Değiştirilmesi	52
4.	NESNE EŞLEME YÖNTEMİ VE İMGE EŞLEMEYE UYGULANMASI	57
4.1.	l_1 Normunda Çoklu Eşleme	57
4.1.1.	Çoklu Eşleme Algoritması	60
4.1.2.	Çizgelerin l_1 Normuna Gömülmesi ve Çoklu Nokta Eşleme	62
4.1.3.	Deneyleler	66
4.2.	İşaretçisiz Yüz İfadesi Elde Etme Sistemi	68
4.2.1.	Veri Tabanlarının Oluşturulması	69
4.2.2.	Yüz İfadelerinin Elde Edilmesi	72
5.	SONUÇLAR	74
5.1.	Görsel Sonuçlar	74
5.2.	Başarım Analizi	76
6.	DEĞERLENDİRME	79
6.1.	Gelecek Çalışmalar	81

KAYNAKLAR.....	82
ÖZGEÇMİŞ.....	86

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge		Sayfa
Çizelge 2.1	Örnek yüz hareket üniteleri	10
Çizelge 3.1	İnsan kafasının antropometrik incelemesi [50]	39
Çizelge 5.1	Modellerin ekrana çizdirilmesi sırasında saniyede üretilen kare sayıları	77
Çizelge 5.2	Modeller için 50 işaretçiye ait etki alanlarının tespit edilmesi sırasında komşuluk algoritmasının sonlanması için geçen toplam süre	78
Çizelge 5.3	En fazla komşuya sahip olan sanal işaretçilerin sahip oldukları komşu sayısı ve bu komşuların tespit edilmesinde komşuluk algoritmasının sonlanması için geçen süre	78

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 1.1	Sistemin genel yapısı	5
Şekil 3.1	(a) Yüz ifadesi yakalama oturumu sırasında yüzüne işaretçi yerleştirilmiş olan aktör ve arkasında işaretçi verilerini yakalamada kullanılan VICON sistemine ait bir hareket yakalama kamerası (Resim Mocap.lt şirketinden alınmıştır) (b) Yüz ifadelerinin kafa modeli üzerinde canlandırılmasında kullanılan işaretçi verisinden örnek bir kare	29
Şekil 3.2	Sistemde kullanılan örnek kafa modeli	30
Şekil 3.3	Sanal işaretçi ve etki alanı. Kırmızı nokta sanal işaretçinin etki alanının merkezi olmak üzere, r yarıçapında, z eksenine paralel d derinliğinde bir silindir	31
Şekil 3.4	İşaretçi verileri ile eşleşen kafa modeli üzerindeki sanal işaretçiler	32
Şekil 3.5	İşaretçi eşleme. (a) Sanal işaretçi için merkez noktasının seçilmesi (b) Sanal işaretçinin etki alanındaki noktaların bulunması ve gösterilmesi	33
Şekil 3.6	Komşuluk algoritması	34
Şekil 3.7	Komşuluk algoritmasının Şekil 3.6'daki nokta kümesi için çalıştırılması. Algoritma üç seviyede toplam 7 kez çağırılmıştır. Her bir noktada okun sağ tarafında belirtilen komşu noktalar için uzaklık karşılaştırması yapılmıştır. Komşu listesine eklenecek olan noktalar kırmızı ile belirtilmiştir.	35
Şekil 3.8	Kafayı oluşturan noktaların sanal işaretçilere komşu olarak atanması (a) Noktaların sanal işaretçiler arasında paylaşılmadığı durum (b) Noktaların sanal işaretçiler arasında paylaşıldığı durum	37
Şekil 3.9	Yüz ifadesi yakalama oturumu sırasında yüzüne işaretçi yerleştirilmiş bir aktör (Resim Mocap.lt şirketinden alınmıştır.)	40
Şekil 3.10	Kafanın merkezinin tespiti için kullanılan hareketsiz işaretçiler	41
Şekil 3.11	(a) Alnın iki ucu ve kulak önlerindeki üçgensel bölgelerdeki işaretçilerin orta noktaları bulunur ve bu iki noktayı birleştiren vektör elde edilir. (b) Elde edilen vektörün dik kestiği ve burun ucunu içeren düzlemin denklemi bulunur.	41

Şekil 3.12	Göz kapağı ve göz modeli (a) Göz kapağı açık durumda (b)Göz kapağı yarı kapalı durumda	49
Şekil 3.13	Göz kapağı modelinin poligonsal yapısı	50
Şekil 3.14	Gözlerin kafa hareketinden bağımsız olarak sabit bir noktaya bakması (a) Sola bakış (b) Sağa bakış (c) Ortaya bakış	51
Şekil 3.15	Nötr durumdaki bir yüz ifadesinin duygusal olarak değişikliğe uğratılmasıyla elde edilen kafa modelleri (a) Nötr (b) Sinirli (c) Sasırmış (d) Üzgün (e) Uykulu (f) Mutlu	53
Şekil 3.16	Sinirli bir yüz ifadesi elde etmek için hareket ettirilen sanal işaretçiler (a)Nötr bir yüz ifadesinde sanal işaretçilerin yerleşimi (b) Sinirli bir yüz ifadesi oluşturmak için hareket ettirilen işaretçiler elips içinde gösterilmiştir.	54
Şekil 3.17	(a)Kasların çatılmasıyla elde edilen sinirli yüz ifadesi (b) a'daki yüz ifadesinde, kasların arasındaki bölgeye kırışıklıklar eklenmesiyle elde edilen sinirli yüz ifadesi	55
Şekil 4.1	Çoklu eşlemenin gerekliliği. Kamera nesnelere silüetleri birbirine benzemesine rağmen, nesnelere şok çizgeleri arasında bire-bir esleme bulunmamaktadır.	59
Şekil 4.2	Çoklu eşleme algoritmasının genel yapısı. Nesnelere silüetlerini şok çizgeleri ile ifade ettikten sonra ("1" etiketli geçiş), çizgeler aynı boyuttaki geometrik uzaya gömülmektedirler ("2" etiketli geçiş). İki dağılım arasındaki eşlemenin hesaplanması için Toprak Taşıyıcı Mesafesi (Earth Mover's Distance – EMD) algoritması kullanılmaktadır.	62
Şekil 4.3	Bir ağaca tırtıl ayrıştırması uygulanmasıyla elde edilen ayrık kenarlı yollar	64
Şekil 4.4	Kullanılan veri setinden örnek nesne silüetleri	66
Şekil 4.5	Önerilen algoritmanın Şekil 4.1'deki çizgelere uygulanması	67
Şekil 4.6	Önerilen sistemin genel yapısı	68
Şekil 4.7	Yüz ifadesi yakalama sisteminde veri tabanlarının oluşturulması	70
Şekil 4.8	Bir yüz resmi üzerindeki kritik yollar ve tepe noktaları (Resim [49]'dan alınmıştır.)	71

Şekil 4.9	Şekil 4.8'deki resimden elde edilen yönlü çevrimsiz çizge (Resim [49]'dan alınmıştır.)	72
Şekil 4.10	Video kamera ile performans verisi yakalanan kullanıcının yüz ifadelerini içeren işaretçi verilerinin elde edilmesi	73
Şekil 5.1	Performans verisinden elde edilen canlandırmadan kareler	74
Şekil 5.2	Performans verisindeki yüz ifadelerinin duygusal olarak değiştirilmesiyle elde edilen canlandırmadan kareler (Yukarıdan aşağıya sinirli, şaşırmış, üzgün, uykulu, mutlu)	75
Şekil 5.3	Başarım analizinde kullanılan kafa modelleri (a) Orta kalitedeki kafa modeli (Model 1) (b)Yüksek kalitedeki kafa modeli (Model 2)	76

KISALTMALAR

Kisaltmalar Açıklama

EMD Earth Mover's Distance – Toprak Taşıyıcı Mesafesi algoritması

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Sembol Açıklama

d	Bir noktanın sanal işaretçinin merkezine olan uzaklığı
D(φ)	Gömme fonksiyonu
F	Akı matrisi
\mathfrak{N}	Tırtıl ayrıştırması
P(v)	Tırtıl ayrıştırmasında elde edilen bir yol
r	Bir sanal işaretçinin etki alanının yarıçapı
w	Kafa modeli üzerindeki bir noktanın sanal işaretçiden etkilenme katsayısını belirten ağırlık

1. GİRİŞ

İnsan yüzü canlandırması, bilgisayar grafiği üzerine araştırma yapan çevreleri son otuz beş yıldır önemli ölçüde zorlayan bir konu olarak literatürdeki yerini korumaktadır. Frederic I. Parke'nin [14] 1972'de yaptığı çalışma ile bilgisayar grafiğinin araştırma alanları içerisine giren insan yüzü modelleme ve canlandırması konularında pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların büyük bölümü, gerçekçi yüz animasyonunu gerçek zamanlı olarak yapma üzerine yoğunlaşmıştır. Fakat insan yüzü anatomisinin karmaşık bir yapıda oluşu ve insanların yüz üzerindeki en ince değişiklikleri algılamada gayet duyarlı olmaları, kullanıcıyı tatmin edecek ölçüde gerçekçi canlandırma elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Nitekim gerçek zamanlı olarak yüz ifadelerini ve duyguları sanal bir kafa modeline yeterince gerçekçi olarak aktarabilen bir sistem henüz mevcut değildir. Yüz animasyonu üzerine tasarlanacak ideal bir sistemin sahip olacağı özellikler şöyle sıralanabilir [4]:

- Gerçekçi bir canlandırma üretmesi
- Gerçek zamanlı olarak çalışması
- Kullanıcının müdahalesine olabildiğince az ihtiyaç duyması
- Farklı yüzlere kolaylıkla uyum sağlayabilmesi

İdeal bir sistemde sağlanması hedeflenen özelliklerin başında gelen gerçekçi animasyonun elde edilmesi, önemli ikinci unsur olan gerçek zamanlı çalışma ile ters orantılı olarak işlemektedir. Canlandırmanın kalitesini artırmak için kullanılacak yüksek çözünürlüklü kafa modelleri ya da kullanılan modelin poligonlar yerine eğrilerden oluşması gibi yöntemler, sistemin saniye başına ürettiği kare sayısını önemli ölçüde azaltmaktadır. Gerçekçiliği artırmak adına gelişmiş ışıklandırma yöntemleri kullanma gibi genel anlamda bilgisayar grafiği uygulamalarında hesaplama zamanının önemli kısmını işgal eden işlemler de gerçek zamanlı animasyon hedefleyen sistemler için verimli olmamaktadır. Dolayısıyla gerçek zamanlı animasyon elde etmek için animasyonun gerçekçiliğinden fedakârlık yapılmak durumunda kalınmaktadır.

Bilgisayar için hesaplama maliyeti düşük olan ve kullanıcının dikkatinden kaçabilecek hileli yöntemlerle gerçekçi animasyon elde edilmeye çalışılmaktadır. Örneğin yüz ifadelerinin oluşturulmasında önemli rolü bulunan kırışıklıkları ele alalım. Alın bölgesinde, gözlerin çevresinde ve ağız kısmında oluşacak olan kırışıklıkları kafa modeli üzerinde değişiklik yaparak elde edebilmek için öncelikle yüksek çözünürlüklü kafa modellerine ihtiyaç duyulacaktır. Yüksek çözünürlüklü kafa modelini oluşturan on binlerce noktanın ekrana çizdirilmesinin sisteme ek yük getirecek olmasının yanı sıra, değişen yüz ifadelerini modele aktarmak için konumu hesaplanacak olan nokta sayısının artması da sistemi yavaşlatacaktır. Bunlara ek olarak ışıklandırma ve gölgelendirme yapıldığı takdirde de sistemin hızında önemli ölçüde azalma görülecektir. Hesaplama maliyeti yüksek olan bu yöntem yerine, performansla olan katkısına oranla kaliteden az kayıp veren diğer bir yöntemde düşük çözünürlüklü bir kafa modeli üzerine gölgelendirme ve kırışıklıkları içeren bir kaplama uygulanmaktadır. Neticede gerçek zamanlı olarak tatmin edici ölçüde gerçekçi canlandırmalar elde edilebilmektedir. Bilgisayar donanımındaki hızlı gelişime rağmen animasyonda istenen düzeydeki gerçekliğin gerçek zamanlı olarak yakalanabilmesi adına kullanıcıların uzun yıllar daha benzer hileli yöntemlerle tatmin edilmeye çalışılacağı kolaylıkla öngörülebilir.

Üretilecek olan sistemin kullanıcının müdahalesine ihtiyaç duymadan çalışması ve sadece belirli bir insanın yüzüne özel bir uygulama olmaması, sistemin kullanılabilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Sistemin başlangıçta kullanıcı tarafından olabildiğince az ayar yapılarak çalışmaya hazır konuma getirilmesi ve canlandırma sırasında da kullanıcının müdahale etmesine gerek kalmadan çalışması, kullanıcı dostu bir sistem için gereklidir. Ayrıca sistemin kaynak olarak kullanabileceği farklı insan yüzleri ve elde edilen yüz canlandırması parametrelerinin uygulanacağı farklı kafa modellerinin kullanımına olanak sağlaması, sistemin kullanılabilirliğini artıracaktır.

Yüz canlandırması için pek çok yöntem denenmiştir. Kafa modeline uygulanacak olan yüz ifadelerinin sisteme girişi için video, ses, metin verileri ya da grafik sanatçıları tarafından fare yardımıyla yüz ifadelerinin oluşturulması gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler içerisinde elde edilen canlandırmanın kalitesine

karşılık ortaya konan çaba oranı en yüksek olan sistemler video tabanlı sistemlerdir. Bu sistemlerde kamera karşısına geçirilen ve çoğu zaman yüzüne özel işaretçi ya da makyaj uygulanan aktörün yüz ifadeleri video akışından elde edilmektedir. Daha sonra, elde edilen bu veriler bilgisayar ortamında bulunan üç boyutlu sanal modele uygulanmaktadır. Bu işlem için önceden hazırlanmış üç boyutlu yüz ifadesi modelleri arasında pürüzsüz geçişler yapılması, yüzün kas anatomisinin modellenip kasların kaydırılması yöntemiyle yüz ifadelerinin elde edilmesi, ya da yüz modeli üzerindeki noktaların tek katman halinde komşuluğundaki noktalar ile birlikte işaretçi bilgisine göre deforme edilmesi gibi farklı yöntemler kullanılabilir.

Yukarıda anlatılan özelliklere ek olarak, bir canlandırmanın duygusal olarak farklı anlam ifade edebilecek şekilde değişikliğe uğratılabilmesi de önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Mevcut sistemlerde üretilen canlandırmalar, genellikle belirli bir senaryo çerçevesinde kaydedilmektedir ve elde edilen ürün sonradan değiştirilebilmeye olanak tanıyacak bir biçime sahip olmamaktadır. Dolayısıyla oluşturulmak istenen her bir canlandırma için, yapılan işlemlerin tekrarlanması gerekmektedir. Oysa belirli bir senaryo çerçevesinde kaydedilen bir yüz animasyonunun farklı duyguları ifade edebilecek şekilde değiştirilmesine olanak sağlayacak bir sistem, hem toplam iş yükünü azaltacak, hem de kullanıcı ile iletişimin sağlandığı sistemlerde etkili biçimde kullanılabilir. Bu ihtiyacı karşılayabilecek bir sistem, yazarın bilgisi dâhilinde, henüz mevcut değildir.

1.1. Önerilen Çözüm

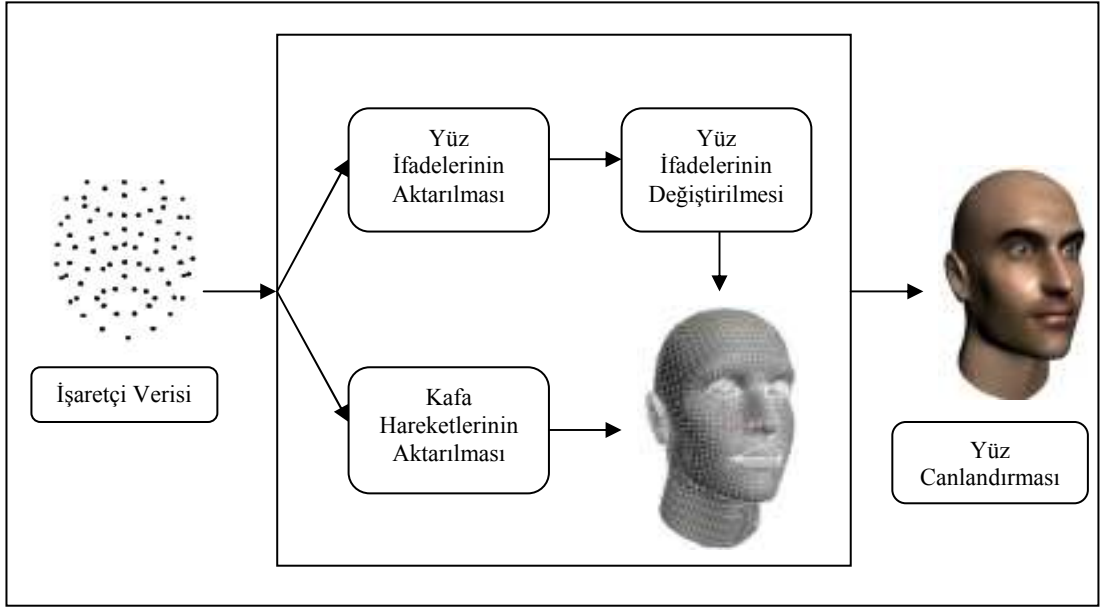
Sistemimiz, bir aktörün yüz ifadelerini içeren işaretçi bilgilerini kullanarak oluşturulacak olan yüz ifadelerinin, duygusal olarak değişikliğe uğratıldıktan sonra üç boyutlu sanal insan kafası modeline aktarılmasını amaçlamaktadır. Böylelikle belirli bir senaryoya göre kaydedilmiş olan aktör performansından, farklı duyguları ifade edebilecek şekilde yüz canlandırmaları elde etmek mümkün olmaktadır. Örneğin bir bilgisayar oyununda önceden kaydedilmiş bir konuşma canlandırmasının, kullanıcının oyundaki başarısına göre farklı bir duygu ile tekrar üretilerek sunulmasına(daha alaycı ya da daha sinirli gibi) olanak tanınmaktadır. Böylelikle bilgisayar oyunları ile kullanıcıda oluşturulması hedeflenen sanal

gerçeklik hissine önemli katkıda bulunmuş olacaktır. Önerdiğimiz yöntemin kullanılabileceği bir başka alan da sanal bilgi danışma ajanlarıdır. Bankalarda veya turistik merkezlerde bulunan bu sanal sekreterlerin, önceden kaydedilmiş olan bilgiyi iletişime geçtiği kullanıcıya (çocuk, yetişkin, yaşlı vb.) en uygun şekilde hitap edecek bir yaklaşım ile sunması sayesinde iletişim kalitesi artırılmış olacaktır.

Sistemimizin tasarımı sırasında üzerine çalıştığımız bir diğer konu olan nesne eşleme problemi, görüntü işleme alanında çalışan araştırmacıların üzerine yoğunlaştıkları temel konulardandır. Problemin hedefi verilen iki nesnenin öznitelikleri arasındaki benzerliğin yakalanmasıdır. Çalışmalarımız sonucunda bir nesne ile önceden kaydedilmiş olan bir veri tabanında bulunan nesnelere eşleme bulmayı amaçlayan yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemin nesne eşlemedeki başarısı deneysel olarak ölçülüp, elde edilen sonuçların önceki çalışmalar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Bunun yanında, geliştirilen nesne eşleme yönteminin imge eşleme problemine uygulanarak, geliştirdiğimiz sisteme uyarlanmasıyla işaretçi verisi elde etmede kullanılmasını öngören tam bir sistem tasarımı önerilmiştir.

1.2. Sistemin Yapısı

Sistemimizde yüz ifadelerinin sanal olarak oluşturulmasında kullanılmak üzere yüz üzerine yerleştirilen işaretçilerin konum bilgilerinden faydalanılmaktadır. Yüzüne yansıtıcı işaretçiler yerleştirilen bir aktörün yüz ifadelerinin kamera ile kaydedilip, elde edilen görüntülerdeki işaretçilerin her karedeki konumlarının hesaplanması işlemi, film sektöründe yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemle elde edilmiş olan işaretçi verilerinin sistemimize girdi olarak sağlandığı kabul edilmektedir. İşaretçi verilerinden faydalanılarak öncelikle kafanın üç boyutlu uzaydaki yer değiştirme ve dönme hareketleri elde edilmektedir. Daha sonra da işaretçi verilerinin içerdiği yüz ifadesi bilgileri elde edilmektedir. Elde edilen bu bilgiler, sistemde bulunan sanal kafa modeline aktarılmaktadır. Yüz ifadeleri bu aktarma işlemi sırasında, sinirli, şaşırmış, üzgün, uykulu ve mutlu olacak şekilde değiştirilebilmektedir. Sanal kafa modelinin ışıklandırılması ve yüz dokusu ile kaplanması sonucunda üç boyutlu yüz ifadesi canlandırması elde edilmiş olmaktadır. Sistemin temel işleyişi Şekil 1.1’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Sistemin genel yapısı

Sistemimizin tasarımı sırasında geliştirilen ve gelecekte yapılacak çalışmalarda sistemimize eklenerek yüz üzerine işaretçi ekmeden canlandırma elde edilmesine olanak sağlayabilecek bir nesne eşleme yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemde bir sorgu nesnesi ile benzerliği karşılaştırılan veri tabanı nesnelere benzerlik oranı en yüksek olan nesnenin bulunması işlemi gerçekleştirilmektedir. Önerilen yöntemde nesne eşleme problemi, bir çizge eşleme problemine dönüştürülerek çözülmektedir. Tezimizin nesne eşleme yönteminin detaylı olarak incelendiği dördüncü kısmında, bu yöntemin imge eşlemeye uyarlanarak geliştirdiğimiz sisteme işaretçi verisi sağlamada kullanılmasını öngören tam bir sistem önerilmiştir.

1.3. Tezin Organizasyonu

Tezin organizasyonu şu şekildedir: İkinci kısımda yüz canlandırmasının kullanım alanları ve genel hatlarıyla bu alanda yapılmış olan çalışmalar özetlenecektir. Ayrıca bu kısımda performans tabanlı yüz canlandırması konusunda görüntü işleme ve bilgisayar grafiği toplulukları tarafından yapılan çalışmalar detaylı olarak anlatılacaktır. Üçüncü kısımda, yüz ifadesi bilgisi içeren işaretçi bilgilerini temel olarak üç boyutlu sanal kafa modeli üzerinde yüz ifadesi canlandırmasının

oluşturulması ve elde edilen canlandırmanın duygusal olarak değişikliğe uğratılması işlemleri açıklanacaktır. Dördüncü kısımda geliştirilen nesne eşleme yöntemi detaylı olarak incelenecek ve yöntemin imge eşlemede kullanılmasını öngören sistemin tasarımı anlatılacaktır. Beşinci kısımda sistemin ürettiği sonuçla yer verilecektir. Son olarak altıncı kısımda tezin genel değerlendirmesi yapılacak ve bu alanda gelecekte yapılabilecek çalışmalara değinilecektir.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Bilgisayar teknolojisinin yaşamın her alanında önemli bir yere sahip hale gelmesi, çoklu iletişim araçlarının yaygınlaşması ve eğlence kültürünün sanal ortama kayması ile bilgisayar grafiği uygulamaları her geçen gün daha fazla alanda karşımıza çıkmaktadır. Filmlerin ve bilgisayar oyunlarının vazgeçilmez parçası haline gelen sanal karakterlerin insansı vücut hareketlerinin yanı sıra gerçeklik kalitesi günden güne artan yüz ifadeleri, sanal dünya ile gerçek dünya arasındaki mesafenin hızla kapanmakta olduğunu ortaya koymaktadır.

Yüz canlandırması sistemlerinin hızlı gelişimindeki en birinci etken hiç kuşkusuz film sektörüdür. Tamamen üç boyutlu sanal karakterlerin rol aldığı filmler, her geçen gün büyüyen izleyici kitlesi ile alışılmış yöntemlerle üretilen sinema filmlerine rekabet edecek konuma gelmiştir. Beyaz perdede yüz canlandırması, bilgisayar grafiği kullanılarak yapılan ilk kısa film olan TinToy'daki bebek figürünün fiziksel olarak modellenen kafa modeli ile kullanılmaya başlanmıştır. Toy Story filmi ile uzun metrajlı filmlerde de kullanılmaya başlanan yöntemler, Final Fantasy filminde başroldeki karakter Aki Ross'un gerçekçi yüz ifadeleri ile izleyiciyi büyüleyecek ve Hollywood yıldızlarını telaşa düşürecek derecede gelişim göstermiştir.

Bilgisayar oyunları ve sanal gerçeklik uygulamaları da bilgisayar grafiğinin ve karakter canlandırmasının önemli uygulama alanları arasındadır. Sanal dünyada eğlenmek ve öğrenmek için gezinen kullanıcılara gerçeklik hissinin yaşatılması için bu alanda önemli yatırımlar yapılmaktadır. Yüz canlandırmasının bir başka kullanım alanı da plastik cerrahidir. Bu alanda kullanılan sistemler, yüze uygulanacak olan estetik ameliyatlara öncesinde hastanın sanal ortamda modellenmiş olan yüzü üzerinde operasyonun nasıl yapılacağına karar verilmesine ve operasyondan sonra nasıl bir yüze sahip olacağına hastaya gösterilmesine olanak tanımaktadır [38, 39].

Görüntü iletimini temel alan iletişim sistemlerinde yüz canlandırması, veri sıkıştırılmaya elverişliliği dolayısıyla kullanılmaktadır. Yakın gelecekte evlerdeki yerini almaya hazırlanan üç boyutlu televizyonlarda ve her geçen gün kullanımı yaygınlaşan telekonferans sistemlerinde, büyük boyutlardaki görüntü verisini alıcı

tarafa gönderilmesi, kullanılabilir veri bandı genişliği ile mümkün verimli bir biçimde gerçekleştirilememektedir. Bunun yerine kamera ile yakalanan yüz ifadelerinin yüz animasyonu şeklinde kodlanıp alıcı cihaza gönderilmesi ve veri alındıktan sonra alıcı cihazda yüz canlandırmasının tekrar üretilip kullanıcıya gösterilmesi üzerine çalışılmaktadır. Böylelikle çok daha düşük boyutlardaki kodlanmış yüz canlandırması verisinden faydalanarak mevcut bant genişliğinin daha verimli olarak kullanılması sağlanmış olacaktır.

Yüz canlandırmasının önemli bir diğer kullanım alanı da bankalar ya da turizm danışma büroları gibi çok sayıda insanla belirli konularda iletişimin sağlanmasında kullanılan sanal ajanlardır. Bu sanal ajanların kullanıcıda gerçek bir müşteri temsilcisi ya da bilgilendirme görevlisiyle konuşuyormuşçasına etkileşime olanak tanınması, kullanıcının tepkilerini ölçüp duruma uygun cevabı uygun yüz ifadesiyle sunması, kurumların hedefledikleri müşteri memnuniyetini maliyet ve insan gücü yönünden tasarruf sağlayarak elde etmelerine olanak tanımaktadır. Bunun yanında uzaktan eğitim uygulamaları çerçevesinde öğrenci ile etkileşim kurabilen sanal öğretmenler üzerine de çalışmalar yapılmaktadır [40, 41]. Öğrencinin duygularını ve anlatılan dersi anlayıp anlamadığını gözlemleyen sistem, gerçek bir öğretmen gibi nasıl davranması gerektiğine karar verip uygun yüz ifadesi ve beden dili ile öğrenci ile etkileşime geçmektedir. Benzer şekilde otistik çocukların eğitiminde, onlarla arkadaş olup oyun oynayabilen ve dil eğitimlerine destek olan sanal arkadaşlar kullanılmaktadır [42].

Geniş kullanım alanlarına sahip olan yüz animasyonunun elde edilmesi için pek çok farklı yöntem geliştirilmiştir. Parke'nin [14] yaptığı bu alandaki ilk çalışmanın üzerinden geçen yarım asra yakın zaman içerisinde bilgisayar grafiği topluluğunun ilgi odaklarından biri olan konuda canlandırmayı üretmek için harcanan zaman, kullanılan etkileşim aracı ve elde edilen canlandırmanın kalitesi gibi ölçütlerde farklı başarımlar sergileyen sistemler ortaya konmuştur. Geliştirilen farklı yöntemler bu kısımda detaylı olarak incelenecektir. Deng ve Noh'un yüz animasyonu üzerine yaptıkları kapsamlı literatür araştırması bu alandaki çalışmaları özet halinde bir araya toplamıştır [4].

Yüz modelleme ve canlandırması konularında uygulanan teknikleri katı bir sınıflandırmaya tabi tutmak, yöntemler arasında belirgin sınırlar olmamasından ve son zamanlarda yapılan çalışmaların daha iyi sonuçlar elde etmek amacıyla farklı yaklaşımları bir arada kullanmasından dolayı zordur [4]. Fakat bu alandaki çalışmaları ana hatları ile gruplara ayırmak mümkündür. Bu kısımda yüz animasyonu konusunda yapılan araştırmalar ara şekil bulunması, yüz hareketi kodlama sistemi tabanlı yaklaşımlar (Facial Action Coding System - FACS), deformasyon tabanlı yaklaşımlar, fizik tabanlı kas modelleme, ses tabanlı konuşma canlandırması ve aktör performansı tabanlı kamera ile sürülen sistemler başlıkları altında detaylı olarak incelenecektir.

2.1. Ara Şekil Bulunması (Shape Interpolation)

Şekillerin karıştırılması (blend shape) ya da ara şekillerin bulunması (shape interpolation) yöntemleri, sezgisel olarak kontrol edilebilmesi ve kontrollerinin esnek olması dolayısıyla üç boyutlu sanal canlandırma üreten sanatçılar tarafından yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Film sektöründe çokça kullanılan yöntem, yaygın olarak kullanılan üç boyutlu grafik tasarımı ve canlandırması programları tarafından da hazır halde kullanıma sunulmaktadır.

Temel olarak bir kafa modelinin farklı yüz ifadeleri için ayrı ayrı modellenmesiyle oluşturulan model kümesinden, yeni bir yüz ifadesi oluşturmak amacıyla modellerin belirli oranlarda karıştırılması işlemidir. Daha teknik bir ifadeyle:

$$v_j = \sum_{k=0}^n w_k b_{kj} \quad (2.1)$$

denkleminde, v_j sonuçta elde edilecek modeldeki j.inci noktayı, w_k karıştırma oranını, b_{kj} ise model kümesindeki k.ncı modelin j.inci noktasını ifade etmektedir. Ağırlıklı toplam, poligonalsal modelin noktalarına tek tek uygulanabileceği gibi eğrilerden oluşan modellerde kontrol noktalarına da uygulanabilir [4]. Denklemindeki w_k ağırlık katsayıları canlandırma sanatçısı tarafından seçilebileceği gibi otomatik olarak bir algoritma tarafından da atanabilir [23, 43].

Modellerin denklem 2.1 deki gibi doğrusal olarak karıştırılması genellikle daha kolay ve maliyeti düşük olduğu için tercih edilmektedir [23]. Fakat bunun yerine modellerin kosinüs fonksiyonu gibi lineer olmayan yöntemlerle karıştırılması da mümkündür.

2.2. Yüz Hareketi Kodlama Sistemi (FACS – Facial Action Coding System)

Yüz hareketi kodlama sistemi (FACS), yüz kasları, çene ve dil hareketlerinin, yüzün yapısının anatomik olarak incelenmesi ile tanımlanmıştır [44]. İlk olarak 1978 yılında Ekman ve Friesen tarafından tanımlanan ve 2002 yılında bazı değişiklikler yapılarak tekrar düzenlenen FACS, 44 temel hareket ünitesi (Action Unit - AU) içermektedir. Birbirinden bağımsız olan bu hareket ünitelerinin birlikte hareket ettirilmesi sonucunda yüz ifadesi oluşmaktadır.

Çizelge 2. 1 Örnek yüz hareket üniteleri

Hareket Ünitesi (AU)	İşlevi	Hareket Ünitesi (AU)	İşlevi
AU 1	İç Kaş Kaldırıcı	AU 16	Alt Dudak İndirici
AU 4	Kaş İndirici	AU 20	Dudak Gerici
AU 6	Yanak Yükseltici	AU 23	Dudak Sıkıştırıcı
AU 12	Dudak Köşesi Çekici	AU 26	Açık Çene
AU 14	Gamze	AU 43	Kapalı Gözler

FACS kullanımına örnek olarak yüz hareketi kodlama sistemi hareket ünitelerinden AU1 (iç kaş kaldırıcı), AU6 (yanak kaldırıcı), AU12 (göz kapağı köşesini çekici) ve AU14 (gamze yapıcı) bir arada hareket ettirilmesiyle mutlu bir yüz ifadesi elde edilmektedir. FACS’da bulunan bazı yüz hareket üniteleri ve gerçekleştirdikleri işlevler Çizelge 2.1 de listelenmiştir.

Yüz hareketi kodlama sistemi, kullanım kolaylığı sunmasından dolayı kas tabanlı sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat sunduğu kolaylığın yanında bazı eksik yönleri de mevcuttur [5]. FACS sistemleri, hareket ünitelerinin etki

bölgelerinin çok belirgin sınırları olmasından dolayı insanların yüz ifadelerindeki esnekliği yansıtmada yeterince başarılı olamamaktadır. Bunun yanında hareket ünitelerinin mekânsal yer değişikliğinin FACS ile tanımlanıyor olmasına karşın zamansal olarak bu değişimin nasıl olacağı konusunda açıklama getirilmiyor olması da yüz ifadeleri arasında geçiş yaparken farklı yöntemlerin kullanılmasını gerekli kılmaktadır.

2.3. Deformasyon Tabanlı Yaklaşımlar

Çokgenler ya da NURBS eğrileri gibi eğrilerden oluşan kafa modelinde yüz canlandırması elde etmek için modelin yüzeyinde deformasyon yaparak farklı yüz ifadeleri elde etmek de mümkündür. Deformasyon tabanlı sistemlerde kafa modelini oluşturan noktaların yerlerinin doğrudan değiştirilmesiyle yeni yüz ifadeleri oluşturulmaktadır. Yüz anatomisinin ya da yüz kaslarının fiziksel yapısının göz önüne alınmadığı yöntemde kaliteli canlandırmalar, fizik tabanlı sistemlere göre karmaşıklığı daha az olan işlemlerle elde edilebilmektedir.

Guenter ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 1400 noktadan oluşan kafa modelinde, yüz kısmında bulunan hareketli noktaların, önceden belirlenmiş olan kontrol noktalarının hareketine göre yer değiştirmesi ile yüz canlandırması elde edilmiştir [8]. Deformasyon yöntemi kafa modellemede de kullanılmaktadır. Pighin ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada kamera ile farklı yönlerden fotoğrafı çekilen kullanıcının yüz hatlarına göre, sistemde bulunan genel kafa modelinin noktalarının yerleri değiştirilerek kullanıcıya özgü bir kafa modeli oluşturulmaktadır [3]. Modelin burun kısmı kullanıcının burun şekline göre uzatılıp kısaltılmakta, göz çukuru, kulak kepçesi ve diğer uzuvlarda benzer şekilde değişiklikler yapılmaktadır. Sonuçta elde edilen model, kullanıcının resmi ile kaplanarak kullanıcının kafa modeli sanal ortamda oluşturulmuş olmaktadır. Benzer yaklaşımın kullanıldığı bir başka çalışmada kamera ile karşıdan ve yandan fotoğrafı çekilen kullanıcının kafa modeli, sistemdeki genel model üzerinde değişiklikler yapılarak ve kaplamada bu fotoğraflardan elde edilen doku kullanılarak elde edilmiştir [12].

2.4. Fizik Tabanlı Modelleme

İnsan kafasında bulunan 22 kemikten sadece çene eklemının oynar eklem olması dolayısıyla yüz ifadelerinin büyük çoğunluğu birbirleriyle ve yüz dokusu ile bağlanan yüz kaslarının hareketi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Fizik tabanlı kas modelleme teknikleri kafa anatomisinin bu özelliği esas alınarak geliştirilmiştir.

Genel itibariyle kas modelleri, kasın kemiğe bağlandığı noktayı ifade eden başlangıç noktası ve kas tarafından hareket ettirilecek olan noktaları içeren kasın etki alanından oluşmaktadır. Sahip oldukları esneklik özelliğini yansıtabilmek için kaslar yay sistemleri şeklinde modellenmişlerdir. Bu alanda yapılan ilk çalışmada Platt ve Badler, yüz kaslarını kas liflerinden oluşan bir lif yumağı olarak modellemişlerdir [45]. Bu modeldeki kas lifleri, noktasal kas başlangıcı ve kas lifinin etki ettiği kafa modelini oluşturan noktalardan bir ya da birden fazla noktadan oluşan nokta kümeleri olarak tanımlanmıştır. Daha sonraki bir çalışmada Choe ve arkadaşları kasları paralel kaslar ve büzücü kaslar olarak ikiye ayırmışlar, paralel kasların başlangıç noktasını da noktasal yerine çizgisel olarak modellemişlerdir [6].

İnsan yüzünü kaplayan yüz dokusu anatomik olarak incelendiğinde, dört katmanlı yapıdaki deri ve bir de deriyi hareket ettiren kaslar olmak üzere beş katmandan oluştuğu gözlenmektedir [46]. Kas tabanlı sistemlerde kasların etki ettiği yüz dokusu, deri yerine kullanılmak üzere kafa modeli poligonundan oluşacak şekilde tek katmanlı olabildiği gibi [6], insanın yüz dokusu anatomisine uygun olarak çok katmanlı, hacimli yüz dokusu modellemeleri de mevcuttur. Terzopoulos ve Waters'ın geliştirdikleri üç katmanlı yüz dokusu modelinde kafa modeli, deri, yağ doku ve kaslardan oluşan üç katmanlı dokunun hareketine göre şekil değişikliğine uğratılmaktadır [47]. Anatomik olarak daha gerçekçi olmasına karşılık, çok katmanlı doku modellemesi tek katmanlı modele göre çok daha fazla hesaplama yapmayı gerektirmektedir. Yüz dokusunun hacminin yanı sıra modellenen dokunun insan anatomisine uygun olarak doğrusal olmayan akıcı – elastik yapıda modellenmesi de animasyondaki gerçekliği artırmaktadır [7]. Fakat bu yöntem, gerçekliğe sağladığı katkının yanında sisteme büyük hesaplama yükü getirmektedir. Bundan dolayı Choe

ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sistemin hesaplama karmaşasını azaltıp gerçek zamanlı çalışabilmesi için yüz dokusu doğrusal elastik yapıda modellenmiştir [6].

Konuşma, kahkaha atma gibi yüz ifadelerinin yanında özellikle yeme ve çiğneme hareketlerinde görev alan hareketli çene eklemının ayrıca modellenmesi de literatürde yapılmış çalışmalar arasındadır. Uğur Güdükbay'ın yaptığı çalışmada, insan anatomisine uygun olarak tasarlanan çene, iki ucundan çene kemiğine bağlanmasıyla oluşan eksen etrafında dönebilecek ve küçük miktarda yer değiştirme hareketi yapabilecek şekilde modellenmiştir [33]. Bu çalışmada elde edilen modelde ağız kapalı iken çiğneme hareketi ve yutkunma durumunda adam elmasının şekil değiştirmesi de modellenmiştir. Choe ve arkadaşlarının çalışmasında ise çene eklemi sadece konuşma durumunda açılıp kapanma hareketini ifade edecek şekilde modellenmiştir [6].

2.5. Ses Tabanlı Konuşma Canlandırması

Ses tabanlı sistemler, yüz modelinin deformasyonunun insan konuşmasını içeren ses kayıtlarına göre yapıldığı sistemlerdir. Genel olarak modelin ağız kısmının canlandırılmasında kullanılır.

Sadece ses verisinin girdi olarak kullanıldığı sistemlerde, analiz edilen ses verisindeki fonetik olarak anlamlı en küçük sesler yakalanıp, önceden grafik sanatçıları tarafından bu sesi ifade etmek üzere tasarlanmış olan yüz modeli ile eşleştirilmektedir. Elde edilen farklı yüz ifadeleri arasında pürüzsüz bir geçişin sağlanması için ise ara doldurma tekniği kullanılmaktadır. Bu yöntem anlamlı olarak belirlenmiş olan her ses kümesi için farklı bir yüz ifadesinin grafik sanatçıları tarafından modellenmesini gerektirdiğinden dolayı masraflı bir yöntemdir. Bu problemi ortadan kaldırmak için görüntü verisinden faydalanarak, anlamlı ses grupları ile eşleşen farklı yüz ifadelerine sahip modelleri oluşturan sistemler geliştirilmiştir. Giacomo ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ses grupları ile eşleşen yüz ifadelerinin oluşturulması işleminde sistemin görüntü verisi ile eğitilmesi yöntemi kullanılmıştır [31]. Bu çalışmada İngilizcede bulunan bütün sesleri içeren bir metni kamera karşısında okuyan ve yüzünde işaretçiler bulunan aktörden elde

edilen veriler istatistiksel incelemeye tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre ses gruplarına karşılık gelen yüz ifadeleri daha kolay ve daha gerçekçi olarak oluşturulmuştur. Fakat tatmin edici düzeyde canlandırma kalitesinin yakalanması için sistemin eğitilmesinde ne miktarda görüntü ve ses verisi kullanılacağı hakkında kesinlik yoktur [4].

Ses verisi ile ağız bölgesi canlandırması yapılmasının yanı sıra kullanıcının duygusal durumunun mevcut ses verisinden faydalanarak algılanması ile üç boyutlu modele aktarılması üzerine de çalışılmıştır [19]. Bu çalışmada konuşma verisinin akustik içeriğinin analiz edilmesiyle sesin ritmik vurgu özelliklerinden faydalanarak kullanıcının mutluluk, sinirlilik, korkma, üzgün olma, sıkılma, iğrenme ya da normal konuşma durumlarından hangisinde olduğu tespit edilip modele aktarılmıştır. Benzer şekilde Busso ve arkadaşları, ses verisinin akustik vurgu özelliklerinden faydalanarak kafa modelinin doğal olarak hareket ettirilmesi üzerine çalışılmıştır [24].

2.6. Performans Tabanlı Sistemler

Yüz animasyonunda kullanılan her yüz ifadesi için farklı yüz modellerinin yapıldığı sistemlerde ya da kontrol noktalarının grafik sanatçıları tarafından tek tek ayarlanmasını gerektiren FACS veya kas tabanlı sistemlerde istenen düzeyde gerçekliğin yakalanması, hem uzun zaman almaktadır hem de grafik sanatçısının hayal gücü ve yeteneği ile sınırlıdır. Yüz canlandırmasına tiyatro sanatçılarının profesyonel yüz ifadelerinin kazandırılması ve bu işlem yapılırken zamandan ve işgücünden tasarruf sağlanması, performans tabanlı sistemlerin geliştirilmesindeki en önemli etkenlerin başında gelir. Performans tabanlı sistemlerde yüz canlandırması, kamera karşısında performans sergileyen aktörün yüz ifadelerinin üç boyutlu modele aktarılması ile elde edilmektedir. Kameradan alınan görüntü verisinin analiz edilmesiyle yüz ifadelerinin oluşturulmasında kullanılacak olan hareket verileri elde edilmektedir. Elde edilen bu veriler, doğrudan yüz ifadesinin oluşturulmasında deformasyon yöntemi yardımıyla kullanılabilmesi gibi, yüz hareketi kontrol sistemi hareket ünitelerinin kontrol edilmesinde, yüz üzerine yerleştirilmiş olan kasların hareket ettirilmesinde ya da önceden modellenmiş yüz ifadeleri arasında geçiş yapılmasında da kullanılabilir.

Bu bölümde performansı kaydedilen aktörün yüzüne makyaj ya da işaretçi uygulanmasını temel alan çalışmalar ve işaretçi uygulanmadan yüz ifadelerini algılayabilen sistemler incelenecektir. Son olarak da video verisinden yüz ifadelerinin çıkarılması ile ilgili çalışmalara kısaca değinilecektir.

2.6.1. İşaretçi Uygulanan Sistemler

Bu alanda ilk çalışma Lance Willimas tarafından 1990 yılında yapılmıştır [21]. Bu çalışmada lazer tarayıcı ile sanal ortama aktarılan aktörün kafa modeli, aktörün kamera ile kaydedilen kafa fotoğrafı ile kaplanmıştır. Aktörün yüz ifadelerini algılamak için aktörün performansını sınırlayabilecek olan mekanik alıcılar yerine, serbestçe hareket etmeye olanak tanıyacak biçimde kamera ile görüntü yakalanması yöntemi izlenmiştir. Performans yakalama işlemi için aktörün yüzüne yansıtıcı işaretçiler yerleştirilmiştir. Kamera ile görüntü yakalandığı sırada kameranın önüne kamera eksenini ile 45 derecelik açı yapacak şekilde yerleştirilen bir cama yukarıdan doğrudan uygulanan ışık sayesinde, aktörün yüzündeki işaretçiler tam olarak kamera ile aynı yönden ışıklandırılmıştır. Böylece yansıtıcılığı artırılan işaretçilerin x ve y konumları, yakalanan görüntü verisinden görüntü işleme teknikleri kullanılarak çıkarılmıştır. Her işaretçi için elde edilen konum bilgisine göre kafa modeli üzerinde değişiklik yapılarak canlandırma elde edilmiştir. Göz kapakları ve ağzın kapalı olarak modellendiği çalışmada tek kamera ile görüntü yakalandığı için işaretçilerin z konumları hesaba katılmamıştır. Bu çalışma, yazarının da belirttiği gibi, tam bir sistem olmayıp ancak yeni bir yaklaşımı ortaya koymak adına yapılmış bir çalışma olmuştur.

Bu konuda yapılan bir diğer önemli çalışma Guenter ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [8]. Bu çalışmada yüzüne altı farklı renkteki 182 yansıtıcı işaretçi yerleştirilen aktrisin performansı, farklı yönlerden aktrisin yüzüne odaklanacak şekilde yerleştirilmiş altı stüdyo tipi kamera ile kaydedilmiştir. Elde edilen video verileri üzerinde her bir işaretçinin görüldüğü farklı konumlar hesaba katılarak bütün işaretçiler için x, y ve z konumları görüntü işleme teknikleri yardımıyla hesaplanmıştır. Bu hesaplama sırasında birbirine yakın pozisyondaki işaretçilerin farklı renkte olmalarından faydalanılmıştır. Lazer tarayıcı ile taranarak sisteme

aktarılan kafa modeli üzerine kaplamak amacıyla aktrisin yüzünün resmi, her kameranın en iyi gördüğü yüz kısmının resimleri birleştirilerek oluşturulmuştur. Oluşturulan yüz resmi üzerindeki renkli işaretçiler, işaretçinin en yakınındaki ten dokusu ile kapatılmıştır. Sonuçta elde edilen yüz resmi kafa modeli üzerine kaplanarak gerçekçi kafa modeli elde edilmiştir. Daha sonra her bir işaretçi ile bu işaretçilerin kafa modeli üzerinde etki edeceği noktalar eşleştirilmiştir. Canlandırma yapılacak olan her karede işaretçilerin etki alanına giren noktalar, işaretçilerin konumlarındaki değişikliğe göre hareket ettirilmiştir. Böylelikle yüz animasyonu elde edilmiştir. Bu sistemde elde edilen işaretçi yer değiştirme verilerinin ve her kare için ayrı ayrı hesaplanan yüz kaplamasının sıkıştırılarak internet üzerinden ya da CD-ROM gibi veri saklama araçları ile yayınlanması ve bu veriyi alan kullanıcının bilgisayarında canlandırmanın tekrar oluşturulup gerçek zamanlı olarak oynatılması öngörülmüştür. Bu sayede fazla yer kaplayan canlandırma verisi yerine daha az yer kaplayan işaretçi ve sıkıştırılabilir kaplama verisi kullanarak depolama alanı ya da bant genişliğinden tasarruf sağlanması amaçlanmıştır. Bu çalışmada aktrisin kafa hareketleri modele aktarılamamıştır. Sadece yüz ifadeleri modele aktarılmıştır.

Choe ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada üç adet video kamera ile performans verisi yakalanan aktrisin yüz ifadeleri, kas tabanlı olarak modellenen kafa modeline aktarılmıştır [6]. Sistemde aktrisin yüzüne toplam 24 adet işaretçi yerleştirilmiştir. Bu işaretçilerden 16'sı yüz ifadelerinin yakalanmasında, geri kalan 6 işaretçi ise kafanın yer değiştirme ve dönme hareketlerinin algılanmasında kullanılmıştır. Yüz ifadelerinin yakalanmasında kullanılan işaretçiler, yüz dokusunu hareket ettirecek olan kasların hareket parametreleri olarak kullanılmıştır. Sistem yüz ifadelerini kas tabanlı olarak oluşturduğu için, bir aktörden alınan yüz ifadesi verilerinin aynı kas yapısına sahip olan farklı kafa modellerine uygulanmasına da olanak tanımaktadır. Bu çalışmada performans tabanlı yaklaşımlar ile fizik tabanlı modelleme arasında köprü kurulması amaçlanmıştır.

Deng ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, performans tabanlı yaklaşım ile ara şekil bulma yöntemi birlikte kullanılmıştır [23]. Çalışmada, performans sergileyecek olan aktristen normal, mutlu, sinirli ve üzgün olmak üzere farklı duyguları yansıtacak biçimde, İngilizcedeki bütün sesleri içerecek bir performans

sergilemesi istenmiştir. Yüz bölgesine 102 yansıtıcı işaretçi yerleştirilen aktrisin performansı VICON hareket yakalama sistemi ile kaydedilmiştir. Bu kayıtla eş zamanlı olarak aktrisin ses ve video kaydı da alınmıştır. Daha sonra İngiltere'deki 15 farklı ses grubunun dört ayrı duygu için ifade edilmiş olduğu kareler performans verisi içerisinde el ile seçilmiştir. Seçilen $15 \times 4 = 60$ ses grubu ve her biri ile eşleşen işaretçi verileri incelenerek, performans verisinde bulunan her bir yüz ifadesini oluşturmak için, temel kabul edilen bu 60 ses grubunun ne oranda karıştırılması gerektiği tespit edilmiştir. Bir sonraki aşamada önceden modellenmiş olan ve 46 ayrı yüz ifadesi içeren kafa modeli kütüphanesinde, aktrisin yüzündeki işaretçiler arasındaki mesafe ile kafa modeli üzerine kullanıcı tarafından yerleştirilen sanal işaretçiler arasındaki mesafenin birbirine olan oranlarından faydalanarak ses grupları ile kafa modelleri arasında eşleşme elde edilmiştir. Böylelikle aktrisin yüz yapısının kullanılan kafa modelinden farklı bir geometriye sahip olması durumunda sistemin bundan etkilenmemesi sağlanmıştır. Bu çalışma sayesinde, farklı yüz ifadeleri içeren önceden oluşturulmuş kafa modelleri kütüphanesinde ara şekil bulma probleminde, her bir modelin belirli bir yüz ifadesini oluşturmada hangi ağırlık katsayısı ile oluşturulacak olan yüz ifadesine katkı sağlayacağı, performans verisinden faydalanarak deneysel olarak bulunmuştur. Bu çalışmanın devamı niteliğindeki bir diğer çalışmada da, kaydedilen işaretçi ve ses verileri arasındaki bağıntı tespit edilmeye çalışılıp, aktrisin kafa hareketleri ile kaydedilen sesteki akustik özellikler ilişkilendirilmiştir [24]. Bu çalışma sonucunda kafa hareketi canlandırmasının ses tabanlı olarak yapılması sağlanmıştır.

2.6.2. İşaretçi Uygulanmayan Sistemler

İnsan yüzü üzerine kasların hareketini algılamaya yarayacak şekilde özel makyaj yapmak ya da ortam kızıl ötesi ışıklarla aydınlatıldığında yüz ifadelerini kolayca algılamayı sağlayacak yansıtıcı işaretçiler yerleştirmek, sistemin tasarımını kolaylaştırırken bazı kısıtlamaları da beraberinde getirmektedir. Öncelikle, performans yakalama işlemi için gerekli olan makyaj ya da işaretçi yerleştirme işleminin uzman kişiler tarafından yapılması gerekmektedir. Ayrıca kullanılan malzemelerin her kullanıcı tarafından kolaylıkla elde edilebilmesi mümkün

olamayabilmektedir. Bunun yanında yüzünde alışılmadık yabancı maddeler yapıştırılmış olan aktör, performans sergilerken doğal davranmakta problem yaşayabilmektedir. Elde edilen hareket yakalama verisinin kalitesi ise yüze yerleştirilen işaretçi sayısı ile orantılı olarak değişmektedir. Oysa yüze yerleştirilebilecek işaretçi sayısı, işaretçilerin sistem tarafından birbirine karıştırılmayacak uzaklıkta yerleştirilmesi kısıtlamasından dolayı belirli bir sayıyı geçememektedir. Bu ise elde edilen hareket verisinin kalitesi üzerinde olumsuz yönde etki etmektedir. Bu problemleri aşmak için işaretçi kullanmadan aktör performansının yakalandığı sistemler üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Chai ve arkadaşları yaptıkları çalışmada görü tabanlı sistemler ile işaretçi tabanlı sistemlerin avantajlı yönlerini bir araya getirmeyi amaçlamışlardır [2]. Önerilen sistemde yüzüne 76 adet yansıtıcı işaretçi yerleştirilen ve farklı yüz ifadeleri sergilemesi istenen bir aktörün performans videosu VICON hareket yakalama sistemi ile kaydedilip, işaretçilerin konumları bir veritabanında tutulmuştur. Daha sonra yüzünde özel işaretçi ya da makyaj bulunmayan bir kullanıcının performans videosu sıradan bir kamera ile kaydedilmiştir. Elde edilen bu ikinci videonun ilk karesinde kullanıcıdan yüz üzerinde dudakların, ağız köşelerinin, kaşların, gözlerin ve burnun konumlarını belli edecek şekilde 19 adet noktanın konumunu tespit etmesi istenmiştir. Video verisinin ilerleyen karelerinde bu noktaların iki boyuttaki konumları, kullanıcının müdahalesi olmadan sistem tarafından takip edilmektedir. İşaretçisiz video verisinde bulunan ve iki boyutlu konum bilgisi içeren 19 noktaya karşılık, işaretçi veritabanında üç boyut bilgisi içeren 76 nokta bulunmaktadır. Bu aşamada 19x2 elemanlı iki boyutlu hareket kümesinden 76x3 elemanlı üç boyutlu hareket kümesine eşleme yapmak gerekmektedir. Bu eşleme bire-bir olmadığı için, sistemde izlenen bu 19 noktadan yüz ifadelerini tanımlamak amacıyla noktalar arasındaki uzaklıkları ve belirli noktalardan geçen doğruların eğimleri gibi bilgilerden oluşan 15 farklı kontrol parametresi çıkarılması önerilmiştir. Elde edilen bu parametreler ile önceden kaydedilmiş işaretçi verilerinden çıkarılmış olan kontrol parametreleri arasında eşleşme bulunmaya çalışılmaktadır. Sistemde, anlamlı bir yüz ifadesinin yirmi ardışık video karesinde olduğu kabul edilerek, kontrol parametreleri buna göre gruplandırılıp kontrol sinyalleri elde edilmiştir. Gürültülü

olan yüz ifadesi kontrol sinyaline filtreleme uygulandıktan sonra işaretçi veri tabanında k en yakın komşu algoritması uygulanmaktadır. Elde edilen en yakın 120 kontrol sinyaline temel bileşen analizi uygulanarak en büyük 7 eigen-eğrisi elde edilmiştir. Bu eğrilerin filtrelenmesiyle de sistemdeki kafa modelinin değiştirilmesinde kullanılacak olan ve 76x3 serbestlik derecesindeki kontrol sinyali elde edilmektedir. Daha sonra bu kontrol sinyalinin kafa modelinin deformasyonunda kullanılmasıyla da yüz canlandırması elde edilmiş olmaktadır. Bu son basamakta sistemin çalışmasının hızlandırılması amacıyla, hesaplama harcanan zamanın, kullanılan kafa modelinin kalitesinden bağımsız olduğu yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Öncelikle sistem çalıştırılmadan, kullanılacak olan kafa modeli ile yüz ifadelerinin kaynağı olan aktörün lazer tarayıcı ile taranmış olan kafa modeli arasında nokta eşleme işlemi yapılmıştır. Daha sonra veritabanında mevcut bulunan işaretçi bilgilerinin içerdiği bütün yüz ifadeleri, kullanılacak olan kafa modeline uygulanarak sistem çalıştırılmadan önce farklı yüz ifadeleri için farklı yüz modelleri elde edilmiştir. Böylece sistem çalıştığı sırada kafa modelinin deformasyonunda kullanılacak olan kontrol sinyali, daha önceden üretilmiş olan yüz ifadesine ait kafa modelinin canlandırmaya eklenmesinde kullanılmaktadır. Canlandırma oluşturulurken de veritabanında bulunan bu hazır yüz ifadelerinin arası pürüzsüz bir şekilde doldurularak gerçekçi bir canlandırma elde edilmesi amaçlanmıştır. Hesaplaması fazla zaman alacak işlemlerin önceden yapıp veri tabanında kaydedilmiş olması dolayısıyla sistem gerçek zamanlı olarak çalışabilmektedir. Sistemin kullanıcının makyaj ya da işaretçi kullanmasına gerek kalmadan olabildiğince az miktarda müdahale ile işaretçi tabanlı sistemlerin ürettiği kalitede canlandırma üretebiliyor olması sistemin yaygın kullanımı için önemli bir artıdır. Bunun yanında sistemin eğitilmesinde kullanılan video verisinin yeterli düzeyde olmaması sebebiyle konuşmadaki ağız hareketlerini canlandırmaya katmada yetersiz kalıyor olması da üzerinde çalışılmayı gerektiren önemli bir eksikliklerdir.

Essa ve arkadaşları hiçbir şekilde işaretçi ya da makyaj kullanmadan kamera ile yakalanan aktör performansı videosu üzerinde piksel piksel inceleme yaparak (optical flow) yüz ifadelerini modele aktarmışlardır [5]. Sistem öncelikle eldeki video verisinden kafanın ve yüzdeki uzuvların konumunu [10]'da önerilen yöntemle

tespit etmektedir. Daha sonra elde edilen konumdaki yüz resmi, tespit edilmiş olan uzuvların konumuna göre sistemde bulunan standart kafa modeli üzerine tam oturacak şekilde bükülmektedir. Böylelikle yüz resminde tespit edilememiş olan uzuvlar, standart kafa modeli üzerindeki karşılıkları sayesinde tespit edilmiş olmaktadır. Daha sonra yüz resmi üzerinde piksel piksel analiz yapılarak her bir noktanın zaman içindeki konum değişikliğini belirten hareket vektörleri oluşturulmaktadır. Daha sonra bu hareket vektörleri kafa modeli üzerindeki kasların hareket ettirilmesinde kullanılmıştır. Önerilen sistem yüz hareketi kodlama sistemindeki (FACS) bazı eksiklikleri gidermeyi amaçlamıştır. FACS sisteminde tanımlanmış olan hareket ünitelerinin, insan yüzünün anatomik yapısının aksine sadece belirli bir bölgeyi etkiliyor olması ve yüz ifadelerinin canlandırılması için zaman bileşeni tanımlanmamış olması noktalarındaki eksiklikler, önerilen bu sistem ile çözüme kavuşturulmaktadır. FACS sistemini video verisi ile kontrol eden sistem, FACS da tanımlanmamış olan zaman bileşeni problemini video verisinden elde edilen ve zamanla değişen hareket vektörleri ile çözmeyi başarmıştır. Yüz üzerinde belirlenen çok sayıda kontrol noktası sayesinde de karmaşık olan yüz ifadelerinin oluşturulmasında farklı kontrol parametrelerinin devreye sokulmasıyla daha gerçekçi yüz ifadeleri elde edilmiştir. Bu çalışmada üzerinde durulan bir diğer önemli nokta da yüz ifadelerine önemli ölçüde anlam katan kafanın yer değiştirmesi ve dönmesi hareketlerinin sistem tarafından algılanıyor olmasıdır.

Pighin ve arkadaşları, fotoğrafları çekilen aktörün yüz ifadelerinin gerçekçi olarak sentezlenmesi üzerine çalışmışlardır [3]. Önerilen sistemde farklı açılardan aktöre odaklanmış olan beş adet fotoğraf makinesi kullanılmaktadır. Bu makinelerden aynı anda çekilen fotoğraflarda bazı uzuvların konumlarını tespit etmek amacıyla, kullanıcıdan birkaç noktayı belirlemesi istenmektedir. Bu işlem sayesinde hem fotoğrafın çekildiği kameranın konumu tespit edilmektedir, hem de sistemde bulunan standart kafa modeli aktörün kafa yapısını yansıtacak şekilde değiştirilmektedir. Ayrıca üretilen kafa modeline elde mevcut bulunan fotoğraflardan faydalanarak aktörün suratının resmi kaplanmaktadır. Kaplama işlemi, modele olan bakış açısına bağımlı ve bakış açısından bağımsız olmak üzere iki ayrı şekilde yapılmıştır. Daha gerçekçi ışıklandırma ve gölgelendirmenin gözlemlendiği bakış açısına bağımlı

kaplama metodunda, modele kaplanacak olan kaplamanın oluşturulmasında büyük ölçüde modelin izlendiği bakış açısına sahip olan kameradan alınan fotoğraf kullanılmaktadır. Bakış açısından bağımsız olan kaplama modelinde ise kafa üzerindeki her bir nokta için o noktayı gören kameralardan alınan fotoğrafların aynı noktaya denk gelen piksel değerlerinin ortalaması alınarak yeni bir kaplama resmi oluşturulmaktadır. Bakış açısından bağımsız kaplama modelinin avantajı, kameranın bulunduğu herhangi bir pozisyon için sadece bir kaplamanın üretiliyor olmasıdır. Fakat bu kaplama farklı resimlerin karıştırılmasıyla elde edildiği için, üretilen kaplamanın bazı bölgelerinde bulanıklık gözlemlenmektedir. Bakış açısına bağımlı olan kaplama modeli kaliteli kaplama üretilmesi için, kaplama üretme işlemi modelin izlenmesinde kullanılan kamera açısı her değiştirildiğinde tekrarlanacağından dolayı masraflı bir işlemdir. Aktörün sergilediği sekiz temel yüz ifadesinin (mutlu, üzgün, gülen, sinirli, şaşkın, uykulu, acı çeken ve normal) fotoğrafları alınarak yukarıdaki işlemlerin tekrarlanması sonucunda, sistemde farklı yüz ifadelerine ait olan kafa modellerini içeren bir galeri oluşturulmuştur. Kullanımı kolay olan bir grafik ara yüzü yardımıyla farklı yüz modellerinin farklı kısımları birleştirilerek yeni yüz ifadeleri oluşturulabilmektedir. Sonuçta galeride bulunan ve/veya yeni üretilen bu modeller arasında pürüzsüz geçişler sağlanarak gerçekçi yüz canlandırması yapılması sağlanmıştır. Bu çalışmayı takip eden diğer bir çalışmada, elde edilen modeli yeniden ışıklandırma, kaplama üzerine yarıklık ya da dövme ekleme ve yüz ifadesini duygusal olarak abartma işlemleri uygulanmıştır [34].

Noh ve Neumann, herhangi bir metot ya da araçla üretilmiş olan yüz canlandırmasının farklı modellere aktarılması ile yeni canlandırmalar üretilmesi üzerine çalışmıştır [1]. Yüz ifadesi kopyalama olarak adlandırılan sistemde, işaretçi tabanlı performans yakalama gibi bir yöntem ile elde edilecek olan yüz canlandırmasının, öncelikle sistemde bulunan genel kafa modeli üzerinde üretilmesi gerekmektedir. Elde edilen canlandırmanın diğer bir modele aktarılması için sistemdeki genel model ile arasında yüzey eşleme işlemi yapılması gerekmektedir. Bu işlem sonucunda sistemdeki standart kafa modeli, hedef model ile aynı karakteristiği gösterecek şekilde bazı değişikliklere uğratılmaktadır. Yüzey eşleme işlemi sistem tarafından otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Sistemin eşleme

sırasında hata yapabilme ihtimaline karşılık işlem sonunda kullanıcıdan bazı noktaları eşlemesi istenebilmektedir. Yapılan deneylerde kullanılan farklı modeller için otomatik eşleme işlemi sonucunda kullanıcının en fazla 10 adet noktanın eşlemesini düzeltmesi gerektiği görülmüştür. Geometrisi sistemdeki standart kafa modeline yakın olan bazı modellerde otomatik eşleme işlemi hatasız olarak gerçekleştirilebilmektedir. Bir sonraki aşamada standart modeli oluşturan noktalarının yer değiştirmesini ifade eden hareket vektörleri, hedef modele aktarılmaktadır. Modellerin geometrisinin farklı olduğu durumlarda, hareket vektörlerinin yön ve boyutlarında ayarlama yapılması gerekebilmektedir. Yeni modele uygulanacak olan hareket vektörünün yönünün doğru olarak hesaplanabilmesi için animasyonun uygulandığı orijinal kaynak model ve eşleme sonrasında değişikliğe uğramış haldeki kaynak modelin noktalarının her birisi için yerel bir koordinat sistemi tanımlanmaktadır. Her bir noktanın komşu nokta ve üçgenlerini referans alarak oluşturulan bu yerel koordinat sistemleri arasındaki açısal farklılara göre kaynak modelden alınacak olan hareket vektörünün yönünde ayarlama yapılmaktadır. Hareket vektörünün boyutunun ayarlanması için ise orijinal kafa modeli üzerindeki her bir noktada, o noktayı içeren poligonlardan oluşan bir çevreleyici kutu kullanılmaktadır. Çevreleyici kutunun boyutunun eşleme sonrasında oluşan modeldeki eşdeğer çevreleyici kutunun boyutuna oranı, o nokta için tanımlanacak olan hareket vektörünün ne oranda boyut değiştireceğini ifade etmektedir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki önerilen sistem sayesinde çok küçük hata oranları ile yüz ifadesi canlandırması kopyalamak mümkündür. Bu çalışmayı temel alan bir diğer çalışmada Noh ve arkadaşları, kamera ile yakalanan aktör performansındaki yüz ifadelerinin görüntü işleme teknikleri kullanarak sınıflandırılmasıyla, sistemde önceden bulunan yüz ifadesi parametreleri ile canlandırmanın istenen model üzerinde oluşturulmasını önermişlerdir [17].

2.6.3. Video Verisinden Yüz İfadelerinin Çıkarılması

Video verisinden yüz ifadelerinin çıkarılması işlemi, temel olarak performansı kaydedilen aktörün yüzüne işaretçi yerleştirilip yerleştirilmemesine göre

değişmektedir. İşaretçinin kullanıldığı sistemlerde video verisinden yüz ifadelerinin elde edilmesi diğer sistemlere kıyasla daha kolay olarak yapılabilmektedir.

2.6.3.1. İşaretçi Kullanılmayan Sistemlerde Video Analizi

İşaretçi kullanılmayan ve kullanıcının müdahalesi olmadan yüz ifadelerinin bulunmasını hedefleyen sistemlerde öncelikle kafanın konumunun tespit edilmesi gerekmektedir. Kafanın konumunu tespit etmek amacıyla çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Moghaddam ve Pentland, geliştirdikleri yüz tanıma sisteminde karşılaştırma yapacakları fotoğraftaki yüzü otomatik olarak elde etmek için eigen-yüzleri yöntemini kullanmışlardır [10]. Bu yöntemde, sistemi eğitmek için kullanılan yüz resimlerinin Karhunen-Loeve dönüşümlerinden oluşan uzayda, suratın bulunacağı resim ile şablon eşleme yapılarak suratın muhtemel konumu tespit edilmektedir. Sistem ayrıca kafanın yatay düzlemdeki yönünü de tespit etmektedir. Resimde suratın tespit edilmesi için ten renginden faydalanılması üzerine de çalışılmıştır [12, 18]. Resimdeki ten rengi olan bölgeler beyaz, diğer kısımlar siyah olacak şekilde ayırt edildikten ve resimdeki alanlar etiketlendikten sonra en büyük alana sahip olan kısım surat olarak kabul edilmiştir. Yang ve arkadaşlarının resimlerdeki yüz tespiti ile ilgili farklı yaklaşımları özetleyen çalışmaları bu konu hakkında detaylı bilgi sunmaktadır [11].

Kafanın konumu tespit edildikten sonra göz, kaş, ağız gibi uzuvların tespit edilmesinde de benzer yöntemler kullanılmaktadır. [10]'da uzuvların konumunun tespiti için şablon eşleme metodu kullanılmıştır. Lo ve Chung, aktöre bağlı olarak ürettikleri yüz ifadesi veri tabanında, aktörün önceden belirlenmiş ve kaydedilmiş altı temel yüz ifadesini, eigen-yüzleri metodu kullanarak şablon eşlemeye tabi tutmuşlardır [35]. Sonuçta sınıflandırılan yüz ifadesine karşılık gelen, sistemde mevcut kafa modelini canlandırmaya eklemişlerdir. Takano ve arkadaşları gözlerin ve ağızın daha önceden konumu tespit edilen surat üzerindeki yerlerinin tespit edilmesi için HSV ve YIQ renk uzaylarında göz ve dudak renklerinin ten renginden ayrıştırılabilmesinden faydalanmışlardır [18]. Böylelikle kabaca konumları tespit edilen gözlerin ve ağızın etrafında, yüz canlandırması için kullanılacak olan özellik belirleyici noktalar uzuvların kenar ve köşelerinden seçilmiştir. Park ve arkadaşları

da uzuvların komşuluklarında bulunan ten rengi ile olan ton farklılıklarından faydalanarak konum tespiti yapmışlardır [12]. Bu çalışmada öncelikle tespit edilen gözün konumuna dayalı olarak ağız ve burun için kademeli bir konum tahmin mekanizması işletirilmiştir. Bunun yanında, uzuvları yaklaşık olarak çevreleyecek büyüklükteki temel geometrik şekillerden (elips, çember gibi) başlanarak uzvun etrafını tam çevreleyen şekiller elde edilmiştir. Lowe'nin çalışmasında ise bir resimdeki özelliklerin boyuttan bağımsız olarak bulunmasını sağlayan bir sistem geliştirilmiştir [36]. Genellikle bir resimdeki nesnelerin tespiti için kullanılan bu sistem, aktör performansını içeren video verisindeki özniteliklerin çıkarılmasından sonra, standart uzuv resimlerinin öznitelikleri ile eşleşen konumların tespit edilmesinde de kullanılabilir.

Yüz ifadeleri yakalamanın bir diğer yolu da stereo kamera çiftleri ile kaydedilen performans verisine bilgisayarla görü algoritmaları uygulanması metodudur. Zeng ve arkadaşları, yüz ifadelerini yüksek çözünürlüklü kafa modeli ile birlikte algılayan stereo bir sistem geliştirmişlerdir [13, 15]. Önerilen sistemde aktörün performansı, konumu bilinen dört siyah beyaz kamera ve iki renkli kamera ile kaydedilmiştir. Kayıt sırasında iki adet yansıtıcı (projektör) ile aktörün yüzüne gri tonlarında rastgele çizgi örüntüleri yansıtılmıştır. Her üç karede bir projektörler boş örüntü göndermiştir. Bu karelerde renkli kameralarla kaydedilen fotoğraflar, yüz üzerine uygulanacak olan kaplamanın üretilmesinde kullanılmıştır. Sistemde, aktörün yüzüne yansıtılan çizgilerin yüz üzerinde oluşturduğu şekillerden faydalanarak, yüz üzerindeki her bir noktanın üç boyutlu uzaydaki konumu, noktaların stereo kayıt yapan kameralardaki farklı konumları üzerinde yapılan hesaplama ile tespit edilmiştir. Böylelikle aktör yüzüne işaretçi konmadan ve lazer tarayıcı gibi pahalı araçlara gerek kalmadan aktörün kafa modeli ve yüz ifadeleri yüksek çözünürlüklü olarak elde edilmiştir. Gurbuz ve arkadaşları da stereo video verisinden faydalanarak kullanıcının kafa hareketinin algılanmasını, surat modelinin oluşturulmasını ve kafanın hareketinin sanal bir modele aktarılmasını sağlamışlardır [20].

2.6.3.2. İşaretçi Kullanılan Sistemlerde Video Analizi

Guenter ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada altı stüdyo tipi kamera ile farklı açılardan performansı kaydedilen aktrisin yüzüne altı farklı renkteki toplam 182 işaretçi yerleştirilmiştir [8]. Noktaların birbirinden ayırt edilip konumlarının daha kolay tespit edilebilmesi amacıyla kullanılan renkli işaretçiler, yüz üzerinde aynı renkteki işaretçiler birbirinden olabildiğince uzak konumlarda bulunacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Her bir kameradan alınan video verilerindeki işaretçiler, aynı renkteki piksellerin merkez noktaları bulunarak iki boyutlu olarak konumlandırılmışlardır. Bunun sağlanabilmesi için, kullanıcı tarafından sistemdeki her kameradan alınan ilk karedeki her bir işaretçinin altı işaretçi renginden birinde ya da zemin renginde olmasına göre etiketlenmesi istenmiştir. İlerleyen karelerde noktaların takip edilmesi sistem tarafından sağlanmaktadır. Burada ortaya çıkan önemli bir problem, her bir noktanın farklı kameralardan alınan görüntülerde tespit edilip eşlenmesi ve üç boyutlu konumunun bulunmasıdır. Bu amaçla k kamera ve n iki boyutlu nokta için olası $\binom{k}{2}n^2$ kamera – nokta ikilileri denenip ışın kesiştirme metodu ile belirli bir hata oranının altında doğru konumda bulunan noktalar, muhtemel üç boyutlu nokta olarak adlandırılmaktadır. Her bir nokta için oluşturulan muhtemel noktalar listesinde, noktaların üçlü kombinasyonu alınarak doğru eşleşme olması en yüksek ihtimale sahip üç nokta elde edilmektedir. Bu konumlardan en küçük varyansa sahip olanı noktanın konumu olarak bulunmuş olmaktadır. İlerleyen karelerde aynı noktanın takip edilmesi de önemli bir diğer problemdir. İlk karede konumları tespit edilmiş olan noktaların başlangıçta etiketlenip, bütün video verisi boyunca aynı etiketle adlandırılmaya devam etmesi gerekmektedir. Fakat bu işlem yapılırken bazı işaretçilerin bazı karelerde görünmemesinden ya da bazı karelerde dış veya gözde oluşan parlamalardan kaynaklanan sahte işaretçilerin tespit edilmesinden dolayı temel en yakın komşu algoritmasının kullanılması mümkün olmamaktadır. Bundan dolayı en yakın komşu algoritması, bir işaretçi bir karede görünmez olduğu durumda, o işaretçinin konumunun komşuluğunda bulunan diğer işaretçilerin konumuna dayanarak tahmin edilmesine olanak tanıyacak şekilde değiştirilmiştir. Her bir nokta için tahmin edilen üç boyut konumları arasında yapılan bir eşleme işleminden sonra, bir nokta için en büyük olasılığa sahip üç boyut konumu tespit

edilmiştir. Sonuçta elde edilen işaretçilerin üç boyutlu konumları, kafa modeli üzerinde yüz ifadesinin oluşturulmasında kullanılmıştır.

2.6.3.3. Hibrit Sistemlerde Özellik Eşleme Problemi

İşaretçi tabanlı sistemlerin yüz ifadelerini yüksek çözünürlüklü olarak sağlaması ve işaretçisiz sistemlerin kullanım kolaylığı sunuyor olması gibi her iki yöntemin olumlu taraflarını birleştirmeyi hedefleyen çalışmalarda öznelik eşleme problemi ortaya çıkmaktadır. Düşük yoğunlukta yüz ifadesi bilgisi sağlayan işaretçisiz sistemler ile veri tabanında bulunan yüksek yoğunluktaki işaretçi verileri arasında çoklu eşleme yapılması gerekmektedir. Örneğin Chai ve arkadaşlarının çalışmasında, aktörün yüzüne işaretçi yerleştirilmeden kaydedilen video verisinde sistem tarafından takip edilen 19 noktanın iki boyuttaki koordinatlarına karşılık veritabanında bulunan 76 işaretçinin üç boyuttaki konumları bilinmektedir [2]. Bu durumda 19×2 elemanı bulunan video verisi kümesinden 76×3 elemanı bulunan işaretçi verisi kümesine eşleme yapılması gerekmektedir. Chai ve arkadaşları bire-bir olmayan bu eşlemeyi yapmak yerine bu noktalardan uzaklık ve açıya bağlı 15 parametre üreterek, parametre uzayında k en yakın komşu algoritması tabanlı bir karşılaştırma yapmışlardır [2].

Düşük çözünürlüklü işaretçisiz video verisinden yüksek çözünürlüklü işaretçi verisine bire-bir olmayan eşleme işlemini başarılı bir şekilde yapmak, üretilecek olan canlandırmanın kalitesine olumlu yönde katkı sağlayacaktır. Bu amaçla çoklu eşleme işleminin bu iki veri grubu arasında uygulanması yöntemi izlenebilir. Çoklu eşleme yönteminin farklı imgeler üzerine uygulanması, yüz tanıma ya da nesne gruplama sistemlerinde üzerinde çalışılan bir problemidir.

Platel ve arkadaşları iki imge arasında benzerlik bulma işlemini çoklu çizge eşleme problemine dönüştürerek çözmeyi hedeflemişlerdir [49]. Bu çalışmada veri tabanında bulunan imgelerle benzerlik karşılaştırması yapılacak olan imgenin özneliklerini ifade eden kritik yollar (critical paths) ve tepe noktaları tespit edilmektedir. Daha sonra bu kritik yollar ve tepe noktaları kullanılarak yönlü çevrimsiz bir çizge oluşturulmaktadır.

Bir sonraki adımda Demirci ve arkadaşlarının önerdikleri küresel gömme (spherical embedding) metodu takip edilerek karşılaştırılacak imgeler vektör uzayına taşınmaktadır [48]. Böylelikle yönlü çizge eşleme problemi, geometrik uzayda nokta eşleme problemine indirgenmiş olmaktadır. Bu problemin çözümü için de Toprak Taşıyıcı Mesafesi (Earth Mover's Distance) algoritması kullanılarak birbiri ile en yüksek eşleşme oranına sahip olan imgeler elde edilmiştir.

3. İNSAN YÜZÜ CANLANDIRMASI

Sistemimize yüklenen üç boyutlu herhangi bir kafa modeli üzerinde, bir aktörün yüz ifadelerini içeren işaretçi bilgileri esas alınarak yüz ifadeleri oluşturulmaktadır. Oluşturulan canlandırmada yüz ifadelerinin duygusal olarak değiştirilmesine imkân sağlanmaktadır.

Tezin bu bölümünde öncelikle sistemde yüz ifadelerinin oluşturulması sırasında kullanılacak temel girdi olan işaretçi verilerinin yapısından bahsedilecektir. Daha sonra sistemde kullanılan kafa modeli ve bu model üzerinde işaretçi verileri tarafından kontrol edilecek olan sanal işaretçilerden bahsedilecektir. Üçüncü bölümde bu sanal işaretçilerin işaretçi verileri ile eşlenmesi işlemi ve sanal işaretçilerin etki edecekleri nokta kümelerinin tespit edilmesi işlemleri açıklanacaktır. Dördüncü bölümde işaretçi verilerinden kafa hareketlerinin elde edilmesi ve modele aktarılması işlemlerine değinilecektir. Beşinci bölümde yüz ifadelerinin işaretçi verilerinden elde edilmesi ve modele aktarılması işlemleri açıklanacaktır. Son bölümde ise üretilen yüz canlandırmasının duygusal olarak değişikliğe uğratılmasından bahsedilecektir.

3.1. Yüz İfadesi İşaretçi Verileri

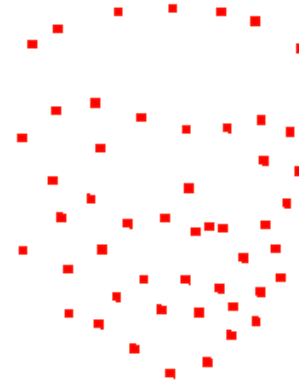
Sistemimizde üç boyutlu sanal kafa modeli üzerinde canlandırılacak olan yüz ifadeleri, yüzüne işaretçi yerleştirilmiş olan bir aktörün performansının kamera ile yakalanmasıyla elde edilmiş olan metin tabanlı bir veridir. Aktörün yüzüne yerleştirilmiş olan işaretçilerin her karedeki üç boyutlu konum bilgilerinden oluşan veriden faydalanarak, kafanın hareketi ve yüz ifadeleri elde edilmektedir. İşaretçi tabanlı aktör performansı kaydetme, film sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla geliştirilmiş olan ticari sistemler mevcuttur. Sistemimizi test etmek amacıyla kullandığımız ve Mocap.lt şirketi tarafından ücretsiz olarak araştırmacıların kullanımına sunulan işaretçi verisi, VICON hareket yakalama sistemi ile elde edilmiştir. Mocap.lt şirketine ait bir yüz ifadesi yakalama oturumunda yüzüne yansıtıcı işaretçiler yerleştirilmiş olan aktör, Şekil 3.1.a'da gösterilmiştir.

Sistemimizi test etmek amacıyla kullandığımız yüz ifadesi verisi, 7 adet alın bölgesinde, 5'er adet yanak bölgelerinde, 1'er adet göz kapaklarında, 7 adet kaşlarda, 9 adet ağız bölgesinde, 4 adet burun üzerinde, 1'er adet kulak önlerinde ve 9 adet de çenede bulunmak üzere toplam 50 işaretçinin yüz üzerine yerleştirilmesi ile elde edilmiştir. Bu işaretçilerin üç boyutlu konum bilgisi 2766 kare boyunca, saniyede 100 kare olacak şekilde kaydedilmiştir. Kullandığımız işaretçi verisine ait bir kare, Şekil 3.1.b'de görülmektedir.

Kullandığımız test verisi saniyede 100 kare olacak şekilde kaydedilmiş olduğundan dolayı, sistemimizin gerçek aktör performansı ile aynı hızda işleyebilmesi için saniyede 100 kare üretmesi gerekmektedir. Sistemin saniyede 100 kareden daha fazla görüntü üretmesi engellenerek, canlandırmanın olduğundan hızlı oluşturulması otomatik olarak engellenmektedir.



(a)



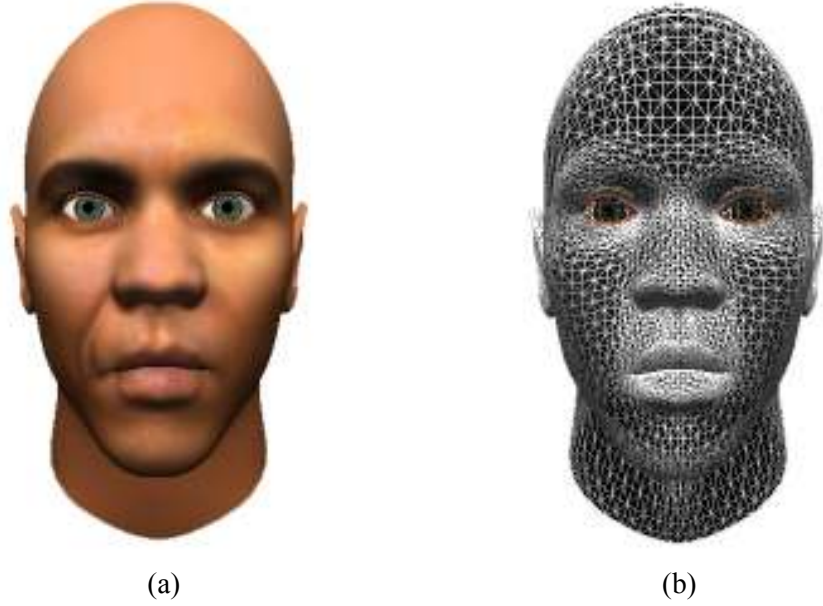
(b)

Şekil 3.1. (a) Yüz ifadesi yakalama oturumu sırasında yüzüne işaretçi yerleştirilmiş olan aktör ve arkasında işaretçi verilerini yakalamada kullanılan VICON sistemine ait bir hareket yakalama kamerası (Resim Mocap.lt şirketinden alınmıştır) (b) Yüz ifadelerinin kafa modeli üzerinde canlandırılmasında kullanılan işaretçi verisinden örnek bir kare

3.2. Kafa Modeli ve Sanal İşaretçiler

Sistemde kullanılan kafa modeli, üçgenlerden oluşan, göz ve ağız kısımlarında açıklıklar bulunan poligonalsal yapıda bir modeldir. Bu yapıdaki herhangi bir kafa modeli, kullanıcı tarafından modelin sabit disk üzerindeki konumu belirtilerek sisteme yüklenebilmektedir. Yüklenen kafa modeli dosyasında, modeli oluşturan

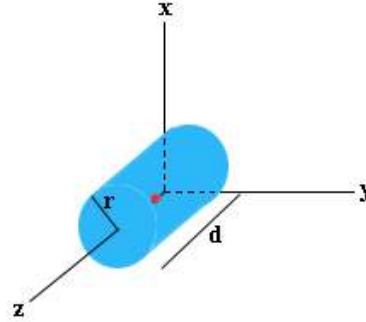
noktalar, bu noktaların üçlü gruplanmasıyla oluşan üçgenler, her noktaya ait bir normal vektörü ve her nokta için modele kaplanacak olan dokunun koordinat bilgisi bulunmaktadır. Sisteme yüklenen kafa modeli, sağlanan doku ile kaplanmakta ve ışıklandırmaya tabi tutulmaktadır. Bu şartlar altında farklı kafa modelleri için denediğimiz sistemimiz, 5960 nokta ve 11492 yüzeyden oluşan bir kafa modeli için saniyede 115 karenin üzerinde performans sergilemiştir. 24134 noktanın oluşturduğu 46384 yüzeye sahip daha yüksek kalitedeki diğer bir kafa modeli ile sistemimiz saniyede 70 kare üretmiştir. Bu iki örnekten de görüleceği gibi sistemimiz belirtilen kalitedeki modeller için gerçek zamanlı olarak çalışmaktadır.



Şekil 3.2. Sistemde kullanılan örnek kafa modeli (a)kaplama ve ışıklandırma uygulanmış halde (b) kaplama uygulanmadan poligon teller ile çizilmiş şekilde

Sistemde 182 noktanın oluşturduğu 360 üçgenden ibaret olan standart poligon sal bir göz modeli kullanılmaktadır. Model, göz dokusu ile kaplanmış bir küreden ibarettir. Gözlerin kafa modeli üzerinde alacakları konum, sisteme kullanıcı tarafından girilebilmektedir. Göz kapakları için ise 147 noktanın oluşturduğu 234 üçgenden oluşan standart bir model kullanılmaktadır. Şekil 3.2’de sistemde kullanılan örnek bir kafa modeli görülmektedir.

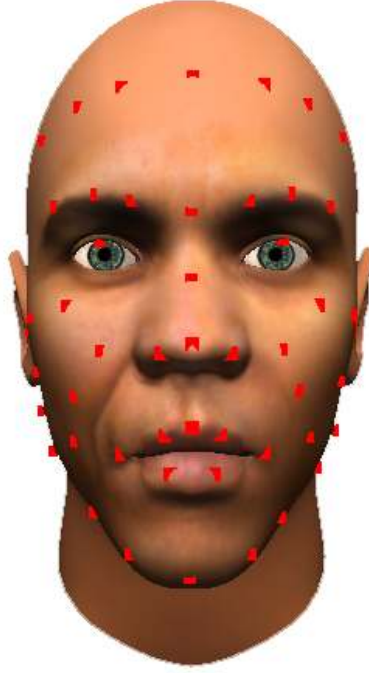
Sistemimiz, [8]'de kullanılabenzer şekilde deformasyon tabanlı olarak çalışmaktadır. Kafa modeli üzerine, yüz ifadelerinin oluşturulmasında kullanılan işaretçilere karşılık gelecek şekilde yerleştirilen ve işaretçiler tarafından hareket ettirilen “sanal işaretçiler” ile kafa modeli deformasyona uğratılmaktadır. İşaretçi verisinde bulunan işaretçi sayısı ile aynı sayıda olacak şekilde oluşturulan sanal işaretçilerin her biri, kafa modeli üzerindeki bir nokta ile eşleştirilmektedir. Her bir sanal işaretçinin, eşleştiği noktayı merkez alacak şekilde $x - y$ düzleminde belirli bir r yarıçapında ve z eksenine paralel olarak belirli bir d derinliğinde silindir oluşturacak şekilde etki alanı mevcuttur (Şekil 3.3). Sistemin ilk kısmından elde edilen işaretçilerin her karedeki konum bilgilerinden faydalanarak sanal işaretçilerin yerleri değiştirilmektedir. Sanal işaretçinin etki alanında bulunan noktalar ise, işaretçinin merkez noktasına olan uzaklıkları ile ters orantılı olarak konum değişikliğine uğratılmaktadır.



Şekil 3.3. Sanal işaretçi ve etki alanı. Kırmızı nokta sanal işaretçinin etki alanının merkezi olmak üzere, r yarıçapında, z eksenine paralel d derinliğinde bir silindir

3.3. İşaretçi Eşleme ve Komşuluk Algoritması

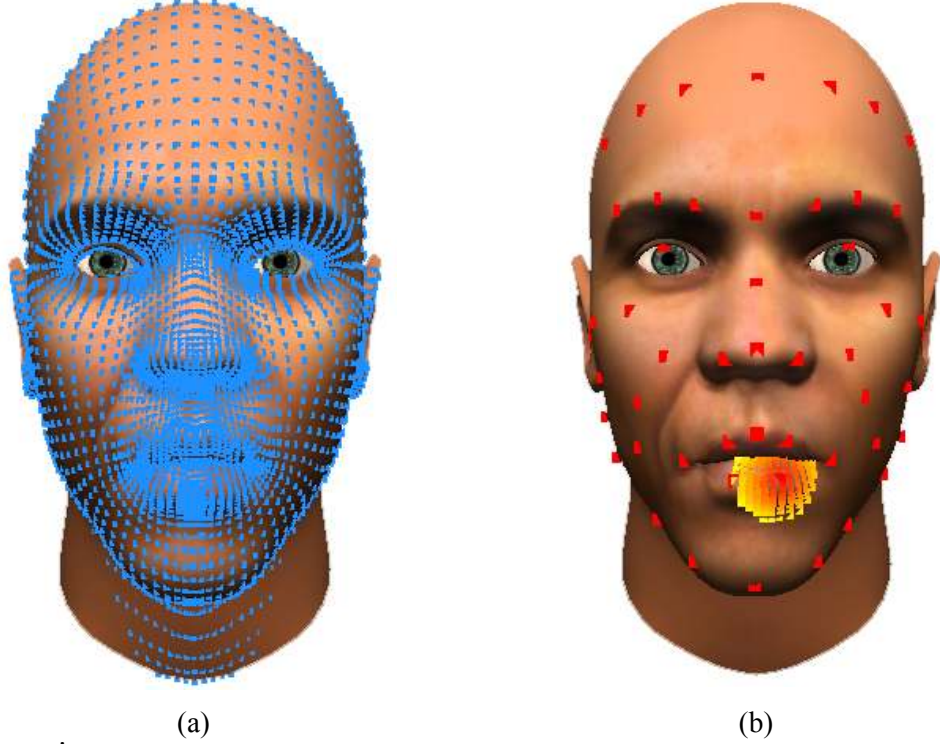
Sistemde canlandırmanın oluşturulabilmesi için kafa modeli ile işaretçi verileri arasında eşlemenin sağlanması gerekmektedir. İşaretçi eşleme işlemi, sistem tarafından sağlanan grafiksel kullanıcı ara yüzü ile kullanıcı tarafından fare kullanılarak yapılmaktadır.



Şekil 3.4. İşaretçi verileri ile eşleşen kafa modeli üzerindeki sanal işaretçiler

Şekil 3.4'te örnek kafa modeli üzerine bütün sanal işaretçilerin yerleştirilmiş olduğu durum gösterilmiştir. İşaretçilerin eşlenebilmesi için kullanıcı öncelikle ekranda görünen işaretçi verisi üzerindeki noktalardan (yani işaretçilerden) birini fare ile seçmelidir. Kafa modeli üzerinde surat kısmını oluşturan ve sanal işaretçilere atanacak olan noktalar, kullanıcı ara yüzünden faydalanılarak ekrana çizdirilir. Bir önceki adımda seçilmiş olan işaretçiye kafa modeli üzerinde karşılık gelecek sanal işaretçinin konumlanacağı nokta fare ile seçilmelidir. Seçilen noktanın etiket numarası ve seçilen işaretçinin adı ara yüzde kullanıcıya gösterilmektedir. Şekil 3.5.a'da modelin yüz kısmını oluşturan noktalar görülmektedir. Daha sonra kullanıcı ara yüzü kullanılarak sanal işaretçinin etki edeceği alanın yarıçapı ve derinliği girilir. Burun kemiği üzerinde ve alnın saç ile birleştiği noktalarda işaretçilerin genellikle hareketsiz olması istenmektedir. İşaretçi verisinden kaynaklanabilecek gürültüleri yok etmek için bu gibi işaretçilerin yer değişimini kullanıcı ara yüzü ile ortadan kaldırma seçeneği kullanıcıya sunulmuştur. Şayet seçilmiş olan işaretçinin kafa modeli üzerinde hareket oluşturması istenmiyorsa sanal işaretçi "sabit" olarak ayarlanır. Daha sonra "Komşuları Hesapla" düğmesine basılarak sanal işaretçinin etki alanına giren noktalar, komşuluk algoritmasına göre hesaplanır. Bu işlem

tamamlandıktan sonra sanal işaretçi için hesaplanmış olan komşu noktalar model üzerinde gösterilir (Şekil 3.5.b). Kullanıcının onaylaması durumunda sanal işaretçi, işaretçi verisindeki gerçek işaretçi ile eşleştirilmiş olur.

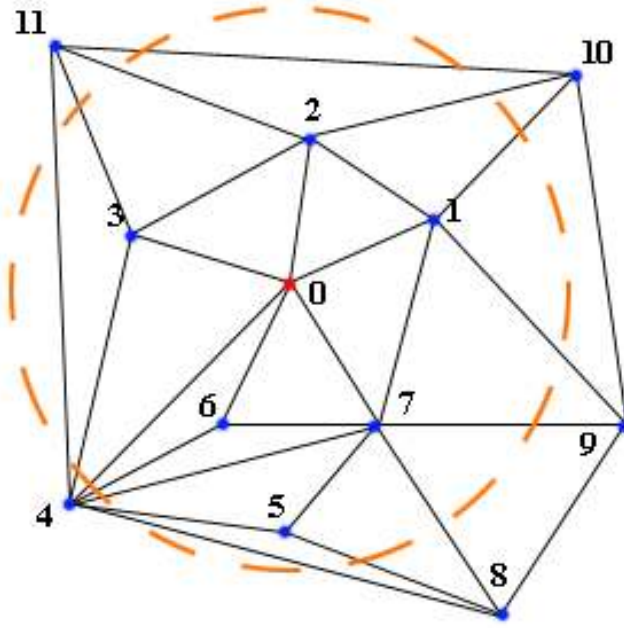


Şekil 3.5. İşaretçi eşleme. (a) Sanal işaretçi için merkez noktasının seçilmesi (b) Sanal işaretçinin etki alanındaki noktaların bulunması ve gösterilmesi

3.3.1. Komşuluk Algoritması

Sistemde her sanal işaretçi için etki alanına giren noktaların tutulduğu bir komşu nokta listesi bulunmaktadır. Algoritma ilk olarak sanal işaretçi için atanan merkez noktasını komşuların tutulduğu listeye eklemektedir. Daha sonra kafa modelinde bu noktayı içeren bütün üçgenler aranarak, elde edilen her üçgende diğer iki noktadan sanal işaretçinin etki alanına giren ve önceden komşu listesine eklenmemiş olan noktalar komşu listesine eklenir. Komşu listesine eklenen her yeni nokta için bu işlem özyinelemeli olarak tekrarlanır. Algoritma özyinelemeli olmasına rağmen, sistemde kullanılacak olan ideal bir kafa modelinde sanal bir işaretçi ile eşleşecek noktaların sayısının genellikle 100'ü geçmemesi ve algoritmanın önceden listeye eklenen ya da sanal işaretçinin etki alanı dışında kalan noktalar için aramayı

ilerletmiyor olması dolayısıyla makul ölçüde kısa sürede sonlanmaktadır. Sonuçta algoritma sanal işaretçinin etki alanına giren toplam nokta sayısı kadar çağırılmış olacaktır. Şekil 3.2’de görülen 5960 nokta ve 11492 yüzeyden oluşan kafa modeli için önceden kaydedilmiş olan 50 işaretçinin eşlenmesi ve komşularının hesaplanıp atanması işlemi, 3 saniyeden daha kısa sürede gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.6. Komşuluk algoritması

Komşuluk algoritmasının çalışma mantığını şekil üzerinde anlatacak olursak, Şekil 3.6’da “0” ile etiketlenen nokta, sanal işaretçinin merkezini, kesik çizgilerle çizilmiş olan dairesel bölge ise etki alanını ifade etmektedir. Komşuluk algoritmasının ilk basamağında “0” noktası komşu listesine eklenecektir. Daha sonra sanal işaretçinin etki alanı içerisindeki muhtemel komşuları bulmak için “0” noktasını içeren (0, 1, 2), (0, 2, 3), (0, 3, 4), (0, 4, 6), (0, 6, 7) ve (0, 7, 1) üçgenlerindeki “1, 2, 3, 4, 6, 7” noktaları için yakınlık testi yapılacaktır. “0” noktasının etki alanı dışında kalan “4” noktası haricindeki noktalar, merkez noktasına olan öklit uzaklıklarının sanal işaretçinin etki alanının yarıçapına olan oranına göre [0, 1] aralığında bir ağırlıkla etiketlenip komşu listesine ekleneceklerdir. Sonraki adımda komşu listesine eklenen her yeni nokta için koşuluk fonksiyonu tekrar çağırılacaktır. Bir sonraki adımda çalıştırılan komşuluk algoritmalarından, sadece “7” noktası için başlatılan algoritma

yeni bir noktayı (“5” noktası) komşu listesine ekleyerek üçüncü seviyede bir komşuluk fonksiyonu çağıracaktır. Bunun dışındaki bütün fonksiyonlar, listeye eklenecek bir nokta bulunamadığından dolayı algoritmanın taban durumuna gelip çalışmayı sonlandıracaklardır. Sonuç olarak şekildeki gibi bir nokta kümesi için üç seviyede toplam 7 kez komşuluk algoritması çalıştırılmış olacaktır. Algoritmanın Şekil 3.6’daki nokta kümesi üzerinde çalıştırılması durumunda yapılacak olan uzaklık karşılaştırmaları, komşu listesine eklenecek noktalar ve algoritmanın özyinelemeli olarak çalıştırılması, Şekil 3.6’da ifade edilmiştir.

0 >> 1,2,3,4,6,7
1 >> 0,2,7,9,10
2 >> 0,1,3,10,11
3 >> 0,2,4,11
6 >> 0,3,4,7
7 >> 0,1,4,5,6,8,9
5 >> 4,7,8

Şekil 3.7. Komşuluk algoritmasının Şekil 3.6’daki nokta kümesi için çalıştırılması. Algoritma üç seviyede toplam 7 kez çağırılmıştır. Her bir noktada okun sağ tarafında belirtilen komşu noktalar için uzaklık karşılaştırması yapılmıştır. Komşu listesine eklenecek olan noktalar kırmızı ile belirtilmiştir.

Algoritmanın hızlandırılması için üçgenler arasında ortak olan noktalara tekrar uzaklık testi uygulanması engellenebilir. Örneğin Şekil 3.6’daki “4” noktası, Şekil 3.7’de görüldüğü üzere “0, 3, 6, 7, 5” noktaları için algoritma çalıştırıldığında toplam 5 kez uzaklık testine tabi tutulmuştur. Bu fazladan karşılaştırmaları önlemek için merkez noktasına olan uzaklığı hesaplanan bir noktanın uzaklığını tekrar hesaplamamak için ilk uzaklık testinden sonra mesafenin kaydedilmesi düşünülebilir. Zamandan kazanmak için en elverişli veri yapısı olan hash tabloları kullanıldığı takdirde algoritma büyük ölçüde hızlanacaktır. Fakat kafa modelini oluşturan nokta sayısının çok fazla olabileceği ve bir işaretçinin komşuluğundaki noktaların bu tablonun çok küçük bir kısmını dolduracağı için, hash tablosu kullanmak hafızadan büyük yer kaybına neden olacaktır. İkili ağaç yapısı ya da bağlı liste oluşturulması

ise, arama işlemini doğrusal ya da logaritmik zamanda yapıyor olması itibariyle ek zaman yükü getireceğinden tercih edilmemiştir. Yukarıda da belirtildiği gibi algoritmanın makul ölçüde hızlı sonuç ürettiği ve uygulanabilecek hızlandırma tekniklerinin verimli olmaması nedeniyle algoritmadaki fazladan karşılaştırmaların ihmal edilebilir olduğuna karar verilmiştir.

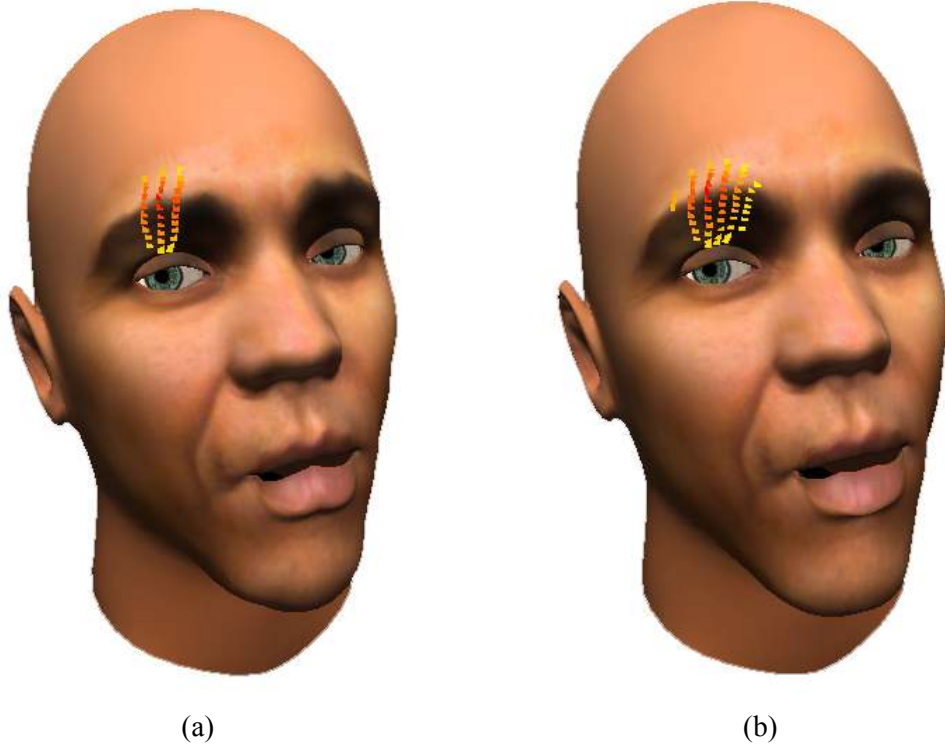
Sanal işaretçinin etki alanına giren komşu noktalara, sanal işaretçinin merkez noktasına olan uzaklıkları ile ters orantılı olacak şekilde ağırlıklar atanmıştır. Bu ağırlık dağılımı kullanıcıya ara yüzde dereceli renklendirme ile gösterilmektedir. Şekil 3.5.b’de alt dudakta bulunan sanal bir işaretçi için etki alanındaki noktalar ve ağırlık dağılımı gösterilmiştir. Elde edilen ağırlık değerleri, sanal işaretçinin etki alanında bulunan noktaların eşlenmiş oldukları işaretçinin yer değiştirmesinden ne oranda etkileneceklerini ifade etmektedir.

3.3.2. Noktaların Sanal İşaretçilere Atanması

Komşuluk algoritması ile bulunan noktalar, sanal işaretçinin etki alanı içine giren noktalar kümesini oluşturmaktadır. Kafa modeli üzerinde bulunan her hangi bir nokta, en fazla bir sanal işaretçinin komşusu olarak atanabileceği gibi birden fazla sanal işaretçinin etki alanına da girebilir. Bu iki seçenek arasında performans – kalite dengesinin gözetilmesi gerekmektedir.

İlk durumda olduğu gibi şayet her bir nokta en fazla bir sanal işaretçi tarafından kontrol edilecek olursa, komşuluk algoritmasında biraz değişiklik yapılması gerekecektir. Yeni durumda sanal işaretçinin etki alanına giren her bir nokta için başka bir sanal işaretçi tarafından komşuluğa kabul edilmiş olup olmadığının test edilmesi gerekmektedir. İki sanal işaretçinin etki alanlarının kesişiminde bulunan noktaların ise, daha yakın oldukları sanal işaretçiye komşu olarak atanmaları gerekmektedir. Komşuluk algoritmasına getirdiği ekstra yükten dolayı sadece sistemin başlangıç anında bu seçenek kısmi bir yavaşlamaya sebep olacaktır. Fakat ilerleyen her karede kafa üzerindeki her bir noktanın konumunun en fazla bir defa değiştirilecek olmasından dolayı da sistemin çalışmasında kısmi bir hızlanma gözlenecektir. Bu yöntemin performans üzerindeki bu etkisinin yanında canlandırma

kalitesi üzerinde olumsuz bir etkisi gözlenmiştir. Sanal işaretçilerin etki alanlarının kesiştiği bölgelerde sınırlar keskin bir biçimde oluşacağı için yüz hareketi oluşturulurken yüz üzerinde kırışıklıklar gözlemlenecektir. Şekil 3.8.a’da kaşlarda, çenede ve dudakta işaretçilerin etki alanlarının sınırlarının oluşturduğu kırıklı kırışıklıklar belirgin biçimde görülebilmektedir.



(a) Noktaların sanal işaretçiler arasında paylaşılmadığı durum (b) Noktaların sanal işaretçiler arasında paylaşıldığı durum

Noktaların birden fazla sanal işaretçi tarafından ortak olarak hareket ettirilmesi durumunda, bazı noktaların birden fazla defa konum değişikliğine uğrayabilme olasılığından dolayı sisteme ilk duruma kıyasla bir miktar ekstra yük getirecektir. Fakat Şekil 3.8.b’de görüleceği gibi bu yöntemle elde edilecek olan yüz canlandırması daha gerçekçi olmaktadır. Sistemimizde her iki şekilde komşu atama durumları da gerçekleştirilmiştir. Kullanıcıya programın başlangıcında tercih yapması için her iki seçenek de sunulmaktadır. Fakat noktaların paylaşıldığı durumda çok daha başarılı sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir.

3.3.3. İşaretçi Verisinin Oranlanması

Mevcut işaretçi verisinde işaretçilerin birbirleri arasındaki mesafe ile sistemde kullanılan kafa modelini oluşturan noktaların birbirleri arasındaki mesafe birbirinden çok farklı olabilir. Bu durumda işaretçilerin konum değişiklikleri hiç bir oranlamaya tabi tutulmadan modele aktarılmaya çalışıldığında, kafa modeli anlamsız bir şekil alabilir. Bu durumu önlemek için kafa modeli ile işaretçi verilerinin boyutları arasındaki oran tespit edilmelidir. Bu amaçla işaretçi verilerinin konum değişikliği modele aktarılmadan önce, işaretçi verisini oluşturan iki sabit işaretçi (alnın iki ucundaki işaretçiler gibi) arasındaki uzaklık ile kafa modeli üzerinde bu iki işaretçiyle eşleşen iki sanal işaretçi arasındaki uzaklık birbirine oranlanmaktadır. Elde edilen bu oranın işaretçi verisinden elde edilecek olan konum değiştirme bilgilerine uygulanmasıyla elde edilen yer değiştirme bilgisi sanal işaretçilere aktarılarak yüz ifadesi elde edilmektedir.

3.4. Kafa Hareketi

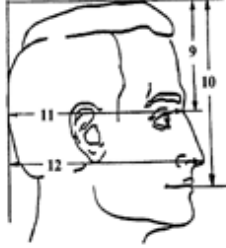
Gerçekçi yüz animasyonunu elde etmede kafa hareketlerinin gerçekçi olarak üretilmesinin rolü büyüktür. Kafanın hareketi, yer değiştirme ya da kafayı çevirme şeklinde olabilir. Her iki hareket için de üç boyutlu uzaydaki üç eksende üçer hareket yapılabilir. Sonuçta yüz animasyonun toplam 6 hareketi kafa hareketlerinden elde edilir. Kafanın bu hareketleri, hareket yakalama verisinde bulunan ve yüz ifadeleri ile konumu değişmeyen işaretçiler referans alınarak hesaplanmaktadır.

3.4.1. Yer Değiştirme

Kafanın yer değiştirmesini hesaplamak için aktörün kafasının merkez noktasının yer değişiminden faydalanılmaktadır. Kafanın eksenler etrafındaki dönüşünden etkilenmeyen kafa merkezi, sadece kafanın konum değiştirdiği durumlarda yer değiştirmektedir. Hareket yakalama verisinden faydalanarak bulunan kafanın merkezinin her karedeki yer değişimi istenen hareketin elde edilmesini sağlamaktadır.

Çizelge 3.1. İnsan kafasının antropometrik incelemesi [50]

(a) 12. Uzunluk: Burun ucundan kafanın arkasına kadar olan uzunluk



Örnek	Uzunluk Birimi	Sıralı Yüzdelik Dilimler				
		1.inci	5.inci	50.inci	95.inci	99.uncu
Erkek	cm	20.0	20.5	22.0	23.2	23.9
Bayan	cm	19.2	19.7	21.0	22.2	22.8

(b) 6. Uzunluk: Kulak önlerindeki üçgensel bölgeler arasındaki uzunluk



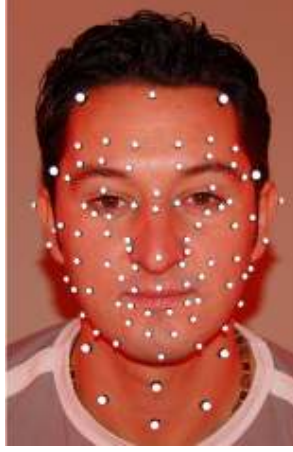
Örnek	Uzunluk Birimi	Sıralı Yüzdelik Dilimler				
		1.inci	5.inci	50.inci	95.inci	99.uncu
Erkek	cm	13.1	13.5	14.5	15.5	15.9
Bayan	cm	12.5	12.8	13.3	14.3	15.0

Kafanın merkezinin tam olarak tespit edilmesi için laboratuvar ortamında milimetrik ölçümler yapılması gerektiğinden, sistemimizde kafa merkezi ancak yaklaşık olarak bulunmaktadır. Bu amaçla ortalama bir insan kafasındaki oranlardan faydalanarak kafa merkezi tespit edilmektedir.

[50]'deki çalışmada, 100 yetişkin erkek ve bayanın kafalarındaki belirli noktalar arasındaki uzaklıklar tespit edilmiştir. Elde edilen uzunluklar küçükten büyüğe sıralanmış ve 1, 5, 50, 95 ve 99.uncu sıradaki kişilerden elde edilen uzunluklar kaydedilmiştir. Çizelge 3.1.a'da 12 ile ifade edilen mesafede burun ucu ile kafanın arkası arasındaki uzunluk gösterilmiştir. Bu uzunluk için ortanca değer erkeklerde 22.0 cm, bayanlarda 21.0 cm'dir. Çizelge 3.1.b'de 6 ile ifade edilen mesafede kulak önlerindeki üçgensel bölgeler arasındaki uzunluk ölçülmüştür. Bu uzunluk için ise ortanca değer erkeklerde 14.5 cm, bayanlarda 13.3 cm'dir.

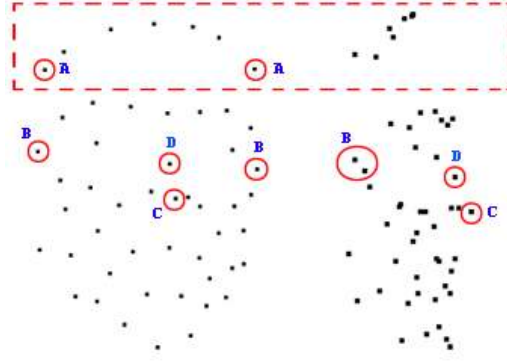
Çalışmamızda kafanın merkezinin, yaklaşık olarak burun ucu hizasında, Çizelge 3.1.a'da belirtilen uzunluğun yarı mesafesinde bulunduğu kabul edilmiştir. Şekil

3.9’da görülen aktörün yüzü üzerindeki işaretçilerden elde edilen işaretçi verisi sayesinde, aktörün iki kulağı arasındaki mesafe bilinmektedir. Çizelge 3.1 deki uzunluklar ile işaretçi verisinden alınan bu uzunluk oranlandığında, kafanın merkezinin burun ucundan ne kadar uzakta olduğu tespit edilmiş olur.



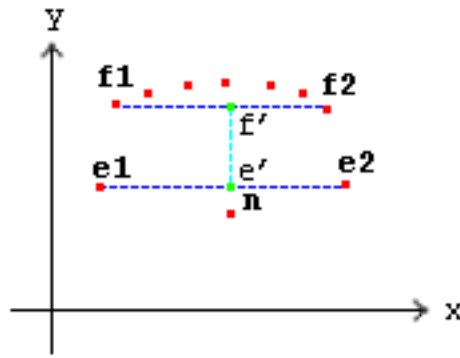
Şekil 3.9. Yüz ifadesi yakalama oturumu sırasında yüzüne işaretçi yerleştirilmiş bir aktör (Resim Mocap.lt şirketinden alınmıştır.)

Kafanın merkez noktasının burun ucuna olan uzaklığının yanı sıra, işaretçilere göre belirlenecek olan konumunun da bulunması gerekmektedir. Bu amaçla yüz üzerinde hareketsiz olduğu kabul edilen, bir başka deyişle yüz ifadeleri ile konumu değişmeyen işaretçilerden faydalanılmaktadır. Şekil 3.10’da “A” ile etiketlenmiş olan işaretçiler alnın iki ucundaki noktaları, “B” ile etiketlenen işaretçiler kulak önündeki üçgensel bölgeleri, “C” ile etiketlenmiş olan işaretçi burun ucunu, “D” ile etiketlenmiş olan işaretçi ise burnun ortasında bulunan kemiğin orta noktasını ifade etmektedir. Yüz üzerindeki diğer işaretçilere göre ihmal edilebilecek miktarlarda yer değiştiren bu işaretçilerin konumlarından faydalanılarak kafa merkezi tespit edilmektedir.

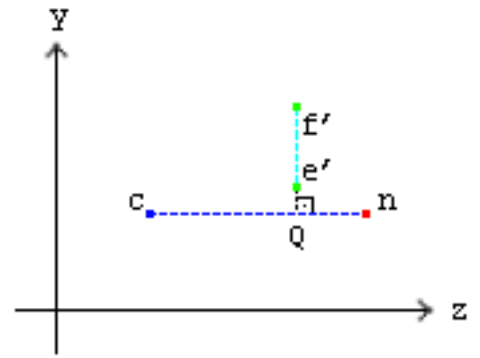


Şekil 3.10. Kafanın merkezinin tespiti için kullanılan hareketsiz işaretçiler

Kafa merkezinin konumunu tespit etmek için öncelikle alnın iki ucundaki işaretçilerin ve kulak önlerindeki işaretçilerin orta noktalarının konumları ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Şekil 3.11.a'da alnın bölgesindeki işaretçileri ifade eden $f1$ ve $f2$ noktalarının orta noktası olarak f' , kulak önlerindeki noktaları ifade eden $e1$ ve $e2$ noktalarının orta noktası olarak e' noktası bulunmaktadır. Daha sonra elde edilen bu iki nokta arasındaki $\overrightarrow{f'e'}$ vektörü hesaplanmaktadır. Bir sonraki adımda $\overrightarrow{f'e'}$ vektörüne dik olan ve burun ucundaki işaretçinin (Şekil 3.11.b'de n noktası) konumunu içeren düzlemin denklemi elde edilir. Ayrıca bu düzlem ile önceki adımda elde edilen vektörün kesiştiği nokta bulunur (Q noktası).



(a)



(b)

Şekil 3.11. (a) Alnın iki ucu ve kulak önlerindeki üçgenel bölgedeki işaretçilerin orta noktaları bulunur ve bu iki noktayı birleştiren vektör elde edilir. (b) Elde edilen vektörün dik kestiği ve burun ucunu içeren düzlemin denklemi bulunur.

Son adımda, burun ucu n ile kesişim noktası Q arasındaki x , y ve z eksenlerindeki değişim ile önceden hesaplanan burun ucu - kafa merkezi arasındaki mesafe oranlanarak, kafa merkezinin (c noktası) x , y ve z koordinatları bulunmuş olur.

3.4.2. Çevirme

Kafanın merkezini orijin kabul eden kafaya ait koordinat düzleminde, kafanın x , y ve z eksenlerine göre yaptığı dönme hareketleri kafanın çevrilmesini sağlar. Kafanın çevrilmesinin hesaplanması için de hareketsiz işaretçi verilerinden faydalanılmaktadır. Kafanın çevrilme hareketini sağlıklı olarak bulabilmek için sabit işaretçilerden geçen doğruların eğimlerinden faydalanılmaktadır. Fakat bu doğruları oluşturacak olan noktalar seçilirken, hareketin bulunmak istendiği eksene dik bir doğru oluşturulmaya çalışılmalıdır. Çünkü eksenlere paralel olan doğrular, paralel oldukları eksenlerdeki çevrilme hareketi konusunda sağlıklı bilgi sağlamayacaklardır.

Kafanın x ve y eksenindeki çevrilme hareketi için, bu eksenlerin oluşturduğu düzleme dik olan, bir başka deyişle z eksenine paralel olan bir doğru kullanmak gerekmektedir. Sabit işaretçilerden kulak önlerindeki işaretçilerin orta noktası ve burnun ortasında bulunan sabit kemik üzerindeki işaretçiden geçen doğru bu ihtiyacı karşılamaktadır. Şekil 3.10'da bu noktalar sırasıyla "B" ve "D" harfleri ile etiketlenmiştir. Bu doğrunun eğiminin x ve y eksenlerindeki bileşenleri, kafanın x ve y eksenlerinde ne kadar çevrilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kafanın z eksenindeki çevrilme hareketi için ise z eksenine dik olan düzlemden bir doğru seçilmelidir. Bu doğru için ise Şekil 3.10'da "A" ile etiketlenen alnın iki ucundaki hareketsiz işaretçiler kullanılmıştır. Elde edilen doğrunun eğiminin z eksenindeki bileşeni, kafanın z eksenindeki dönme açısına eşittir.

Hareket bilgisinin kafa modeline uygulanmasında, her bir kare için hangi durumun referans alınacağı da sağlıklı sonuçlar üretilebilmesi açısından önemli bir problemdir. Şayet her karede bir önceki kareye göre hareket bilgisi güncellenecek olursa, her karedeki hesaplamalarda küçük miktarlarda bulunan hatalar birleşerek ilerleyen karelerde tutarsız kafa hareketleri ortaya çıkmasına sebep olacaktır. Bunu önlemek için sistemin başlangıcında işaretçi hareket verisinin ilk karesindeki bilgilerle kafanın

pozisyon ve çevirme bilgisi elde edilip kaydedilmektedir. Takip eden her karede aynı işlemin tekrar uygulanmasıyla elde edilen konum ve çevirme bilgisinin ilk karedeki sonuçlardan farkının hesaplanmasıyla, her bir kare için kafanın nerede bulunacağı ve kaç derece çevrileceği bilgisi elde edilmiş olmaktadır. Bu bilgilerin her karede başlangıç durumuna göre tekrar hesaplanması sayesinde sistemdeki hata oranı sabit tutulmuş olmaktadır.

Bu kısımda kafanın yer değiştirmesi ve çevrilmesi için önerilen yöntemlerin sistemimizde uygulanması sonucunda gerçekçi kafa hareketleri canlandırması elde edilmiştir.

3.5. Yüz İfadelerinin Modele Aktarılması

Sistemde mevcut bulunan işaretçi bilgileri, üç boyutlu uzayda işaretçilerin her karedeki konumlarını ifade eden bir yapıda bulunmaktadır. İşaretçilerin konumu ise, kafanın yerinin değiştirilmesi, kafanın çevrilmesi ve yüz ifadelerinin oluşturulmasına sebep olacak şekilde yüz kaslarının hareket etmesine bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla yüz ifadelerini kafa modeline aktarmak için öncelikle işaretçi verisindeki kafa hareketlerinin ortadan kaldırılıp, sadece yüz ifadelerinden kaynaklanan işaretçi konum değişikliklerini içeren kararlı bir bilgiye ulaşılması gerekmektedir. Daha sonra elde edilecek olan kararlı işaretçi bilgileri ile tanımlanmış olan sanal işaretçiler hareket ettirilerek yüz ifadeleri kafa modeline aktarılmış olacaktır.

3.5.1. İşaretçi Bilgilerinin Kararlı Hale Getirilmesi

İşaretçi tabanlı aktör performansının yakalandığı sistemlerde işaretçi bilgisinden aktörün kafa hareketinin çıkarılıp sadece yüz ifadelerinden kaynaklanan değişimlerin elde edilmesi işlemi önemli bir problemdir. Bu sorunu çözmek için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Kafa hareketi içermeyen aktör performansı elde etmede akla gelen ilk yöntem, aktör performansı yakalanırken aktörün kafasını hareket ettirmesini önlemektir [8]. Fakat bunun tam olarak sağlanması mümkün olmadığı gibi gerçekçi bir yüz animasyonunda kafa hareketlerinin canlandırılmasının da payı büyüktür. Bunun yerine kullanılan diğer bir yöntem, işaretçi bilgilerinin kararlı hale getirilmesi için aktörün kafasına ait yerel bir koordinat sistemi oluşturulmasıdır. Böylelikle bu

koordinat sisteminde işaretçilerin yer değiştirmesi sadece yüz ifadelerinden kaynaklanmış olacaktır.

[30]'da detaylı olarak anlatılan işlemde dünya koordinat sistemine göre oluşturulan yerel koordinat sisteminin elde edilmesinde yüz üzerindeki sabit işaretçilerden faydalanılmaktadır. Yüzün sağ tarafındaki sabit işaretçilerin ortalamasının alınmasıyla elde edilen nokta ile yüzün sol tarafındaki sabit işaretçilerin ortalamasının alınmasıyla elde edilen noktadan geçen vektör, yerel koordinat sisteminin x eksenini oluşturmaktadır. Alın bölgesinde bulunan ve yüzü simetrik olarak ikiye bölecek şekilde konumlanmış olan sabit işaretçilerin orta noktası ile burun kemiği üzerindeki sabit işaretçiden geçen vektör, yerel koordinat sisteminin y eksenini oluşturmaktadır. Daha sonra elde edilen bu iki vektörün vektörel çarpımı, bu iki eksene dik olan z eksenini elde etmemizi sağlamaktadır. y ve z eksenleri elde edildikten sonra, x ekseninin bu iki eksene dik olduğunu garanti etmek için y ve z eksenlerinin vektörel çarpımları hesaplanarak x eksenini tekrar hesaplanmaktadır.

Yerel uzaydaki bir noktanın koordinatlarının dünya uzayındaki koordinatlar ile olan ilişkisi (3.1) de olduğu gibi tanımlanmıştır. Burada $P = [x, y, z]$, bir noktanın yerel uzaydaki konumunu belirtmektedir. A, yerel koordinat sistemini oluşturan 3x3 lük bir matristir. A matrisinin satırları, yerel koordinat sisteminin sırasıyla x, y ve z eksenlerini ifade etmektedir. $P' = [x', y', z']$ ise noktanın dünya koordinat sistemindeki konumunu belirtmektedir.

$$P * A + yerel Orijin = P' \quad (3.1)$$

Elimizde mevcut bulunan işaretçi bilgileri bize her bir noktanın dünya koordinat sistemindeki yerini bildirmektedir. Yani P' başlangıçta bilinmektedir. (3.1) deki A matrisi olan yerel koordinat sisteminin eksenleri ve yerel orijin de işaretçi verilerinden faydalanarak hesaplanabilmektedir. Yerel orijini denklemin karşı tarafına alınca (3.2) elde edilir.

$$P * A = P' - \text{yerel orijin} \quad (3.2)$$

Daha sonra denklemin her iki tarafı A matrisinin tersi olan bir B matrisi ile çarpılarak (3.3) denklemi elde edilir. A * B matrisi, birim matris olduğu için (3.4) denklemine ulaşılmış olur.

$$P * A * B = (P' - \text{yerel orijin}) * B \quad (3.3)$$

$$P * I = (P' - \text{yerel orijin}) * B$$

$$P = (P' - \text{yerel orijin}) * B \quad (3.4)$$

Sonuç olarak A matrisinin tersi olan B matrisi hesaplanarak, bir noktanın yerel koordinat sistemindeki konumu elde edilebilmektedir. A matrisinin eksenleri birbirine dik olduğu için determinantı hiç bir zaman 0 olmayacaktır. A matrisi de tekil bir matris olmadığı için her zaman tersi bulunacaktır. Bundan dolayı B matrisini temel cebir işlemleri uygulayarak elde etmek mümkündür.

Bütün hareket yakalama verisi için aynı yerel koordinat sistemini kullanmak için ilk karede referans alacağımız bir koordinat sistemi oluşturmamız gerekmektedir. İlk karede elde edeceğimiz koordinat sisteminin eksenini ifade eden matris M ile ifade edilirse, (3.5) denkleminde P * M ile bir noktanın dünya koordinat sistemindeki konumu kafa hareketinden bağımsız olarak elde edilmiş olur. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, M matrisinin sadece ilk karede hesaplanması gerekirken, A ve B matrislerinin her kare için ayrı hesaplanıyor olduğudur.

$$P'' = P * M = (P' - \text{yerel orijin}) * B * M \quad (3.5)$$

(3.5) denkleminde N = B * M olmak üzere bir N matrisi tanımlanırsa, (3.6) denklemi elde edilir. Böylelikle her bir karede A matrisini oluşturmak için iki vektör çarpımı,

N matrisini oluşturmak için bir matris çarpımı ve her bir işaretçi için P'' konumunun hesaplanması için bir matris çarpımı yapılması gerekmektedir.

$$P'' = (P' - yerel\ orijin) * N \quad (3.6)$$

Hareket yakalama verisinin büyük kafa hareketleri içermesi ya da sabit işaretçilerin istenen ölçüde sabit olmaması durumunda, elde edilen kararlı işaretçi verilerindeki kafa hareketinin hepsi ayıklanamayabilir. Bu durumda yukarıda sıralanan işlemler, elde edilen sonuç verisine bir ya da iki defa daha uygulanırsa, işaretçi verisindeki kafa hareketi önemli ölçüde ayıklanmış olacaktır.

3.5.2. Yüz İfadelerinin Canlandırılması

İşaretçi verilerindeki kafa hareketlerine bağlı olan konum değişikliklerinin ayıklanmasıyla elimizdeki verilerde sadece yüz ifadelerinden kaynaklanan işaretçi konum değişiklikleri bulunmaktadır. Bu konum değişiklikleri, sanal işaretçilerin etki alanlarındaki noktaların konumlarının değiştirilmesinde kullanılarak yüz ifadeleri oluşturulmaktadır. İşaretçi verilerindeki konum değişikliği, kafa modelinin farklı bölgelerine sahip oldukları çeşitli davranış şekillerinden dolayı farklı biçimde uygulanmaktadır. Bu bölümde dudaklar, yanaklar, kaşlar ve çeneye yapılan uygulama, gözlerin hareket ettirilmesinde uygulanan yöntem ve kaşların hareket ettirilmesinde izlenen yöntem ayrı başlıklar altında incelenecektir.

3.5.2.1. Dudaklar, Yanaklar, Kaşlar ve Çenenin Hareket Ettirilmesi

Sanal işaretçilerin oluşturulması ve komşularının atanması işlemi sırasında, sanal işaretçilerin etki alanlarında bulunan her bir komşu nokta için işaretçinin konum değişikliğinden ne ölçüde etkileneceğini belirten bir ağırlık ataması yapılmıştı. Noktanın sanal işaretçinin merkezine olan uzaklığı d, sanal işaretçinin etki alanının yarıçapı r olmak üzere, w ağırlığı $w = d/r$ ile ifade edilmiştir. Etki alanı içerisindeki her noktada $d \leq r$ olduğundan dolayı w değeri [0, 1] aralığındaki bir reel

sayıdır. Bu durumda sanal işaretçinin merkezine yakın olan noktalar işaretçinin konum değiştirmesinden daha çok, uzak olan noktalar daha az etkilenmektedirler.

Dudaklar, yanaklar, kaşlar ve çenede bulunan sanal işaretçiler, eşleştikleri işaretçinin konum değişikliğine bağlı olarak yer değiştirmektedirler. Bu sanal işaretçilerin etki alanlarında bulunan noktalar ise sahip oldukları w ağırlığı ile orantılı olarak işaretçinin konum değişikliğinden etkilenmektedirler.

Dudaklarda bulunan sanal işaretçilerin etki alanı ayarlanırken, üst dudakta bulunan bir işaretçinin alt dudaktan, alt dudaktaki bir işaretçinin de üst dudaktan komşu almamasını sağlayacak şekilde hassas bir ayarlama yapmak gerekmektedir. Örneğin alt dudakta bulunan ve üst dudaktaki bir sanal işaretçinin merkez noktasına olan öklit uzaklığı sanal işaretçinin etki alanının yarıçapından az olan bir nokta, komşuluk algoritması sayesinde üst dudaktaki sanal işaretçinin komşuları arasına dâhil edilmeyecektir. Böylelikle üst dudaktaki işaretçinin hareketi ile yer değiştirmemesi gereken fakat fiziksel olarak yakınında bulunan alt dudak hareket ettirilmemiş olmaktadır.

Çenede bulunan işaretçiler de etki alanlarındaki noktaları yukarıda açıklanan mantıkla hareket ettirmektedirler. Bu noktada daha gerçekçi bir benzetim elde etmek adına çeneyi katı bir model olarak ele alıp, çene eklemi üzerinde bulunan bütün noktaları çene hareketine göre konumlandırmak mümkündür. Uğur Güdükbay [33]'de ağız hareketini, oynar çene eklemi modeli kullanarak canlandırmıştır. Bu yaklaşımın bizim çalışmamıza uyarlanmasında çene bölgesindeki işaretçilerin hareketlerinin analiz edilmesiyle çene hareketinin algılanmasından sonra, bu hareketin kafa modeli üzerine aktarılması yönünde bir uygulama yapmak mümkündür. Fakat yanakları ve dudakları hareket ettirmede kullanılan yöntemin çeneye uygulanması ile tatmin edici ölçüde gerçekçi canlandırma elde ettiğimiz için hesaplama karmaşası daha yüksek ve tasarımı daha zahmetli olan çeneyi oynar eklem olarak modelleme yöntemi sistemimizde kullanılmamıştır.

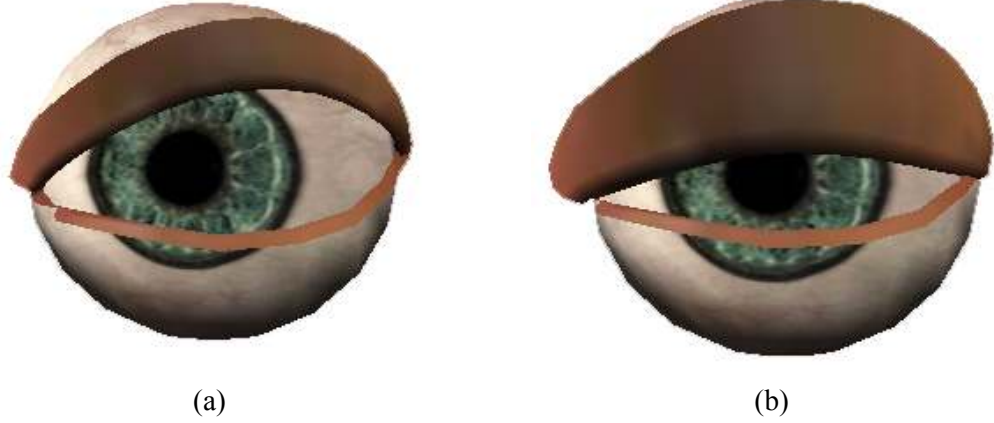
Dudaklar, yanaklar, kaşlar ve çenede bulunan sanal işaretçilerin etki alanlarının keşişiminde bulunan noktalar, etki alanına girdiği bütün noktalar tarafından sıra ile konum değişikliğine uğratılmaktadır. Böylelikle sanal işaretçilerin etki alanları

arasında pürüzsüz bir geçiş sağlanmış olmaktadır. Sistemimizin ürettiği canlandırmada, özellikle yanak, kaş ve çene bölgelerindeki sanal işaretçiler arasındaki uyumun tatmin edici ölçüde olduğunu gözlemlenmiştir.

3.5.2.2. Göz Kapaklarının Hareket Ettirilmesi

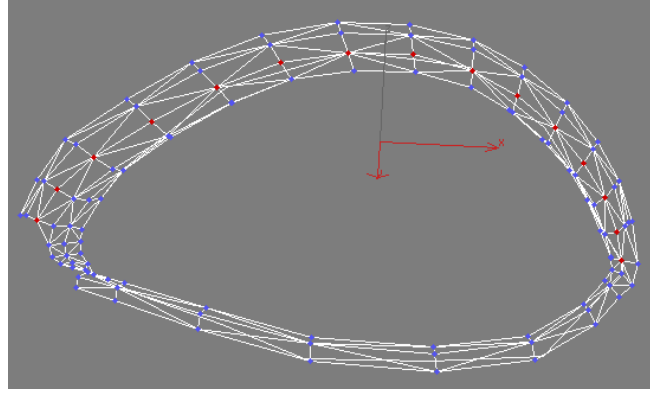
Göz kırpma işlemi sırasında sadece üst göz kapakları hareket etmektedir. Alt göz kapakları ise gözü kısma hareketi yapıldığı zamanlarda hareket etmektedir. Elimizdeki mevcut işaretçi verileri içerisinde göz kapağı için sadece üst göz kapaklarında konumlanmış olan birer işaretçi kullanıldığı için, sistemimizde işaretçi tabanlı olarak sadece göz kırpma işlemi canlandırması yapılmaktadır. Alt göz kapağının kısılması hareketi ise yüz ifadelerinin değiştirilmesi sırasında işaretçi verisinden bağımsız olarak uygulanmaktadır.

Göz kapağına atanacak olan sanal işaretçinin etki alanına girecek olan noktaların seçimi sırasında diğer işaretçilerde kullandığımız komşuluk algoritmasını kullanmak mümkün olmamaktadır. Çünkü komşuluk algoritması ancak dairesel bir alandaki noktaları, merkez noktasına olan uzaklıklarına göre ağırlıklandırmaya olanak tanımaktadır. Yüz üzerindeki noktaların konum değiştirmesi genel itibariyle bu ağırlıklandırma yöntemi ile modellenenmektedir. Göz kapağında ise göz kapağı modelini oluşturan noktalar açısız olarak aynı mesafeyi kat ederken, mekânsal olarak farklı miktarlarda konum değiştirmektedirler. Şekil 3.12.a'da açık durumdaki göz kapağı, 3.12.b'de ise yarı kapalı durumdaki göz kapağı görülmektedir. Şekilde de görüleceği gibi göz kapağının gözün orta kısmına denk gelen kısmı, gözün kenarlarına denk gelen kısımlarına göre mekânsal olarak daha fazla yer değiştirmiştir. Dolayısıyla göz kapağının canlandırılmasında komşuluk algoritması dışında özel bir yöntem kullanılması gerekmektedir.



Şekil 3.12. Göz kapağı ve göz modeli (a) Göz kapağı açık durumda (b) Göz kapağı yarı kapalı durumda

Sistemimizde göz kapağı canlandırmasını yapabilmek için sabit bir göz kapağı modeli kullanılmaktadır. Bu sabit göz kapağı modeli, kullanıcının canlandırma için seçtiği kafa modeli üzerinde yine kullanıcı tarafından belirtilen konuma yerleştirilmekte ve gerekirse yeniden boyutlandırılmaktadır. Sağ ve sol her iki göz kapağı için de aynı model kullanıldığından, sağ göz için modelin yansıması kullanılmaktadır. Kullanılan modelde üst göz kapağı için hareketli olarak tanımladığımız noktalar, aynı yatay sırayı takip eden ve 15 -18 noktadan oluşan L1,L2 ve L3 olmak üzere üç nokta kümesinden oluşmaktadır. Şekil 3.13'de orta sırayı oluşturan L2 noktalar kümesi kırmızı renk ile gösterilmiştir. L1 nokta kümesi göz kapağının en alt ve dolayısıyla göz kırpma hareketi sırasında en hareketli olan kısmını oluşturmaktadır. L3 nokta kümesi ise göz kapağı modelinin en üst kısmını oluşturmaktadır. Nokta kümelerinin göz kapağı işaretçisinin hareketinden etkilenme oranları birbirinden farklıdır. L1 nokta kümesi, işaretçinin konum değişikliğinden doğrudan etkilenmektedir. L2 nokta kümesi işaretçi hareketinin 0.9'u kadar, L3 nokta kümesi ise 0.7'si kadar yer değiştirmektedir. Uygulanan bu değerler deneysel olarak elde edilen değerlerdir.



Şekil 3.13. Göz kapağı modelinin poligonalsal yapısı

Nokta kümelerinin işaretçi hareketinden farklı oranda etkilenmesinin yanı sıra, bir nokta grubu içerisindeki noktalar da farklı miktarlarda hareket etmektedirler. Gözün ortasına yakın olan noktalar işaretçi hareketinden tam olarak etkilenirken, göz kapağının kenarlarına yaklaştıkça noktaların hareketten etkilenme katsayıları giderek azalmaktadır. Bu nokta grubu içi derecelendirmesini gerçekçi olarak elde edebilmek için, noktaların orta noktaya olan uzaklık sıralamalarına göre Gauss dağılımı uygulanmıştır. Sonuçta göz küresi üzerinde kayan bir göz kapağı canlandırması gerçekçi olarak elde edilmiştir.

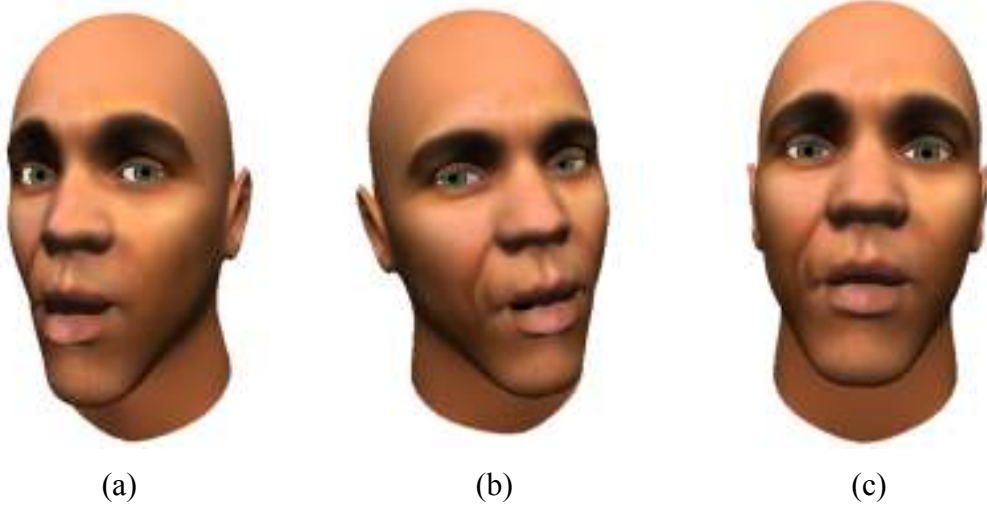
Benzer şekilde alt göz kapağında da nokta L4 ve L5 olmak üzere iki nokta kümesi seçilerek derecelendirme yapılmıştır. Bu noktaların konum değiştirmesi ise duyguların değiştirilmesi sırasında, uyumlu bir yüz ifadesi oluşturmak için kullanılmıştır.

3.5.2.3. Gözlerin Hareket Ettirilmesi

Gözler, ruha açılan pencereler olarak insanlar arasındaki iletişimde önemli rol oynamaktadır. Görmeyi sağlamak için küçük miktarlarda da olsa sürekli hareket halinde olan gözler, konuşma sırasında duyguları ifade etmek için farklı hareketler yapmaktadır. Bir şeyler hatırlanmaya çalışıldığı zaman bakışlar yukarı, aşağı ya da yana kaydırılır. Göz hareketlerinin ifade ettiği manaların örneklerini artırmak mümkündür. Dolayısıyla yüz animasyonu yapan bir sistemde göz hareketlerinin de canlandırılması, gerçekçilik açısından kaçınılmaz bir ihtiyaçtır.

Fakat insanların gözleri üzerine işaretçi yerleştirilemediğinden, göz hareketlerini algılamak için farklı yöntemler kullanılması gerekmektedir. İşaretçi tabanlı olarak çalışan sistemimizde de göz hareketlerine ait bilgi bulunmamaktadır. Fakat kafa modeli ile birlikte dönen ve donuk bir bakış ortaya koyan bir göz modelinin, animasyon kalitesini önemli ölçüde düşürdüğü de bir gerçektir. Bunun önüne geçmek için sistemimizde gözlerin hareketi bir varsayıma dayalı olarak oluşturulmaktadır. Sistemimizde, insanların iletişim kurduğu kişi ile konuşurken genellikle göz temasını koruma eğiliminde olması gerçeğinden faydalanılmıştır.

Sistemimizde gözün canlandırılması için sabit bir göz modeli kullanılmaktadır. Bir kürenin etrafına göz dokusunun kaplanmasıyla oluşan göz modeli, kullanıcının belirttiği konuma yerleştirilmektedir. Başlangıç karesinde gözler, orijinde bulunan kameraya doğru bakacak şekilde çevrilmektedirler.



Şekil 3.14. Gözlerin kafa hareketinden bağımsız olarak sabit bir noktaya bakması
Sola bakış (b) Sağa bakış (c) Ortaya bakış

Gözün kafaya göre olan konumunun her karede korunmasının yanı sıra gözün bakış açısının kafanın hareketi ile değişmesi de gerekmektedir. Bunun sağlanabilmesi için, başlangıçta gözler, işaretçi bilgilerinden faydalanılarak elde edilen kafa hareketlerine göre konum değiştirme ve çevrilme işlemlerine tabi tutulmaktadırlar. Bu adımdan sonra kafanın hareketi ile birlikte konumunu değiştirmiş ve kafanın baktığı yöne bakan gözler elde edilmiş olur. Gözlerin bakış yönünün kameraya doğru olması için, kafanın yaptığı dönme hareketi bu kez ters yönde sadece gözlere uygulanmaktadır.

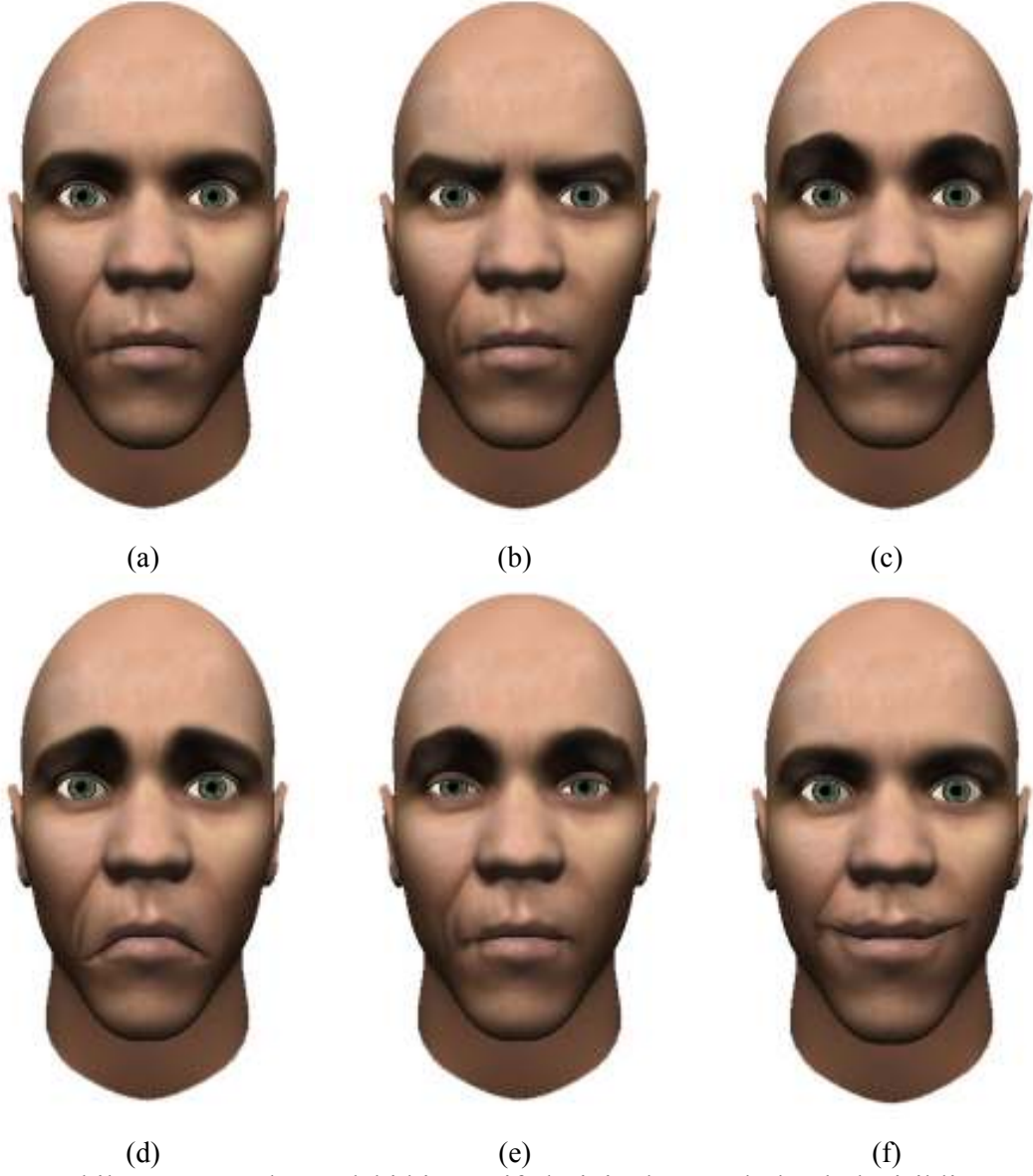
Böylelikle iletişim kurduğu kişinin gözlerine bakan canlandırma elde edilmiş olur. Şekil 3.14'te kafanın farklı yönlere çevrilmesi ile gözlerin kameraya doğru bakmaya devam ettiği görülmektedir.

3.6. Yüz İfadelerinin Duygusal Olarak Değiştirilmesi

Sistemimizin buraya kadar anlatılan kısmı sayesinde, işaretçi tabanlı olarak kaydedilmiş olan aktör performansının üç boyutlu sanal bir kafa modeli üzerinde canlandırılması oluşturulmaktadır.

Sistemin başlangıcında, programa yüklenen kafa modelinin nötr bir yüz ifadesine sahip olması gerekmektedir. Aynı şekilde sistemin çalışmasında kaynak olarak kullanılan işaretçi verisi de nötr bir yüz ifadesi ile kaydedilmeye başlanmıştır. Böylelikle sistemimiz, başlangıç karesinden itibaren aktörden elde edildiği şekliyle işaretçi verisinde bulunan yüz ifadelerini sanal modele aktarmış olmaktadır. Fakat bu yöntemle her bir performans verisi için bir tek yüz canlandırması üretilebilmektedir. Aynı konuşma metninin farklı bir duyguyu yansıtacak bir şekilde canlandırmasının oluşturulması için farklı bir performans verisine ihtiyaç duyulacaktır. Performans verisinden yüz ifadelerinin elde edilmesi masraflı bir işlem olduğundan ve sonuçta üretilecek olan her canlandırma ayrı ayrı kaydedilip fazladan depolama alanı ya da bant genişliği işgal edeceğinden dolayı kaynakların verimsiz kullanılmasına sebep olmaktadır.

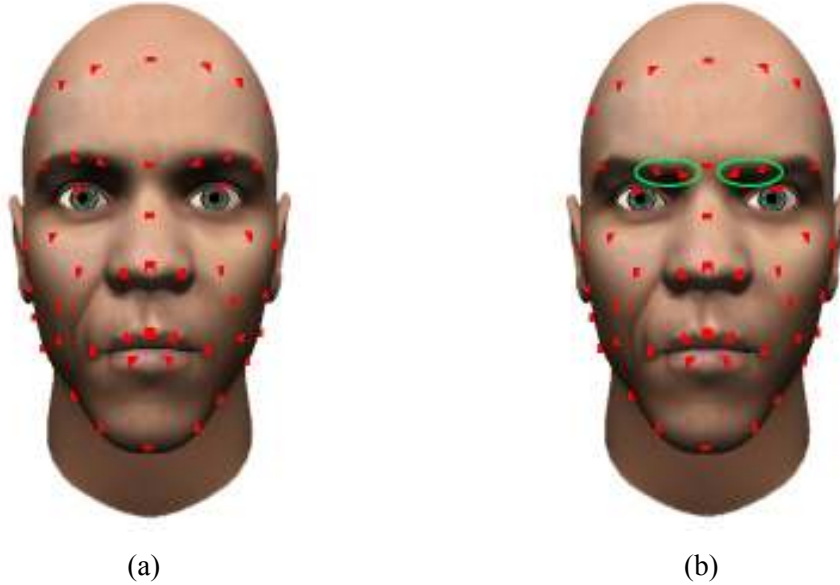
Sistemimiz, duygusal olarak nötr bir şekilde kaydedilmiş olan performans verisi üzerinde duygusal değişiklikler yaparak farklı canlandırmalar elde edilmesini sağlamasıyla bu probleme etkili bir çözüm sunmaktadır.



Şekil 3.15. Nötr durumdaki bir yüz ifadesinin duygusal olarak değişikliğe uğratılmasıyla elde edilen kafa modelleri (a) Nötr (b) Sinirli (c) Şaşırılmış (d) Üzgün (e) Uykulu (f) Mutlu

Sistemimizde nötr olarak kaydedilmiş olan bir performans verisinden beş farklı duyguyu ifade edecek şekilde canlandırma elde etmek mümkündür. Bu duygular: sinirli, şaşırılmış, üzgün, uykulu ve mutlu olma durumlarıdır. Şekil 3.15'te nötr bir yüz ifadesi ve bu beş duyguyu ifade edecek şekilde değişikliğe uğratılmış kafa modelleri görülmektedir.

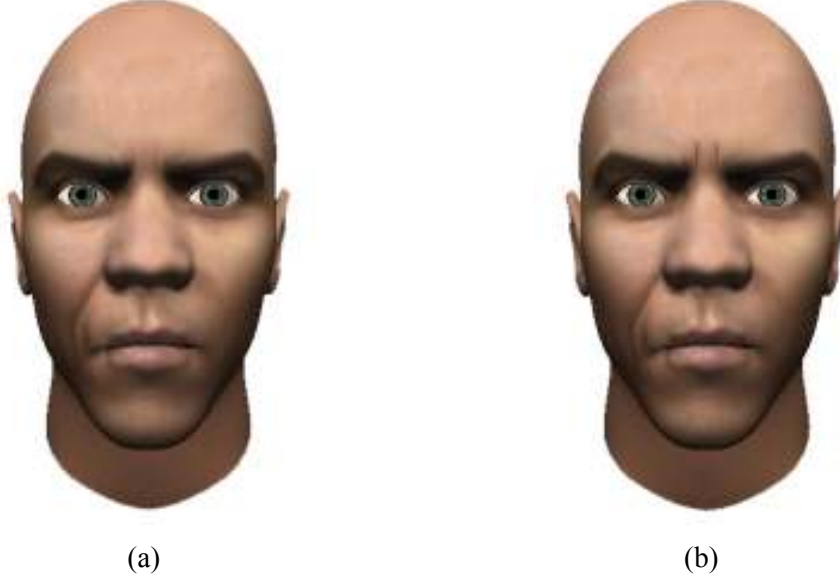
Yüz ifadelerinin değiştirilmesi işlemi, yüz üzerindeki bazı sanal işaretçilerin belirli yönlerde, kullanıcının istediği oranlarda kaydırılması ile gerçekleştirilmektedir. Örneğin sinirli bir yüz ifadesi oluşturmak için, kaşların üzerindeki işaretçilerden burna yakın konumda bulunan ikisi, aşağıya ve burna doğru hareket ettirilerek çatılmış kaşlara sahip bir yüz ifadesi elde edilmiştir. Şekil 3.16.b'de sinirli bir yüz ifadesi oluşturmak için hareket ettirilen sanal işaretçiler gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Sinirli bir yüz ifadesi elde etmek için hareket ettirilen sanal işaretçiler
(a)Nötr bir yüz ifadesinde sanal işaretçilerin yerleşimi (b) Sinirli bir yüz ifadesi oluşturmak için hareket ettirilen işaretçiler elips içinde gösterilmiştir.

Şaşırılmış bir yüz ifadesi elde etmek için kaşlardaki her üç işaretçi de yukarı kaldırılmıştır. Üzgün bir yüz ifadesi elde etmek için kaşlar üzerindeki burna en yakın olan işaretçiler yukarı kaldırılmıştır. Ağız kenarındaki işaretçiler de aşağıya doğru indirilerek dudakları bükük bir yüz ifadesi elde edilmiştir. Uykulu bir yüz ifadesi elde etmek için kaşlar şaşırılmış yüz ifadesinden daha az miktarda yukarı kaldırılmış, alt ve üst göz kapakları da kısılmıştır. Böylelikle gözünü açık tutmakta zorlandığı için kaşını kaldırarak uyanık durmaya çalışan bir insan yüzü modeli elde edilmiştir. Mutlu bir insan yüzü elde etmek için de ağızların köşelerindeki sanal işaretçiler yukarı kaldırılmıştır.

Bir yüz ifadesinin hangi oranda modele uygulanacağı, grafik ara yüzü ile kullanıcı tarafından sisteme girilmektedir. Kullanıcının girdiği 0 – 100 aralığındaki bir değer ile yüz ifadesi değişikliğe uğratılmaktadır.



Şekil 3.17. (a)Kaşların çatılmasıyla elde edilen sınırlı yüz ifadesi (b) a'daki yüz ifadesinde, kaşların arasındaki bölgeye kırışıklıklar eklenmesiyle elde edilen sınırlı yüz ifadesi

Bazı yüz ifadeleri sırasında insan yüzünde oluşan kırışıklıkların model üzerinde ifade edilmesi, canlandırılmak istenen duygusal değişikliğin daha güçlü bir biçimde elde edilmesini sağlamaktadır. Fakat bu kırışıklıkların kafa modelinin deformasyonu ile oluşturulması hem yüksek kalitede kafa modeli kullanılmasını gerektirmekte, hem de hesaplama bakımından sisteme ek yük getirmektedir. Bunun yerine hesaplama maliyeti düşük olan kaplama üzerinde değişiklik yapılması yöntemi kullanılmıştır. Yüz üzerinde oluşturulmak istenen kırışıklıklar, yüz üzerine kaplanan dokuya eklenerek ifade edilmek istenen duygu daha güçlü bir biçimde elde edilmiştir. Örneğin sınırlı bir yüz ifadesi oluşturulduğu sırada, birbirine yaklaşan kaşların arasında kalan, burnun tam üstünde bulunan noktada oluşan kırışıklıklar modelin kaplamasına eklenerek, daha sınırlı yüz ifadesine sahip bir model elde edilmiştir (Şekil 3.17). Sistemde sınırlı bir yüz ifadesi elde etmek için 50'den yüksek bir katsayı girildiği takdirde kırışıklıklar kaplamaya eklenmektedir. Katsayının 50'den düşük olduğu durumlarda sadece kaşlar çatılarak sınırlı bir yüz ifadesi elde

edilmektedir. Benzer şekilde şaşırılmış bir yüz ifadesi oluşturulduğu sırada da alındaki kırışıklıklar, kaplama dokusunda eklenmektedir.

Kafa modeli duygusal olarak değişikliğe uğratıldıktan sonra, aktör performansı önceki bölümlerde anlatıldığı gibi kafa modeline aktarılmaktadır. Başlangıç durumundaki yüz ifadesi nötr değil de belirli bir duyguyu ifade edecek şekilde değiştirildiğinden dolayı, aktör performansında bulunan yüz ifadeleri farklı bir duygu ile tekrar canlandırılmış olmaktadır. Fakat bu kez yüz ifadeleri kafa modeline aktarılırken bazı işaretçilerin yüz üzerindeki etkileri azaltılmaktadır. Örneğin duygusal durumu şaşkın olarak değiştirilmiş olan bir yüz canlandırmasında, kaşlar fiziksel olarak kaldırılacak en yüksek düzeye yaklaştığı için, aktör performansında bulunan kaş hareketleri model üzerine aktarılırken sönümlendirilmektedir. Benzer uygulamalar diğer yüz ifadeleri için de gerçekleştirilmektedir.

4. NESNE EŞLEME YÖNTEMİ VE İMGE EŞLEMEYE UYGULANMASI

Nesne eşleme problemi, bir veri tabanında bulunan nesnelere ile bir sorgu nesnesinin karşılaştırılarak, en yüksek benzerlik oranına sahip olan nesnenin tespit edilmesini amaçlamaktadır. Bu problem görüntü işleme alanında çalışan araştırmacıların üzerine yoğunlaştıkları temel problemlerdendir.

Geliştirdiğimiz yöntemde, nesne eşleme problemi bir çizge eşleme problemine indirgenerek çözülmektedir. Nesnelere, özniteliklerinde bozulma oluşmadan çizgelere dönüştürebilmek için yeni bir yaklaşımın önerildiği yöntemimiz ile bu alanda yapılmış olan çalışmalara kıyasla daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Geliştirilen nesne eşleme yöntemi, imge eşleme probleminin çözümünde de kullanılabilir özelliktedir. Nesne eşleme tabanlı olarak geliştirilecek bir imge eşleme yöntemi ise tasarladığımız yüz canlandırması oluşturma sistemi ile birlikte kullanılmaya elverişli olacaktır. Fakat bu yöntemin sistemimize uyarlanıp geniş çaplı yeni bir sistem geliştirilmesi bir yüksek lisans tezinin iş yükünün çok üzerinde olacağından, sistemimiz ile geliştirilen yöntem uygulama düzeyinde birleştirilmemiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalara hedef belirlemek amacıyla, sistemimiz ile imge eşleme yönteminin birlikte kullanıldığı bir sistemin yapısı önerilmekle yetinilmiştir.

Tezin bu kısmında öncelikle geliştirilen yöntem detaylı olarak açıklanacaktır. Daha sonra bu yöntem ile önceki bölümde detayları anlatılan sistemimizin birlikte kullanılmasıyla oluşacak geniş çaplı bir sistem tasarımı anlatılacaktır.

4.1. l_1 Normunda Çoklu Eşleme

Nesne eşleme, bilgisayarla görü alanındaki temel problemlerden biridir. Problemin hedefi verilen iki nesnenin öznitelikleri arasında benzerlik yakalanmasıdır. Bu hedefe ulaşmak için nesnelere özniteliklerinin çıkarılması ve bu öznitelikler arasında eşleme sağlanması işlemleri gerçekleştirilir. Eşleme işlemi sonucunda elde edilen benzerlik değeri, sorgu nesnesinin bir veri tabanındaki nesne sınıflarından hangisine ait olduğunun belirlenmesinde kullanılmaktadır. Basit bir deney düzeneğinde bu

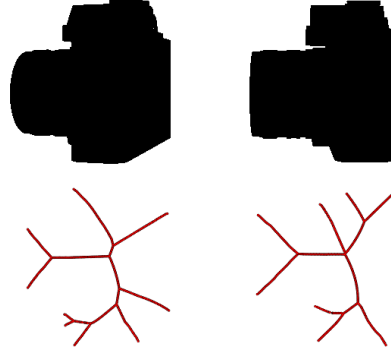
sınıflandırma doğrusal bir arama işlemi ile gerçekleştirilebilir. Daha açık bir ifadeyle sorgu nesnesinin, veri tabanındaki bütün nesnelere karşılaştırılmasından sonra, en yüksek benzerlik değerine sahip olan veri tabanı nesnesinin konumu bulunabilir.

Güçlü ifade etme özelliklerinden dolayı çizgeler, örüntü tanıma, hesaplama tabanlı ve moleküler biyoloji, dilbilimi, bilgisayar ağları ve fizik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir $G = (V, E)$ çizgesi, sonlu sayıda nokta (düğüm) (V) ve bu düğümleri bağlayan bağlantılardan (kenar) (E) oluşmaktadır. $u, v \in V$ olmak üzere iki düğüm için, $e = (u, v) \in E$ şeklinde bir kenar var ise u ve v düğümleri ardışıktır. Bilgisayarla görü ve örüntü tanımada çizgeler, üç boyutlu nesnelere, tıbbi resimler ve parmak izleri gibi karmaşık yapıları ifade etmede kullanılırlar. Bu yapılarda düğümler nesnelere özniteliklerini ya da bölgelerini, kenarlar da düğümler arasındaki ilişkiyi belirtirler. Nesnelere çizgelerle ifade edildiği durumlarda, nesne eşleme problemi bir çizge eşleme problemine dönüşmüş olur.

Nesnelere arasındaki benzerliğin, nesnelere çizge gösterimlerinden faydalanarak bulunması problemi, bilgisayarla görü ve örüntü tanıma alanlarında çalışan araştırmacıların çeyrek asra yakın bir süredir üzerine yoğunlaştıkları konulardandır. Çizgeler arasında iyi bir eşleme elde edebilmek için, iki çizge ya da alt çizgeler arasındaki en iyi izomorfizmin bulunması üzerine birçok çalışma yapılmıştır [57, 37, 51]. $G_1 = (V_1, E_1)$ ve $G_2 = (V_2, E_2)$ iki çizge olmak üzere, G_1 ve G_2 arasındaki izomorfizm, G_1 ve G_2 'nin düğümleri arasında tam eşleme ile tanımlanmaktadır. Öyle ki $f : V(G_1) \rightarrow V(G_2)$ olmak üzere herhangi iki u ve $v \in G_1$ düğümlerinin ardışık olması için $f(u)$ ve $f(v)$, G_2 de ardışık olmalıdır.

Çizge izomorfizminin polinom zamanda yapılıp yapılamayacağı hala açık bir problem olmasına karşın, alt çizge izomorfizm probleminin NP – tam olduğu bilinmektedir [27]. Bazı araştırmacılar [32], çizge izomorfizm bulma probleminde çizgelere bir takım kısıtlamalar getirerek polinom zamanda çalışan algoritmalar geliştirmişlerdir. Alt çizge izomorfizm bulma algoritmaları bilgisayarla görü alanında pek çok problemin çözümünde başarılı olarak kullanılmasına karşın, gürültü, bölümlenme ve boğumlama hatalarından dolayı benzer nesnelere çizgeleri arasında anlamlı izomorfizm bulunamaması da mümkündür. Tam çizge eşlemenin

kısıtlamaları, nesnelerin siluetlerinin ve yönsüz şok çizgelerinin (ağaçlarının) alt alta verildiği Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Çoklu eşlemenin gerekliliği. Kamera nesnelerinin siluetleri birbirine benzemesine rağmen, nesnelerin şok çizgeleri arasında bire-bir eşleme bulunmamaktadır.

Şekil 4.1’de kamera nesnelerinin siluetleri birbirine benzemesine karşılık çizgeleri arasında çizge ya da alt çizge izomorfizmi bulunmamaktadır. Bölümleme hatalarından ya da ölçekleme farklılıklarından dolayı bir nesnedeki bir öznitelik, diğer nesnedeki bir grup özniteliğe karşılık gelebilmektedir. Dolayısıyla bu şekildeki eşlemeleri kodlayabilmek için, çizge eşleme problemi tam olmayan (ya da hataya toleranslı, hata düzelticili) çizge eşleme olarak ifade edilmektedir. Önerdiğimiz yöntem iki çizgenin düğümleri arasındaki çoklu eşlemeyi bulmayı amaçlayan kısmi çizge eşleme üzerine yoğunlaşmaktadır.

Verilen iki çizge için, çizgeler üzerinde belirli kısıtlamalar getirilmeden doğrusal ya da polinom zamanda çoklu eşlemenin sağlanması mümkün değildir. En kötü durumda birbiriyle bağlı olmayan bir grup düğüm, diğer çizgedeki bir grup düğüm ile eşleşebilmektedir. Bir çizgedeki belirli sayıdaki alt çizgeler Bell sayısı ile tanımlanmaktadır [22]. Önerdiğimiz yöntemin amacı iki çizge içerisinden birer alt çizge elde edip düğümleri arasındaki eşlemenin hesaplanmasıdır. Her düğüm eşleme değeri, çizgeler arasındaki benzerlik değerinin bulunmasında katkı sağlayacaktır. Benzerlik değerleri aynı zamanda düğümler arasındaki yapısal ilişkiyi de ortaya koyacaktır.

Bu çalışmayla ilişkili olan önceki çalışmada [27], iki çizgenin düğüm grupları arasındaki çoklu eşleme ile sağlanan kısmi çizge eşlemesi ortaya konmuştur. Çizgelerin farklı tanım kümelerine taşınmasıyla çoklu eşleme işleminin yaklaşık olarak polinom zamanda gerçekleştirilebildiği gösterilmiştir. Bahsedilen çalışmada çizgeler geometrik uzaya gömülerek, düğümler d boyutlu noktalar şeklinde ifade edilmiştir. Bu gömme işlemi, düğümler arasındaki en kısa yolun eşleştikleri noktalar arasındaki öklit uzaklığını yansıttığını garanti etmektedir. Çizge gömme teknikleri kullanılarak çoklu çizge eşleme işlemi, çoklu nokta eşleme işlemi olarak ortaya konmuştur. Daha sonra noktalar arasındaki eşlemeler Toprak Taşıyıcı Mesafesi (Earth Mover's Distance - EMD) [53] algoritması ile hesaplanmıştır. Önceki çalışmada iyi seviyede eşleştirme sonuçları elde edilmesine rağmen, yöntemin kusurlu bir yönü bulunmaktadır. Çizge gömme işlemi için kullanılan l_2 normuna yapılan gömme işlemi sırasında şekil bozulması oluşmaktadır. Bir başka ifadeyle çizgedeki düğümler arasındaki mesafe, geometrik uzayda eşleştikleri noktalar arasındaki mesafe ile eşit olmamaktadır. Bu çalışmamızda bu problem, izomorfik bir çizge gömme tekniği uygulanarak çözülmektedir. Çalışmamızda çizge teorisi alanındaki önemli bir teorem olan, l_1 normunda yapılan çizge gömme işlemi sonucunda çizgelerdeki düğümler arasındaki mesafenin, geometrik uzayda eşleştikleri noktalar arasındaki mesafe ile eşit olması özelliğinden faydalanılmaktadır. Elde edilen deney sonuçları, çalışmamızın bir önceki çalışma üzerindeki başarısını ortaya koymaktadır.

Bir sonraki alt başlıkta bir önceki çalışmada geliştirilen çoklu eşleme yöntemi kısaca açıklanacaktır. Daha sonra çalışmamız sonucunda bu algoritmaya getirilen iyileştirme anlatılacaktır. Son olarak da deney sonuçlarına yer verilecektir.

4.1.1. Çoklu Eşleme Algoritması

Çoklu eşleme üzerine olan önceki çalışma, çizgelerin geometrik uzayda gösterilmesini temel almaktadır. Bu adım çizge gömme teknikleri ile sağlanmaktadır. Algoritma, küresel kodlama yoluyla çizge gömme işlemini gerçekleştirerek her düğümün bir nokta ile ifade edilmesini sağlamaktadır. Burada amaç, bir düğüm çifti arasındaki mesafenin, eşleştiği noktalar arasındaki mesafe ile eşit olmasının

sağlanmasıdır. Bu gömme yönteminin en büyük avantajı, çizgelerin önceden belirlenmiş boyuttaki bir geometrik uzaya gömülmesidir.

Küresel kodlama yöntemiyle gömme işlemi bütün çizgeler için çalışmamaktadır, sadece ağaç yapısında bulunan çizgeler için çalışmaktadır. Bundan dolayı çoklu çizge eşleme yaklaşımında çizgeler, öncelikle ağaç olarak ifade edilmektedir ve elde edilen ağaçlar d boyutlu geometrik uzaya gömülmektedir. Bu iki basamaklı dönüşüm işlemi, çoklu çizge eşleme problemini EMD algoritması ile çözülebilen çoklu nokta eşleme problemine dönüştürmektedir.

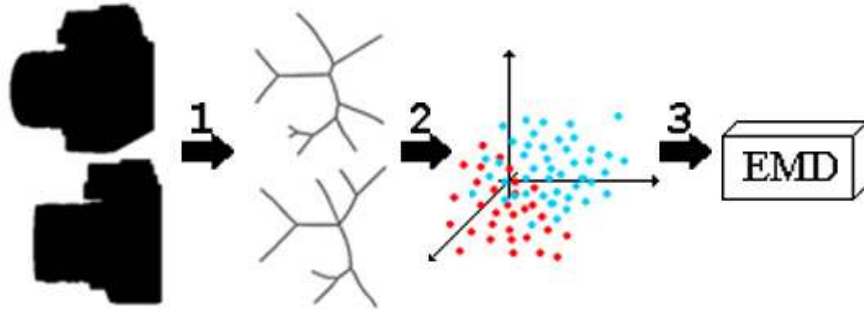
EMD algoritması, iyi bilinen bir taşıma problemini [9] esas almaktadır ve iki dağılım arasındaki farklılıkları hesaplamada kullanılmaktadır. İki dağılımdan ilkinin oluşturan elemanların her birinin arzı, ikincisini oluşturan elemanların her birinin talebi ifade ettiğini kabul edelim. Bu durumda EMD algoritması, bir dağılımı diğer dağılıma dönüştürmek için yapılması gereken en az miktardaki işi hesaplamaktadır. Daha kavramsal bir ifade ile, $P = \{(p_1, w_{p1}), \dots, (p_n, w_{pn})\}$ n boyutundaki ilk dağılım, $Q = \{(q_1, w_{q1}), \dots, (q_m, w_{qm})\}$ m boyutundaki ikinci dağılım olmak üzere p_i (ya da q_i) i .inci elemanın konumunu ve w_{p_i} (ya da w_{q_i}) de i .inci elemanın ağırlığını ifade etsin. Problemin amacı p_i ve q_j arasındaki akıyı ifade eden f_{ij} 'yi içeren bir $F = [f_{ij}]$ akı matrisi bulmaktır. Bulunacak olan bu akı ile Denklem (4.1)'de ifade edilen toplam masraf değeri olabilecek en küçük değere çekilmektedir.

$$EMD(P, Q) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m f_{ij} d_{ij} \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'de $\sum_{i=1}^n f_{ij} \leq w_{p_i}$, $\sum_{j=1}^m f_{ij} \leq w_{q_j}$, $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{ij} = \min(\sum_{i=1}^n w_{p_i}, \sum_{j=1}^m w_{q_j})$ ve $f_{ij} \geq 0$ 'dir.

EMD algoritması bir doğrusal programlama problemi olarak ele alınmıştır ve çözümü çoklu nokta eşlemelerini sağlamaktadır. Elde edilen bu eşlemelerin orijinal çizgelere uygulanmasıyla da çoklu çizge eşlemeleri elde edilmektedir. Bulunan sonuç nokta kümeleri arasındaki mesafe bilgisini de içermektedir. Bu mesafe bilgisi daha sonra orijinal çizgeler arasındaki farklılık ölçütü olarak kullanılmaktadır. Sonuç olarak bir veri tabanı ve bir de sorgu nesnesi için, veri tabanında bulunan nesnelere

sorgu nesnesine en çok benzeyen nesne, farklılık değerlerinin hesaplanması ile bulunabilir. Çalışmamızda noktaların ağırlıkları düğümlerden elde edilmektedir. Şok çizgelerinde bir düğümün ağırlığı, o düğümü merkez alarak nesneyi taşırmayacak biçimde çizilen en büyük daireyi ifade eder. Bu çizge yapısı deneyler başlığı altında açıklanacaktır. Çoklu eşleme algoritmasının genel yapısı Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Çoklu eşleme algoritmasının genel yapısı. Nesnelerin silüetlerini şok çizgeleri ile ifade ettikten sonra (“1” etiketli geçiş), çizgeler aynı boyuttaki geometrik uzaya gömülmektedirler (“2” etiketli geçiş). İki dağılım arasındaki eşlemenin hesaplanması için Toprak Taşıyıcı Mesafesi (Earth Mover’s Distance – EMD) algoritması kullanılmaktadır.

4.1.2. Çizgelerin l_1 Normuna Gömülmesi ve Çoklu Nokta Eşleme

Bir önceki kısımda açıklanan eşleme algoritmasının önemli bir eksikliği vardır. Çizgeleri ağaç olarak ifade ettikten sonra elde edilen ağaçların l_2 normuna gömülmesi bozulmalara sebep olmaktadır. Sonuç olarak düğüm çiftleri arasındaki mesafeler, geometrik uzayda eşleştikleri nokta çiftleri arasındaki mesafeye eşit olmamaktadır. [29]’da ortaya atılan Teorem 1, bu bozulmayı ifade etmektedir:

Teorem 1: l yaprağı bulunan bir T ağacı için, d geometrik uzayın boyut sayısını belirtmek üzere, $\varphi : V(T) \rightarrow l_2^d$ şeklinde tanımlanan ve bozulma içeren öyle bir gömme yöntemi vardır ki:

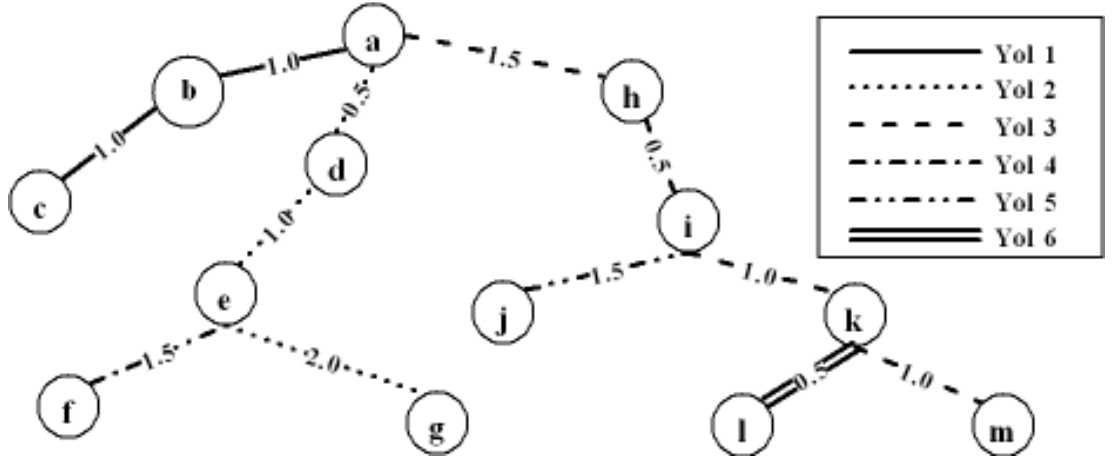
$$D(\varphi) \leq O(l^{1/(d-1)}(\min \{\log l(T), d\})^{1/2}) \quad (4.2)$$

[27]'de belirtildiği gibi, 100 boyutlu bir uzayda küresel kodlama ile çizge gömme işlemi 17% bozulma ile sonuçlanmaktadır. Dolayısıyla çizgeler geometrik uzayda tam olarak ifade edilmemiş olmakta ve noktalar arasındaki çoklu eşleme işlemi yanlış eşlemeler ile sonuçlanabilmektedir.

Çalışmamızda çizgeler l_1 normuna gömülerek bu problem ortadan kaldırılmıştır. Herhangi bir ağacın l_1 normuna izometrik olarak gömülebildiği bilinmektedir [28]. Bu bilgiden faydalanarak çizge uzayından geometrik uzaya geçerken herhangi bir bozulma olmadığı garanti edilmektedir. d boyutlu bir uzayda $X = \{x_1, x_2, \dots, x_d\}$ ve $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_d\}$ iki nokta olmak üzere, X ve Y noktaları arasındaki U_1 mesafesi, l_1 normunda Denklem (4.3)'e göre hesaplanmaktadır.

$$U_1 = \sum_{k=1}^d |x_k - y_k| \quad (4.3)$$

Çizgedeki her düğüm için geometrik uzayda eşleştiği noktanın koordinatları, çizgenin topolojik yapısını ortaya koyan tırtıl ayrıştırması yöntemi (Caterpillar Decomposition) ile hesaplanmaktadır. Tırtıl ayrıştırması, ayrık kenarlı (alt) kök - yaprak yollarından oluşur. Bu yaklaşım, Şekil 4.3'te şematik olarak gösterilmiştir. a ve c , a ve g , a ve m düğümleri arasındaki yollar, birinci düzey yollar olarak adlandırılmaktadır ve tırtıl ayrıştırmasındaki ilk üç yolu oluşturmaktadır. Bu üç yolun ağaçtan çıkarılması ile geriye üç adet ayrık kenarlı yol kalmaktadır. Bunlar e ve f , i ve j , k ve l düğümleri arasındaki yollardır ve ikinci düzey yollar olarak adlandırılmaktadırlar. Bu yollar da tırtıl ayrıştırmasının 4 - 6 arasındaki yollarını oluşturmaktadırlar. İkinci düzey düğümler çıkarıldığında geriye düğüm kaldığı durumlarda, bu işlem ağaçtan geriye hiç düğüm kalmayana dek tekrarlanır. Elde edilen yolların bileşimine tırtıl ayrıştırması denilir ve \aleph ile ifade edilir. \aleph içerdiği toplam yol sayısı, çizgenin gömüleceği geometrik uzayın boyut sayısını belirtmektedir.



Şekil 4.3. Bir ağaca tırtıl ayrıştırması uygulanmasıyla elde edilen ayrıklı kenarlı yollar

Bir v düğümünün geometrik uzaydaki konumunun tespit edilmesi için, öncelikle v düğümü ile kök düğüm r arasındaki tekil $P(v)$ yolu bulunur. $P(v)$ yolunun ilk parçası l_1 ağırlığında olsun ve herhangi bir $P^1 \in \aleph$ yolunu takip etsin. Aynı şekilde ikinci parçası l_2 ağırlığında olsun ve herhangi bir $P^2 \in \aleph$ yolunu, ve sonuncu parçası l_a ağırlığında olsun ve herhangi bir $P^a \in \aleph$ yolunu takip ediyor olsun. $\langle P_1, \dots, P_a \rangle$ ve $\langle l_1, \dots, l_a \rangle$ serileri, sırasıyla $P(v)$ 'nin ayrıştırma ve ağırlık serileri olsun. \aleph içindeki her yol bir koordinat eksenine karşılık geldiği için anlatılacak olan yöntem ile v 'nin koordinatı bulunur. Eğer $P(v)$ 'nin ayrıştırma serisi bir $P^i \in \aleph$ yolundan oluşuyorsa, eşleşen koordinat ağırlık serisinde tanımlandığı gibi bir l_i değerine sahip olacaktır. Oluşmuyorsa, eşleşen koordinat değeri 0 olacaktır. Bu yöntemle elde edilen gömmenin l_1 normunda izometrik olduğu açıkça görülebilir. Yöntemin uygulamasını Şekil 4.3 üzerinde takip edecek olursak, öncelikle ağaçtan tırtıl ayrıştırması ile altı yol elde edildiğine göre gömme yapılacak olan geometrik uzay altı boyutlu olacaktır. Örneğin f düğümünün koordinatlarını hesaplayacak olursak, şekilde görüleceği gibi a ve f düğümleri arasındaki yol bir adet 1.5 ağırlığında birinci düzey yol (a ve e düğümleri arasında) ve bir adet de 1.5 ağırlığında ikinci düzey yoldan (e ve f düğümleri arasında) oluşmaktadır. Bu yollar tırtıl ayrıştırmasında ikinci ve dördüncü yollar olarak adlandırıldıkları için, f düğümünü ifade eden noktanın sadece ikinci ve dördüncü koordinatları sıfır dışında değerler alacaktır. Sonuç olarak f düğümü ile geometrik uzayda eşleşen noktanın koordinatı $(0, 1.5, 0, 1.5, 0, 0)$ olacaktır. \aleph tırtıl

ayrışımı tekil bir ayrışım olmadığı halde, sonuçta elde edilen gömme işlemi l_1 normunda izometriktir. Fakat gömme işlemi sırasında tutarlı olabilmek için, tırtıl ayrıştırması işlemi sırasında yollar seçilirken düğümlerin ağırlıkları göz önünde bulundurulmaktadır.

Yukarıda anlatılan algoritma ile bulunan gömmeler farklı boyutlarda elde edilmiş olabilir. Bu durumda farklı boyutlardaki iki gömme arasında eşleme işlemi uygulayabilmek için iki dağılımı da aynı normdaki uzaya taşımak gerekmektedir. Bu işlem genellikle iki şekilde yapılabilir. İlk yöntemde dağılımların kovaryans matrislerinin ilk K doğru tekil vektörlerine izdüşümü alınmaktadır. Bu yöntem Temel Bileşen Analizi tabanlı olup, K boyutlu alt uzaylara yapılan izdüşümlerdeki orijinal vektörlerin bilgilerini mümkün olan en üst düzeyde korumayı sağlar. Bu teknikle iki dağılımın boyut sayısı en az miktarda bilgi kaybı ile eşitlenmesine rağmen, geometrik uzayda bozulma ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Çalışmamızda hedefimiz izometrik gömme işleminin sağlanması olduğu için bu yöntemin kullanılması tercih edilmemiştir. İkinci yöntemde farklı boyuttaki iki dağılımın boyut sayısı, az sayıda boyuta sahip olan dağılıma diğer dağılım ile eşit sayıda boyuta sahip oluncaya kadar “0” ekleyerek eşitlenir. Bu yöntem EMD algoritmasının sonlanma zamanını artırmaya karşılık bir sonraki paragrafta açıklanacağı gibi EMD algoritmasının daha etkili bir modeli kullanılarak bu problem aşılmıştır.

Çizgeleri izometrik olarak aynı boyutta gömdükten sonra, noktalar arasındaki eşlemenin bulunması işlemi yapılmaktadır. Yukarıda da belirtildiği gibi bu işlem için EMD algoritması kullanılmaktadır. l_1 normunda çoklu eşlemeyi verimli biçimde yapabilmek için, [52]'de ortaya atılan, normal EMD algoritmasına göre basitleştirilmiş bir yapıya sahip olan ve daha az zamanda çalışmasını sonlandıran EMD – L_1 yaklaşımının kullanılması tercih edilmiştir. EMD – L_1 'in orijinal EMD algoritması ile yaklaşık değer kullanmadan birbirine denk yer mesafesi ürettiği teknik olarak ispatlanmıştır.

4.1.3. Deneyler

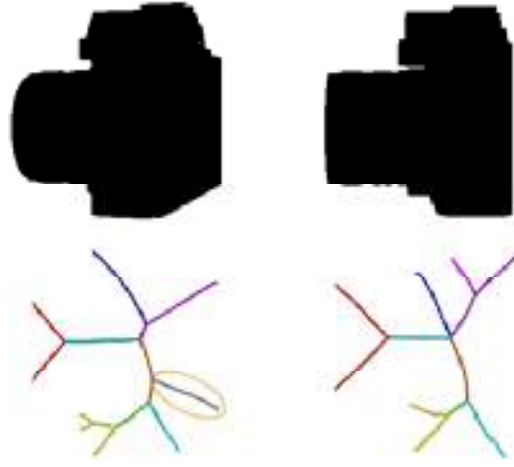
Bu kısımda, önerdiğimiz yöntemin bir veri tabanı üzerinde uygulanması ve sonuçlarının önceki bir çalışma [27] ile olan karşılaştırması yapılacaktır. Kullandığımız veri setinde 9 nesne ve her bir nesnenin 180 farklı imgesinden oluşan toplam 1620 siluet bulunmaktadır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Kullanılan veri setinden örnek nesne silüetleri

Her silüet, düğümlerinin şokları [54] oluşturduğu, kenarlarının ardışık şok noktalarını bağladığı yönsüz bir şok ağacı ile ifade edilmektedir. İskelette bulunan her p noktası 3-boyutlu bir vektör olarak $v(p) = (x, y, r)$ şeklinde tanımlanır. Burada (x, y) noktanın kartezyen koordinat sistemi üzerindeki konumunu, r ise nokta merkezli olarak nesnenin silüetinin dışına taşmayacak şekilde çizilen en büyük dairenin yarıçapını göstermektedir. Her bir nokta çizgede bir düğüm ile ifade edilmektedir. Her nokta çifti, aralarındaki öklit uzaklığını ifade eden ağırlıklarla etiketlenen kenarlar ile birbirine bağlanmaktadır. Çizge en küçük değer aralığı ağacı hesaplanarak bir ağaca dönüştürülür. Sonuçta ağacın düğümleri noktalara karşılık gelmektedir, kenarları ise yakın olan noktaları bağlamaktadır. Ağacın kökü, diğer bütün düğümlere olan toplam en kısa yol mesafesi en küçük olan düğüm olarak seçilmiştir.

Anlatılan metodun Şekil 4.1'deki çizgeler üzerinde uygulanmasıyla elde edilen eşlemeler Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Şekilde eşleşen kısımlar aynı renk ile renklendirilmiştir. İlk çizgedeki elips içine alınan bölge eşlenmeyen noktaları belirtmektedir.



Şekil 4.5. Önerilen algoritmanın Şekil 4.1'deki çizgelere uygulanması

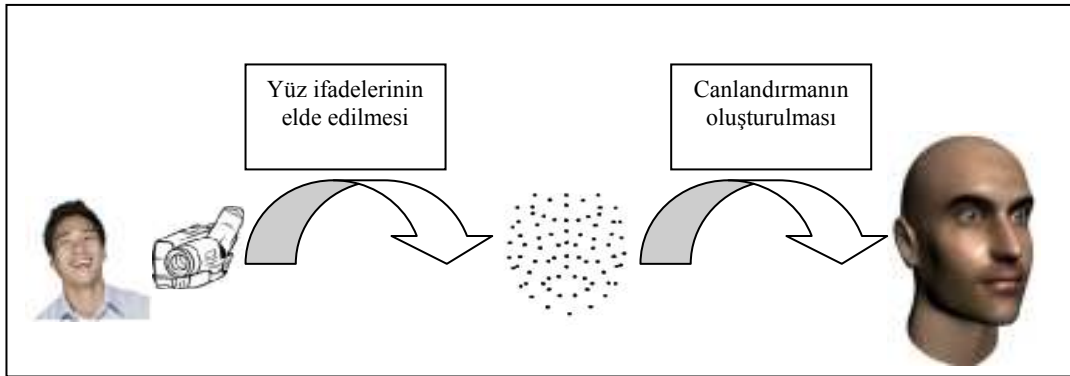
Önerilen yöntemin başarısını gözlemlemek için şu şekilde bir deney uygulanmıştır. Öncelikle veri tabanındaki her bir nesne, sorgu nesnesi olarak kullanılmıştır. Sorgu nesnesi ile geri kalan bütün nesnelere arasındaki benzerlik, yukarıda anlatılan yöntemle hesaplanmıştır. Algoritmanın bir i sorgu nesnesine ait bir j imgesi için, aynı nesneye ait j imgesinin komşuluğundaki bir imgeyi sonuç olarak bulması beklenmektedir. Bu durum, doğru poz bulma olarak adlandırılmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre sistemimiz %93.1 doğru poz bulma oranına sahipken, önceki çalışmada önerilen yöntem ile %90.8 oranında doğru poz bulunabilmiştir. İkinci bir deneyde de algoritmanın bulduğu nesnenin, sorgu nesnesi ile aynı gruba ait olup olmadığı araştırılmıştır. Bulunan nesne aynı gruba ait ise bu doğru nesne tanımlaması olarak adlandırılmıştır. Sistemimiz %97.5 oranında nesnelere doğru olarak tanımlarken, önceki çalışmada bu oran %95.3 olarak bulunmuştur. Sonuçlardan da görüleceği gibi önerdiğimiz izometrik gömme yöntemi, sistem performansında önemli artış kaydedilmesini sağlamıştır.

Deney sonuçları incelenirken dikkat edilmesi gereken bir nokta da veri tabanında bulunan nesnelere pek çoğunun simetrik bir yapıda olmasından dolayı, poz yakalama durumunda sorgu nesnesi ile aynı şekle sahip olduğu halde sorgu nesnesinin komşuluğunda bulunmayan imgeler ile yapılan eşlemelerin hatalı poz yakalama olarak değerlendirilmiş olmasıdır. Dolayısıyla bu deneydeki poz yakalama değerleri en kötü durumda belirtilen oranlarda olacaktır.

4.2. İşaretçisiz Yüz İfadesi Elde Etme Sistemi

Tezimizin bu bölümünde gelecekte yapılacak çalışmalar için yol gösterici olması amacıyla işaretçisiz olarak yüz ifadelerini elde edip canlandırmasını oluşturacak bir sistemin tasarımı açıklanmıştır. Anlatılan sistemde, tezimizin üçüncü kısmında detaylı olarak anlatılan yüz ifadesi canlandırma sistemi ile tezimizin dördüncü kısmında açıklanan nesne eşleme yönteminin birlikte kullanılması önerilmiştir. Burada yapısı anlatılan sistemin uygulaması, bir yüksek lisans tezinin iş yükünün çok üzerinde olduğu için gelecek çalışmalara bırakılmıştır.

Tezimizin üçüncü kısmında detaylı olarak anlatılan yüz canlandırması oluşturma sistemi, işaretçi tabanlı olarak çalışmaktadır. Yüz ifadelerinin işaretçi tabanlı olarak elde edilmesi uzmanlık ve teknik aletler bulunmasını gerektiren bir iştir. Bir aktörün yüzüne uzman sanatçılar tarafından işaretçilerin yerleştirilmesinden sonra, özel kameralarla stüdyo ortamında aktörün performans videosu kaydedilmektedir. Daha sonra kaydedilen bu videodan görüntü işleme teknikleri ile işaretçilerin konum bilgileri elde edilmektedir. Bu işlemlerin bir ev kullanıcısı tarafından gerçekleştirilemeyeceği çok açıktır.



Şekil 4.6. Önerilen sistemin genel yapısı

Sistemimizin yaygın olarak kullanılabilmesi için, yüzünde işaretçi yerleştirilmemiş olan bir kullanıcının yüz ifadelerinin işaretçi tabanlı bir veriye dönüştürülmesi gerekmektedir (Şekil 4.6). Bu durumda kullanıcının yüz imgesi ile önceden kaydedilmiş olan ve içerdiği yüz ifadelerinin işaretçi tabanlı olarak karşılığı bilinen bir video veri tabanındaki yüz imgeleri arasında imge eşleme işlemi yapıldığı

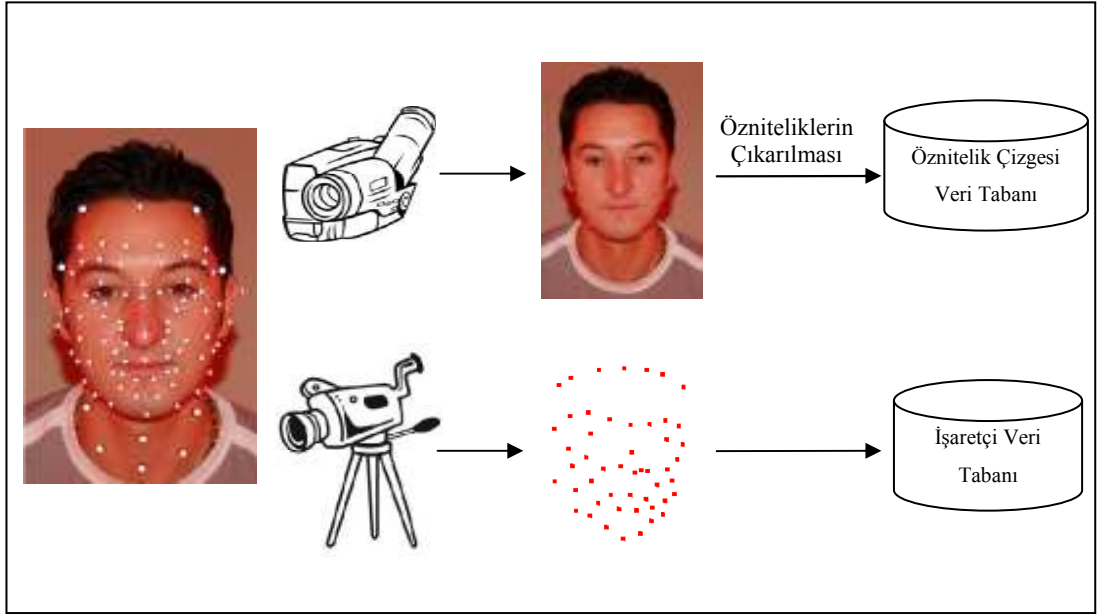
takdirde, sistemimizin çalışması için gerekli olan işaretçi verileri elde edilmiş olacaktır.

Yüz ifadelerinin elde edilmesinde kullanılacak olan sistem iki bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde yüzüne makyaj uygulanan bir aktörün performans verileri işaretçi tabanlı olarak kaydedilmekte ve her işaretçi verisi için aktörün yüz imgesinin özniteliklerini içeren yönlü çevrimsiz bir çizge oluşturulmaktadır. Sistemin bu bölümü önceden çalıştırılıp, elde edilen bilgiler veri tabanlarına kaydedilecektir. Dolayısıyla işlemin bu basamağı sadece bir defa uygulanacak ve kullanıcıya yansıtılmayacaktır.

İkinci bölümde ise normal bir kamera ile kaydedilen ve yüzünde herhangi bir işaretçi ya da makyaj bulunmayan kullanıcının performans videosu kullanılmaktadır. Video verisinin her karesinde aktörün yüz imgesine ait öznitelikler çıkarılarak, veri tabanında eşleştiği yüz öznitelikleri tespit edilmektedir. Daha sonra işaretçi veri tabanından bu özniteliklere ait imgeye karşılık gelen işaretçi bilgileri elde edilmektedir.

4.2.1. Veri Tabanlarının Oluşturulması

Sistemimizin ilk bölümünde, iki temel kısım bulunmaktadır. Şekil 4.7’de aşamaları gösterilen sistemin ilk kısmında, daha sonra kullanılmak üzere iki adet veri tabanı oluşturulmaktadır. Bu veritabanlarını oluşturmak amacıyla kamera karşısına geçirilen aktörün yüzüne, karanlıkta parlayan fakat ışıklı ortamda ten renginden ayırt edilmeyen özellikteki fosforlu makyaj ile işaretçi tabanlı sistemlerde yüz üzerine işaretçilerin yerleştirildiği konumlara işaretçi büyüklüğünde noktalar konmaktadır. Makyajlama işleminden sonra ortam karanlık hale getirildiğinde aktörün yüzünde sadece makyajlanan kısımlar ışık yayacaktır. Bir başka deyişle, karanlık ortamda aktörün yüz ifadeleri işaretçi yakalama sistemleri ile yakalanmaya elverişli duruma gelmiş olmaktadır. Ortam ışıklandırıldığında ise yüz üzerinde herhangi bir işaretçi ya da makyaj görünmeyecektir.



Şekil 4.7. Yüz ifadesi yakalama sisteminde veri tabanlarının oluşturulması

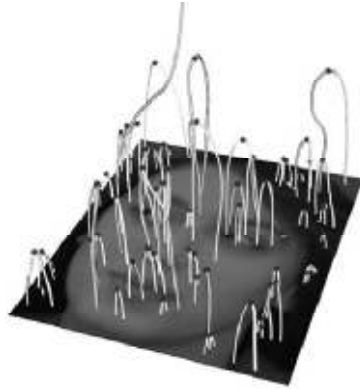
Aktörün performansı iki farklı türdeki kamera ile kaydedilmektedir. Bu kameralardan aktörün tam karşısına yerleştirilecek olan standart video kamerası, ortam normal ışıklandırma ile aydınlatıldığı zaman aktörün yüzünü resim olarak kaydetmek için kullanılmaktadır. İkinci kamera türü ise, ortam karanlık hale getirildiğinde parlamaya başlayan işaretçilerin konumlarını tespit etmek için özel olarak geliştirilmiş olan işaretçi yakalama kameralarıdır (VICON sistemleri gibi). Aktörün yüzünü farklı açılardan göreceği şekilde yerleştirilecek olan bu kameralar yardımıyla aktörün yüz ifadelerini içeren işaretçi verileri elde edilmektedir. Her iki kamera türünün de saniyede 60 kare kayıt alabilecek özellikte olması gerekmektedir.

Performans kaydetme işleminin yapılacağı ortam özel bir ışıklandırma sistemi ile aydınlatılmaktadır. Bu özel ışıklandırma sistemi ile ortam saniyede 60 defa aydınlatılıp tekrar karanlık hale getirilmektedir. Böylelikle saniyenin 1/60'lık kısmında ortam aydınlık olduğu müddetçe normal kamera ile aktörün yüzünün resmi kaydedilecektir. Bir sonraki 1/60 saniyelik zaman diliminde ortam karanlık olacağından işaretçi yakalama sistemi ile işaretçilerin konumları tespit edilecektir. İnsan yüzünde 1/60 saniye içerisinde yüz ifadesinde çok büyük değişiklik olmayacağından dolayı, elde edilen işaretçi verisinin kaydedilen resimdeki yüz ifadesine ait olduğu kabul edilmektedir. Bu şekilde bir saniyede 30 adet işaretçi –

resim çifti elde edilmiş olacaktır. Bu sıklıktaki hareket verisi, yüz ifadeleri arasındaki pürüzsüz geçişi sağlayacak yoğunluktur.

Belirtilen özelliklerdeki stüdyo ortamında kamera karşısına geçirilen aktörden farklı yüz ifadelerini içeren bir performans sergilemesi istenmektedir. Aktörün performans videosu ve işaretçi verileri eşzamanlı olarak kaydedilmektedir.

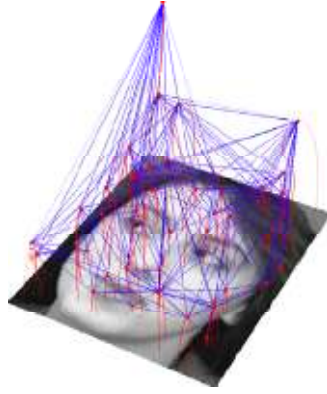
Bir sonraki adımda, kaydedilmiş olan performans görüntülerindeki her kareye özniteliklerin çıkarılması işlemi uygulanmaktadır. Özniteliklerin çıkarılması için, [49]'da geliştirilen yüz tanıma sisteminde kullanılan afet teorisi (catastrophe theory) yardımıyla tepe noktalarının elde edilmesi öngörülmektedir. Afet teorisinde kritik noktalar, resim üzerinde kademeli geçişin sonlandığı konumdaki belirli boyuttaki noktalar olarak tanımlanmaktadır. Bu kritik noktaların belirli kontrol parametrelerinin değişimine bağlı olarak ne ölçüde değiştiklerinin incelenmesi ise afet teorisi olarak adlandırılmaktadır. Bir Morse kritik noktası, bir kontrol parametresi sürekli olarak değiştirildiği sürece bir kritik yol boyunca hareket edecektir. Afet teorisinin bir yüz resmine uygulanmasıyla elde edilen tepe noktaları ve kritik yollar Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Bir yüz resmi üzerindeki kritik yollar ve tepe noktaları (Resim [49]'dan alınmıştır.)

Yüz resmine ait kritik yollar ve tepe noktaları bulunduktan sonra, bu bilgileri kullanarak yönlü çevrimsiz bir çizge oluşturulmaktadır. Bu çizge oluşturulurken öncelikle resimdeki sonsuza giden yol tespit edilip v_1 olarak etiketlenmektedir. Geri kalan $n-1$ yol, tepe noktalarının ölçülerine göre büyükten küçüğe doğru v_2, \dots, v_n

şeklinde etiketlenmektedir. Daha sonra v_1 noktası v_2 nin seviyesine indirgenerek Delaunay üçgenlemesi hesaplanmaktadır ve elde edilen sonuç eş zamanlı olarak üretilen çizgede v_1 ve v_2 düğümlerini bağlayacak olan kenarı oluşturmaktadır. Bu işlem bütün kritik yollar ve tepe noktaları için tekrarlandığında yönlü çevrimsiz çizge elde edilmektedir. Elde edilen çizge bir veri tabanında eşleşen işaretçi bilgileri ile anahtarlanarak tutulmaktadır. Şekil 4.8'deki resme yukarıda anlatılan işlemin uygulanmasıyla elde edilen yönlü çevrimsiz çizge, Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Şekil 4.8'deki resimden elde edilen yönlü çevrimsiz çizge (Resim [49]'dan alınmıştır.)

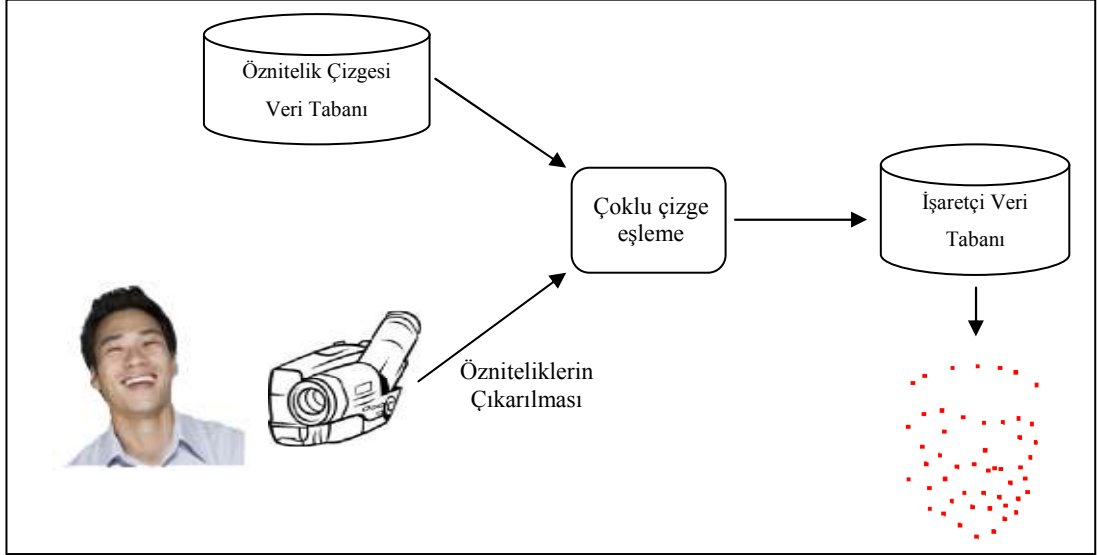
Bu basamaklar tamamlandıktan sonra birbiriyle paralel olarak kaydedilmiş iki veri tabanı oluşturulmuş olmaktadır. Sistemin bu noktadan sonraki ikinci kısmında ise bu veriler yardımıyla kullanıcının yüz ifadeleri ile eşleşen işaretçi verileri yüz modeline uygulanmak üzere sistemin grafik uygulaması kısmına aktarılacaktır.

4.2.2. Yüz İfadelerinin Elde Edilmesi

Sistemimizin ikinci bölümünde normal bir kamera ile performans videosu kaydedilen kullanıcının yüz ifadelerinin işaretçi tabanlı olarak elde edilmesi işlemi gerçekleştirilmektedir.

Bu kısımda ilk olarak yüzüne makyaj ya da işaretçi yerleştirilmemiş olan kullanıcının performans videosu ışıklandırılmış ortamda standart bir kamera ile kaydedilmektedir. Daha sonra kaydedilen videodaki her kare, bir önceki kısımda anlatıldığı gibi

öznitelik çıkarma işlemine tabi tutulmaktadır. Daha sonra çıkarılan özniteliklerden yine bir önceki kısımda açıklandığı şekilde yönlü çevrimsiz çizge oluşturulmaktadır.



Şekil 4.10. Video kamera ile performans verisi yakalanan kullanıcının yüz ifadelerini içeren işaretçi verilerinin elde edilmesi

Elde edilen bu yönlü çevrimsiz çizge ile çizge veri tabanında bulunan çizgeler arasında geliştirdiğimiz yöntem ile çoklu eşleme işlemi yapılmaktadır. Çoklu eşleme işlemi sonucunda sorgu resmi ile benzerlik oranı en yüksek olan veri tabanı resmi, işaretçi veri tabanından veri seçmek için anahtar olarak kullanılmaktadır. İşaretçi veri tabanında bu anahtar ile anahtarlanmış olan işaretçi verisi, kafa modeline aktarılmak üzere sistemin bilgisayar grafiği uygulaması olan ikinci kısmına aktarılmaktadır. Sistemin bu ikinci kısmı Şekil 4.10'da şematik olarak gösterilmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu kısımda sistemin ürettiği görsel sonuçlar ve sistemin performans analizi yapılacaktır.

5.1. Görsel Sonuçlar

Bu bölümde sistemin test edilmesinde kullanılan performans verisinin kafa modeline uygulanması sonucu elde edilen yüz canlandırması ile, sinirli, şaşırmış, üzgün, uykulu ve mutlu olarak değişikliğe uğratılmış yüz ifadelerinin canlandırmasının karşılaştırılması yapılacaktır.

Sistemi test etmek amacıyla kullanılan işaretçi tabanlı performans verisinden elde edilen nötr bir yüz ifadesi ile oluşturulmuş canlandırmaya ait kareler Şekil 5.1’de görülmektedir. Şekilde ilk resim, başlangıç durumunda yüzün durumunu göstermektedir. Diğer resimler performans verisinde bulunan farklı yüz ifadelerinin canlandırmaya aktarılmasıyla elde edilen görüntülerdir. Şekil 5.2’de aynı performans verisinin duygusal olarak değişikliğe uğratılmasıyla elde edilen canlandırmadan kareler görülmektedir.



Şekil 5.1. Performans verisinden elde edilen canlandırmadan kareler

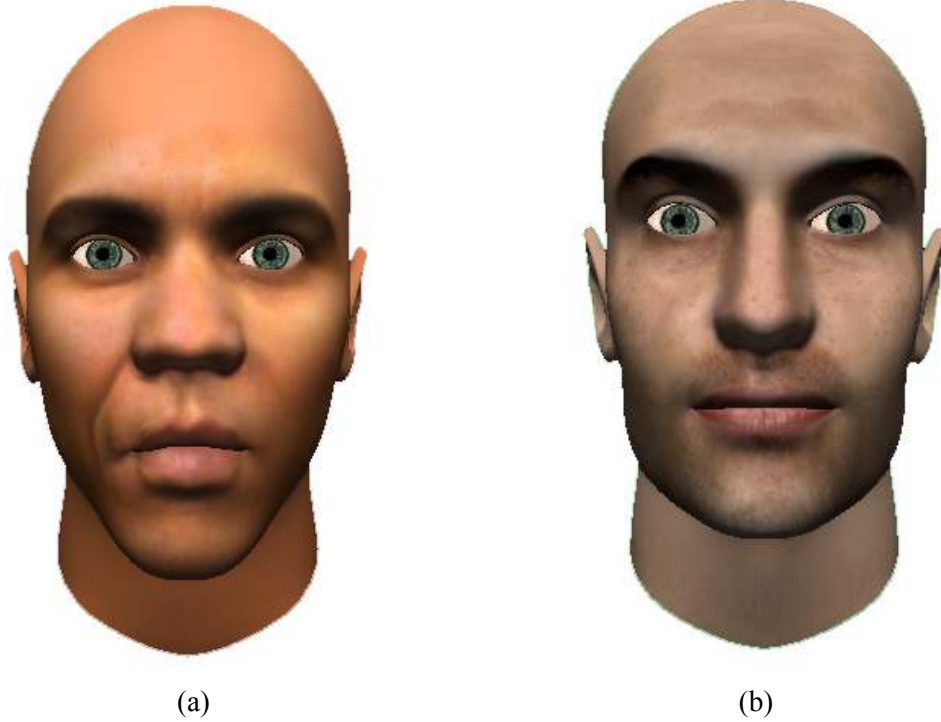


Şekil 5.2. Performans verisindeki yüz ifadelerinin duygusal olarak değiştirilmesiyle elde edilen canlandırmadan kareler (Yukarıdan aşağıya sinirli, şaşırmış, üzgün, uykulu, mutlu)

5.2. Başarım Analizi

Sistemimiz, Intel Core2Duo çift çekirdekli 1,73 GHz işlemcili, 1GB hafızaya sahip bir kişisel bilgisayar üzerinde denenmiştir. Deney bilgisayarı Intel 945GM tümleşik paylaşımlı hafızalı ekran kartına sahiptir. Sistemin geliştirildiği yazılım ortamı, Microsoft Visual Studio 9.0 ve OpenGL kütüphaneleridir.

Başarım analizini yaparken farklı kalitedeki iki kafa modeli üzerinde sonuçlar elde edilmiştir. İlk kafa modeli 5960 nokta ve 11492 yüzeyden oluşmaktadır (Şekil 5.3.a). İkinci kafa modelinde ise 24134 noktanın oluşturduğu 46384 yüzeye bulunmaktadır (Şekil 5.3.b).



Şekil 5.3. Başarım analizinde kullanılan kafa modelleri (a) Orta kalitedeki kafa modeli (Model 1) (b)Yüksek kalitedeki kafa modeli (Model 2)

İlk başarım analizi kullanılan modellerin ekrana çizdirilmesi sırasındaki başarımı ölçmek üzere yapılmıştır. Çizelge 5.1’de modellerin kalitesinin, kaplama kullanılmasının ve ışıklandırmanın, saniyede üretilecek olan kare sayısı üzerindeki etkisi görülmektedir. Sistemin saniyede ürettiği kare sayısını en çok etkileyen öğenin modelin kalitesi olduğu açıkça görülmektedir. Bunun yanında kaplama

kullanılmadığı durumlarda daha yüksek başarımlar elde edildiği de gözlemlenmektedir. Işıklıandırmanın birinci model üzerinde başarımları pek etkilemediği görülmektedir. Yüksek kalitedeki ikinci modelde ise ışıklandırmanın başarımları üzerinde küçük de olsa etki ettiği görülmektedir. Bunun sebebi ikinci modelin ilkenden dört kat daha fazla nokta ve yüzeye sahip olmasıdır. Sistemin çalışması sırasında canlandırmanın oynatılıp oynatılmaması, başarımları saniyede üretilen kare sayısı yönünden etki etmemektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere sistemin çalışması sırasında kaynakların en çok kullanıldığı kısım, canlandırmanın çizdirilmesi kısmıdır.

Çizelge 5.1. Modellerin ekrana çizdirilmesi sırasında saniyede üretilen kare sayıları

Kullanılan Model	Kaplama: Var Işıklıandırma: Var	Kaplama: Yok Işıklıandırma: Var	Kaplama: Var Işıklıandırma: Yok	Kaplama: Yok Işıklıandırma: Yok
Model 1	115	134	116	135
Model 2	52	59	67	77

İkinci başarımları analizi, sanal işaretçilerin etki alanlarına giren noktaları tespit etmede kullanılan komşuluk algoritmasının çalışma süresi üzerinde yapılmıştır. Sistemi test etmede kullanılan işaretçi verileri, 50 işaretçinin konum bilgisini içerdiği için, bu 50 işaretçiye karşılık gelen 50 sanal işaretçinin etki alanı hesaplanmıştır. Çizelge 5.2’de görüldüğü gibi orta kalitedeki ilk kafa modelinde komşuluk algoritmasının toplam çalışma süresi 0,875 saniyedir. Yüksek kalitedeki ikinci modelde ise bu süre 10,578 saniye olarak tespit edilmiştir. İki çalışma süresi arasındaki orantısızlığın sebebi, düşük kalitedeki modelde bir sanal işaretçinin etki alanına giren noktaların komşuluğunda bulunan noktaların yüksek kalitedeki modele göre daha az sayıda olmasıdır. Tezin üçüncü bölümünde anlatıldığı gibi komşuluk algoritmasının özyinelemeli bir yapıya sahip olmasından dolayı, çalışma zamanları arasındaki oran doğrusal olmamıştır.

Çizelge 5.2. Modeller için 50 işaretçiye ait etki alanlarının tespit edilmesi sırasında komşuluk algoritmasının sonlanması için geçen toplam süre

Kullanılan Model	Toplam Süre (sn)
Model 1	0,875
Model 2	10,578

Çizelge 5.3'te de sanal işaretçilerden etki alanına giren nokta sayısı en fazla olan işaretçilerin komşu okta sayıları ve komşuluk algoritmasının bu işaretçilerin etki alanına giren noktaları bulmak için harcadığı süre gösterilmiştir. Dudak bölgesindeki sanal işaretçilerin komşuluklarını hesaplamada elde edilen bu değerler de komşuluk algoritmasının özyinelemeli yapısının, zaman yönünden başarımlar üzerindeki olumsuz etkisini ortaya koymaktadır. Fakat sanal işaretçilerin atanması işlemi program çalıştırılırken sadece bir kez yapılacağından dolayı belirtilen çalışma zamanları kabul edilebilir düzeydedir.

Çizelge 5.3. En fazla komşuya sahip olan sanal işaretçilerin sahip oldukları komşu sayısı ve bu komşuların tespit edilmesinde komşuluk algoritmasının sonlanması için geçen süre

Kullanılan Model	Komşu Nokta Sayısı	Geçen Süre (sn)
Model 1	244	0.062
Model 2	1100	1.01

6. DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında, üç boyutlu bir sanal kafa modeli üzerinde yüz ifadelerinin canlandırılmasını sağlayan bir sistem sunulmuştur. Tasarlanan sistemde bir aktörün işaretçi tabanlı olarak kaydedilmiş olan yüz ifadelerinin, üç boyutlu sanal bir insan kafası modeline aktarılması sağlanmıştır. Sistemimiz üç adımda canlandırma üretmektedir:

- Yükleme
- Ayarlama
- Duygusal değişikliğe uğratma

İlk adımda, kullanıcı tarafından belirlenen ve canlandırmada kullanılacak olan kafa modeli, göz modeli ve işaretçi verisi bilgilerinin sisteme yüklenmesi işlemi gerçekleştirilmektedir.

Bir sonraki adımda, kafa modeli üzerindeki noktaların hareket ettirilmesinde kullanılacak olan ve işaretçi verisi tarafından kontrol edilen sanal işaretçiler, kullanıcı tarafından oluşturulmaktadır. Oluşturulacak olan sanal işaretçiler, yüz üzerinde kullanıcı tarafından seçilen bir noktayı merkez alacak şekilde oluşturulan, belirli bir yarıçaptaki dairesel bölge içinde kalan komşu noktalardan oluşmaktadır. Etki alanına giren noktalar belirlenen sanal işaretçiler, işaretçi verisinde eşleştikleri işaretçinin her karedeki konum değişikliğine göre hareket ettirilerek canlandırmanın oluşturulmasını sağlamaktadır.

Son adımda ise, kaydedilmiş olan işaretçi verisindeki yüz ifadelerinin canlandırılması sırasında modelin içinde bulunacağı duygusal durum seçilmektedir. Sistemde nötr bir ifade ile canlandırma oluşturulabileceği gibi, sinirli, şaşırılmış, üzgün, uyuklu ya da mutlu bir yüz ifadesi ile de canlandırma oluşturulabilmektedir. Sistemimiz, getirdiği bu yenilik sayesinde bir işaretçi verisinden farklı canlandırmalar elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Bunun yanında görüntü işleme alanındaki temel araştırma konularından olan nesne eşleme problemi için yeni bir çözüm yolu geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemde nesne eşleme problemi, çizge eşleme problemine indirgenerek çözülmektedir.

Nesnelerden elde edilen çizgelerin l_1 normuna bozulma oluşmadan gömülmesini temel alan yöntemimizde, gömme işlemi sonrasında elde edilen iki farklı dağılım arasındaki mesafe Toprak Taşıyıcı Mesafesi (Earth Mover's Distance - EMD) algoritması kullanılarak hesaplanmaktadır. Bir sorgu nesnesi ile bütün veri tabanı nesnelere için belirtilen algoritmanın tek tek çalıştırılmasından sonra elde edilen değerler içerisindeki en yüksek benzerlik değeri, bulunan nesnelere eşleşme olduğunu ifade etmektedir. Geliştirilen yöntemin başarımının hesaplanması için, bir nesne veri tabanı üzerinde algoritma şu şekilde çalıştırılmıştır. Öncelikle veri tabanından bir nesne seçilmiş ve diğer veri tabanı nesnelere için sorgu nesnesi olarak kullanılmıştır. Elde edilen değerler kaydedilmiş, nesne veri tabanına tekrar konmuş ve aynı işlem diğer bütün veri tabanı nesnelere için de tekrarlanmıştır. Sonuçta elde edilen değerlere göre sistemin nesnelere doğru tespit edip edemediğine karar verilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile önceki bir çalışmanın başarım karşılaştırması yapılmıştır.

Görüntü işleme üzerine çalışan toplulukların üzerine çalıştığı bir diğer problem de imge eşleme problemidir. Bu problem iki farklı imge arasındaki benzerliğin bulunmasını hedeflemektedir. İki imge arasındaki eşlemenin bulunması için özellikle imgelerin öznitelikleri çıkarılmaktadır ve daha sonra öznitelik kümeleri arasında eşleme işlemi yapılmaktadır. Geliştirdiğimiz nesne eşleme yöntemi, imge eşleme probleminin çözümünde de kullanılabilir bir yapıdadır. Yöntemin bu özelliği dolayısıyla, geliştirmiş olduğumuz bilgisayar grafiği uygulaması olan yüz canlandırması elde etme sistemi ile birlikte kullanılması da mümkündür. Tezimizde, bir kullanıcının yüzüne işaretçi yerleştirmeden kaydedilmiş olan performans videosundan yüz ifadelerinin elde edilmesini ve elde edilen işaretçi bilgilerinin geliştirdiğimiz yüz ifadesi canlandırma sisteminde kullanılmasını amaçlayan bir sistemin tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan sistem, özel bir işaretçi – ışıklandırma – kamera düzeneği ile kaydedilecek aktör performansı ve işaretçi veri tabanları ile kullanıcıdan kaydedilecek işaretçisiz yüz performansı videosu arasında imge eşleme işlemi yapılmasını öngörmektedir. Bulunan eşleme sonucunda elde edilecek olan işaretçi bilgileri ile de yüz ifadesi canlandırması oluşturulması hedeflenmiştir.

Tasarlanan sistemin uygulaması bir yüksek lisans tezinin iş yükünün üzerinde olmasından dolayı, uygulamanın geliştirilmesi gelecek çalışmalara bırakılmıştır.

6.1. Gelecek Çalışmalar

Gerçekçi yüz canlandırmasında bulunması gereken önemli öğelerden olan saç, dil ve dişler, sistemimizde uygulanmamıştır. Bu öğelerin gerçekçi olarak sisteme eklenmesi, elde edilecek olan canlandırmanın kalitesini önemli ölçüde artıracaktır.

Sistemimiz ile birlikte geliştirdiğimiz nesne eşleme yönteminin tezin dördüncü kısmında anlatıldığı gibi sistemle birleştirilmesi de gelecek çalışmalara bırakılmıştır. Böylelikle elde edilecek bir sistemde, işaretçi kullanmadan performans verisi kaydedilen bir kullanıcının yüz ifadelerinin sanal modele aktarılması sağlanmış olacaktır.

Geliştirdiğimiz nesne eşleme yönteminin başarımının daha sağlıklı biçimde ölçülebilmesi için ise daha büyük çaptaki bir veri tabanı ile deneylerin tekrarlanarak sonuçların elde edilmesi gerekmektedir. Ayrıca izometrik çizge gömme işleminin farklı normlarda denenmesi ve farklı dağılım tabanlı eşleme algoritmalarının EMD algoritması yerine kullanılması, bu alanda gelecekte yapılması planlanan çalışmalardır.

KAYNAKLAR

- [1] Noh, J., Neumann, U., Expression cloning, Proceedings of ACM SIGGRAPH'01, 277–288, 2001.
- [2] Chai, J., Xiao, J., Hodgins, J., Vision-based control of 3D facial animation, Proceedings of Symposium on Computer Animation, 193 – 206. ACM Press, 2003.
- [3] F. Pighin, J. Hecker, D. Lischinski, R. Szeliski, and D.H. Salesin. Synthesizing realistic facial expressions from photographs. SIGGRAPH Proceedings, 75–84, 1998.
- [4] Deng, Z., Noh, J., Computer facial animation: A survey, In Deng, Z., Neumann, U., Data driven 3D facial animation, 1-28, Springer-Verlag, London, 2008.
- [5] Essa, I., Basu, S., Darrell, T., Pentland, A., Modeling, tracking and interactive animation of faces and heads using input from video. Proceedings of Computer Animation '96 Conference, Geneva, Switzerland, Haziran 1996.
- [6] Choe, B., Lee, H., Ko, H., Performance-driven muscle-based facial animation. The Journal of Visualization and Computer Animation, 12(2), 67-79, 2001.
- [7] Lee, Y., Terzopoulos, D., Waters, K., Realistic modeling for facial animation. SIGGRAPH Proceedings, 55-62, 1995.
- [8] Guenter, B., Grimm, C., Wood, D., Malvar, H., Pighin, F., Making faces. Proceedings of ACM SIGGRAPH '98, 55-66, 1998.
- [9] Agarwala, R., Bafna, V., Farach, M., Paterson, M., Thorup, M., On the approximability of numerical taxonomy (fitting distances by tree metrics. SIAM Journal on Computing 28(2), 1073–1085 (1999)
- [10] Moghaddam, B., Pentland, A., Face recognition using view-based and modular eigenspaces. Automatic Systems for the Identification and Inspection of Humans, SPIE Vol 2277, Temmuz 1994.
- [11] Yang, M., Kriegman, D., Ahuja, N., Detecting faces in images: A survey. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol 24, No.1, Ocak 2002.
- [12] Park, I., Zhang, H., Vezhnevets, V., Image-based 3D face modeling system. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2005:15, 2072-2090.
- [13] Zhang, L., Snavely, N., Curless, B., Seitz, S., Spacetime faces: High-resolution capture for modeling and animation. In Deng, Z., Neumann, U., Data driven 3D facial animation, 248-277, Springer-Verlag, London, 2008.
- [14] Parke, F., Computer generated animation of faces. Proceedings of ACM Natl. Conf., Vol. 1, 451-457, 1972.
- [15] Zhang, L., Curless, B., Seitz, S., Spacetime stereo: Shape recovery for dynamic scenes. Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'03), Wisconsin, USA, Haziran 2003.
- [16] Ahuja, R.K., Magnanti, T.L., Orlin, J.B.: Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications, pp. 4–7. Prentice Hall, Englewood Cliffs (1993)
- [17] Noh, J., Fidaleo, D., Neumann, U., Gesture driven facial animation. USC Technical Report, 02-761, 2002.

- [18] Takano, Y., Yuyama, I., Seki, Y., Hasegawa, H., Watanabe, Y., Improvement for 3D coordinate reconstruction of facial feature points in video sequence. 3DTV – Conference 2008, 289-292, İstanbul, Türkiye, Mayıs 2008.
- [19] Bozkurt, E., Erdem, Ç., Erzin, E., Erdem, T., Özkan, M., Tekalp, A., Speech-driven automatic facial expression synthesis, 3DTV – Conference 2008, 273-276, İstanbul, Türkiye, Mayıs 2008.
- [20] Gurbuz, S., Yoshida, S., Inoua, N., Real-time synthesis of natural head motion on a 3D avatar from reconstructed 3D frontal face data, 3DTV – Conference 2008, 277-280, İstanbul, Türkiye, Mayıs 2008.
- [21] Williams, L., Performance-driven facial animation, Proceedings of ACM SIGGRAPH '90, 235-242, ACM Press, 1990.
- [22] Almohamad, H.A., Duffuaa, S.O.: A linear programming approach for the weighted graph matching problem. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 15(5), 522–525 (1993)
- [23] Deng, Z., Chiang, P.Y., Fox, P., Neumann, U., Animating blendshape faces by cross mapping motion capture data, Proceedings of ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, 2006.
- [24] Busso, C., Deng, Z., Neumann, U., Narayanan, S., Natural head motion synthesis driven by acoustic prosodic features, Computer Animation and Virtual Worlds, 16, 283-290, 2005.
- [25] Bell, E.T.: Exponential numbers. American Mathematics Monthly 41, 411–419 (1934)
- [26] Bunke, H., Error correcting graph matching: On the influence of the underlying cost function. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 21(9), 917–922, 1999.
- [27] Demirci, F., Shokoufandeh, A., Keselman, Y., Bretzner, L., Dickinson, S., Object recognition as many-to-many feature matching. International Journal of Computer Vision, 69(2), 203–222, 2006.
- [28] Garey, M.R., Johnson, D.S., Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness. W. H. Freeman & Co, New York (1979)
- [29] Gupta, A., Embedding tree metrics into low dimensional euclidean spaces. STOC 1999 Proceedings of the thirty-first annual ACM symposium on Theory of computing, 694–700. ACM, New York, 1999.
- [30] Kitagawa, M., Windsor, B., Mocap for Artists, Workflow and Techniques for Motion Capture, Focal Press, Burlington, Massachusetts, 2008.
- [31] Giacomo, T.D., Garcheryi S., Thalmann, N.M., Expressive visual speech generation, In Deng, Z., Neumann, U., Data driven 3D facial animation, 29-59, Springer-Verlag, London, 2008.
- [32] Gupta, A., Embedding tree metrics into low-dimensional euclidean spaces, Discrete & Computational Geometry, 24(1), 105–116, 2000.
- [33] Güdükbay, U., A movable jaw model for the human face, Computers & Graphics, 21(5), 549-554, 1997.
- [34] Pighin, F., Szeliski, R., Salesin, D.H., Resynthesizing facial animation through 3D model-based tracking, Proceedings of IEEE International Conference of Computer Vision '99, 143-150, 1999.

- [35] Lo, H., Chung, R., Facial expression recognition approach for performance animation, Second International Workshop on Digital and Computational Video, 132-139, Florida, USA, Ağustos 2001.
- [36] Lowe, D.G., Object recognition from local scale-invariant features, Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, 1150-1157, Kerkyra, Greece, Eylül 1999.
- [37] Hoffmann, C.M., Group-theoretic algorithms and graph isomorphism, Springer, Berlin, 1982.
- [38] Koch, R.M., Gross, M.H., Carls, F.R., Büren, D.F., Fankhauser, G., Parish, Y.I.H., Simulating facial surgery using finite element models, International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 421-428, New Orleans, USA, Ağustos 1996.
- [39] Vannier, M.W., Marsh, J.I., Warren, J.o., Three dimensional computer graphics for craniofacial surgical planning and evaluation, Computer Graphics, 17(3), 263-273, 1983.
- [40] “Eve: An Understanding Virtual Teacher” erişim adresi: <http://www.livescience.com/technology/071127-eve-robot.html> , erişim tarihi: 11.Mart.2009
- [41] “Animated Computer Tutors Help Remedial Readers, Language Learners, Autistic Children” erişim adresi: <http://mambo.ucsc.edu/ScienceDaily.html> , erişim tarihi: 11.Mart.2009
- [42] “Virtual Teachers Outperform Real Ones” erişim adresi: <http://mambo.ucsc.edu/FoxNewsStory.html> , erişim tarihi: 11.Mart.2009
- [43] Lewis, J.P., Mooser, J., Deng, Z., Neumann, U., Reducing blendshape interference by selected motion attenuation, Symposium on Interactive 3D graphics and Games, 25-29, Washington, USA, Nisan 2005.
- [44] Ekman, P., Friesen, W.V., Facial Action Coding System, Consulting Psychologists Press, 1978.
- [45] Platt, S.M., Badler, N.I., Animating facial expressions, Computer Graphics, 15(3), 245-252, 1981.
- [46] Frick, H., Hans, J., Human Anatomy, Vol. 1, Thieme Medical Publishers, Stuttgart, 1991.
- [47] Terzopoulos, D., Waters, K., Physically-based facial modeling, analysis, and animation, Journal of Visualization and Computer Animation, 1(2), 73-80, 1990.
- [48] Demirci, M.F., Shokoufandeh, A., Dickinson, S., Keselman, Y., Bretzner, L., Many-to-many feature matching using spherical coding of directed graphs, Lecture Notes in Computer Science - Computer Vision - ECCV 2004, 322-335, Springer Berlin, Heidelberg, 2004.
- [49] Platel, B., Demirci, M.F., Shokoufandeh, A., Florack, L.M.J., Knaters, F.M.W., Romeny, B.M.T., Dickinson, S.J., Discrete representation of top points via scale space tessellation, Lecture Notes in Computer Science – Scale Space and PDE Methods in Computer Vision, 73-84, Springer Berlin, Heidelberg, 2005.
- [50] Young, J.W., Head and face anthropometry of adult U.S. civilians – Technical Report, FAA Civil Aeromedical Institute, Oklahoma, 1993.
- [51] Horaud, R., Skordas, T., Structural matching for stereo vision, Ninth International Conference on Pattern Recognition, Rome, Italy, 439–445, 1988.

- [52] Lee, S.W., Kim, J.H., Attributed stroke graph matching for seal imprint verification, *Pattern Recognition Letters* 9, 137–145, 1989.
- [53] Ling, H., Okada, K., An efficient earth mover's distance algorithm for robust histogram comparison, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 29(5), 840–853, 2007.
- [54] Rubner, Y., Tomasi, C., Guibas, L.J., The earth mover's distance as a metric for image retrieval, *International Journal of Computer Vision*, 40(2), 99–121, 2000.
- [55] Siddiqi, K., Shokoufandeh, A., Dickinson, S., Zucker, S., Shock graphs and shape matching, *International Journal of Computer Vision*, 35(1), 13–32, 1999.
- [56] Wang, Y.K., Fan, K.C., Horng, J.T., Genetic-based search for error-correcting graph isomorphism, *IEEETSAC: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 27, 1997.
- [57] Williams, M.L., Wilson, R.C., Hancock, E.R.: Deterministic search for relational graph matching. *Pattern Recognition*, 32(7), 1255–1271, 1999.
- [58] Wong, E.K., Model matching in robot vision by subgraph isomorphism, *Pattern Recognition*, 25(3), 287–303, 1992.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : OSMANLIOĞLU, Yusuf
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 21.09.1985 Malatya
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 292 40 00
Faks : 0 (312) 292 40 91
e-mail : yosmanlioglu@etu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Orta Doğu Teknik Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007 - 2008	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Proje Asistanı
2008 - 2009	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce İleri Düzey
Arapça Orta Düzey

Yayınlar

Dergi Yayınları

1. **Yusuf Osmanhoğlu**, Y.Sinan Hanay, Oğuz Ergin, “Modifying Data-Holding Components of the Processors for Energy Efficiency”, Journal of Circuits, Systems, and Computers, JCSC Vol. 18, No.6 (October 2009).
2. Y. Onur Koçberber, **Yusuf Osmanhoğlu**, Oğuz Ergin, “Exploiting Narrow Values for Faster Parity Generation”, Microelectronics International, Vol. 26, No. 3 , 22 – 29, 2009.

Konferans Yayınları

1. **Yusuf Osmanhoğlu**, Y.Onur Koçberber, Oğuz Ergin, “Reducing Parity Generation Latency through Content Aware Circuit”, Great Lakes Symposium on VLSI (GLVLSI'09), Boston, USA, Mayıs 2009.
2. M.Fatih Demirci, **Yusuf Osmanhoğlu**, “Many-to-many Matching Under the L1 Norm”, International Conference of Image Analysis and Processing (ICIAP'09), Salerno, Italy, Eylül 2009.