

Aktif görünüm modeline dayalı gürbüz yüz hizalama

Fatih KAHRAMAN*, **Binnur KURT**, **Muhittin GÖKMEN**

İTÜ Bilişim Enstitüsü, Bilgisayar Bilimleri, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Yüz görünümündeki şekil ve doku değişimine bağlı farklılıklar yüz tanıma problemini oldukça zor hale getirmektedir. Bireyler arası yüz görünüm farklılıklarının fazla olmasına karşın, her bireyin kendi yüz görünümünü farklı hale getirecek değişimlerde mevcuttur. Özellikle aydınlatma ve poz değişimleri yüz tanıma sistemlerinin başarımını etkileyen zorlukların başında gelmektedir. Bu çalışmada otomatik yüz hizalama için aydınlatma ve poz değişimlerine karşı gürbüz yeni bir yöntem tanıtılmıştır. Klasik aktif görünüm modeli (AGM) yapısına yüz için özelleştirilmiş aydınlatma normalizasyonu eklenerek AGM'nin farklı aydınlatma koşullarındaki arama ve yakınsama performansını arttıran yeni bir yöntem önerilmiştir. AGM ile yüz bölütlemede, özgün yüz aydınlatma normalizasyonunu AGM bükme (warping) işleminden hemen sonra ve her çevirimde uygulayarak aydınlatma değişimlerine karşı gürbüz bir model oluşturulmuştur. Yöntem giriş olarak verilen farklı aydınlatılmış ve farklı bir poza sahip yüz görüntüsünü hem iyileştirmeye hem de hizalamaya çalışmaktadır. Ayrıca tam karşıdan çekilmiş tek bir yüz görüntüsünden, o kişinin farklı pozlara sahip görüntülerini sentezleyen bir yöntem tanıtılmış ve sentetik olarak sentezlenen poz verileri ile AGM şekil uzayı güçlendirilerek poz değişimlerine karşı gürbüz bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde, model eğitimi için aynı bireyin farklı aydınlatma ve poza sahip görüntülerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Önerilen yöntemde aydınlatma değişimlerine karşı bağımsız bir yapı oluşturulması için karmaşık aydınlatma modelleri gerekmemektedir. Deneysel çalışmalardan da görüleceği gibi önerilen yöntem, farklı aydınlatma ve pozlarda bile klasik AGM'ye göre oldukça iyi sonuçlar vermiştir.

Anahtar Kelimeler: *Yüz hizalama, aktif görünüm modelleri, aydınlatmadan bağımsız yüz tanıma.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Fatih KAHRAMAN. fatih.kahraman@be.itu.edu.tr; Tel: (262) 677 25 83.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Bilişim Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Bilgisayar Bilimleri Programında tamamlanmış olan " Aktif görünüm modeline dayalı gürbüz yüz hizalama" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 06.11.2009 tarihinde dergiye ulaşılmış, 07.01.2010 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.08.2011 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Bu makaleye "Kahraman, F., Kurt, B., Gökmen, M., (2011) 'Aktif görünüm modeline dayalı gürbüz yüz hizalama', İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 10: 3, 49-60" şeklinde atıf yapabilirsiniz.

Active appearance based robust face alignment

Extended abstract

In building a face recognition system for real-life scenarios, one usually faces the problem that is the selection of a feature-space and preprocessing methods such as alignment under varying illumination conditions and poses. In this study, we developed a robust face alignment approach based on Active Appearance Model (AAM) by inserting an illumination normalization module into the standard AAM searching procedure and inserting different poses of the same identity into the training set.

The modified AAM search can now handle both illumination and pose variations in the same epoch, hence it provides better convergence in both point-to-point and point-to-curve senses. We also investigate how face recognition performance is affected by the selection of feature space as well as the proposed alignment method. The experimental results show that the combined pose alignment and illumination normalization methods increase the recognition rates considerably for all feature spaces. In this paper, we focus on the problems induced by varying illumination and poses. Our primary aim is to eliminate the negative effect of illumination and pose on the face recognition system performance through illumination and pose-invariant face alignment based on Active Appearance Model.

Pose normalization is required before recognition in order to reach acceptable recognition rates. We developed AAM based pose normalization method which uses only one AAM. There are two important contributions over the previous studies. By using the proposed method:

- *One can synthetically generate appearances for different poses when only frontal face image is available.*
- *One can generate frontal appearance of the face when there is only non-frontal face image is available.*

The same variation in pose imposes similar effect on the face appearance for all individuals. Defor-

mation mostly occurs on the shape whereas the texture is almost constant. Since the number of landmarks in AAM is constant, the wireframe triangles are translated or scaled as pose changes. So as we change pose, only wireframe triangles undergo affine transformation but the gray level distribution within these triangles remains the same. One can easily generate frontal face appearance if AAM is correctly fitted to any given non-frontal face of the same individual provided that there is no self-occlusion on face. Self-occlusion usually is not a problem for angles less than ± 45 .

For 2D pose generation, we first compute how each landmark point translates and scales with respect to the corresponding frontal counterpart landmark point for 8 different poses, and obtain a ratio vector for each pose. We use the ratio vector to create the same pose variation over the shape of another individual. Appearances are also obtained through AAM using synthetically generated landmarks. It is important to note that the generated faces contain no information about the individual used in building the ratio matrix. An AAM model trained by using only frontal faces can only fit into frontal faces well and fail to fit into non-frontal faces. Our purpose here is to enrich the training database by inserting synthetically generated faces at different poses so that AAM model trained by frontal faces can now converge to images at any pose.

In this paper we developed AAM based face alignment method which handles illumination and pose variations. The classical AAM fails to model the appearances of the same identity under different illuminations and poses. We solved this problem by inserting histogram fitting based normalization into the searching mechanism and inserting different poses of the same identity into the training set. From the experimental results, we showed that the proposed face restoration scheme for AAM provides higher accuracy for face alignment in point-to-point error sense. Recognition results based on PCA and LDA feature spaces showed that the proposed illumination and pose normalization outperforms standard AAM.

Keywords: *Face alignment, active appearance models, illumination invariant face recognition.*

Giriş

Yüz tanıma sistemlerinin farklı poz ve ışık değişimine karşı gürbüz olması istenir. Kabul edilebilir tanıma başarımının elde edilebilmesi için poz değişimlerini normalize eden modüllerin yüz tanıma sisteminde yer alması gerekir. Yüz görünümünde aydınlatmadan kaynaklanan değişim bireyler arası değişimden daha büyük olabilmektedir. Yüzün üç boyutlu ($3B$) yapısından dolayı, ışığın yönü ve şiddetine bağlı olarak yüz görüntüsünü oluşturan beneklerin gri seviye değerleri ve bunların dağılımları tamamen değişebilmektedir. Bu nedenle yüz tanıma ve modellemede yüksek başarımlar hedefleniyor ise mutlaka aydınlatma normalizasyonu yapılması gerekmektedir.

Shashua ve diğerleri (2001) yüzün Lambertian yüzey olduğu ve yüz dokusunda herhangi bir gölge olmadığı ideal ortam varsayımı altında, farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş görüntüleri, ideal ortamda çekilmiş görüntülere oranlayarak aydınlatma değişimlerinin onarılabileceğini göstermişlerdir. Önerdikleri yöntem, oldukça basit ve uygulanabilir olması yanında $2B$ görüntüler kullanan yüz tanıma sistemlerinin ışığa karşı gürbüz hale gelmesine yardımcı olmaktadır. Liu ve arkadaşları (2005) tarafından RI yöntemi daha da geliştirilmiş ve yüz için özelleştirilmiş çevrimsel bir algoritma sunulmuştur. Her iki yöntem için temel zorluk tüm görüntülerin tamamen hizalanmış olduğu varsayımının gerçek hayatta geçersiz olması ve hizalanmamış görüntüler için tamamen hatalı sonuçlar üretiyor olmasıdır.

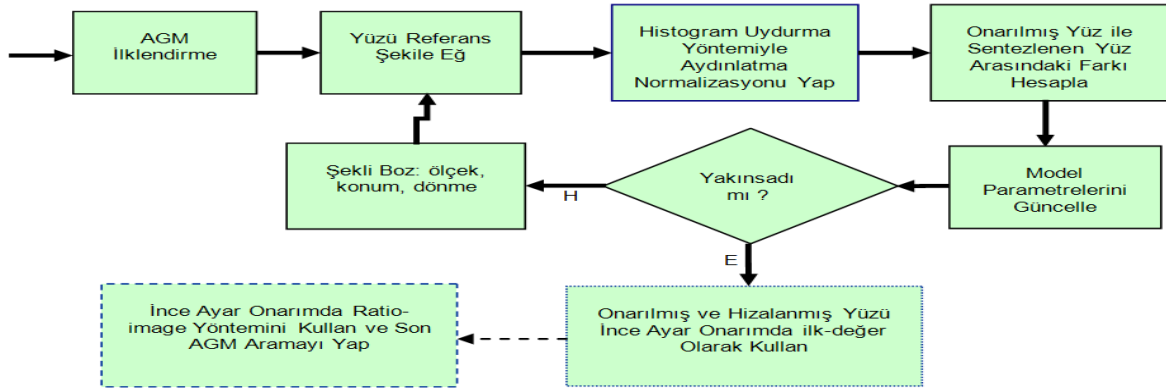
Wang ve arkadaşları (2003) aydınlatma konileri adını verdikleri yöntemde, yüzde aydınlatmadan kaynaklanan değişimleri teorik olarak açıklayan, etkili bir model önermişlerdir. Bu yöntemde yüz üzerinde oluşan gölgelerde model yapısı içine alan yöntem sayesinde literatürde öne çıkan bir başarımlar raporlanmıştır. Aydınlatma konileri yönteminin en büyük sorunu hesaplama maliyetinin oldukça yüksek olması ve her birey için en az yedi adet farklı aydınlatılmış görüntüye ihtiyaç duymasındır. Basri ve arkadaşları (2001) aydınlatmayı küresel harmonik baz vektörleri ile düşük boyutlu doğrusal alt-uzaylarla ifade etmişlerdir. Harmonik görüntüler verilen yüzey normalleri ve albedolar kullanılarak analitik olarak kolayca hesaplanabil-

mektedir. Fakat yüzey normalleri ve albedo'nun doğru kestirimi oldukça zordur.

Üç boyutlu bir nesne olan yüz farklı bakış açılarından tamamen farklı bir görünüme sahip olabilmektedir. Son yıllarda yüz tanıma ile ilgili çalışmalar büyük ölçüde yüz hizalama konusuna odaklanmıştır. Çünkü farklı bakış açılarından çekilmiş nesnelere hizalanabilirse, poz değişimlerinden kaynaklanan bozulmalara çözümler üretilebilmektedir. Önerilen yöntemler genellikle şekil ve görünüm modeline dayalı yaklaşımlardır. Bu yöntemler arasında en önemli olanları Cootes ve diğerlerinin (1995) önerdiği Aktif Şekil Modelleri ($AŞM$) ve bu yöntemin çok daha gelişkin sürümü olan yine Cootes ve arkadaşlarının (2001) önerdiği Aktif Görünüm Modellerini (AGM) sayabiliriz. Görünüm tabanlı yöntemlerden öne çıkanların başında AGM 'nin uygulama alanını genişletmek için Cootes ve diğerleri (2002) tarafından önerilen, bakış açısından bağımsız AGM gelmektedir. Önerilen yöntem farklı pozlardaki yüzlerden eğitilmiş beş farklı AGM 'nin bir araya getirilmesi ile bakış açısından bağımsız bir yaklaşım sunuyor olsada ilk AGM ile en iyileme ve modelleme bakımından bir farkı yoktur. Blanz ve diğerleri (2003) ise önerdikleri bozulabilir model uydurma yönteminde, $3B$ yüz verilerinden oluşan eğitim kümesiyle kurulan model yardımıyla, $2B$ tek bir görüntüden özgün pozlar elde edilebilmişlerdir. Fakat bu ve benzeri $3B$ yaklaşımların en büyük problemi hesaplama maliyetlerinin çok yüksek olmasıdır.

Çalışmamızda Blanz ve diğerlerinin (2003) önerdikleri hesaplama maliyeti yüksek olan $3B$ bozulabilir model benzeri bir yaklaşım için model uydurma (fitting) yöntemini iki boyutlu ($2B$) görüntülerde de yapılabileceği gösterilmiştir. Makalenin ikinci bölümünde aktif görünüm modeli, üçüncü bölümde aydınlatma normalizasyonu, dördüncü bölümde ise yüz için özelleştirilmiş aydınlatma normalizasyonu yöntemi kullanılarak oluşturulan özgün AGM yüz arama yöntemi tanıtılmaktadır.

Beşinci bölümde poz değişimlerine karşı gürbüz yüz modeli kurulması ve poz sentezleme ve deneysel sonuçlar verilmiştir. Son bölümde ise çıkarımlar ve gelecek çalışmalar anlatılmıştır.



Şekil 1. Poz önerilen gürbüz AGM'nin genel yapısı

Aktif görünüm modeli

Aktif Görünüm Modeli (AGM) ile şekil ve doku değişimleri tek bir parametre vektörü ile kontrol edilebilecek şekilde modellenmektedir. AGM şu prensiplere göre çalışmaktadır: Eğitim kümesindeki yüzlere ait ayırt edici şekilsel öznitellikler sonlu ve yeterli sayıda, n adet, nokta ile işaretlenerek yüz şekil bilgisi elde edilir. Yüz şekil bilgisi, işaretlenen n adet konaç noktası

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_n] \quad (1)$$

biçiminde matematiksel olarak ifade edilir. Şekil noktaları arasında kalan yüze ait beneklerin gri-seviye değerleri önceden belirlenmiş referans şekle göre normalize edilerek g ile ifade edilen doku vektörleri elde edilir. Eğitim kümesindeki yüzlere ait x şekil vektörleri ve g doku vektörlerine ayrı ayrı Temel Bileşen Analizi (TBA) uygulanarak şekil ve doku değişimleri daha düşük bir alt uzayda ifade edilir. TBA ile verilen bir şeklin ortalama şekilden olan farkını şekil öz vektörlerinin doğrusal birleşimi olarak ifade etmek ve denklem (2)'de gösterildiği gibi ortalama şekile, şekil öz vektörlerinin belirli bir doğrusal birleşimini ekleyerek yeni bir şekil sentezlemekte mümkündür. Benzer şekilde doku vektöründe sentezlenebilmektedir.

$$\begin{aligned} x &= \bar{x} + \Phi_s b_s \\ g &= \bar{g} + \Phi_g b_g \end{aligned} \quad (2)$$

İfadede yer alan \bar{x} ve \bar{g} sırasıyla tüm şekil ve doku vektörlerinin ortalamasını ifade etmektedir. Φ_s ise en büyük değere sahip t adet şekil öz de-

ğerlerine karşılık gelen özvektörleri tutan matristir. b_s ise t boyutlu şekil parametre vektörüne karşılık gelmektedir. Denklem (2)'de gösterildiği gibi b_s 'teki değişim doğrudan şekilde değişime neden olmaktadır. Φ_g ise en büyük değere sahip doku öz değerlerine karşılık gelen doku özvektörleri tutan matristir. b_g ise gri seviye değişimlerini tutan parametre vektörüne karşılık gelmektedir. Şekil ve doku model parametreleri arasında var olan ilintisi ortadan kaldırmak için b_s ve b_g model parametre vektörleri W_s köşegen matrisi ile ağırlıklandırılarak

$$b = (w_s b_s \quad b_g)^T \quad (3)$$

biçiminde ard arda eklenir ve b ile gösterilen tek bir vektör haline getirilir. W_s ağırlık matrisinin köşegenleri, şekil özdeğerlerinin toplamının, doku özdeğerlerinin toplamına oranı olarak ifade edilmiş ve bu oranlar köşegen değerleri olarak kullanılmaktadır. Oluşturulan bu vektörlere üçüncü bir TBA uygulanır. Böylelikle her iki model parametrelerinin birleşimine kıyasla çok daha derli toplu ve etkili bir gösterim elde edilmiş olacaktır.

$$b = \Phi_c c \quad (4)$$

Denklem (4)'te b_s ve b_g 'nin ardı ardına eklenmesi ile oluşturulan b vektörlerine TBA uygulanması sonucu elde edilen birleşik modele ait c parametrelerinin nasıl hesaplandığı gösterilmektedir. Denklem (3)'ü daha açık olarak

$$b = \begin{pmatrix} W_s \Phi_s^T (x - \bar{x}) \\ \Phi_g^T (g - \bar{g}) \end{pmatrix} \quad (5)$$

biçiminde yeniden yazabiliriz. Son olarak denklem (5) yardımı ile şekil vektörünün birleşik model parametresi, yani görünüm parametresi olan c 'ye göre nasıl sentezleneceğini denklem (6)'da gösterildiği gibi ifade etmek mümkündür.

$$\begin{aligned} x &= \bar{x} + \Phi_s W_s^{-1} \Phi_{c,s} c \\ g &= \bar{g} + \Phi_g \Phi_{c,g} c \end{aligned} \quad (6)$$

Denklem (6)'daki $\Phi_{c,s}$ birleşik modelin özvektörlerinin şekil ile ilgili olan ilk bölümünü gösterirken, $\Phi_{c,g}$ ise doku modeli ile ilgili diğer parçasını ifade etmektedir. Denklem (6)'daki ifadeden görüleceği gibi c görünüm parametresi değiştirildiğinde hem şekil hem de doku aynı anda değişmektedir.

Aydınlatma normalizasyonu

Bu çalışmada giriş görüntüsünden referans şekile eğilen yüz, aydınlatma değişimlerini ortadan kaldıran normalizasyon yöntemleriyle onarıldıktan sonra, AGM tarafından sentezlenen yüz görüntüsü ile arasındaki fark hesabı yapılmaktadır. AGM algoritmasına eklediğimiz yeni bir modül yardımı ile hata hesabı yapılmadan önce aydınlatma normalizasyonu yapıldığı için AGM daha gürbüz bir hale getirilmiş olmaktadır. Şekil 1'de önerdiğimiz yöntemin genel yapısı gösterilmektedir.

Çalışmamızda aydınlatma normalizasyonu için literatürde öne çıkan güncel algoritmalarından oran görüntüsü (RI) olarak bilinen ve ilk olarak Shashua ve arkadaşları (2001) tarafından ışıktan bağımsız yöntemler için önerilmiş olan ve Liu ve arkadaşları (2005) tarafından ise yüz için özelleştirilen normalizasyon yönteminin AGM en iyileme/arama üzerine etkileri analiz edilmiştir. RI yöntemi, giriş yüz görüntüsünün Gauss süzgeçler kullanılarak bulanıklaştırılmış halinin referans (ortalama) yüz görüntüsüne oranını kullanarak belirli bir çevrim ile yüzdeki ışık değişimini referans görüntüye yakın hale getirmeye çalışan bir normalizasyon yöntemidir. RI yöntemi kullanılarak farklı şekilde aydınlatılmış yüz görüntüleri onarılabilmektedir.

RI yönteminden başka histogram temelli aydınlatma normalizasyonu yöntemleri de çalışmamız kapsamında incelenmiştir. Düşük karışıklığa sahip görüntülerdeki benek değerlerinin histogram dağılımları histogram eşitleme yöntemleriyle uniform hale getirilerek görüntüde iyileşme elde edilebilmektedir. Fakat bir örnek histogram dağılımı tam olarak her zaman elde edilemediğinden global histogram eşitleme (GHE) benzeri yöntemler giriş görüntüsünden çok daha kötü sonuçlar üretebilmektedir. Bu yüzden çalışmamızda Jebara (1996)'nın önerdiği yonteme benzer, histogram uydurma yönteminin (HU) yüz için özelleşmiş hali üzerinde durulmuştur. HU yöntemi aynı zamanda Histogram Özelleştirme (histogram specification) olarak adlandırılan ve literatürde sıklıkla kullanılan yöntemdir.



Şekil 2. HU yöntemi kullanılarak yüzün normalize edilmesi: Üst) Giriş görüntüleri, Alt) HU normalizasyon sonuçları



Şekil 3. Aşırı aydınlatma koşullarında normalizasyon sonuçları: Üst) Giriş görüntüleri, Alt) Normalizasyon sonuçları

Deneysel çalışmalarımızda farklı aydınlatma koşullarında yüz görüntüsünün özellikle sağ ve sol iki yarısına ait gri seviye değerlerinde farklılaşmalar olduğu görülmüştür. Bu nedenle analizlerimizde yüz dikey simetri ekseninden iki eşit pencereye

ayrılmış ve bu iki yüz bölgesinin histogram dağılımları referans yüz olarak kullanılan eğitim kümesine ait ortamala yüzün dağılımına benzetilmeye çalışılmıştır. Işık kaynağının konumuna bağlı olarak, yüzün sağ ve sol tarafında oluşan gri seviye farklılıklarını (gölge, parlak bölgeler vb.) onarmak için yüz sağ pencere (*sagP*) ve sol pencere (*solP*) olmak üzere simetri ekseninden iki bölgeye ayrılmış ve *sagP* ve *solP* bölgelerine *HU* ayrı ayrı uygulanmıştır.

Öncelikle $H_{solP}(i)$ ve $H_{sagP}(i)$ histogramları ve bunların dönüşüm fonksiyonları olan $f_{H_{solP} \rightarrow G}$ ve $f_{H_{sagP} \rightarrow G}$ hesaplanır. $G(i)$ eğitim kümesinden elde edilen ortalama yüze ait histogramdır. Burada kullanılan referans yüz *AGM* model kurulumunda kullanılan ortamala yüzdür. Pencere arası yumuşak geçişin sağlanabilmesi denklem (7)'de gösterilen $f_{H_{toplam} \rightarrow G}$ dönüşüm fonksiyonu kullanılmıştır.

$$f_{H_{toplam} \rightarrow G}(i) = solluk \times f_{H_{solP} \rightarrow G}(i) + (1 - solluk) \times f_{H_{sagP} \rightarrow G}(i) \quad (7)$$

Denklem (7)'deki *solluk* parametresi 1 ile 0 arasında değerler alabilmektedir. Bunun anlamı $f_{H_{toplam} \rightarrow G}$ dönüşüm fonksiyonu elde edilirken sağ *P* ile *solP* üzerinde hareket edilmesidir. Eğer yüzün ilgili beneği *solP* bölgesinin içlerinde kalıyorsa *solluk* parametresinin değeri 1'e çok yakın olacak ve $f_{H_{toplam} \rightarrow G}$ dönüşüm fonksiyonun eldesinde $f_{H_{solP} \rightarrow G}$ daha etkin olacaktır. *HU* yöntemi ve yukarıda bahsettiğimiz yumuşak geçiş dönüşümü kullanılarak elde edilen onarım sonucu Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir. Görüntüye bir bütün olarak normalizasyon uygulamak yerine, sağ ve sol iki pencereye *HU* yöntemi uygulanmış olmasına rağmen herhangi bir bozucu etki oluşmamasının nedeni yukarıda bahsedilen yumuşak geçiş dönüşümü kullanılmış olmasıdır. Şekil 2 ve Şekil 3'teki sonuçlar dikkatle incelendiğinde önerilen normalizasyon yönteminin *AGM* arama/en iyileme mekanizması için oldukça uygun sonuçlar ürettiği görülecektir. Klasik *AGM*, Şekil 3'ün ilk satırında verilen tüm giriş görüntülerde hatalı noktalara yakınsayacaktır. Bir sonraki bölümde *AGM*'nin önerilen normalizasyon yöntemleriyle birlikte kulla-

nılması sonucu oluşturulan gürbüz *AGM* yapısı ile doğru noktalara yakınsadığı *pt.-pt.* anlamında gösterilecektir. Şekil 3'te giriş olarak verilen görüntüler *Yale B* (Georghiades vd. 2001) yüz veri kümesinden aydınlatma koşullarına göre oluşturulan dört adet kümeden alınmıştır. Üst soldaki görüntüler *Küme 4*'ten, sağ üstteki görüntüler ise *Küme 3*'ten alınan aşırı aydınlatma koşullarına ait görüntülerdir. Çalışmamızın deneysel sonuçlarında bu küme üzerinde normalizasyon yöntemlerinin ve önerilen *AGM* yapısının başarımı karşılaştırmalı olarak gösterilecektir.



(a) (b) (c)

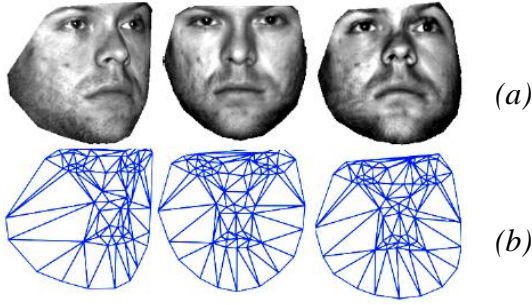
Şekil 4. Klasik *AGM* kullanılarak yüz hizalama: a) Eğitim kümesindeki benzer aydınlatma koşulundaki hizalama, b) Farklı aydınlatma koşulu, b) Farklı poz

İki boyutlu yüz görüntülerinden poz sentezleme

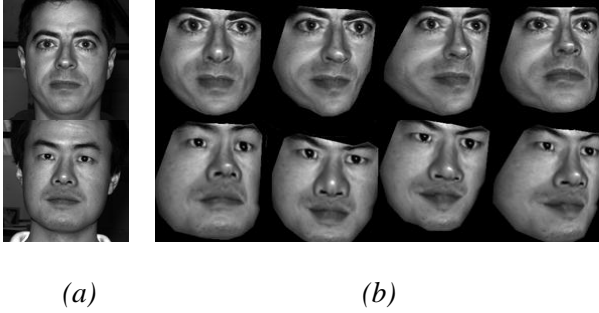
Şekil 4.a'da eğitim kümesindeki benzer aydınlatma ve poza sahip yüz için, Şekil 4.b'de ise farklı ışıklandırma koşullarında çekilmiş yüz için, Şekil 4.c'de ise farklı poza sahip yüz için *AGM* yakınsama sonucu gösterilmektedir. Şekil 4'deki sonuçlardan da görülebileceği gibi eğitim kümesinden farklı görüntüler için klasik *AGM* hatalı noktalara yakınsamaktadır.

AGM ile yüz modellenirken diğer ilgin değişimlerin kurulacak modele etkisini ortadan kaldırabilmek için yüz öncelikle referans bir şekile (*shape*) eğilir. Bu sayede ölçek, konum ve dönmeden kaynaklanan tüm değişimler en aza indirgenebilmektedir. Dikkat edilirse klasik *AGM* yapısında normalize edilmeye çalışılan değişimler ölçek, konum ve düzlem içi dönmedir. Aydınlatma değişimi ve düzlem dışı dönme sonucu oluşan poz değişimi klasik *AGM*'de dikkate alınmamaktadır. Aynı poz değişimi yaklaşık olarak her bireyin yüz görünümünde benzer bir değişikliğe sebep olur. Farklı pozlarda yüz şekil ve doku bilgisinin nasıl

değiştirdiği Şekil 5.a ve Şekil 5.b'de gösterilmektedir. Dikkat edilirse üç farklı poz için en büyük değişim, yüz şekil bilgisini oluşturan tel-örgü üçgenlerinde ortaya çıkmaktadır. Her üç pozda, yüz üzerindeki önemli noktaların sayısı sabit olduğu için, tel-örgü üçgenlerinin sayısı eşittir. Pozdaki değişimle üçgenler sadece ölçek, yer ve şekil değiştirmektedir.



Şekil 5. Farklı pozlar için şekil ve doku değişimi: a) Yüz dokusu, b) Yüz önemli noktaları üzerine çizilen üçgenler



Şekil 6. Poz sentezleme: a) Giriş görüntüsü, b) Sentezlenen farklı bakış açılara sahip yüzler

Her pozdaki doku bilgisi alınıp tam karşıdan bakan referans yüzde yeniden kurulursa yaklaşık olarak tam karşıdan bakan bir yüz görüntüsü oluştuğu görülecektir. Bunun tek istisnası; poz değişiminde yüzün kendini örtme (self-occlusion) durumudur. Bu durum $\pm 45^\circ$ 'lik poz açısında ihmal edilebilir bir düzeyde ortaya çıkmaktadır. Poz değişimleri bağıl (relative) olarak hesaplanarak farklı bireylere ait tam karşıdan çekilmiş yüz şekil bilgisi, poz bağıl değişimine göre deforme edildiğinde, o kişinin farklı pozları sentezlenebilir. Yani iki boyutlu bir yüz görüntüsü üzerinde şekil deformasyonu yapılarak Şekil 6'da gösterildiği gibi, gerçeğe uygun farklı pozlar elde edilebilir.

Poz normalizasyonu ve poz sentezleme

Yüz poz sentezi yöntemleri incelendiğinde genellikle $3B$ bilgisine ihtiyaç duyulduğu görülecektir. Oysaki kameraya göre ± 45 dereceden az düzlem içi ve düzlem dışı dönmüş yüz pozlarının sentezlenmesinde $3B$ bilgisi kullanmaksızın, sadece basit doğrusal bükme ve yüz şekil bilgisini oluşturan noktaların uyarlanır olarak bozulması ile farklı poza sahip yüzler belirli bir yakınsama ile sentezlenebilir. Yüz belirli bir açıyla sağa/sola veya yukarı/aşağı baktığında, yüz şeklinden bağımsız olarak yüzü oluşturan doku üçgenleri yaklaşık olarak aynı açısal yolu alırlar. Bu ise yüzü oluşturan doku üçgenlerinin belirli bir kurala göre deforme olması, ölçek değiştirmesi ve/veya ötelenmesi anlamına gelir.

Yüzdeki önemli noktaların poz değişimi ile nasıl bir değişim gösterdiği, her bir noktanın hareket vektörleri çıkartılarak bulunabilir. Hareket vektörleri hesaplanırken aynı kişinin yüz şekil ölçeği dikkate alınarak, bağıl hareket miktarı hesaplanmaktadır. Bu sayede yeni bir kişiye ait çok farklı bir yüz şekil verildiğinde, hesaplanan bağıl hareket miktarları kullanılarak, o yüz için poz sentezi yapılabilmektedir. S_i^0 , i . kişinin tam karşıdan çekilen yüz imgesinde işaretlenmiş, K adet önemli noktadan oluşan şekil vektörü olsun ve $S_i^0 = ((x_{i,1}, y_{i,1}), \dots, (x_{i,K}, y_{i,K})) \in R^{2K}$ şeklinde ifade edilsin. Çalışmamızda K 73, N ise 4920 olarak belirlenmiştir. Her bireye ait S^0 şekil vektöründen her poz için ayrı ayrı hesaplanmış olan şekil oran vektörüyle ağırlıklandırılarak p farklı poza ait S_i^p şekilleri sentezlenir. Aynı kişinin tam karşıdan ve p pozundaki iki görüntüsüne ait şekil vektörleri arasında tanımladığımız şekil oran vektörü,

$$r_p(S^p, S^0) = \left(\left(\frac{x_{p,1}}{x_{0,1}}, \frac{y_{p,1}}{y_{0,1}} \right), \dots, \left(\frac{x_{p,K}}{x_{0,K}}, \frac{y_{p,K}}{y_{0,K}} \right) \right) \quad (7)$$

biçiminde ifade edilir. Şekil-oran vektörü kullanılarak, j . kişinin tam karşıdan çekilmiş görüntüsüne ait şekil vektöründen, kişinin görülmemiş p . pozuna ait şekil vektörü $\hat{S}_j^p = r_p S_j^0$ biçiminde

yaklaş ık olarak bulunabilir. *AGM* şek il altuzayı tam karşı dan bakan ve sentetik olarak elde edilen pozlar, p adet farklı bakış açısına sahip şek il vektörü $\{S_i^0, (\hat{S}_i^{p_k}; k=1, 2, \dots, p)\}$ ile temel bileş en analizi kullanarak, $S = \bar{S} + \Phi_s \cdot s$ şek linde elde edilir.



Ş ekil. 7. Tam karşı dan bakan yüzler ve o yüz lere ait sentetik pozlardan kurulan yüz uzayındaki ilk beş temel bileş ene ait katsayıların rastgele de ğ iştirilmesi ile sentezlenen yüz ler

Burada Φ_s kovaryans matrisinin en yüksek de ğ erli k adet özde ğ erine karş ılık gelen k adet öz vektördür. E ğ itim kümesindeki tüm yüzlerin şek illeri ve sentetik olarak elde edilen p adet sentetik şek il, ortalama şek le deforme edildikten sonra, şek illere karş ılık gelen dokulardan doku alt uzayı $T = \bar{T} + \Phi_t \cdot t$ şek linde oluşturulur.

AGM sentetik pozlarında e ğ itim kümesine eklenmesiyle daha güçlü şek i alt uzayına sahip olmuş olur. Ş ekil 7’de *Yale B* veri kümesinde yer alan 10 kişinin sadece tam karşı dan çekilmiş görüntülerine sentetik pozlarında eklenmesi ile zenginleştirilmiş *AGM*’den geri çatılan yüzler sergilenmektedir. Bunlar yüz modeline ait görünüm parametrelerinin ilgili temel bileş enine karş ılık gelen öz de ğ er λ_i ’nin, ± 3 aralığında rastgele de ğ iştirilmesi ile geri çatılmış yüzlerdir. Dikkat edilirse kurulan modelle çok farklı poz ve kimlikteki yüzlerin geri çatılabildi ğ i görülmektedir. Kurulan model ile çok farklı poz ve kimlikteki yüzlerin geri çatılabildi ğ i görülmektedir. E ğ itim kümemizde sadece tam

karşı dan bakan hali olan yüzlerin bile belirli bir yakınsamayla farklı pozlarının bulunabilmesi ö ne-rilen yöntemin genelleme başarımını göstermesi açısından önemlidir.

Deneysel sonuçlar ve tartışma

Aktif Görünüm Modeli şek il ve doku de ğ iş imlerini tek bir modelde birleştirmektedir.

AGM hizalama algoritması (*AGM* arama algoritması olarakta isimlendirilir) aslında bir çeş it en iyileme algoritmasıdır. En iyileme kriteri olarak *AGM* tarafından sentezlenen yüz görüntüsü ile test görüntüsünde kullanılan yüz şek line e ğ ilen yüz arasındaki fark kullanılmaktadır. Aydınlatma probleminden kaynaklanan bu fark hatası oldukça fazla oldu ğ u için klasik *AGM* yöntemleri yanlış sonuçlar üretmektedir. Ö nerdi ğ imiz yöntemde, test görüntüsünden referans şek ile e ğ ilen yüz, yüz için özelleş miş normalizasyon yöntemleriyle onarıldıktan sonra, *AGM* tarafından sentezlenen yüz görüntüsü ile arasındaki fark hesabı yapılmaktadır. Bu sayede klasik *AGM*’de ışık de ğ iş imlerinden kaynaklanan büyük fark (en-iyileme kriteri olan hata), ö nerdi ğ imiz yöntemde *AGM* arama iş leminde ortadan kaldırılmış olmaktadır. *AGM* algoritmasına ekledi ğ imiz yeni bir modül yardımı ile hata hesabı yapılmadan önce aydınlatma normalizasyonu yapıldı ğ ı için *AGM* test görüntülerindeki ışık de ğ iş iminden etkilenmeyen daha gürbüz bir hale getirilmiş olmaktadır. Ö nerdi ğ imiz yöntem *Yale B* yüz veri kümesi üzerinde test edilmiştir. Bu veri kümesindeki her bir birey için 64 farklı aydınlatma koşulunda çekilmiş görüntü bulunmaktadır. Veri kümesi K_1 , K_2 , K_3 ve K_4 olarak isimlendirilen dört parçaya ayrılmıştır. K_1 kümesinde ışık kayna ğ ının yüze ± 20 derece ile geldi ğ i yüzler bulunmaktadır. K_2 kümesinde ışık kayna ğ ının yüze ± 20 ile ± 50 derece arasında konumlandı ğ ı aydınlatma koşuluna sahip yüzler bulunmaktadır. K_3 kümesinde ışık kayna ğ ının yüze ± 50 ile ± 70 derece arasındaki yüzler K_4 ’te ise ± 70 dereceden daha büyük açılarla konumlanmış ışık kaynaklarıyla aydınlatılmış yüz görüntüleri yer almaktadır. Bu çalış ma kapsamında 4920 adet yüz görüntüsünün her biri için 73 adet şek il noktası el yordamı ile iş aretlenmiştir. 73 adet yüze ait önemli noktanın yüz bileş enlerine göre da ğ ılımı ş u şek

kildedir: 16 nokta ağız, 12 nokta burun, 9 nokta sağ göz, 9 nokta sol göz, 8 nokta sol kaş, 8 nokta sağ kaş ve 11 nokta çene yayı. Deneysel çalışmalarımızda Stegmann ve diğerlerinin (2003) önerdiği AGM yapısının değiştirilmiş hali test amaçlı kullanılmıştır. İlk önce eğitim kümesinde yer alan her kişinin ideal olarak aydınlatılmış sadece bir adet imge ve bu imgeye karşılık gelen yüze ait önemli noktaları kullanılarak modelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle eğitim kümesinde yer alan yüz görüntülerinin %95 şekil değişimini (shape variation) kapsayacak şekil modeli oluşturulmuştur. Eğitim kümesinde yer alan tüm görüntülere ait doku bilgisi ortalama şekile, üçgenleme (triangulation) yöntemi ile eğilir. Hizalanmış ve ortalama yüze eğilmiş yüz görüntüleri yaklaşık 32.533 benekten oluşmaktadır. Normalize edilmiş bu yüz dokularındaki %95'lik değişim 21 boyutlu doku uzayı ile modellenmiştir. Şekil uzayı ise 12 boyutlu bir uzay yardımı ile yine şekildeki toplam değişimin %95'i kapsayacak şekilde modellenmiştir. En son olarak doku ve şekil değişimini birlikte modelleyen görünüm modeli 15 boyutlu bir uzayla ifade edilmiştir. Şekil 8'de ise klasik AGM ve önerilen yöntemin en-iyileme aşamaları gösterilmiştir.



(a) (b) (c) (d)

Şekil 8. Klasik (üst satır) ve Önerilen (alt satır) AGM için test görüntüsü için en-iyileme çevrimleri: a) Giriş ve ilk-klendirme, b)1. çevrim, c) 3. çevrim, d) 6. çevrim.

Veri kümesinde yer alan tüm yüzlere ait şekil önemli noktaları işaretlendikten sonra hizalama başarımı, $D(x_{gt}, x)$ gibi bir uzaklık ölçütü ile he-

saplanabilir. İfadede yer alan x_{gt} gerçek şekil noktalarını, x ise hizalama yönteminin yakınsadığı şekil noktalarını ifade etmektedir. Deneysel çalışmalarımızda, şekil noktaları üzerinden hizalama hatalarını uzaklık cinsinden veren iki farklı ölçüt tanımlanmıştır. Bunlardan birincisi,

$$D_{pt.pt.} = \sum \sqrt{(x_i - x_{gt,i})^2 + (y_i - y_{gt,i})^2} \quad (8)$$

şeklinde ifade edilen, noktadan noktaya hatayı öklit uzaklık cinsinden veren $pt.-pt.$ ölçütüdür. Diğeri ise yakınsanan şekil üzerindeki noktadan, $r(t) = (r_x(t), r_y(t)), t \in [0,1]$ şeklinde ifade edilen eğrinin çevritine olan en yakın noktaya olan uzaklığı ölçen ve

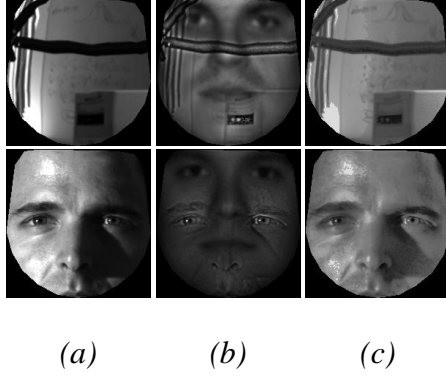
$$D_{pt-crv} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \min_t \sqrt{(x_i - r_x)^2 + (y_i - r_y)^2} \quad (9)$$

biçiminde ifade edilen, $pt.-crv.$ uzaklık ölçütüdür.

AGM arama işleminin ilklendirmeye karşı çok hassas olduğu bilinmektedir. Eğer uygun bir şekilde ilklendirme yapıldıysa, AGM doğru noktalara yakınsamakta aksi durumlarda ise yerel minimumlara takıldığı için hatalı yerlere yakınsayabilmektedir. Deneysel çalışmalarda önerilen yöntemin kötü ilklendirmeler karşısındaki başarımını ölçmek amacıyla el yordamı ile işaretlenmiş yüz şekil noktaları sistematik olarak bozulmuştur. Orijinal şekil noktaları ± 5 derece dönme, 0.85 ile 1.15 arasında ölçek değişimleri uygulanmış ve şekil ağırlık merkezleri x ve y eksenlerinde %10 oranında sistematik olarak yer değiştirilmiş ve oluşan şekil noktaları model ilklendirmesi olarak kullanılmıştır. Tablo 1'de tüm ilklendirmeler için ortalama $pt.-pt.$ ve $pt.-crv.$ hatalar sergilenmektedir. Tablo 1 ve Tablo 2'de görülebileceği gibi önerdiğimiz aydınlatma normalizasyonu ile bütünleştirilmiş AGM'nin ortalama hizalama hatası klasik AGM'ye göre oldukça düşüktür.

Deneysel çalışmalarda RI yönteminin AGM arama aşaması için uygun olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni kötü ilklendirmelerde RI yöntemi, yüz olmayan bölgeler için ortalama yüze ait verileri

normalizasyon sonucuna yansıtması ve Şekil 9’da gösterildiği gibi, yüz olmayan homojen bölgelere sentetik olarak ortalama yüze ait bilgileri ekliyor olmasıdır. Bu *AGM* arama algoritmasında parametre güncelleme miktarının hesaplanmasında kullanılan sentezlenen görüntü ile giriş görüntüsü arasındaki farkı doğrudan etkileyen bir durumdur.



Şekil 9. *AGM* arama aşamasında *RI* ve *HU* yöntemlerinin ürettiği onarım sonuçları: a) Giriş görüntüsü, b) *RI* sonucu, c) *HU* sonucu

Tablo 1. Klasik *AGM* hizalama sonuçları.

	Yüz Veri Kümeleri			
	K_1	K_2	K_3	K_4
Pt.-pt.	4.9±0.2	11.4±0.5	19.4±0.58	36.6±1.6
Pt.-crv.	2.9±0.1	6.8±0.33	12.9±0.36	33.2±1.4

Tablo 2. Önerilen *AGM* hizalama sonuçları.

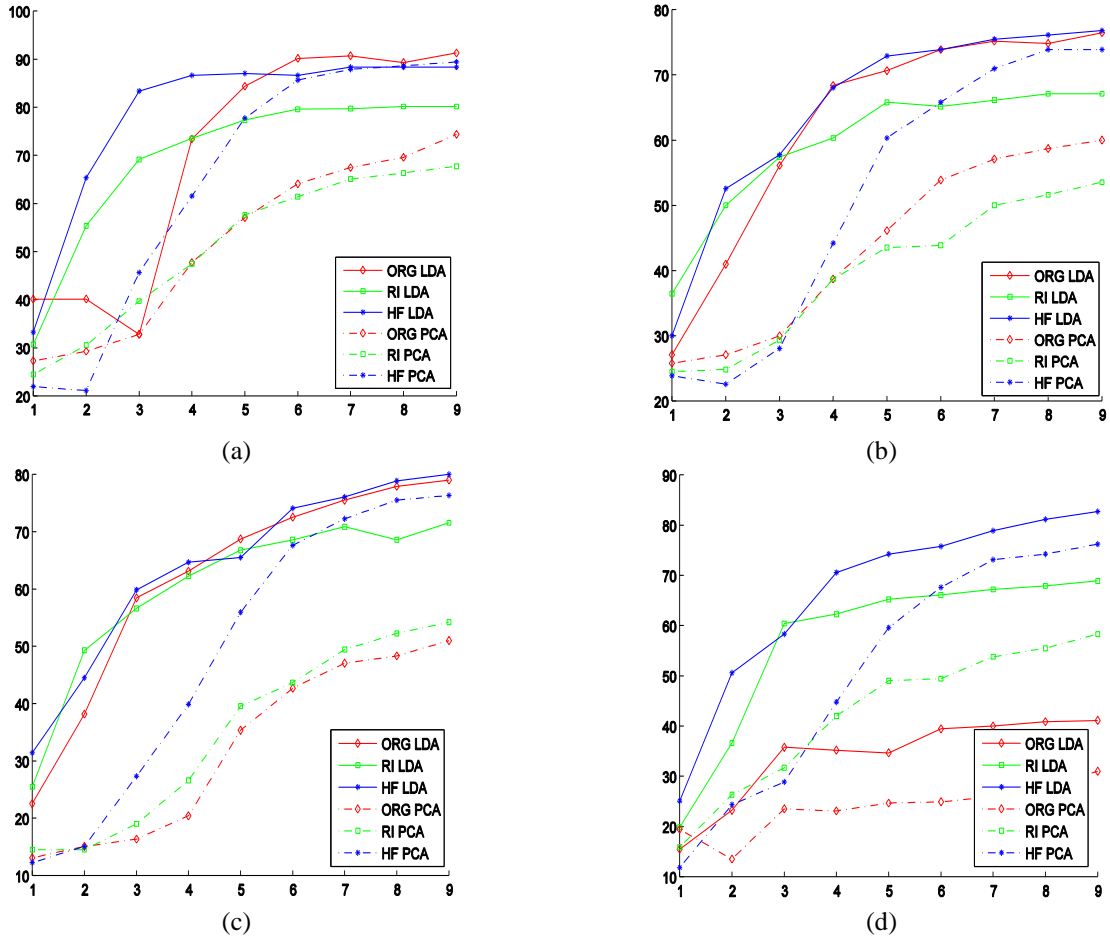
	Yüz Veri Kümeleri			
	K_1	K_2	K_3	K_4
Pt.-pt.	4.1±0.12	8.06±0.3	13.03±0.4	21.3±0.5
Pt.-crv.	2.4±0.08	5.24±0.23	8.76±0.3	14.7±0.4

Yüz olmayan bölgelerde çok yüksek hata beklerken *RI* benzeri yöntemlerde hata daha düşük çıkabilmektedir. Histogram temelli yöntemler ise sadece var olan benek değerlerinin dağılımını değiştirdiği için yüz *AGM* arama algoritması ile daha uyumlu çalışabilmektedir. *RI* yöntemi, tüm yüzlerin tam olarak hizalanmış olduğu varsayımına göre çalışmaktadır bu ise *AGM*’de geçersiz bir varsayımdır çünkü amacımız arama işleminden sonra hizalanmış yüz görüntüsünü elde etmektir.

Deneysel çalışmalarımızda farklı öznelik uzaylarının ve önışleme yöntemlerinin yüz tanıma sis-

temlerinde tanıma başarımı üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmiş ve yapılan çalışmaların sonuçları ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu çalışmanın ana katkısı; yüz modeli kurulurken, eğitim kümesindeki yüz şekilleri kullanılarak, şekil verilerinin sentetik olarak zenginleştirilmesi ve bu sentetik şekillerden sentetik yüzler oluşturularak poz değişimlerini de içeren gürbüz bir model oluşturulması ve klasik *AGM* ile yüz bölütlemeye, özgün yüz aydınlatma normalizasyonunu *AGM* bükme işleminden hemen sonra ve her çevrimde yaparak, ışık değişimlerine karşı bağışık yaklaşım sunmasıdır. Deneylerde *Yale B* veri kümesindeki tüm farklı bireylerin (10 kişi) yüz görüntüleri kullanılmıştır. Her kişinin 20 farklı yönden aydınlatılmış yüz görüntüsünün önemli noktaları el yordamı ile işaretlenmiştir. Her bireyin tam karşıdan aydınlatılmış ve tam karşıya bakan pozu yüz modeli oluşturulurken eğitim amaçlı kullanılmıştır. Geriye kalan tüm farklı aydınlatılmış yüzlerle ise aydınlatma test kümesi oluşturulmuştur. Tablo 1 ve 2’de bu test kümeleri için hizalama sonuçları gösterilmiştir. Şekil 11 ve Şekil 12’de ise önerilen yöntemin eğitim kümesinde yer alamayan yüzler için hizalama sonuçları gösterilmiştir. Ayrıca önerilen yöntemin yüz tanıma başarımını nasıl etkilediği incelenmiştir ve test amaçlı *TBA* (*PCA*), *DAA* (*LDA*) öznelik uzayları kullanılmıştır. Eğitim kümesi K_1 veri kümesinden rasgele seçilen 25 yüz imgesinden oluşturulmuştur. K_1 , K_2 , K_3 ve K_4 şeklinde dört kümeye ayrılan imge veri tabanında her kümede, kişilerin toplam 8 farklı pozu yer almaktadır. K_1 ’den geriye kalan tüm görüntüler test amacıyla kullanılmıştır. *TBA* ve *DAA* öznelik uzaylarının tümünün yüzdeki hatalı hizalamaya karşı çok duyarlı olduğu bilinmektedir. Tanıma başarımı, özgün giriş görüntüleri kullanıldığında tüm öznelik uzayları için oldukça düşük sonuç vermiştir. *AGM* ile birlikte normalizasyon amaçlı *HU* yöntemi kullanıldığında, yüz tanıma başarımı tüm kümelerde ve tüm öznelik uzaylarında daha iyi sonuç vermiştir. Şekil 10’da dört farklı öznelik uzayı için özgün imgelerin, oran-görüntüsü yönteminin ve histogram uydurma yönteminin kullanılması durumları için ayrı ayrı tanıma başarımları, öznelik vektörünün boyutuna bağlı olarak verilmiştir.

DAA tanıma başarımı öznelik vektörünün boyu 9’a yaklaştıkça yükselmektedir. K_1 kümesindeki özgün görüntüler için *TBA* %74.36, *DAA* ise %



Şekil 10. TBA ve LDA öznelikleri için yüz tanıma başarıları: a) K_1 , b) K_2 , c) K_3 , d) K_4 veri kümeleri için yüz tanıma başarımları

91.26 en yüksek başarıyı verirken K_4 veri kümesindeki özgün görüntüler için bu başarımlar sırasıyla %30.99 ile %41.13'e düşmektedir. Deneysel çalışmalarındaki en önemli gözlemlerden biri de AGM hizalama aşamasında ve hizamadan sonra elde edilen yüzlerde histogram uydurma normalizasyonu kullanıldığında yüz tanıma başarımlarının, özgün görüntü ve RI normalizasyonuna göre, tüm veri kümelerinde (K_1 - K_4) yüksek başarımlarını, düşük öznelilik boyutlarında bile benzer tanıma başarımları verebiliyor olmasıdır. DAA öznelilik vektörü boyutu 3 olarak alındığında özgün giriş görüntüleri ile %32.81, HU normalizasyonu için ise %83.38 başarımlar elde edilmektedir. En ilginç sonuçlar en zorlu aydınlatma koşullarına sahip yüzlerden oluşan K_4 veri kümesinde elde edilmiştir, şöyle ki; özgün görüntüler için DAA %41.13, TBA %30.99 verirken, HU kullanıldığında ise TBA %76.20, DAA ise %82.68 tanıma başarımları vermiştir. Bu sonuçların yüz sentezleme ve yüz

doğrultma yapmadan elde etmenin mümkün olmadığını bu noktada tekrar hatırlamakta fayda var çünkü veri kümesindeki her bireyin 8 farklı poz ve 64 farklı aydınlatmaya sahip yüzleri bulunmaktadır. Önerilen yöntem bu iki problemi bir arada çözebilmektedir.

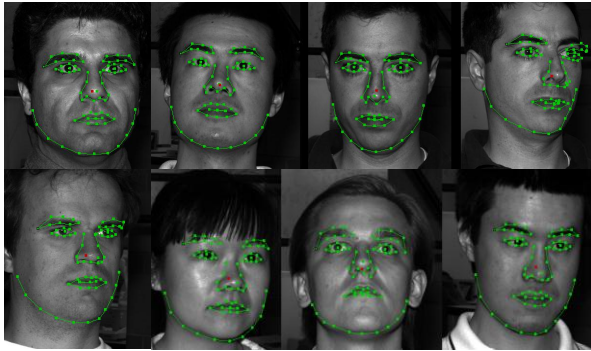
Sonuçlar ve gelecek çalışmalar

Bu çalışmada yüz hizalama için aydınlatma ve poz değişimlerine karşı gürbüz yeni bir yöntem tanıtılmıştır. Yöntem giriş olarak verilen farklı aydınlatılmış yüz görüntüsünü hem onarmaya hem de hizalamaya çalışmaktadır. Aydınlatma normalizasyonu modülü aktif görünüm modeli arama algoritmasının içine eklenmiştir. Önerilen yöntemin özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

- Önerilen yöntemin eğitimi için eğitim kümesindeki her birey için sadece bir adet önden çekilmiş görüntüsünün olması yeterlidir. Bu yöntemin gerçek problemlere uygulanmasını kolay-



Ş ekil 11. Farklı poz ve aydınlatmaya sahip yüzlerin hizalanma ve aydınlatma normalizasyonu: (üst satır) ilklendirmeler, (alt satır) önerilen yöntemin sonuçları



Ş ekil 12. Eğitim kümesinde yer almayan pozlar için önerilen yöntemin ürettiği hizalama sonuçları

laştıran bir özelliktir. Yöntemde, aynı bireyin birden farklı aydınlatma koşullarında çekilmiş görüntülerine ihtiyaç duyulmamaktadır.

- Önerilen yöntemde, ışık değişimlerine karşı bağımsız bir yapı oluşturulması için karmaşık aydınlatma modellerinin kurulması gerekmemektedir.
- Önerilen yöntemin en büyük kazanımlarından bir tanesi de basit normalizasyon yöntemleri kullanılarak yüksek başarımlar elde etmeye olanak vermesidir. AGM arama ve en-iyileme algoritmasında radikal değişiklikler yapmadan normalizasyon/onarma algoritmaları önerilen yöntemde AGM'ye uyarlanmıştır. Bu ise önerilen yöntemin uygulanabilirliğini arttırmaktadır. Bu iş için özelleşmiş başkaca normalizasyon algoritmaları ile çok daha iyi sonuç alınabileceği sunulan deneysel çalışmalardan görülmektedir.
- Önerilen yöntem hem *Yale-B* yüz veri kümesinde denenmiştir. Deneysel çalışmalarda elde edi-

len sonuçların kullanılan veri kümesinden bağımsız olduğu görülmüştür.

Deneysel çalışmalardan da görüleceği gibi, önerilen yöntemle klasik AGM'nin hizalama başarımı farklı aydınlatma koşulları söz konusu olduğunda bile oldukça yüksektir. Ayrıca tam karşıdan çekilmiş tek bir yüz görüntüsünden, o kişinin farklı pozlara sahip görüntülerini sentezleyen bir yöntem tanıtılmış ve sentetik olarak sentezlenen poz verileri ile AGM şekil uzayı güçlendirilerek poz değişimlerine karşı gürbüz bir yöntem önerilmiştir.

Kaynaklar

- Cootes, T. F., Taylor, C. J., Cooper, D. H. ve Graham, J., (1995). Active Shape Models-their training and application, *Computer Vision and Image Understanding*, **61**, 1, 38-59.
- Cootes, T. F., Edwards, G., ve Taylor, C. J., (2001). Active appearance models, *IEEE Transactions on PAMI*, **23**, 6, 681-685.
- Blanz, V. ve Vetter, T., (2003). Face Recognition Based on Fitting a 3D Morphable Model, *IEEE Transactions on PAMI*, **25**, 1063-1074.
- Cootes, T., Wheeler, G., Walker, K., ve Taylor, C., (2002). View based active appearance models, *Image and Vision Computing*, **20**, 657-664.
- Basri, R. ve Jacobs, D., (2001). Photometric Stereo with General, Unknown Lighting, *CVPR*, **2**, 374-381.
- Shashua, A. ve Riklin-Raviv, T., (2001). The Quotient Image: Class-Based Re-Rendering and Recognition With Varying Illuminations, *IEEE Transactions on PAMI*, **1**, 129-139.
- Jebara, T., (1996). 3D Pose Estimation and Normalization for Face Recognition, *Bitirme Tezi*, McGill Centre for Intelligent Machines, Quebec.
- Stegmann, M. B., Ersboll, B. K. ve Larsen, R., (2003). FAME - A Flexible Appearance Modeling Environment, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, **22**, 1319-1331.
- Wang, H., Li, Z. S., Wang, Y. ve Zhang, W., (2003). Illumination Modeling and Normalization for Face Recognition, *Int. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition*, 104-111.
- Liu, D. H., Lam, K. M. ve Shen, L. S., (2005). Illumination invariant face recognition, *Pattern Recognition*, **38**, 10, 1705-1716.
- Georghiadis, A. S., Belhumeur, P. N. ve Kriegman, D. J., (2001). From Few to Many: Illumination Cone Models for Face Recognition under Variable Lighting and Pose, *IEEE Transactions on PAMI*, **23**, 6, 643-660.