



PhD Research Article / Doktora Çalışması Araştırma Makalesi
SMART FACIAL FEATURE REGIONS AND FACIAL FEATURE POINTS

Gülsüm Çiğdem ÇAVDAROĞLU*

Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL

Received/Geliş: 21.02.2013 Accepted/Kabul: 13.05.2013

ABSTRACT

It is required to detect facial points automatically in order to make sentiment analysis, age analysis, gender identification, obtain three-dimensional virtual face model through two or more face images, develop augmented reality applications such as virtual makeup. In the present study, an integrated algorithm and a software were developed to find position of human faces, facial feature regions and facial feature points using standardized images. Images can be taken from different angles and positions. The data used for testing purposes is obtained from a facial database that contains human face images with 1600x1200 resolution taken by Inspec Mega Capturor II 3D (optical 3D digitizer) structured - light 3D digitizer device. Some cases were excluded from the scope of this work such as glasses, beard and mustache, different skin colors, different emotions, facial expressions. These objects cover some parts of face and require preprocess operations. In the present study, color analysis methods and Haar classification methods are integrated. In testing stage 35 different human face images contain 11 men and 24 women, with resolution 1600x1200 pixels. 100% capture face accuracy is obtained as a result of the tests. Mean square error is calculated as 2.04086 pixels. Using smart feature regions and feature points, 3D face point cloud was produced and stereo face images are matched easily.

Keywords: Interest regions, interest points, facial feature points, face detection, image processing, image matching.

AKILLI YÜZ İLİNTİ BÖLGELERİ VE NOKTALARI

ÖZET

İnsan yüzü görüntülerini kullanarak duygu analizi, yaş analizi, cinsiyet belirleme, yüz tanıma gibi işlemlerin yapılabilmesi, iki ya da daha fazla sayıda görüntüden otomatik olarak üç boyutlu yüz modelinin elde edilebilmesi, sanal makyaj gibi artırılmış gerçeklik uygulamaları geliştirilebilmesi için öncelikle yüz ilinti noktalarının otomatik olarak bulunması gereklidir. Sunulan çalışmada, standartlaştırılmış koşullar altında, farklı açılardan alınmış insan yüzü görüntülerinde yüzü konumlandıran, ilinti bölgelerini ve noktalarını bularak analiz eden tümleşik bir algoritma ve yazılım geliştirilmiştir. Test amaçlı olarak kullanılan veriler, Inspec Mega Capturor II 3D (optical 3D digitizer) yapısal – ışıklı 3B sayısallaştırıcı cihaz ile 1600x1200 çözünürlüğünde sabit 1000W'lık halojen lamba altında alınan yüz görüntülerinden oluşan bir yüz veritabanından elde edilmiştir. Yüzün belirli bölümlerinin gözlük gibi başka nesneler tarafından kapatılmış olması, ten rengi analizi sırasında ön işlem gerektirecek sakal, bıyık gibi unsurlar, farklı duygu durumları, jest ve mimikler içeren görüntüler çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır. Sunulan çalışmada, ten rengi analizi, Haar Bölgeleri Yöntemi'ne entegre edilmiştir. 11 erkek 24 kadın toplam 35 kişiye ait 1600x1200 piksel çözünürlüğüne sahip farklı insan yüzü görüntüsü üzerinde yapılan testler sonucunda yüz yakalamada %100 doğruluk elde edilmiştir; yüz ilinti noktası belirleme için hesaplanan ortalama karesel hata 2,04086 piksel olarak hesaplanmıştır. Akıllı ilinti bölgeleri ve noktalarının kullanımıyla eşlenik görüntülerin kolayca eşleştirilmesi ve yüze ait 3B nokta bulutunun üretilmesi sağlanmıştır.

Anahtar Sözcükler: İlinti bölgeleri, ilinti noktaları, yüz ilinti noktaları, yüz yakalama, görüntü işleme, görüntü eşleştirme.

* cavdarkizi@gmail.com, tel: (505) 678 95 81

1. GİRİŞ

İnsan gözüyle görüntülerde kolayca ayırt edilebilen insan yüzlerinin ve bu yüzlere ait duyu organlarının bilgisayar aracılığı ile otomatik olarak tanınması popüler bir araştırma konusudur [1, 2]. İnsan yüzü görüntülerinden yüz ilinti noktalarının (facial points) belirlenmesi, iki boyutlu yüz görüntülerinden üç boyutlu yüz modeli elde edilmesi, duyu belirleme (emotion detection) gibi uygulamalar günümüzde hala üzerinde çalışılan konulardır [3, 4, 5]. Yüz yakalama, tanıma, yüz ilinti bölgeleri ve noktalarını belirleme algoritmaları; yüz ifadesinde, mimiklerde, parlaklıkta, ışıktaki, alım açısı ve alım mesafesindeki değişiklikler gibi birçok etmenden etkilenir [6, 7]. Yüz yakalama işlemi ilk olarak, P. Viola ve M.Jones [30] tarafından geliştirilen ve anahtar özelliklerin kullanımına dayanan, oldukça hızlı sonuç verebilen anahtar özellik sınıflandırıcılar ile gerçekleştirilmiştir. İnsan yüzü üzerine yapılan çalışmalarda geliştirilen yöntemlerden bazıları birçok veri seti ile birlikte çalışabilme özelliğine sahip iken, bazıları veri setini sınırlandırarak daha doğru ve hızlı sonuç elde etmeyi ya da yüz içerisinde belirli noktaları bulmayı amaçlamaktadır [7]. Özellikle güvenlik amaçlı olarak kullanılan otomatik kimlik belirleme sistemlerinde kullanılan biyometrik yöntemlerde yüz ilinti noktalarının doğru bir şekilde konumlandırılması gerekmektedir [8].

Yüz ilinti noktalarının otomatik olarak bulunması konusunda yapılmış çalışmalarda geliştirilen teknikler, geometri ve simetri tabanlı teknikler, şablon tabanlı (template based) teknikler, renk ayırımına dayalı (color based) teknikler ve görünüm tabanlı (appearance based) teknikler olarak gruplandırılmaktadır [11]. Geometri ve simetri tabanlı tekniklerin en önemli dezavantajı, bu sistemlerin profilden alınmış pozlar için iyi bir çözüm üretememeleridir [9].

Renk ayırımına dayalı teknikte, ışık gibi etmenlerin neden olduğu parlaklık gibi durumlar nedeniyle veriler genellikle bir ön işlemeye tabi tutulur [10, 12, 13]. Bu amaçla önerilmiş yöntemlerden birisi, ten rengini YCbCr renk uzayında modellemektir [17, 67]. Şablon tabanlı teknikle, önce manuel olarak bir yüz ilinti noktaları haritası oluşturulur. Bu anlamda, yöntem tam otomatik bir yöntem değildir [12]. Görünüm tabanlı (appearance based) teknikler genellikle özel olarak ilinti noktalarının bulunmasını gerekli kılmayan, yüz tanıma gibi uygulamalarda kullanılırlar [10]. Bahsedilen tüm bu tekniklerin tek başına kullanılması birçok durumda yeterli olmadığı için daha doğru sonuçlar elde edilmesini amaçlayan çalışmalarda, bu tekniklerin bir arada kullanılmasıyla elde edilen hibrit teknikler de geliştirilmiştir [6, 19, 20, 21, 22, 23, 24].

Sunulan çalışmada, sabit konumda bulunan bir kamera ile farklı açılardan alınan insan yüzü görüntülerinde, ilinti bölgelerinin ve noktalarının bulunması ve geliştirilen tanımlayıcılar ile bu bölge ve noktaların tanımlanması, bu işlemler sonucunda elde edilecek akıllı ilinti noktalarıyla eşlenik yüz görüntülerinin otomatik olarak eşleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Yöntem, hem ön yüz pozlarında hem de profil pozlarında sorunsuz çalışabilecek biçimde tasarlanmıştır. Ayrıca yöntemin yüz yönü bulma yeteneği sayesinde her bir ilinti bölgesi ve noktasının yüz içerisinde bulunduğu bölgeyi, hangi duyu organına ait olduğunu, hangi yönde olduğu bilgisi üretilebilmektedir. Bu sayede ilinti bölgeleri ve noktaları, poz alım açısına göre daha doğru bir şekilde belirlenebilmektedir. Sunulan çalışma .Net Framework ortamında C++ ve C# programlama dilleri ile geliştirilmiştir. Temel grafik işlemleri için OpenCv grafik kütüphanesinden [38, 39, 40] ve temel görüntü işleme işlemleri için Aforge görüntü işleme kütüphanesinden [29] yararlanılmıştır.

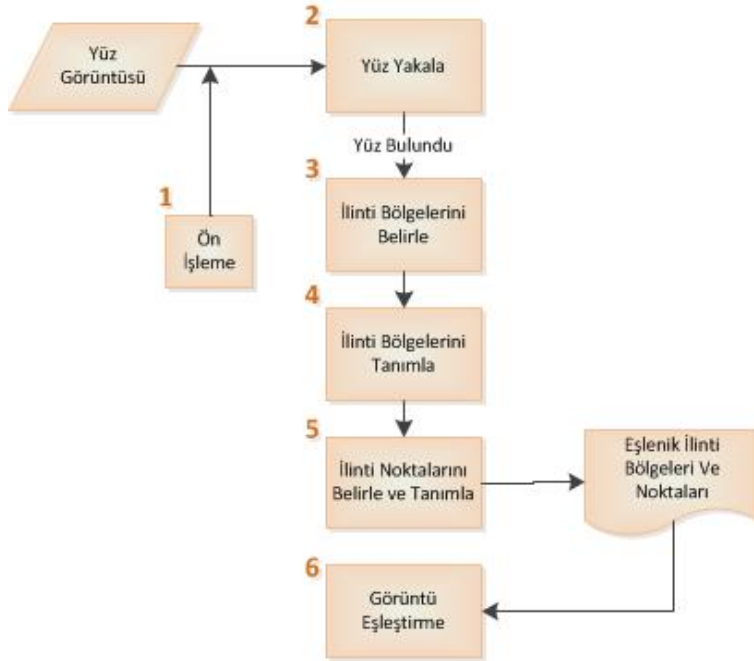
2. YÖNTEM VE MATERYAL

Yüz ilinti bölgesi ve noktası bulma amaçlı çalışmalarda genellikle sabit bir yüz veri tabanı kullanılmaktadır. Bu konuyla ilgili çok sayıda veri tabanı mevcuttur [6, 8, 25, 26, 37, 64]. Sunulan çalışma kapsamında Bosphorus veritabanı kullanılmıştır [27]. Bosphorus veritabanındaki veriler, Inspeck Mega Capturor II 3D yapısal – ışıklı 3B sayısallaştırıcı cihaz ile alınmış, x-y-z

eksenlerinde sırasıyla 0.3mm-0.3mm-0.4mm algılayıcı çözünürlüğüne sahip, 1600x1200 piksel çözünürlüğünde görünür alana ait renkli görüntülerdir. Homojen bir ışıklandırma elde edilebilmesi için 1000W'lık bir halojen lamba kullanılmıştır, bu lambadan kaynaklı speküler yansımaların etkilerinin azaltılabilmesi için örneklerle, yüz rengini değiştirmeyen bir pudra sürülmüştür.

3. SİSTEM TASARIMI

Veri ön işleme, yüz yakalama, ilinti bölgelerini belirleme, ilinti bölgelerini tanımlama, ilinti noktalarını belirleme / tanımlama ve görüntü eşleştirme olmak üzere altı ana aşamadan oluşan sistemin genel iş akışı şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Sistemin genel iş akışı

İlk aşamada, yüz yakalama işlemi gerçekleştirilmektedir. İkinci aşamada, ten rengi histogram analizi yapılarak görüntünün alım yönü belirlenmektedir. İlinti bölgeleri ve noktaları aşamalarındaki işlem akışı, bu iki duruma göre farklılık göstermektedir. Yüz içerisinde hangi ilinti bölgelerinin yer aldığı tespit edildikten sonra ilinti bölgeleri tanımlanmaktadır. Daha sonra ilinti noktaları aşamasında, her bir ilinti bölgesine özel anahtar noktalar aranmaktadır. Bu işlemler sonucunda elde edilen ilinti noktaları, eşleştirme aşamasında, eşlenik görüntülerin karşılaştırılması amacıyla kullanılmaktadır.

3.1. Yüz Yakalama

Sunulan çalışmada yüz yakalama için sınıflandırıcılar ve ten rengi filtreleme yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Yapılan testler sonucunda Viola-Jones yönteminin [30] kullanılan eğitim setine de bağlı olarak özellikle profil görüntülerinde başarısız olduğu saptanmıştır. Bu nedenle, özellikle profil pozı görüntülerinde ilinti bölgelerinin yakalanabilmesi için ten rengi analizi, Haar

Bölgeleri Yöntemi'ne [30] entegre edilmiştir. Böylelikle aşağıda listelenen yüz geometrisi kuralları uygulanarak görüntüde yüz olup olmadığı tespit edilmiştir.

- Ön poz yüz görüntüler için ikişer tane kaş ve göz bölgesi, birer tane burun ve dudak bölgesi bulunmalıdır,
- Profil pozu yüz görüntüleri için tüm ilinti bölgelerinden birer tane bulunmalıdır,
- İlinti bölgeleri yukarıdan aşağıya doğru kaş – göz – burun – dudak şeklinde sıralanmıştır,
- Ön poz yüz görüntülerinde burun bölgesi iki göz ve kaş bölgesinin arasında ve dudak bölgesinden daha küçük alan kaplayacak şekilde bulunmaktadır,
- Profil pozu yüz görüntülerinde burun bölgesi poz yönüne göre göz ve kaş bölgesinin solunda ya da sağında ve yine dudak bölgesinden daha küçük alan kaplayacak şekilde bulunmaktadır.

Burada seçilen Haar Bölgeleri [30] görüntü içerisinde araştırılarak ve her basamakta sınıflandırıcının çalıştırılması sonucunda yüz / yüz değil olarak karar üretilmiştir.

Ten rengi filtreleme yönteminde en önemli sorun, kullanılacak renk uzayının seçimidir [8, 31, 32]. Bu konu üzerinde daha önce yapılan çalışmalarda, HSV [34] ve YCbCr [34] renk uzaylarının birlikte kullanılmasıyla yüksek doğruluk sağladığı gösterilmiştir [35]. Sunulan çalışmada, temel ten rengi analizi için HSV renk uzayı, detaylı ten rengi analizi için RGB, HSV ve YCbCr renk uzayları kullanılmıştır. Temel ten rengi analizi görüntüdeki yüz sınırlarının kabaca belirlenebilmesi için, detaylı ten rengi analizi ise bulunan yüzler içerisinde ilinti bölgelerinin konumlarının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Yüz ilinti bölgelerinin belirlenmesinde uygulanan ten rengi filtreleme işleminin daha detaylı olmasının nedeni, ilinti bölgelerinin yüzün cilt bölümünden hassas bir şekilde ayrılabilmesini sağlamaktır. İlinti noktaları, tespit edilen ilinti bölgeleri içerisinde arandığı için cilt ile ilinti bölgelerinin tam doğru noktalardan ayrılarak bulunması önem taşımaktadır.

Sunulan çalışmada ilinti bölgelerinin doğru bir şekilde elde edilebilmesi, daha detaylı ve hassas ölçümler yapılması gerekli olduğu için, ten rengi filtreleme aşağıda belirtilen eşik değerler göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. Temel Ten Rengi Filtreleme

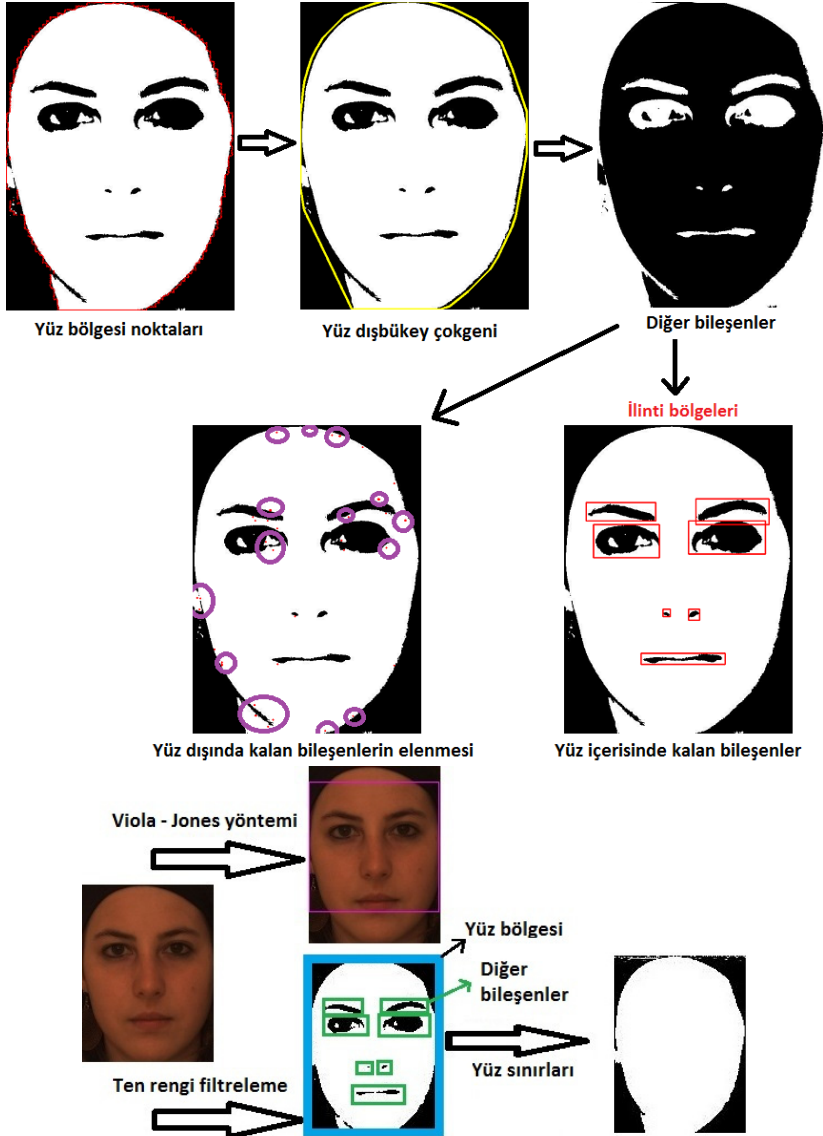
Temel ten rengi filtrelemede, deneysel olarak belirlenen eşik değerleri kullanılmıştır ($H < 18$, $S < 50$, $V < 80$).

Belirlenen H, S ve V eşik değerlerinin test görüntüsü ve kontrastının düşük olması nedeniyle özellikle seçilmiş olan bir diğer test görüntüsüne uygulanması sonucunda elde edilen sonuçlar şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Detaylı ten rengi filtreleme sonuçları

Bu işlemlerin ardından bağımsız bağlı bileşen (blob) analizi gerçekleştirilmiştir. Yüz bölgesinin kendisi ve yüz içerisindeki her bir ilinti bölgesi ayrı bağımsız bağlı bileşenler olarak elde edilmiştir. Bulunan bağımsız bağlı bileşenler içerisinde, alansal olarak en büyük olan ve kendi içerisinde ilinti bölgeleri bileşenlerini içeren bağımsız bileşen, yüze ait olan bileşen olarak işaretlenmiştir. Yöntem gereği, belirlenen yüz bölgesi içerisinde bulunan diğer bağımsız bileşen alanları ise yüz ilinti bölgeleri analizinde değerlendirilmek üzere kaydedilir. Yüz bölgesi dışarısında kalan diğer bağımsız bileşen bölgeleri silinir. Elde edilen sonuçlar şekil 4'te gösterilmiştir.

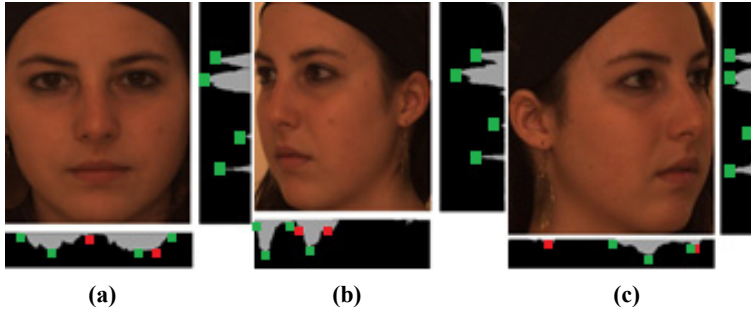


Şekil 4. Yüz bölgesinin belirlenmesi, yüz içerisinde elenen bölgeler ve yüz ilinti bölgeleri

3.2.2. Histogram Analizi ile Ön Poz / Profil Pozu Belirleme

Yüz bölgesi içerisinde kalan ilinti bölgesi bileşenlerinin tanımlanabilmesi için, görüntü içerisinde hangi ilinti bölgesinden kaç tane aramak gerektiği problemi araştırılmıştır. Görüntünün ön poz ya da profil pozu olmasına bağlı olarak tanımlanacak ilinti bölgeleri de değişiklik göstermektedir. Ön poz görüntülerde yüzün hem sağ hem de sol kısımlarında yer alan ilinti bölgeleri kullanılırken, profil pozlarında alım yönüne göre sağ ya da sol kısımda yer alan ilinti bölgeleri tam olarak görüntülenemediği için sadece bir yöndeki ilinti bölgeleri ile çalışılması gereklidir. Buna bağlı olarak önce görüntünün alım yönü, ardından alım yönüne bağlı olarak tanımlanması gereken ilinti bölgeleri belirlenmiştir.

Yatay ve dikey histogramlar, ten rengi piksellerin beyaz, diğer piksellerin siyah renk ile işaretlenmesiyle elde edilen gri değerli görüntü üzerinde satırlar ve sütunlar boyunca piksel değerlerinin toplanmasıyla elde edilmiştir (Şekil-5). Görüntüler, yatay histogram analizi için genişlik değeri 300 piksel ve dikey histogram analizi için yükseklik değeri 300 piksel olacak şekilde yeniden boyutlandırılmıştır. Böylelikle dikey ve yatay histogram analizinde histograma karşılık gelen x ve y piksel koordinatları ve dolyısı ile ilgili duyu organlarının konumları bulunabilmiştir. Elde edilen histogram değerleri üzerinde yerel minimum ve maksimum noktalar (local maximum and minimum indices) bulunmuş ve analizler bu noktalar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te örnek bir görüntüye ilişkin oluşturulmuş yatay ve dikey histogram dağılımları ve bu dağılımlar üzerindeki yerel minimum ve maksimum noktaların görüntü koordinatları cinsinden değerleri görülmektedir.



Şekil 5.a. Örnek ön yüz görüntüsüne ilişkin yatay ve dikey histogram dağılımları

Şekil 5.b. Örnek ön sol profil yüz görüntüsüne ilişkin yatay ve dikey histogram dağılımları

Şekil 5.c. Örnek sağ profil yüz görüntüsüne ilişkin yatay ve dikey histogram dağılımları

Histogram analizinin her aşamasında, yüzün geometrik dağılım bilgisinden yararlanılarak histogram değerlerine aşama aşama bazı düzeltmeler getirilmiştir. Histogram dağılımlarında beklenen yerel minimum ve maksimum nokta sayıları, yatay ve dikey histogramda ayrı ayrı olmak üzere aşağıda verilmiş ve açıklanmıştır:

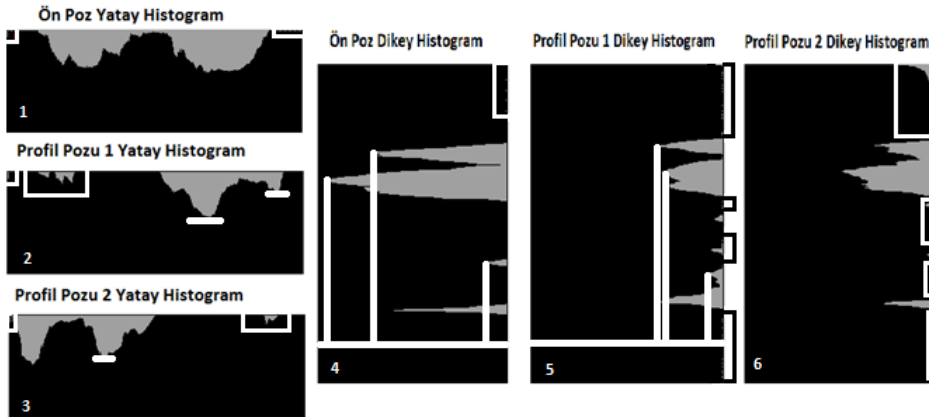
Yatay histogram dağılımı: Eğer görüntü profil yüz görüntüsü ise, bu durumda yüzün yanak kısımlarından birisi dağılımda siyah pikselleri oluşturacaktır. Diğer kısımda kalan duyu organları ise dağılımda beyaz pikselleri ve minimum noktaları oluşturacaktır. Şekil 5b ve 5c'de görüldüğü üzere bu durum histogram analizinde alım açısına da bağlı olarak 1 ya da 2 minimum nokta oluşmasını sağlayabilir. Ön yüz görüntüsünde ise yüzün sağ ve sol tarafındaki tüm duyu organlarının görüntü içerisinde yer alması ve yanak bölgelerinin görüntü içerisinde yer almaması nedeniyle siyah pikseller dağılımda profil görüntüsüne göre daha az bulunacak, beyaz pikseller ise birbirine yakın değerlerde ve histograma homojen bir şekilde yayılmış olarak bulunacaktır ve kesinlikle en az 2 minimum yerel nokta yer alacaktır. Bu durum şekil 5a'da görülmektedir. Bu

bilgilere dayanarak yatay histogram analizinde; (i) en az bir, en çok iki minimum noktası, (ii) İki ya da üç maksimum noktası beklenmektedir.

Dikey histogram dağılımı: Eğer görüntü profil yüz görüntüsü ise, bu durumda yüzün bir bölümünde yer alan göz ve kaş bölgeleri görüntü içerisinde yer almaz ve dağılımda beyaz piksellerin oluşturduğu bölge alansal olarak küçülür. Şekil 5b ve 5c’de görüldüğü üzere dikey histogram dağılımının üst iki bölgesi şekil 5a’da oluşan bölgeye göre daha küçüktür. Ön yüz görüntüsünde ise yüzün sağ ve sol tarafındaki tüm duyu organlarının görüntü içerisinde yer alması nedeniyle bu bölgelerin dağılımdaki karşılıkları olan üst iki bölge alansal olarak daha büyüktür. Hem yatay hem dikey histogram analizinde de tüm duyu organlarına ilişkin bölgeler görüleceği açıktır, alansal olarak bu bölgeler birbirinden farklı boyutlarda olsalar da dağılımda yer alacaklar ve bir minimum nokta oluşturacaklardır. Yüz görüntüsünde yer alan duyu organlarının 4 farklı tipte olması nedeniyle, dikey histogram analizinde; dört minimum noktası bulunması gereklidir. Ancak ten rengi analizinde, ten rengi olmamasına rağmen ten rengi olarak işaretlenmiş pikseller nedeniyle bu dağılımda hatalar oluşmaktadır. Histogram analizinde ardışık işlemler gerçekleştirilerek hedef dağılımda bulunması gereken minimum ve maksimum nokta sayılarına erişilinceye dek dağılıma düzeltmeler getirilmiştir.

Yatay histogram analizi ile görüntünün ön poz mu mü yoksa profil pozu mu olduğu belirlenirken, dikey histogram analizi ile bu yüz görüntüsü içerisinde hangi ilinti bölgelerinin aranması gerektiği belirlenmiştir. Ön poz / profil pozu belirlemesi sırasında, ten rengi piksellerin yüz içerisindeki dağılımlarına, yüz geometrisinin simetri özelliğinden türetilen kurallar uygulanmıştır.

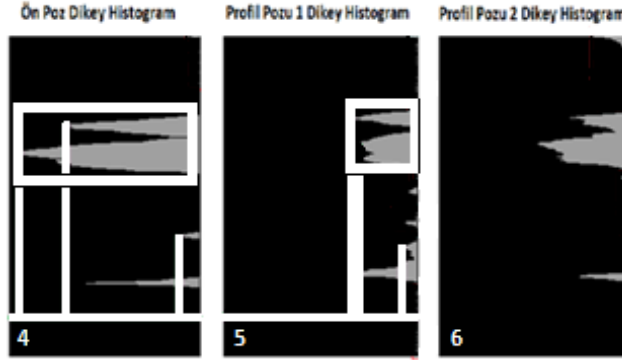
Şekil 6’da dikkörtgen ile işaretlenmiş bölgeler ardışık işlemlerde elenen piksellere ilişkin bölgelerdir. 1 numaralı yatay histogram dağılımı incelendiğinde, aranan minimum noktaların dağılımının sağ tarafında kalan, daha küçük değere sahip olan şekilde çizgi ile işaretlenmiş noktalar olduğu, sol taraftaki minimum noktaların sağ taraftaki noktalara kıyasla daha büyük değerlere sahip olan minimum noktalar olduğu görülmektedir. Bu noktaları içeren bölgeler, ardışık işlemler sırasında dağılımdan çıkartılmaktadır. 1 nolu dağılım için yatay histogram analizinde ulaşılması gereken durum, dağılımda iki minimum nokta ve bu noktaları çevreleyen iki maksimum nokta olmasıdır. Bu koşulları sağlayan minimum ve maksimum noktalar şekil 6’da işaretlenmiştir.



Şekil 6. Ön ve profil pozları için yatay ve dikey histogramlar

Şekil 6’da gösterilen dikey histogram analizi sırasında, yüz ilinti bölgelerinin yüz içerisinde yukarıdan aşağıya doğru sıralanmalarına, ilinti bölgesi sayısına bakılarak görüntüden

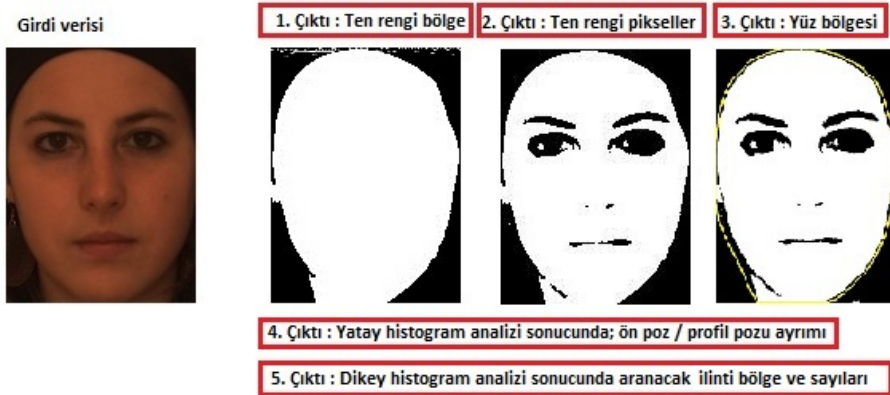
kaç tane hangi ilinti bölgesinden aranacağı bilgisi elde edilmiştir. Dikey histogram dağılımında yer alan minimum noktalar, ilinti bölgelerine ait ten rengi olmayan piksellerin oluşturduğu noktalardır. Yukarıdan aşağıya doğru bu minimum noktalar sırasıyla, kaş, göz, burun ve dudak bölgelerine karşılık gelmektedir. Birinci dikey histogram ve ikinci dikey histogramda yer alan kaş ve göz bölgeleri arasındaki fark şekil 7’de dikdörtgen ile işaretlenerek gösterilmiştir.



Şekil 7. Burun ve dudak histogram istatistikleri ve analizi

İki histogram arasında oluşan bu farkın nedeni ilk dağılımın ön poz yüz görüntüsüne ait olması nedeniyle, göz hizasında kalan kısımda, kaş ve göz ilinti bölgelerinden ikişer tane bulunması ve buna bağlı olarak da daha az sayıda ten rengi piksel içermesidir. Ön poz ve profil pozlarındaki kaş, göz ve burun bölgelerine ilişkin minimum noktalar şekilde çizgiler ile gösterilmiştir. Dikey histogram analizi sonucunda, kaş – göz – burun ve dudak bölgesine karşılık gelen en fazla 4 tane minimum noktası kalması gereklidir. Eğer fazla sayıda nokta bulunmuşsa için bu noktalardan en az bir tanesinin elenmesi gereklidir. Bu eleme sırasında bulunan noktaların birbirlerine yakınlık durumları incelenmiştir.

Yatay ve dikey histogram analizlerinde yapılan ardışık düzeltmelere, yüz histogram dağılımında bulunması amaçlanan minimum ve maksimum nokta sayısına ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. Yüz yakalama işleminin girdi verileri ve sonuç verileri şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Yüz yakalama işlemleri girdi görüntü ve sonuç görüntüler

3.3. İlinti Bölgelerinin Belirlenmesi

Yüz yakalama aşamasında ten rengi filtreleme ile elde edilen ara görüntü sonuçları, bu aşamada ilinti bölgelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Yüz bölgesi olarak işaretlenmiş bağımsız bileşeni çevreleyen dışbükey çokgen (convex hull) oluşturulmuş ve bulunan diğer bağımsız bileşenler, yüz dışbükey çokgeni içerisinde kalıp kalmamasına göre filtrelenmiştir. İlinti bölgelerinin kabaca belirlenmesinin ardından, bulunan her bir bölge için, yüz geometrisinden yararlanarak, ilinti bölgesinin yüz içerisindeki konumu ve diğer ilinti bölgeleriyle olan komşuluklarına göre tanımlama yapılmıştır. Bu aşamada veri ön işleme, ten rengi filtreleme sırasında parçalı olarak elde edilen, ancak aslında tek bir bölgeye ait olan bölgelerin birleştirilmesi ve tek bir ilinti bölgesi olarak işaretlenebilmesi amacıyla yapılmıştır.

3.3.1. İlinti Noktalarının Belirlenmesi

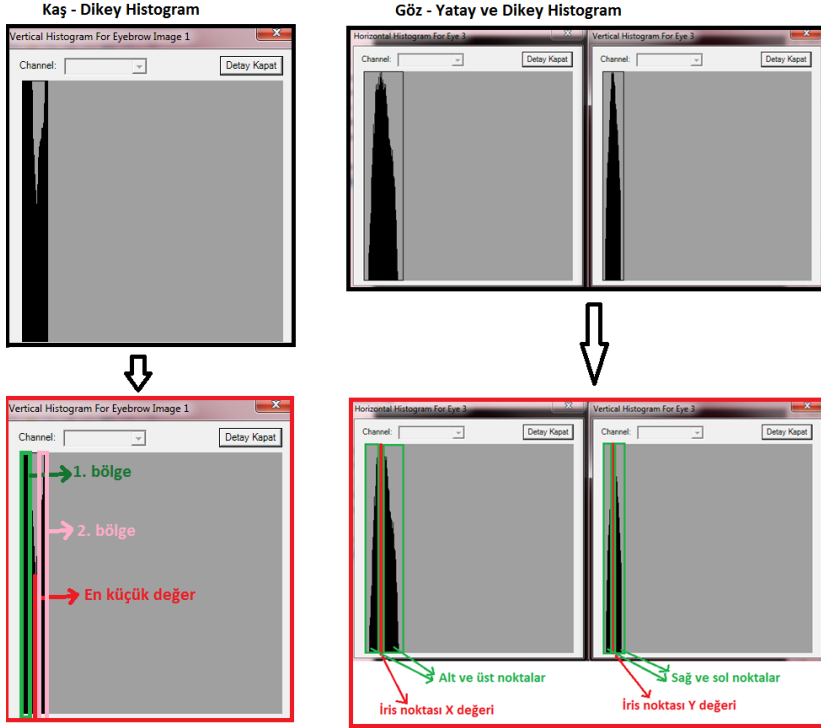
İlinti bölgelerinin belirlenmesinin ardından, ilinti noktaları, sunulan çalışmada geliştirilen ilinti noktası operatörleri ile belirlenmiştir. Burada yüze ait her ilinti bölgesi (kaş, göz, burun, dudak) için ayrı bir operatör geliştirilmiştir. İlinti noktası operatörleri, arayacakları noktaların ayırt edici özelliklerini bilmektedirler. Tüm bu bilgiler kullanılarak, bölge içerisindeki ilinti noktaları belirlenir.

İlinti noktası operatörleri, ait oldukları ilinti bölgesinin gri düzeyli görüntüsü üzerinde çalışarak, orijinal görüntüde RGB, YCbCr ve HSV değerlerine göre yatay ve dikey histogram istatistiklerini çıkartmaktadır ve noktaları bu istatistiklerden elde etmektedir.

Kaş ilinti noktası operatörü; piksel YCbCr değerlerinden ortalama Cr değerini hesaplayarak, bu değere göre eşik filtresi uygulamaktadır. Piksel histogram istatistiklerinde, en küçük değer, kaş orta noktası; histogram başlangıç ve bitiş değerleri ise kaş başlangıç ve bitiş noktalarına karşılık gelmektedir.

Göz ilinti noktası operatörü; piksel YCbCr değerlerinden Y ve Cr bileşenlerini kullanarak ortalama bir değer hesaplayarak, bu değere göre eşik filtresi uygulamaktadır. Elde edilen piksel yatay histogram istatistiklerinde, en küçük değerler gözün alt ve üst noktalarına; dikey histogram istatistiklerinde en büyük değer iris noktasına, bu değer iki tarafında kalan en küçük noktalar ise göz başlangıç ve bitiş noktalarına karşılık gelmektedir.

Burun ilinti noktası operatörü; piksel YCbCr değerlerinin Cr bileşeni ve HSL değerlerinin L (luminance) bileşeni ile yatay histogram istatistiklerini; YCbCr bileşenin Cb bileşeni ile dikey histogram istatistiklerini oluşturmaktadır. Yatay L histogram istatistiklerinde en küçük değer, burun orta noktasına karşılık gelmektedir. Yatay Cr histogram istatistiklerinde en büyük değer her iki yanında kalan en küçük değerler, burun deliklerine karşılık gelmektedir. Dikey histogram istatistiklerinde en büyük ilk değer burun orta noktasına karşılık gelmektedir. *Dudak ilinti noktası operatörü*; ten rengi analizi ile dudak bölgesini ten renginden filtreledikten sonra bağımsız bileşen analizi ile dudak bölgesi piksellerini elde etmektedir. Gri değerli görüntünün yatay histogram istatistiklerinde en büyük değer dudak orta çizgisine, bu değer her iki tarafında kalan en küçük değerler ise dudak başlangıç ve bitiş noktalarına karşılık gelmektedir. Şekil 10 da kaş ve göze ait ilinti noktası operatörlerinin çalışması sırasında oluşturulan histogram istatistikleri ve uygulanan kurallar görülmektedir.



Şekil 10. Kaş ve göz histogram istatistikleri ve analizi

İlinti noktası bulma işleminin test görüntüleri üzerine uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Test görüntüleri için bulunan ilinti noktaları

Tüm aşamalar tamamlandığında, girdi olarak alınan görüntü içerisinde, yüz tespit edilmiş, konumlandırılmış, yüz içerisindeki ilinti bölgeleri ve her bir ilinti bölgesine ilişkin ilinti noktaları bulunmuş ve tanımlanmıştır. Bu bilgilerin elde edilmesinin ardından, eşlenik

görüntülerin karşılaştırılması için elde edilen bu ilinti noktalarının kullanılmasıyla, eşleştirme işlemlerindeki problemlerden ve zorluklardan kaçınılmış olur.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Geliştirilen ilinti noktası operatörleri ile, ortalama 1100 , 1400 piksel boyutlarındaki 35 test görüntüsü için 2,04086 ortalama karesel hata hesaplanmıştır. Çizelge 1’de örnek veriler üzerinde elde edilen ortalama ilinti noktası belirleme piksel doğrulukları gösterilmiştir.

Çizelge 1. Elde edilen doğruluk oranları (piksel bazında)

Veri Adı	2B Koordinatlar		
	Fark		
	Δx	Δy	Δxy
Bs026	0,5	0,625	1,1250
Bs029	1	1,25	1,8811
Bs031	1,25	1,25	1,9869
Bs045	1,125	1,25	1,7900
Bs052	1	1,125	1,6319
Bs069	1,75	2,125	3,1999
Bs071	1,25	1,5	2,2764
Bs074	2,25	1,875	3,0433
Bs083	0,875	1,25	1,6634
Bs096	1,375	0,875	1,8107

Ortalama Δxy (piksel)
2,04086

Akıllı ilinti noktaları sayesinde, bir noktanın eşlenik görüntü içerisinde aranması işlemini gerçekleştiren tanımlayıcıların çalıştırılmasına duyulan gereksinim ortadan kalkmış, eşlenik görüntü içerisinde de aynı algoritma ile noktaların eşlenik karşılıklarının bulunması mümkün olmuştur. Birbirine benzer nitelikte piksellerden oluşan yüz görüntüleri içerisinde bir noktanın aranması, hem uzun süren aramalar, hem de benzer özellikler nedeniyle hatalı eşleşmelere neden olmaktadır. Her bir eşlenik görüntü içerisinde tanımlı ilinti noktalarının

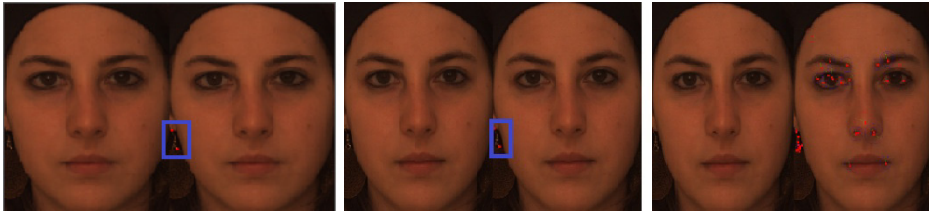
bulunması sayesinde bu eşleştirme işlemine duyulan gereksinim ortadan kalkmıştır ve noktaların tanımları kullanılmak suretiyle eşleştirilmesi mümkün hale gelmiştir.

Kontrastın düşük olduğu görüntülerde, genel ten rengi filtreleme işlemi sonucunda ilinti bölgelerine ait bazı pikseller de ten rengi olarak işaretlenmektedir. Bu özelliği gösteren görüntülerin öncelikle kontrastı artırıldığında ve sonrasında yeniden ten rengi filtrelemesi uygulandığında, doğru sonuçlar elde edilebilmektedir. İkinci test görüntüsü için bu işlemin uygulanması sonucunda elde edilen görüntüler şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Kontrastın artırılması ve ten rengi filtrelemenin tekrarlanması

Yüz görüntüsündeki piksellerin büyük bir kısmının ten renginde olması ve göz, burun deliği gibi simetrik olarak bulunan duyu organları, otomatik yüz ilinti noktası bulma konusunda yaşanan problemlerin temel kaynağını oluşturmaktadır. Eşlenik görüntülerde ortak noktaların belirlenmesini gerekli kılan görüntü eşleştirme algoritmalarının, insan yüzü görüntülerine uygulanması sırasında, yüz görüntüsündeki benzer özellikteki pikseller, eşleştirme işleminin uzun sürmesine ve hatalar içermesine neden olmaktadır. İnsan yüzü içerisindeki ilinti noktaları, literatürde sıklıkla kullanılan Harris [33], Fast [41], Surf [36] gibi genel ilinti operatörleri ile bulunamamaktadır. Bu operatörler genel amaçlı olarak geliştirilmiş olmaları nedeniyle insan yüzü gibi küçük boyutlara sahip özel bir veri üzerinde çalışılması gerektiğinde bu veriye uygun operatörler geliştirilmesi gereklidir. Aşağıda bilinen bazı operatörlerin test görüntüleri üzerinde uygulanması sonucunda elde edilen sonuçlar gösterilmiştir:



Şekil 14-a. Harris operatörünün test verilerine uygulanması

Şekil 14-b. Fast operatörünün test verilerine uygulanması

Şekil 14-c. Surf operatörünün test verilerine uygulanması

Harris operatörü ile ilk görüntü sağ kulak üzerinde iki nokta, ikinci ve üçüncü test görüntüleri için gözler içerisinde gözbebeğine yakın konumlarda ikişer nokta elde edilmiştir.

Fast operatörü ile ilk test görüntü için sağ kulak üzerinde iki nokta, ikinci test görüntüsü için gözler içerisinde ikisi gözbebeğine birisi göz kenarına yakın olmak üzere üç nokta ve üçüncü test görüntüsü için gözler içerisinde gözbebeğine yakın konumlarda iki nokta elde edilmiştir.

Surf operatörü ile ilk test görüntüsü için 38 nokta, ikinci test görüntüsü için 244 nokta ve üçüncü test görüntüsü için 248 tane nokta elde edilmiştir. Ancak bu noktaların hiçbirisi yüz ilinti noktası olarak tabir ettiğimiz noktalara karşılık gelmemektedir.

Sunulan çalışmada, görüntülerden insan yüzünün yakalanması, görüntünün alım yönünün belirlenmesi için yüz verisi üzerinde histogram analizi yapılması, yüz içerisinde kalan ilinti bölgelerinin ve noktalarının, kendi konumlarını bilecek şekilde belirlenmesini sağlayan yeni bir yöntem gösterilmiştir. Her adımda arama alanlarının daraltılmasıyla daha doğru nitelikteki sonuçların daha hızlı bir biçimde elde edilebilmesi sağlanmıştır. Yüz tanıma ve yüz görüntülerinin eşleştirilmesi amaçlı uygulamalardaki gereksinimler göz önünde bulundurularak, ilinti bölgesi ve noktalarının sadece ön yüz görüntülerinde değil, profil görüntülerinde de bulunabilmesi sağlanmıştır.

Farklı açılardan alınmış yüz görüntülerinde, kendini tanımlayabilen akıllı ilinti bölge ve noktalarının bulunabilmesi sayesinde, eşlenik yüz görüntülerinin çakıştırılması sırasında gerekli olan görüntü eşleştirme fonksiyonlarındaki yüksek zaman maliyetli işlemlerden de kaçınılmıştır.

Sistem kapsamında kullanılan eşik değerleri ve diğer sayısal kısıtlamalar nedeniyle, belirtilen veri standartlarına uygun olmayan veriler üzerinde sistemin çalışma doğruluğu azalmaktadır. Sistem, ortalama 45 dereceden alınmış profil görüntüleri ile de düzgün çalışabilmektedir, ancak profil görüntüsünün açısı 90 dereceye yaklaştıkça tespit edilen doğruluk oranlarında düşüş gözlenmiştir.

Belirtilen uygun açılar arasında kalan görüntülerin eşleştirilmesi için, sistem tarafından bulunan noktalar kullanılabilir. Bu sayede birbirine çok yakın özellikler gösteren noktalardan oluşan yüz verisi içerisinde, eşleştirme işleminin yapılması kolaylaştırılır.

İleriye yönelik olarak, geliştirilen yöntem, farklı yüz veritabanları ile birlikte çalışabilecek şekilde esnek bir yapı kazandırılması düşünülmektedir. Diğer taraftan, sistemdeki algoritmalar sabit tutularak ve standart kabul edilerek, yüz veritabanlarındaki yüz görüntülerinin bu standartlara kavuşturulması için gerekli olan ön işlemleri gerçekleştirecek görüntü filtreleri üzerinde çalışılması planlanmaktadır.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Bansal, A., (2012). "Face Recognition Using PCA and LDA Algorithm", Advanced Computing and Communication Technologies (ACCT), 2012 Second International Conference, India.
- [2] Xiaoping, W., (2011). "Face Recognition Based on Bionic Pattern", Electric Information and Control Engineering (ICEICE), 2011 International Conference, China.
- [3] Koo, H. and Song, H., (2010). "Facial Feature Extraction for Face Modeling Program", International Journal Of Circuits.
- [4] Valstar, M.F., (2011). "The First Facial Expression Recognition and Analysis Challenge", Automatic Face & Gesture Recognition and Workshops (FG 2011), 2011 IEEE International Conference.
- [5] Ma, T. C., (2011). "3D Facial Reconstruction System from Skull for Vietnamese", Knowledge and Systems Engineering (KSE), 2011 Third International Conference.
- [6] Gu, H., Su, G. and Du C., (2003). "Feature Points Extraction from Faces", Image and Vision Computing NZ, Palmerston North, pp.154-158.
- [7] Saha, R., Bhattacharjee, D., (2012). "Memory Efficient Human Face Recognition Using Fiducial Points", International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering.
- [8] Eser, S., (2006). Yapay Sinir Ağları İle Yüz Sezimi ve Takibi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] Carrera, P., (2010). Face Recognition Algorithms, Universidad de Pais Vasco.

- [10] Brunelli, R. and Poggio, T., (1993). "Face Recognition: Features versus Templates", IEEE Transactions on PAMI, 15(10):1042-1052.
- [11] Bhumika, G. and Zankhana, H., (2011). "Face Feature Extraction Techniques: A Survey", National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology, India.
- [12] Lee S. and Thalmann N., (2000). "Fast Head Modeling For Animation", Image and Vision Computing 18.
- [13] Heseltine, T., Pears, N. and Austin J., (2002). "Face Detection and Facial Component Extraction by Wavelet Decomposition and Support Vector Machines", Advanced Computer Architecture Group Department of Computer Science The University of York.
- [14] Marcel, S. and Bengio, S., (2002). "Improving Face Verification using Skin Color Information", Proceeding 16th International Conference on Pattern Recognition.
- [15] Yang, M., Kriegman, D. and Ahuja N., (2002). "Detecting Faces in Images: A survey", IEEE Transaction on PAMI.
- [16] Schwerdt, K. and Crowley, J., (2000). "Robust Face Tracking Using Color", Proceedings. Fourth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition.
- [17] Chai, D. and Ngan, K., (1999). "Face Segmentation Using Skin Color Map in Videophone Application", Transactions on Circuits and Systems for Video Technology.
- [18] Boussaid, F., Chai, D. and Bouzerdoum, A., (2003). "On-Chip Skin Detection for Color CMOS Imagers", Proceedings of International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems.
- [19] Kanade, T., (1977). "Computer Recognition of Human Faces", Interdisciplinary Systems Research, Vol. 47.
- [20] Reinders, M. J. T., Van Beek, P. J. L., Sankur, B. and Van Der Lubbe, J. C. A., (1995). "Facial Feature Localization and Adaptation of a Generic Face Model for Model-Based Coding", Signal Processing: Image Communication, pp. 57-74.
- [21] Sobottka, K. and Pitas I., (1996). "Extraction of Facial Regions and Features Using Color and Shape Information", in Proc. of Int. Conf. on Pattern Recognition.
- [22] Tian, Y. and Bolle, R.M., (2001). "Automatic Neutral Face Detection Using Location and Shape Features", Computer Science Research Report RC 22259, IBM Research.
- [23] Fröba, B. and Küblbeck, C., (2001). "Real-Time Face Detection Using Edge-Orientation Matching", AVBPA 2001: 78-83.
- [24] Feris, R. S., Gemmell, J., Toyama, K. and Krueger, V., (2002). "Hierarchical Wavelet Networks for Facial Feature Localization", In Proceedings of the 5th International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, Washington D.C. , USA.
- [25] Ar, İ., (2009). "Videolarda İnsan Eylemlerinin Tanınması", Seminer Raporu, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İzmit.
- [26] Demirel, H. ve Anbarjafari, G., (2008). "Renkli Histogram Eşleştirme Tabanlı Yeni Bir Yüz Tanıma Sistemi", Signal Processing, Communication and Applications Conference, SIU 2008, IEEE 16th 2009.
- [27] Boğaziçi Üniversitesi, <http://bosphorus.ee.boun.edu.tr/> İnternet [Erişim tarihi; 14 Mayıs 2013].
- [28] OpenCV, <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/> İnternet [Erişim tarihi; 26 Mayıs 2013].
- [29] Aforge.NET, <http://www.aforogenet.com/> İnternet [Erişim tarihi; 16 Mayıs 2013].
- [30] Viola, P. and Jones, M., (2011). "Robust Real-time Object Detection", Second International Workshop On Statistical And Computational Theories Of Vision – Modeling, Learning, Computing And Sampling, Canada.
- [31] Kim, I., Shim, J. and Yang, J., (2006). Face Detection, Stanford University.
- [32] Shin, M., Chang, K. and Tsap, L., (2002). "Does Colorspace Transformation Make Any Difference on Skin Detection?", IEEE Workshop on Applications of Computer Vision.

- [33] Parks, D. and Gravel, J.P., COMP644 Pattern Recognition Course, McGill University, <http://kiwi.cs.dal.ca/~dparks/CornerDetection/harris.htm> , İnternet [Erişim tarihi; 14 Mayıs 2013].
- [34] Ford, A. and Roberts A., (1998). Colour Space Conversions, ajoecl1@wmin.ac.uk, Alan.Roberts@rd.bbc.co.uk .
- [35] Kurt, B., (2007). Bilgisayar İle Psikolojik Durum Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [36] Oyallon, E. And Rabin, J., http://www.ipol.im/pub/algo/or_speeded_up_robust_features/
- [37] Grgic, M., Delac, K., <http://www.face-rec.org/databases/>
- [38] [http://www710.univ-lyon1.fr/~bouakaz/OpenCV - 0.9.5/ docs/ ref/ OpenCVRef_ Image Processing.htm](http://www710.univ-lyon1.fr/~bouakaz/OpenCV-0.9.5/docs/ref/OpenCVRef_ImageProcessing.htm)
- [39] OpenCV, <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/>
- [40] OpenCV Community, <http://alereimondo.no-ip.org/OpenCV/34>
- [41] Jazayeri, I. and Fraser, C., (2010). “Interest Operators for Feature - Based Matching in Close Range Photogrammetry”, The Photogrammetric Record, Volume 25, Number 129, Wiley-Blackwell.
- [42] Bagherian, E., Wirza, R. and Udzir, N.I., (2009). “Extract of Facial Feature Point”, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.9 No.1.
- [43] Vukadinovic, D. and Pantic, M., (2005). “Fully automatic facial feature point detection using Gabor feature based boosted classifiers”, Proceedings of IEEE Int'l Conf. Systems, Man and Cybernetics (SMC'05), Waikoloa, Hawaii, pp. 1692 - 1698.
- [44] Serçe, H. (2003). Facial Feature Extraction Using Deformable Templates, The Middle East Technical University, Thesis, Ankara.
- [45] Arı, İ., (2008), Facial Feature Tracking and Expression Recognition for Sign Language, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [46] Çelebi, A.T., Demir, B., Güllü, M.K. ve Ertürk, S., (2008). “Yüz Tanıma için Yüz Özelliklerine Uyumlu Bir-bit Dönüşümü”, IEEE 16. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SİU'2008).
- [47] Güvensan, M. A., Haberdar, H., (2007). “Türk İşaret Dili Tanıma İçin Yüz ve Yüz Özelliklerinin Tanınması ve Takibi”, IEEE 15. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Konferansı, Eskişehir.
- [48] Bevilacqua, V., Ciccimarra, A., Leone, I. and Mastronardi, G., (2008). “Automatic Facial Feature Points Detection”, D.-S. Huang et al. (Eds.): ICIC 2008, LNAI 5227, pp. 1142–1149, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [49] Basili, J., Torres, G., Perez, G., Medina, L. and Meana, H., (2011). “Explicit Image Detection using YCbCr Space Color Model as Skin Detection”, Applications of Mathematics and Computer Engineering, AMERICAN-MATH'11/CEA'11 Proceedings of the 2011 American conference on applied mathematics and the 5th WSEAS international conference on Computer engineering and applications, Pages 123-128 ,
- [50] Rahman, N., Wei, K. and See, J. RGB-H-CbCr Skin Colour Model for Human Face Detection, johnsee@mmu.edu.my.
- [51] Singh, S., Chauhan, D., Vatsa, M. and Singh, R., (2003). “A Robust Skin Color Based Face Detection Algorithm”, Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 6, No. 4, pp. 227-234.
- [52] Hjeltnæs, E. and Low, B. K., (2001). Face Detection: A Survey, Computer Vision and Image Understanding. 83(3), pp. 236-274.
- [53] Bekiroğlu, Y., (2007). İnsan Yüzleri Arasındaki Benzerliğin Temel Bileşenler Aracılığı İle Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- [54] Hassan M., Osman I., Yahia M., (2007). Walsh-Hadamard Transform for Facial Feature Extraction in Face Recognition, World Academy of Science, Engineering and Technology.
- [55] Zhao, S. and Chellappa, R., (2004). "Multiple Exemplar Discriminant Analysis for Face Recognition", In proc. of Intl. Conf. on Pattern Recognition.
- [56] Freund, Y. and Schapire, R., (1996). "Game Theory, On-Line Prediction and Boosting", Annual Workshop on Computational Learning Theory.
- [57] Yılmaz, İ., (2002). "Renk Sistemleri, Renk Uzayları ve Dönüşümler", Selçuk Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Öğretiminde 30. Yıl Sempozyumu, Konya.
- [58] Jensen, OH. and Larsen, R. (2008), Implementing the Viola-Jones Face Detection Algorithm, Thesis, Technical University of Denmark, Denmark.
- [59] Valstar, M.F, (2011). "The First Facial Expression Recognition and Analysis Challenge", Automatic Face & Gesture Recognition and Workshops (FG 2011), 2011 IEEE International Conference.
- [60] Yang, M., (2004). Recent Advances in Face Detection, Honda Research Institute Mountain View, California, USA.
- [61] Lee, S., Ham, Y. and Park R., (1996). "Recognition of Human Front Faces Using Knowledge - Based Feature Extraction and Neurofuzzy Algorithm", Department of Electronic Engineering, Sogang University, Korea, Pattern Recognition Volume 29, Issue 11, November 1996, Pages 1863–1876, 1995.
- [62] Gürel, C., (2011). Development of a Face Recognition System, Master of Science Thesis, Atılım University, İstanbul.
- [63] Peer, P., Kovac, J. and Solina, F., (2003). "Human Skin Color Clustering for Face Detection", Proceedings of IEEE Region 8 Computer as a Tool (EUROCON' 02), vol. 2, pp. 144-148.
- [64] Frischholz, R., <http://www.facedetection.com/facedetection/datasets.htm>, 19 August 2012. İnternet [Erişim tarihi; 14 Mayıs 2013].
- [65] Schaller, N.C., http://www.cs.rit.edu/~ncs/color/t_convert.html İnternet [Erişim tarihi; 15 Mayıs 2013].
- [66] IRO Group Limited, <http://www.easyrgb.com/index.php?X=MATH&H=20#text20> İnternet [Erişim tarihi; 14 Mayıs 2013].
- [67] Wikimedia Foundation, <http://en.wikipedia.org/wiki/YCbCr>, 18 July 2012. İnternet [Erişim tarihi; 14 Mayıs 2013].