



Süleyman Demirel Üniversitesi

YEKARUM e-DERGI

(Journal of YEKARUM)



Cilt 8 , Sayı 2 , 114-130 , 2023
E - ISSN:1309-9388

Gerçek Zamanlı Göz Bebeği Takip Sistemi için Hibrit Algoritma Geliştirilmesi

Cumali KARA¹, Gürkan BİLGİN^{2*}, Süleyman BİLGİN³

¹ Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği A.D., Antalya, Türkiye
(ORCID: 0000-0003-2291-1983), cu.alikara@gmail.com

^{2*} Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Burdur, Türkiye (ORCID: 0000-0002-8441-1557), gbilgin@akdeniz.edu.tr

³ Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye
(ORCID: 0000-0003-0496-8943), suleymanbilgin@akdeniz.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 23/11/2023 ve Kabul Tarihi 07/12/2023)

ÖZET:

Farklı rahatsızlıkları nedeniyle kısıtlı motor becerilerine sahip, hareket yeteneği yetersiz, çevresi ile etkileşiminde sıkıntı bulunan kullanıcılar için göz takip sistemlerinin kullanımı önemlidir. Gerçekleştirilen bu çalışmada bu tür hastalığı olan kişilerin göz bebeği takibi ile sağladığı etkileşimin hassaslığı ve gücünü kullanarak bilgisayar erişimine yardımcı göz takip algoritması tasarlamak hedeflenmiştir. Motivasyonun sağlanmasında, günümüzdeki sistemlerin, göz bebeği takibi için kızılötesi görüntü algılama sistemlerine ihtiyaç duyması ve bunun gibi gereksinimlerin ek maliyetlere sebebiyet vermesi, bunun yerine taşınabilir kameralı bilgisayarlar üzerinden yazılacak bir algoritma ile takibin yapılması fikri etkili olmuştur. Ayrıca daha önce çalışılmış algoritmalara ilaveten yeni bir göz takip algoritması geliştirilmiştir. Ortaya konulan bu araştırma çalışmasında göz bölgesini tespit edebilmek için, Korelasyon ve Viola-Jones (VJ) algoritmaları birlikte kullanılarak hibrit VJVK (Viola-Jones ve Korelasyon) modeli oluşturulmuştur. VJVK ve VJ sonuçlarındaki farklılıkların incelenebilmesi için iki model için de ayrı ayrı göz bölgesi çalışmaları yapılmıştır. Farklı ışık ve mesafelerde denemeler gerçekleştirilerek algoritmaların performansları değerlendirilmiştir. VJVK ile VJ arasındaki fark hız ve doğrulukta yüzdelik olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca gerçek zamanlı göz bebeğini takip edebilecek sistem yeni oluşturulan VJVK ile gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Görüntü İşleme, Göz Takip, Korelasyon, Viola-Jones

Development of a Hybrid Algorithm for Real-Time Pupil Tracking System

ABSTRACT

The use of eye tracking systems is important for users who have limited motor skills, insufficient mobility, and difficulty in interacting with their environment due to various disorders. In this study, it was aimed to design an eye tracking algorithm that helps people with computer access by using the sensitivity and power of the interaction provided by eye pupil tracking for people with this type of disease. The idea that today's systems require infrared

* Sorumlu yazar E-mail:

image detection systems for pupil tracking and that such requirements cause additional costs, instead of tracking with an algorithm written on computers with portable cameras, was effective in providing motivation. Additionally, a new eye tracking algorithm has been developed in addition to previously studied algorithms. In this research study, a hybrid VJVK (Viola-Jones and Correlation) model was created by using Correlation and Viola-Jones (VJ) algorithms together to detect the eye area. In order to examine the differences in VJVK and VJ results, eye area detection studies were carried out separately for both models. The performances of the algorithms were evaluated by performing experiments in different light and distances. The difference between VJVK and VJ is compared in percentage terms in speed and accuracy. In addition, the system that can monitor the pupil in real time was implemented with the newly created VJVK.

Keywords: *Image Processing, Eye Tracking, Correlation, Viola-Jones*

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesine paralel olarak geliştirilen yazılımlar ekonomiden mühendisliğe [1], [2], sağlıktan tarıma [3], [4] birçok farklı sektörde uygulanmaktadır. İnsan hayatı söz konusu olduğunda geliştirilen yazılımlar bir adım daha öne çıkmaktadır. Özellikle göz için geliştirilen uygulamalar günümüzde hala popülerliğini korumaktadır. Göz hareketi takip sistemleri, Bilgisayar-Beyin Arayüzü (BBA) etkileşimlerinde kullanılan temassız kontrol yöntemlerdendir. Göz hareketleri, insanların bir ekran üzerinde yoğunlaştığı ve ilgilendiği kısımlar hakkında bilgi sunabilmektedir [5]. Askeri alanlar, sağlık, pilot ve sürücü davranışları, spor alanları, reklam alanları ve insanların çevreleri ile iletişim kurabilme gibi daha birçok alanda göz hareketleri takip sistemleri sıklıkla tercih edilmektedir [6], [7], [8], [9], [10], [11].

Özellikle, beyin ve kas problemlerine sahip yatalak hastalar, günlük ihtiyaçlarını karşılamada ve bilgisayar kullanımında oldukça zorluk yaşamaktadırlar. Bu tür bireylerin yaşamını kolaylaştırmak adına oldukça fazla bilimsel çalışmalar yapılmaktadır. Teknolojinin hızla gelişmesi sayesinde BBA sistemleri oldukça gelişmiş ve bu tür bireylerin yaşamlarını kolaylaştırmak için hizmete sunulmuştur.

Çalışma kapsamında geliştirilen göz takip sistemi, herhangi bir ek donanım gerektirmeden sadece bilgisayar kamerasından alınan görüntüler sayesinde gerçekleştirilmektedir. Bu sistem, Amyotrofik lateral skleroz (ALS), Multiple skleroz (MS), beyin-omurilik deformasyonu, kas distrofisi ve serebral palsy gibi dejeneratif hastalıkları olan insanların el hareketlerine gerek kalmadan BBA sistemini kontrol edebilme olanakları sunabilecek altyapıyı oluşturmaktadır. Literatür çalışmaları incelendiğinde konu ile ilgili benzer çalışmalar ortaya çıkmıştır.

Bu kapsamda, Hwang ve Ark. yaptığı çalışmada, ALS hastalarının yaşam konforunun artırılması ve hastaya bakan yardımcı bireylerin zorluklarının hafifletilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada göz takibi cihazı kullanan grubun yaşam kalitesi testlerinde önemli ölçüde iyileşme görülmüştür. Ayrıca bu cihazın yardımcıları üzerindeki yükü de belirgin olarak azalttığı ortaya konulmuştur [12]. Sağlık sektöründe gerçekleştirilen bir başka çalışmada Holzman ve ark. göz izleme davranışlarını inceleyerek şizofreni rahatsızlığı üzerinde durmuştur. Uygulamada yüzey elektrotları gözün dışına konumlandırıp toprak elektrodu ise alnın ortasına konumlandırmıştır. Değişen korneoretinal alan kayıtlarını analiz ederek çalışmasını gerçekleştirmiştir [13]. Bir başka çalışmada Kaya ve ark., lazer göz ameliyatlarında önemli rol oynayan göz takibi üzerinde durmuştur. Skeral kan damarlarının özelliklerinin çıkarılması ve hastanın gözündeki deseni takip etmek için görüntü işleme tekniği kullanmıştır [14]. Brandt 1983 yılında yaptığı çalışmasında tasarladığı üzerine bobin yerleştirilmiş özel lensler ile manyetik alan tarafından indüklenen akımları değerlendirmiştir. Göz hareketine bağlı akım değişimleri ile göz hareketi bilgilerini algılayabilmiştir [15]. Durna ve ark. kamera sistemi ile yeni bir binoküler göz bebeği algılama sistemi önermiştir. Kamera sensörü yalnızca kızılötesi görüntüleri geçirecek şekilde modifiyesi yapılarak kamerayla görüntüler elde edilmiştir. Durna ve ark. bu çalışmasında doğrusal olmayan haritalama fonksiyonu kullanarak bakış tahmini çalışması gerçekleştirmişti [16]. Ayrıca kızılötesi ışık kaynağı kişilerin korneasına düşürüldüğünde, ışığın bir kısmı kaynağa geri döner ve kişilerin gözünde bir parıltı oluşur. Kişiler ve ışık kaynağı arasındaki mesafe arttıkça parıltı ile gözbebeğinin orta noktası arasındaki mesafe de artar [17]. Mateo ve ark. kızılötesi ışık kaynağını ekranın her iki tarafından göndererek, Gözbebeği-yansıması tekniğini kullanmıştır. Sonuç olarak bakışla işaretleme ve yüz EMG kombinasyonunun bilgisayar faresinden daha iyi performans gösterme potansiyeline sahip olduğu sonucuna varmışlardır [18].

Bhaskar ve ark. göz kırpma tespiti üzerinden gerçekleştirdiği bir çalışmada sürücülerin yolculuk esnasında gözlerinin kapalı ya da açık olduğunu anlayabilmek için gözün kırpma anı ve kırpma sıklığını tespit edebilmek gerektiğini vurgulamıştır [19]. Sürücülerde yapılan bir başka çalışmada kamera ile elde edilen görüntüler üzerinden VJ algoritması ile yüz ve sağ göz algılaması gerçekleştirilmiş ardından göz durumunu belirlemek için Destek Vektör Makinaları (DVM) ve AdaBoost sınıflandırma tekniği kullanılmıştır. DVM'in AdaBoost' a göre daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [20]. Everingham ve Zisserman yüz dedektörü tarafından çıkarılan görüntülerden gözlerin konumlandırılması üzerine yaptıkları çalışmada üç yaklaşım kullanmıştır. Bunlar Göz ve göz dışı görünümün basit bir Bayesian modeli, göz konumu tahminlerindeki hatayı en aza indirecek bir regresyon modeli ve AdaBoost kullanılarak eğitilen

Cumali KARA, Gürkan BİLGİN, Süleyman BİLGİN, “Gerçek Zamanlı Göz Bebeği Takip sistemi için Hibrit Algoritma Geliştirilmesi”, Yekarum e-Dergi, 8/2 (2023) 114-130

göz algılayıcısıdır. Sonuç olarak Bayesian modelinin zorlu görüntülere sahip veri tabanlarında en iyi performansı gösterdiği ve performansın daha gelişmiş yöntemlerle karşılaştırılabilir olduğu açıklanmıştır [21]. Viola ve Jones algılama prosedürü olarak pikseller yerine basit özellik değerlerini kullanmanın hem hız açısından daha etkili olacağını belirtmiş hem de sınırlı miktarda eğitim verisi kullanıp öğrenilmesi zor olan geçici alan bilgisini kodlayacak yapıda olduğunu ifade etmişlerdir [22]. Hua ve ark. göz izleme teknolojisine dayalı renk çıkarımı ve akıllı algoritmaya dayalı renk şeması taramasının, animasyonlu görüntü renklerinden ürün renklerine etkili dönüşümü gerçekleştirebildiğini göstermiştir. Gerçekleştirdikleri çalışmada renk karar modelini eğitmek için Çok Katmanlı Algılayıcı Yapay Sinir Ağları (ÇKAYSA) yapısından faydalanmıştır [23].

Arslan ve ark. VIVE Pro Eye cihazını kullanarak sanal gerçeklik ortamında elde ettikleri göz izleme sinyalleri ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Hesaplamalarda toplam sabitleme sayısı, toplam seçirme sayısı ve ortalama gözbebeği çapını değerlerini kullanarak önerilen yaklaşımın objektif göz izleme metriklerini analiz etmek için kullanılabilirliğini ortaya koymuşlardır [24]. Bagherzadeh ve Toosizadeh daha iyi bir göz takibi yapabilmek için Çok Katmanlı Kalman Filtresi (ÇKKF) algoritması geliştirmişlerdir. İlk adımda göz başlangıç noktası belirlenmesi için DVM, ikinci adımda ÇKKF kullanarak gözün bir sonraki konumu tahmin edilmek istenmiştir [25]. Kanhirakadavath ve Chandran otizm hastalığının erken teşhisine yardımcı olabilecek modeli keşfetmek amacıyla göz izleme tarama yolu görüntülerini analiz etmek için çeşitli makine öğrenimi tekniklerini araştırmıştır. Sonuçlarda Derin Sinir Ağı (DSA) modeli, %97 Eğri Altında Kalan Alan (EAKA-AUC) değeri, %93,28 duyarlılık, %91,38 özgülük, %94,46 Negatif Tahmin değeri (NTD) ve %90,06 Pozitif Tahmin Değeri (PTD) (beş kat çapraz doğrulanmış) ile en iyi performansı göstermiştir [26]. Otizm teşhisi için yapılan farklı bir araştırmada Python dilinde VJ olarak bilinen bilgisayarlı görme algoritması kullanılarak DVM'leri destekleyen makine öğrenimi teknolojisini kullanan bir program oluşturulmuş ve %89 gibi yüksek doğruluklarla otizm tespitinde hızlı ve etkili sonuçlara ulaşılmıştır [27].

Tesfamikael ve ark.'nın önerdiği yöntemde PID kontrolörün bir DC motoru kontrol ettiği göz izleme kontrollü elektrikli tekerlekli sandalye kullanılmıştır. Yapılan çalışmada en iyi doğruluk yakalanmaya çalışılmış ve gecikme yanıt süresi en aza indirmek hedeflenmiştir. Sonuçta önerilen model yaklaşık %90'lık bir doğruluğa ulaşmış ve yanıt süresi mevcut yöntemlerle karşılaştırıldığında daha düşük seviyeye ulaşmıştır [28]. En az hata ile daha verimli göz izleme modelinin geliştirilmesi için yapılan bir çalışmada, görüntüden yüz bölgesini çıkaran ve Adaboost algoritmasını temel alan, Haar temel özellik filtrelerinin kullanıldığı VJ algoritması uygulanmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, daha verimli göz izleme kalibrasyon süreci

Cumali KARA, Gürkan BİLGİN, Süleyman BİLGİN, “Gerçek Zamanlı Göz Bebeği Takip sistemi için Hibrit Algoritma Geliştirilmesi”, Yekarum e-Dergi, 8/2 (2023) 114-130

için daha az hataya sahip en iyi eğitim modelini elde etmek için Sinir Ağı algoritmasındaki üç eğitim fonksiyonunun performansı ve verimliliği artmıştır [29]. Bir başka önerilen sistemde yüz tanıma için önce VJ algoritması kullanılmış daha sonra SqueezeNet ve U-Net, manüel olarak etiketlenmiş iris ve gözbebeği bölgesini içeren bir eğitim veri seti ile piksel sınıflandırması için modeli eğitmek üzere birleştirilerek kullanılmıştır. Geliştirilen yöntem yüksek doğruluklarla göz takibini sağlayabilmiştir [30].

Bu çalışmada literatür özetinden de anlaşıldığı gibi birçok alanda büyük önem taşıyan, göz takip sistemlerinde kullanılmak üzere göz bebeği tespiti yapılması hedeflenmiştir. Göz bölgesi tespiti ile ilgili yapılan çalışmalarda, genellikle VJ algoritması ve bununla birlikte başka metotlar ile harmanlanarak hibrit yöntemlerin performansları incelenmiştir. Bu araştırmada, VJ algoritması ve geliştirilen yeni teknik (VJVK) kullanılarak göz bebeği tespiti analizlerini gerçekleştirmek, çalışma sonunda ise doğruluk performans karşılaştırmalarını yapmak hedeflenmiştir. Ayrıca kişinin kameraya olan farklı uzaklıklarda olması ve ortamın farklı ışık renklerine sahip olması durumunda yöntemlerin performanslarını değerlendirebilmek amaçlanmıştır.

2. MATERYAL ve METOD

Çalışmada temel amaç göz bebeğini yakalayabilmek için doğruluğu ve tespit hızı yüksek bir algoritma geliştirmektir. Bununla ilgili temel çalışmalar genellikle VJ tabanlıdır. Dolayısı ile bu çalışmada VJ yöntemini baz alarak yeni bir hibrit algoritma geliştirilmiştir. Bu bölümde algoritma içerisinde kullanılan temel adımlar kullanılan materyaller açıklanmıştır.

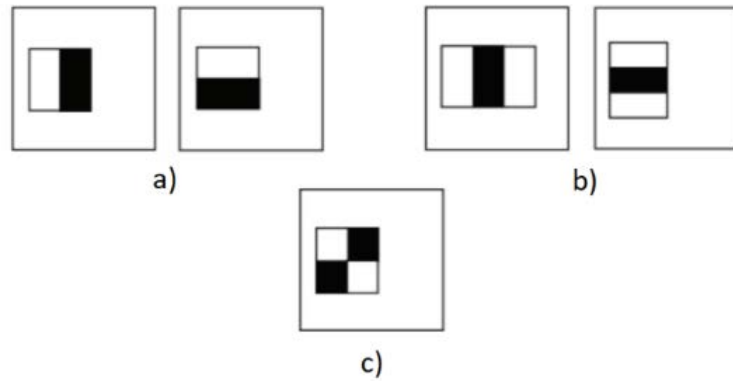
2.1. Viola-Jones Algoritması

Viola ve Jones görüntülerdeki yüz özelliklerinin bulunmasına olanak sağlayan algoritmayı 2001 yılında geliştirmiştir [31]. Oluşturdukları bu algoritma, hızı ve yüksek doğruluk oranları sayesinde gerçek zamanlı algılamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. VJ yaklaşımında görüntüleri sınıflandırmak için Haar özellikleri kullanılmaktadır. Bununla birlikte, Gupta ve ark. yüz tespiti için, nesnelerin algılanması ve eşleştirilmesine imkân sağlayan iyi doğrulukta çalışan bu algoritmayı kullanmışlardır [32]. Algoritma, Haar özellikleri, İntegral resmi, AdaBoost ve ardışıl sınıflandırıcıları olmak üzere 4 ana alt bileşenden oluşmaktadır.

2.1.1 Haar Özellikleri

Haar özellikleri, siyah ve beyaz gibi iki renkten oluşur ve dikdörtgensel geometrik şeklinde pencereler mantığı ile çalışmaktadır. VJ algoritması içerisinde yer alan Haar özellikleri

bulunurken, Şekil 1’ de verilen dikdörtgensel algılama penceresi içindeki siyah-beyaz bölgelerin piksel parlaklık değerleri toplamlarının farkı hesaplanmaktadır.



Şekil 1. Farklı türde Haar dikdörtgensel özellikler.

Şekil 1(a)’ da gösterilen iki dikdörtgen bölge özellik değeri, dikdörtgen bölgelerin kendi içindeki piksellerin toplamı arasındaki farka eşittir. Şekil 1(b)’ de üç dikdörtgen özelliğinin değeri, dıştaki iki dikdörtgen pencerenin piksel toplamlarının merkezdeki dikdörtgen pencere içerisindeki piksellerin toplamından çıkarılmasıyla bulunur. Şekil 1(c)’ de ise dört dikdörtgen özelliğinin değeri, çapraz dikdörtgen çiftleri arasındaki farktan bulunur.

2.1.2 İntegral Resmi

Haar özelliklerinin pikseller üzerinden çıkarılmasını sağlamak için integral resmi yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntem kullanılarak özelliklerin hesabı daha hızlı yapılabilmektedir. Bu durumda integral imge matematiksel olarak,

$$II(x, y) = \sum_{x' \leq x, y' \leq y} I(x', y') \quad (1)$$

Denklem 1’ deki gibi ifade edilir. Denklem 1’ de gösterilen matematiksel ifadede, $II(x, y)$ ile integral imge ve $I(x', y')$ ile orjinal imge verilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde tüm Haar özellikler herhangi bir ölçekte ve konumda eşit hesaplamayla yapılabilmektedir.

2.1.3 AdaBoost

Özelliklerin çıkarılmasının ardından yüz bölgesi tespiti için AdaBoost öğrenme algoritması kullanılmıştır. AdaBoost kısaltması Adaptive ve Boosting kelimelerinin birlikte kullanılması ile kısaltılmıştır. VJ’ tan sonra elde edilen özellik kümesi arasından nesne (yüz, hücre, vb.) üzerinde çok azı yüksek özellik değeri verebilmektedir. AdaBoost ise bu özellikler

Cumali KARA, Gürkan BİLGİN, Süleyman BİLGİN, “Gerçek Zamanlı Göz Bebeği Takip sistemi için Hibrit Algoritma Geliştirilmesi”, Yekarum e-Dergi, 8/2 (2023) 114-130

arasından nesneyi en iyi ifade edenlerini belirleyerek güçlü bir sınıflandırıcı meydana getirmektedir. Seçilen özelliklerden zayıf sınıflandırıcılar $h(x,f,p,\theta)$ Denklem 2’ deki gibi hesaplanmaktadır.

$$h(x, f, p, \theta) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } pf(x) < p\theta \\ 0, & \text{aksi durumda} \end{cases} \quad (2)$$

Denklem 2’de, x , algılama penceresinin resim üzerinde bulunduğu bölgeyi, f özelliği, p eşitsizliğin yönünü, θ ise eşik değerini temsil etmektedir.

2.1.4 Ardışıl Sınıflandırıcı

Doğru olarak saptanan pozitif kısımları negatif kısımlardan ayırıştırma amacıyla kullanılmaktadır. Farklı boyut ve hassasiyete sahip sınıflandırıcı algoritmalarından oluşan ardışıl sınıflandırıcıda, yapısal özelliği elde edilen görüntüye alınmak istenmeyen kısımlar doğrudan bu kısımda elenir ve böylece sadece dâhil olması istenen bölge çıkışa aktarılmış olur [33].

Çalışma kapsamında elde edilen algoritmanın sadece kalibrasyon kısmında kullanılan ardışıl sınıflandırıcı, kameradan gelen görüntünün VJ algoritması kısmının ilk adımında yüz bölgesi, ikinci adımında ise yüz bölgesi içerisinde göz bölgesi tespiti sağlanmaktadır.

2.2. Hough Dönüşümü

Sayısal görüntüleri temsil eden matris kümeleri üzerinde bazı geometrik şekillerin bulunması görüntü işleme çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu bağlamda Hough dönüşümünün geometrik şekilleri bulmadaki başarısı bilinmektedir. Özellikle bu dönüşümün doğrusal ve dairesel geometrik şekilleri başarı ile yakalayabilmektedir. Bilinen belirgin özelliklerinden bir tanesi de bu algoritmanın gürültüden az etkileniyor olmasıdır [34]. Çalışma mantığı olarak oylama mantığına sahip bir dizi algoritmadan oluşmaktadır. Ballard, 1981 yılındaki çalışmasında Hough dönüşümünü ile daireleri belirleyebilmek için genel bir denklem sunmuştur [35]. Önerdiği matematiksel ifade Denklem 3’ de merkez “ $M(a,b)$ ” ve yarıçapı “ r ” olan çember denklemi belirtilmiştir. Bahsi geçen Hough dönüşümünde kullanılan kutupsal koordinat denklemleri Denklem 4’ te verilmiştir.

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (3)$$

$$a = x - r * \cos(t) , b = y - r * \sin(t) \quad (4)$$

Görüntü üzerindeki işlem sıralaması, görüntünün içerisinde kenarların bulunması, belirlenmiş eşik değerine göre görüntünün ikili (0,1) hale getirilmesi ile başlamaktadır. Daha sonra her piksel değeri için, polar koordinat denklemlerinin kullanılması ile oluşma ihtimalleri bulunan dairelerin yarıçaplarının ve merkez noktalarının hesaplanması gerçekleştirilir. Ardından oylama mantığı ile oluşabilecek olan tüm dairelerin oylanır ve aralarında en fazla oy almış olan pikseller Hough Dönüşüm uzayında belirtilir. En fazla oya sahip akümülatörde bulunmak istenen dairenin yarıçapı, merkez noktası ve çizilmesi gerçekleştirilir.

Bu çalışmada göz görüntüsü üzerinde dairesel şekil olan göz bebeği arandığından kullanılan akümülatör matrisi için göz bebeği büyüklükleri yarıçap cinsinden sınırlandırılmıştır.

2.3. Korelasyon

Olasılık ve İstatistikte iki rassal değişkenin aralarındaki doğrusal ilişkinin gücünü ve yönünü Korelasyon belirtmektedir. İstatistiksel kullanımında, bağımsızlık durumundan uzaklaşmanın ne derecede olduğunu ortaya koyar. Korelasyon katsayısı, bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin yönü ve büyüklüğünü belirten katsayıdır. Bu katsayı, (-1) ile (+1) arasında bir değer alır. Pozitif değerler direk yönlü doğrusal ilişkiyi; negatif değerler ise ters yönlü bir doğrusal ilişkiyi belirtir. Korelasyon katsayısı 0 ise söz konusu değişkenler arasında doğrusal bir ilişki yoktur [36]. Denklem 5’ te Korelasyon 2 boyutlu matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2)(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2)}} \quad (5)$$

Bu denklemde A parametresi webcam’ den gelen yeni görüntüyü ifade ederken, B parametresi ise kalibrasyonda elde edilmiş olan göz bölgesini ifade etmektedir.

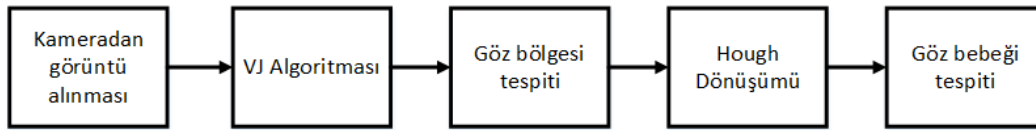
2.4. Kullanılan Materyaller

Bu çalışmada HP Z Book i7 11.Nesil Intel işlemci ve Nvidia RTX 2070 ekran kartına sahip dâhili webcam bulunan dizüstü bilgisayar ve MATLAB 2020B yazılımı kullanılmıştır. Çalışmada görüntüler, ekrana 20-40 cm uzaklıkta ve beyaz sarı ışık kaynakları altında kaydedilmiştir. 7 farklı kişiden toplam 23.997 adet fotoğraf kayıtları alınarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

2.5. Çalışmanın Genel Yapısı

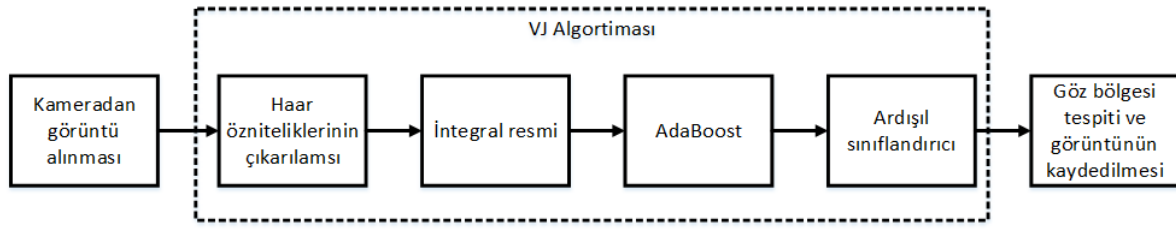
Çalışma kapsamında VJ Algoritması ve geliştirilen hibrit çalışabilen korelasyonlu yapı (VJVK) tasarlanmış ve karşılaştırılmıştır. Yalnız VJ algoritması ile göz bebeği tespiti yapabilen sistemin blok diyagramı Şekil 2’ de gösterilmiştir. Şekil 2’ ye göre ilk girdi kameradan görüntü

alınmasıdır. Alınan görüntü üzerinde ilk olarak yüzün ve göz bölgesinin saptanabilmesi için VJ algoritması kullanılmıştır. VJ algoritmasında, Haar özellikleri vasıtası ile siyah ve beyaz dikdörtgenler oluşturularak içerisinde kalan piksellerin toplamının farkından çıkan sonuca göre çerçevedeki kenarlar veya dokudaki değişiklikler gibi belirli özelliklerin varlığını veya yokluğunu göstermesi sağlanmıştır. Ardından ise integral resmi metodu kullanılarak özellikleri içeren dikdörtgenler hızlı bir şekilde hesaplanmaktadır. Daha sonra Haar özellikleri çıkarıldıktan sonra AdaBoost ile bir görüntü üzerinde kayan pencere ile tarama yapılarak Haar özelliklerinin dağılımına ulaşılır bu sayede farklı zayıf özelliklerin lineer toplanmasıyla güçlü bir sınıflandırıcı elde edilmiş olur. Bir sonraki adımda doğru pozitif örnekleri negatif örneklerden elimine etmek için Basamaklı Sınıflandırıcı kullanılmaktadır. Farklı boyut ve hassasiyetteki sınıflandırıcıları basamaklandırma kabiliyeti sağlar. Ardından belirlenen göz bölgesi çerçeveleri üzerinden, geometrik şekilleri tespit edebilen bir yöntem olan Hough dönüşümü kullanarak yuvarlak göz bebeği belirlemesi yapılmıştır. Bulunan göz bebeği yuvarlağının boyutu ile göz bölgesinin çerçevesi karşılaştırılarak, eğer belirlenen sınırları aşıyorsa göz bebeği değil olarak değerlendirilmiştir. Belirlenen sınırlar içerisinde ise bulunan yuvarlak gözbebeğidir kararı verilip koordinatları kaydedilmiş ve çizdirilmiştir.



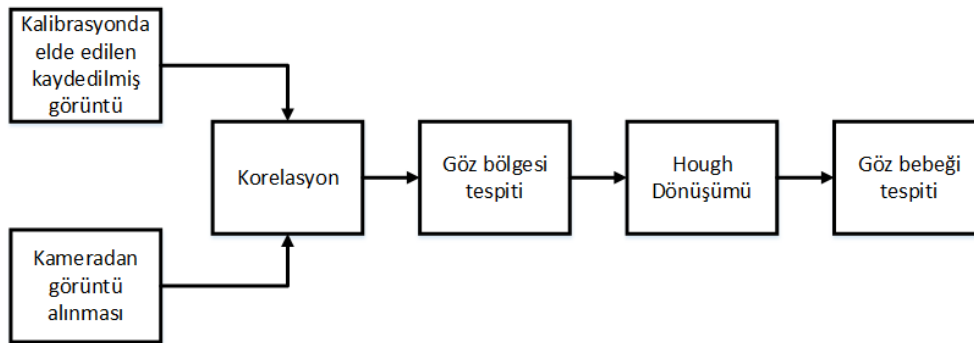
Şekil 2. VJ Algoritması kullanılarak göz bebeği tespiti blok diyagramı.

Hibrit geliştirilen sistemde Şekil 2’ deki VJ algoritması ile göz bebeği bulma tespitinde her çalıştırmada tekrardan 2. bloktaki VJ algoritması işlemlerinin sebep olacağı gecikmeyi ortadan kaldırabilmesi ve çalışmanın hızlandırılması hedeflenmiştir. VJVK yönteminin işleyiş gösterebilmesi için Korelasyonda girdi olarak kullanılmak üzere kalibrasyon görüntüsünün elde edilmesi Şekil 3’ te gösterilmiştir. Şekil 3’ te kamera görüntülerinin Haar özelliklerinin çıkarılması sonrası, integral resmi, Adaboost algoritması ve ardışıl sınıflandırıcıdan sırasıyla geçirildikten sonra bulunan göz bölgesinin kaydedilmesi adımları görülmektedir.



Şekil 3. Kalibrasyon.

Şekil 4’ te blok diyagramı görülen hibrit olarak geliştirilen VJVK sisteminde ise ilk etapta Kalibrasyon sonucu kaydedilen göz bölgesi görüntüsü ile kameradan yeni alınmış bir görüntü Korelasyona tabi tutulmuştur ve en yüksek katsayının bulunduğu piksel alanında göz bölgesi tespiti yapılmaktadır. Gelen görüntü üzerindeki yeni göz bölgesinin tespitinden sonra Hough dönüşümü kullanımı sonrası göz bebeğinin tespiti sağlanmıştır. Bu geliştirilen VJVK yönteminin VJ’ dan farkı VJ kullanarak elde ettiği yüz ve göz bölgesi matrislerini bir kere kaydetmesidir, dolayısı ile tekrarlı olarak VJ algoritması döndürülmemektedir. Bu sayede her seferinde VJ algoritması zahmetinden kurtulmuş, doğru ve hızlı işleyen bir algoritma ortaya çıkarmak hedeflenmiştir.



Şekil 4. VJVK algoritması kullanılarak göz bebeği tespiti blok diyagramı.

VJ algoritması ve VJVK yöntemi kullanılarak ilgili çalışma gerçekleştirilmiştir. VJ ve VJVK yöntemi kullanıcının 20 cm ve 40 cm uzaklık, beyaz ve sarı aydınlatmanın olduğu deney ortamı oluşturularak 4 farklı koşul altında karşılaştırılmış ve web kamerası üzerinde avantajları ve dezavantajları incelenmiştir.

3. ARAŞTIRMA SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, 20 cm uzaklıkta beyaz ışık altında, 20 cm uzaklıkta sarı ışık altında, 40 cm uzaklıkta beyaz ışık altında, 40 cm uzaklıkta sarı ışık altında değerlendirmeler yapılarak

Cumali KARA, Gürkan BİLGİN, Süleyman BİLGİN, “Gerçek Zamanlı Göz Bebeği Takip sistemi için Hibrit Algoritma Geliştirilmesi”, Yekarum e-Dergi, 8/2 (2023) 114-130

çalışmanın doğruluğu ve sağlamlığı test edilmiştir. Testler, algılanan göz bölgesi ve göz bebeği yakalama doğruluk oranları ile karşılaştırılmıştır.

Bu kapsamda, webcam üzerine gelen ilk görüntülerden bir tanesi Şekil 5’ te gösterilmektedir. Bu renkli görüntü her iki algoritmada da sonuca yönelik karşılaştırmalar yapmak için ilk girdi olarak algoritmalara verilmektedir.



Şekil 5. Webcam’ den gelen ilk görüntü.

İlk etapta, webcam üzerinden gelen bu görüntü VJ algoritmasına uygulandıktan sonra elde edilen yüz tanıma görüntü örnekleri Şekil 6’ da gösterilmiştir. Buna göre kameradan gelen ilk görüntü sonrası yüz tanıma yapılmaktadır.



Şekil 6. Kameradan gelen ilk görüntülerin VJ yüz tanıma sonrası örnekleri (VJVK algoritması içinde kalibrasyonda da bir kez bulduruluyor).

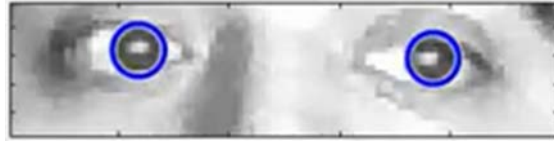
Daha sonra yüz görüntüsü üzerinden çiftli göz bölgesini elde etmek için VJ algoritması tekrar uygulanmış ve Şekil 7’ deki gibi çift göz bölgeleri tespit edilmiştir.



Şekil 7. Yüz tanıma sonrası tekrar VJ algoritması uygulanarak bulunan göz bölgesi örnekleri.

Şekil 7' ye kadar yapılan işlem basamakları, VJVK içerisinde sadece kalibrasyon kısmında bir kez kullanılmakta ve göz bölgeleri kaydedilmektedir. VJVK için bundan sonraki işlemlerde kaydedilen göz bölgesi görüntüsü Korelasyon için kullanılmakta ve VJVK çıkışında yeni bir göz bölgesi görüntüsü tespit edilmektedir. Böylelikle sistem hız kazanmaktadır.

Son olarak her iki algoritma (VJ ve VJVK) sonrasında Hough Dönüşümü kullanılarak göz bebeği tespiti yuvarlak geometrik şekillerin yakalanması ile belirlenmektedir. Şekil 8' de kalibrasyon sonrasında elde edilmiş görüntüye Hough Dönüşümü uygulanması sonrası elde edilen görüntü verilmiştir.



Şekil 8. Kalibrasyon sonrası elde edilmiş görüntü üzerine Hough Dönüşümü uygulanması.

Tablo 1' de belirtildiği üzere göz bölgesi üzerinde farklı ışık kaynaklarında ve kameraya farklı uzaklıklarda gerçekleştirilen çalışmanın VJ ve VJVK algoritmalarının başarı karşılaştırmalarını göstermektedir. Tablo incelendiğinde, beyaz ışık altındaki VJ algoritması başarısı sarı ışıktakine göre düşük kalmaktadır. Diğer taraftan VJVK algoritması ise beyaz ışık altında daha başarılı sonuçlar göstermektedir. Bununla beraber kameraya olan uzaklık arttıkça, beyaz ışıkta algoritma başarıları düşerken, sarı ışıkta uzaklık arttıkça başarının arttığı gözlemlenmektedir. Nihai sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, VJVK algoritmasının VJ algoritmasına göre başarısı ön plana çıkmaktadır. En başarılı sonuç, sarı ışık altında 40 cm uzaklıkta VJVK algoritması ile gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, uzaklık ve ışık rengi bakımından, en iyi ortamın sarı ışık altında, 40 cm uzaklıktan tespiti en uygun çalışma ortamı olacaktır.

Tablo 1. VJ ve VJVK algoritmalarının farklı ışık renklerinde 20 cm ve 40 cm mesafedeki göz bölgesi tespit doğruluklarının karşılaştırılması

Işık Rengi	Algoritma	Mesafe		Ortalama (%)
		20 cm (%)	40 cm (%)	
Beyaz	VJ	97,21	96,57	96,89
	VJVK	99,87	99,61	99,74
Sarı	VJ	96,24	99,44	97,84
	VJVK	98,56	99,92	99,24
Genel	VJ	96,72	98,00	97,36
Ortalama	VJVK	99,21	99,76	99,48

Tablo 1 göz bölgesi performanslarını ortaya koyarken, Tablo 2 de ise göz bebeği tespit performans değerleri gösterilmektedir. Çalışmada da bahsedildiği üzere, göz bebeği tespiti her iki algoritma sonuna eklenen Hough Dönüşümü ile gerçekleştirilmiştir. Tablo 2’ ye göre VJ algoritması % 85,17 doğruluk başarısı gösterirken VJVK algoritması 88,74 doğruluk oranı ile VJ algoritmasından daha başarılı sonuçlar göstermiştir.

Tablo 2. VJ ve VJVK algoritmalarının Hough dönüşümü sonrasında göz bebeği tespit doğruluklarının karşılaştırılması

Algoritma	Genel Ortalama (%)
VJ	85,17
VJVK	88,74

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bilgisayar üzerindeki webcam görüntüleri üzerinden gerçekleştirilen çalışmada, elde edilen sonuçlar iki algoritma için de sağlanan eşit koşullar altında değerlendirilmiştir. VJ algoritması ile VJVK algoritmasının performansları çalışma kapsamında not edilmiştir.

Genellikle göz takip sistemlerinde, manyetik lens, akıllı gözlükler ve kızılötesi sistemler gibi ek donanımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bundan dolayı elde edilen sistemler kullanıcılar için ek bir maliyet oluşturmaktadır. Özellikle diğerlerine nazaran fazla talep görenlerden biri olan kızılötesi tabanlı sistemlerin renkli kameralı sistemlere göre doğruluk, hassasiyet ve gürültüden az etkilenme gibi avantajları mevcut olsa da kızılötesi ışık kaynağı ve algılayıcısına ihtiyaç duyması maliyet açısından dezavantaj yaratmaktadır. Bu durumdan hareketle, çalışma kapsamında, ek bir donanıma ve maliyete ihtiyaç duyulmadan, hareket kabiliyeti kısıtlı hastaların etkileşimi için webcam tabanlı kameralar üzerinde çalışabilecek algoritma geliştirilmiştir.

VJ, bir pencere içerisinde yer alan piksel bloklarının birbiri ile olan ilişkisini öğrenme prensibi üzerine kurulmuş bir gerçek zamanlı göz ve yüz takip algoritmasıdır. Göz bölgesinin

Cumali KARA, Gürkan BİLGİN, Süleyman BİLGİN, "Gerçek Zamanlı Göz Bebeği Takip sistemi için Hibrit Algoritma Geliştirilmesi", Yekarum e-Dergi, 8/2 (2023) 114-130

tespiti için, göz bölgesinin yapısal özelliklerini en fazla barındıran pencereleri tespit ederek çıktı üretmektedir. Çalışma kapsamında VJ tabanlı hibrit olarak geliştirilen VJVK algoritması ise, ilk başta yüz ve göz bölgesinin verilerini kullanıcının onayıyla veri tabanına kaydetmekte ve ardından gelen her yeni görüntüde kayıtlı olan veriler ile korelasyonuna bakmaktadır. VJVK'nın bu konuda VJ'ye göre avantajı kullanıcıdan onay aldığı yüz ve göz bölgesinin doğruluk teyidi ve kullanıcı bazlı güncel veri kullanması olmuştur.

Diğer taraftan çalışma literatürdeki diğer çalışmaların sonuçları ile kıyaslama yapıldığında gerek algoritma hızı gerekse doğruluk oranları bakımından ön plana çıkmaktadır. Devi ve ark. yaptıkları araştırmada Ten Rengi Algoritması ve Dairesel Hough Dönüşümü kullanarak göz tespiti yapmış ve %80 doğruluk başarısı elde etmiştir. Sacco and Farrugia VJ ve DVM yöntemleri ile yaptıkları analizlerde göz tespitinde %91 doğruluk oranını yakalamış, Dasgupta ve ark. göz tespiti için Kalman Filtresi, Temel Bileşen Analizi (TBA), Bölgesel İkili (Bİ) ve DVM analizleri yaparak %94 doğruluğu yakalamıştır. Fatime ve ark VJ, PCA, DVM ve AdaBoost yöntemleri ile %96,2 başarıya ulaşmıştır, benzer olarak Flores ve ark. yine VJ, Yoğunlaştırma Algoritması (YA), Yapay Sinir Ağları (YSA), DVM tekniklerini kullanarak %96 doğruluk başarısına ulaşmıştır. %99 ve %99,41 ile yüksek doğruluk başarı oranlarına ulaşılmıştır, Jo ve ark. %99 doğruluğa DVM, TBA, Lineer Diskriminant Analizi (LDA) teknikleri ile ulaşmıştır. Jiménez-Pinto ve Torres-Torriti ise göz tespiti için %99,41 başarı oranını yakalamıştır. Bu çalışmada önerilen VJVK algoritması ise en yüksek doğruluk başarı oranı %99,92 olarak elde edilmiştir.

Gerek doğruluk oranları ve gerekse sistem çalışma hızı yönünden bu çalışma literatüre önemli katkı yapacak niteliktedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Çalışma, araştırma ve yayın etiğine uygundur.

KAYNAKLAR

- [1] S. Metlek and H. Çetiner, "ResUNet+: A New Convolutional and Attention Block-Based Approach for Brain Tumor Segmentation." *IEEE Access*, 2023.

- [2] S. Metlek, "Forecasting of Dow Jones Sukuk Index Prices Using Artificial Intelligence Systems." *Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research*, vol. pp.1, 2022.
- [3] O. Oral and G. Bilgin, "The Automatic Detection of Tomatoes Leaf Diseases." *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 30, pp. 4, 2021.
- [4] E. Çetin, S. Bilgin and G. Bilgin, "A novel wearable ERP-based BCI approach to explicate hunger necessity." *Neuroscience Letters*, 137573, 2023.
- [5] A. A. Elngar, M. Arafa, A. Fathy, B. Moustafa, O. Mahmoud, M. Shaban and N. Fawzy, "Image classification based on CNN: a survey," *Journal of Cybersecurity and Information Management*, vol. 6.1, pp. 18-50, April 2021.
- [6] A. Borji and I. Laurent, "State-of-the-art in visual attention modeling," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 35.1, pp. 185-207, 2012.
- [7] P. Smith, S. Mubarak and N. V. Lobo. "Determining driver visual attention with one camera," *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, vol. 4.4, pp. 205-218, 2003.
- [8] A. Doshi and M. M. Trivedi, "On the roles of eye gaze and head dynamics in predicting driver's intent to change lanes," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 10.3, pp. 453-462, 2009.
- [9] H. Wang, C. Xue and Q. Liu. "The eye movement experiment and the usability evaluation of the fighter cockpit digital interface." in *2nd Int. Conf. on Information Engineering and Computer Science*. IEEE, 2010, pp.1-4.
- [10] G. J. Siegle, S. R. Steinhauer, and M. E. Thase. "Pupillary assessment and computational modeling of the Stroop task in depression." *International Journal of Psychophysiology*, vol. 52.1, pp. 63-76, 2004.
- [11] V. Mylius, H. J. Braune and K. Schepelmann. "Dysfunction of the pupillary light reflex following migraine headache," *Clinical Autonomic Research* vol. 13, pp. 16-21, 2003.
- [12] C. S. Hwang, H. H. Weng, L. F. Wang, C. H. Tsai and H. T. Chang, "An eye-tracking assistive device improves the quality of life for ALS patients and reduces the caregivers' burden," *Journal of motor behavior*, vol. 46.4, pp. 233-238, 2014.
- [13] P. S. Holzman, R. P. Leonard and L. L. Deborah, et al., "Eye-tracking dysfunctions in schizophrenic patients and their relatives," *Archives of general psychiatry* vol. 31.2, pp. 143-151, 1974.

Cumali KARA, Gürkan BİLGİN, Süleyman BİLGİN, "Gerçek Zamanlı Göz Bebeği Takip sistemi için Hibrit Algoritma Geliştirilmesi", *Yekarum e-Dergi*, 8/2 (2023) 114-130

- [14] A. Kaya, A. B. Can and H. B. Çakmak, "Designing a pattern stabilization method using scleral blood vessels for laser eye surgery." *2010 20th Int. Conf. on Pattern Recognition*. IEEE, 2010, pp. 698-701.
- [15] T. Brandt, *Augenbewegungsstörungen: Klinik und Elektronystagmographie; 23 Tabellen*. Fischer, 1983.
- [16] Y. Durna and A. Fikret, "Design of a binocular pupil and gaze point detection system utilizing high definition images." *Applied Sciences* vol. 7.5, pp. 498, 2017.
- [17] D. W. Hansen, and R. I. Hammoud, "An improved likelihood model for eye tracking," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 106, pp. 2-3, 2007.
- [18] J. C. Mateo, J. San Agustin and J. P. Hansen, "Gaze beats mouse: hands-free selection by combining gaze and emg." *CHI'08 extended abstracts on Human factors in computing systems*. pp. 3039-3044, 2008.
- [19] T. N. Bhaskar, F. T. Keat, S. Ranganath and Y. V. Venkatesh, "Blink detection and eye tracking for eye localization." *TENCON 2003. Conf. on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region*. vol. 2, 2003.
- [20] B. Fatima, A. R. Shaid, S. Ziauddin, A. A. Safi and H. Ramzan, "Driver fatigue detection using viola jones and principal component analysis," *Applied Artificial Intelligence*, vol. 34.6, pp. 456-483, 2020.
- [21] M. Everingham and A. Zisserman. "Regression and classification approaches to eye localization in face images." *7th Int. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition (FGR06)*. IEEE, 2006.
- [22] P. Viola and M. J. Jones. "Robust real-time face detection." *International journal of computer vision*, vol. 57, pp. 137-154, 2004.
- [23] Y. Hua, J. Ni and H. Lu, "An eye-tracking technology and MLP-based color matching design method." *Scientific Reports*, vol. 13.1, pp. 1294, 2023.
- [24] D. B. Arslan, M. Sükuti and A. D. Duru, "The Identification of Individualized Eye Tracking Metrics in VR Using Data Driven Iterative-Adaptive Algorithm." *AJIT-e: Academic Journal of Information Technology*, vol. 14.52, pp. 8-21, 2023.
- [25] S. H. Z. Bagherzadeh and S. Toosizadeh, "Eye tracking algorithm based on multi model Kalman filter." *HighTech and Innovation Journal*, vol. 3.1, pp.15-27, 2022.
- [26] M. R. Kanhirakadavath and M. S. M. Chandran. "Investigation of eye-tracking scan path as a biomarker for autism screening using machine learning algorithms" *Diagnostics*, vol. 12.2, pp. 518, 2022.

Cumali KARA, Gürkan BİLGİN, Süleyman BİLGİN, "Gerçek Zamanlı Göz Bebeği Takip sistemi için Hibrit Algoritma Geliştirilmesi", *Yekarum e-Dergi*, 8/2 (2023) 114-130

- [27] Z. M. Fadhel and Q. M. Hussein, "Detecting autism spectrum disorder in children using eye tracking and machine learning." *2022 Int. Cong. on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, IEEE, 2022, pp.1-3.
- [28] H. H. Tesfamikael, A. Fray, I. Mengsteab, A. Semere and Z. Amanuel, "Simulation of eye tracking control based electric wheelchair construction by image segmentation algorithm." *Journal of Innovative Image Processing (JIIP)*, vol. 3.01, pp. 21-35, 2021.
- [29] F. N. Ibrahim, Z. M. Zin and N. Ibrahim, "Eye Feature Extraction with Calibration Model using Viola-Jones and Neural Network Algorithms." *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 4.6, pp. 208-215, 2019.
- [30] G. Ananthi, M. Pujaa and V. M. Amretha. "Eye gaze capture for preference tracking." *Multimedia Tools and Applications*, vol. 1, pp. 12, 2023.
- [31] M. Jones, "Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple," *Proceedings of the IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Kauai, HI, USA*. IEEE, 2001, pp 8-14.
- [32] A. Gupta and R. Tiwari. "Face detection using modified Viola jones algorithm." *International Journal of Recent Research in Mathematics Computer Science and Information Technology* vol. 1.2, pp. 59-66, 2015.
- [33] R. Lienhart and J. Maydt, "An extended set of haar-like features for rapid object detection." *Proceedings. international conference on image processing*. Vol. 1. IEEE, 2002.
- [34] A. Çelik and E. Tekin, "Hough transform görüntü işleme yöntemiyle ekim makineleri için tohum sayma uygulaması," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi (2020)*, pp. 260-267, 2020.
- [35] D. H. Ballard, "Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes," *Pattern recognition*, vol. 13.2, pp. 111-122, 1981.
- [36] A. Çubukçu, M. Kuncan and M. İmren, et al, "Görüntü işleme ile 3 eksenli robot mekanizması üzerinde nesne ayırt edilmesi ve sıralanması," 2015.