

BİR ENDÜSTRİYEL ROBOTUN KAFESİZ ÇALIŞMASINI SAĞLAYACAK GÖRÜNTÜ TABANLI GÜVENLİK SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Furkan DUMAN *
Ekrem DÜVEN *

Alınma: 03.05.2019 ; düzeltme: 27.05.2019 ; kabul: 31.05.2019

Öz: İnsan ve robotun birlikte çalışması ile yaratılan işbirliği sayesinde, üretimde esneklik, verimlilik, kapasite ve kalite arttırılabilmektedir. Bu birlikte çalışma formunda (insan-robot etkileşiminde) insan ve robotun aynı ortamı paylaşması; çarpma/çarpışma olasılığını ortaya çıkardığından, bu türden çalışma ortamlarında güvenliği sağlamak en önemli sorun olmaktadır. Geleneksel robotlu sistemlerde güvenlik; kafes sistemleri, lazer tarayıcılar, ışık bariyerleri gibi çeşitli donanımlarla sağlanmaktadır. Ancak bu sistemler çalışma ortamını kısıtlamakta, insan ile robotun birlikte çalışmasında avantaj olarak öne sürülen esneklik faktörünü ortadan kaldırmaktadır. Bu çalışmanın ana amacı, kafes ve diğer önleyici sistemleri ortadan kaldırmak için robot üzerine konumlandırılan kamera ve donanımların kullanıldığı görüntü işleme tabanlı bir sistem ve algoritma ortaya çıkarabilmektir. Kullanılan kamera ve donanımların ihtiyaçları sağlayacak nitelikte, ancak düşük maliyetli standart donanımlardan seçilmesine dikkat edilmiştir. Böylelikle standart endüstriyel robotların etkileşime uygun formda çalıştırılabilmeleri için düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir bir çözüm yaratılmaya çalışılmıştır. Bu amaçla; çalışmada, öncelikle çoklu kamera konumlandırılması ve görüntü elde edilmesi üzerine geliştirilen yöntem açıklanmıştır. Ardından elde edilmiş çoklu görüntülerden tekil bir panoramik görüntü elde edilmesi ve bu veri üzerinden insan/nesne tespiti ile konum ve mesafe çıkarımının nasıl yapıldığı belirtilmiştir. Bulunan parametreler ve tanımlı güvenlik kurallarını kullanarak insan ve robotun aynı ortamda çalışmasını düzenleyen algoritma özetlenmiş, son olarak da geliştirilen sistemin getirmiş olduğu kazanım ele alınmış ve ileride yapılabilecek çalışmalara ilişkin öngörüler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: robot görüşü, insan robot işbirliği, robotik sistemlerde güvenlik

Development of the Image Based Security System to Provide Cage-Free Working of an Industrial Robot

Abstract: Thanks to the interoperability (collaboration) between human and robot; flexibility, efficiency, capacity and quality in production can be increased. In this form of work (human-robot interaction), sharing the same environment between human and robot creates the possibility of collision, thus ensuring the safety in such work environments is the most important problem. In traditional robotic systems, security is provided by various equipments such as cage systems, laser scanners and light barriers. However, these systems restrict the working environment and eliminate the flexibility factor that is proposed as an advantage in the interoperability of human and robot. The main purpose of this study is to develop an image processing-based system and algorithm using cameras and hardware positioned on the robot to eliminate cage and other preventive systems. The camera and equipment used in the system were

* Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mimar Sinan Mah. Eflak Cad. No:177, 16310 Yıldırım-BURSA

İletişim Yazarı: Ekrem Düven (ekrem.duven@btu.edu.tr)

chosen to be of low-cost standard equipment. Thus, it has been tried to create a cost-effective and easy-to-implement solution for operating standard industrial robots in a form suitable for interaction. In the article, firstly, the method developed on multiple camera positioning and image acquisition is explained. Then, it is explained how a panoramic image is obtained from the multiple images, how to make human or object detection on this image and how to make location and distance extraction via this detection. The algorithm that manages the operation of the human and the robot in the same environment using the extracted parameters and defined security rules is summarized. Finally, the achievements of the developed system are discussed and predictions for future studies are given.

Keywords: robot vision, human robot collaboration, safety in robotic systems

1. GİRİŞ

Artan nüfus ile birlikte toplumların ihtiyaç duyduğu ürün miktarı ve özellikle de çeşitliliği artmaktadır. Bu çeşitlilik talebini karşılamak, günümüze kadar yaygın olarak kullanılmakta olan monoton çalışma düzenine sahip robotlar ve bantlı sistemler gibi özel üretim makineleriyle zor olmaktadır. Monoton çalışma düzenine sahip makinelerde üretilen ürünü değiştirmek veya makineye farklı bir görev yüklemek yüksek maliyetli ve zaman alan bir süreçtir. Bu nedenle ürün çeşitliliğinde esneklik sağlamak ve verimliliği artırmak için bu tarz makineler yapay zekâ, robot görüşü, insan-robot etkileşimi gibi teknikler ile daha akıllı/yetenekli sistemlere dönüştürülmektedir.

İnsan ile robotun birlikte çalışmasının avantajları; fiziksel olarak insanı zorlayabilecek ve yorabilecek işlerin robota devredilerek, insanın sadece yetenek/zekâ gerektiren hassas işleri yapması, aynı zamanda da denetleyici olarak ortamda bulunması olarak sıralanabilir (Tokçalar ve diğ., 2016). Bu işbirliği sayesinde insan operatörün fiziksel olarak yıpranması en aza indirilmekte, üretimde esneklik ve verimlilik arttırılmakta ve katma değerli işlemlerin tipe özel veya ürünle ilgili yatırım gerektirmeden yüksek kalitede yapılması sağlanmaktadır (İnsan Robot İşbirliği | KUKA AG.).

İnsan-robot etkileşiminde insan ve robot aynı ortamı paylaştığı için çarpma/çarpışma olasılığından dolayı en önemli sorun güvenlidir (Nguyen ve diğ., 2018). Güvenlik ise geleneksel olarak kafes sistemleri, lazer tarayıcılar gibi çeşitli donanımlarla sağlanmaktadır. Fakat bu sistemler çalışma ortamını kısıtlayıp insan ile robotun birlikte çalışmasında esnekliği ortadan kaldırmaktadır. Bu da üretimin yavaşlamasına ve insan operatörünün daha çok yorulmasına sebep olmaktadır. Bu tarz sistemlerde, kafesleri ve bariyerleri ortadan kaldırmak için bazı çalışmalar yapılmıştır.

Takakura ve diğ. çalışmasında tork sensörlü bir robot manipülatörü tasarlanmış ve temas algılanması üzerine çalışan bir algoritma geliştirilmiştir. Kullanılan tork sensörlerine bağlı olarak robot hızı azaltılmıştır (Takakura ve diğ., 2019). Bir diğer çalışmada ise robotun nesneye çarpmasını engellemek için kapasitif sensörler kullanılmıştır. Fakat kapasitif sensörler farklı malzemelere farklı tepkilere verdiği için bu yöntem ideal bir çözüm olmamıştır (Yamada ve diğ., 2006). Güvenliğin sağlanması için dört kameranın kullanıldığı bir çalışmada ise öncelikle geliştirilmiş ortamın üç boyutlu modeli oluşturulmuştur. Sistemde robotun bulunduğu robotlu model ve robotun bulunmadığı engel modeli adında iki farklı model oluşturularak robotun istenilen hedefe gitmesi için çarpışma testleri yapılarak rotası belirlenmiştir (Ebert ve Henrich, 2002). Morioka ve Sakakibara ise çalışmalarında parça yükleme istasyonu, montaj istasyonu ve güvenlik yönetimi istasyonu olmak üzere üç istasyonlu bir sistem geliştirmiştir. Güvenlik yönetim sistemi incelendiğinde insan operatörünün dâhil olabileceği alan ışık perdesi ile kontrol edilmiştir. İnsan operatörün herhangi bir uzvu alana girdiğinde ışık perdesi bozulmakta ve robot manipülatörünün hızı ve hareket alanı kısıtlanmaktadır (Morioka ve Sakakibara, 2010).

Sabit kamera veya kameralarla çalışma ortamının gözleendiği ve insan robot etkileşiminin güvenli bir şekilde gerçekleşmesinin sağlandığı birçok çalışma mevcuttur (Krüger ve diğ., 2009, Cervera ve diğ., 2008, Augustsson ve diğ., 2014). Derinlik kamerası kullanımı tercih edilen Bobka ve diğ. çalışmasında ise ile ortamın modeli simülasyon programında oluşturulmuştur.

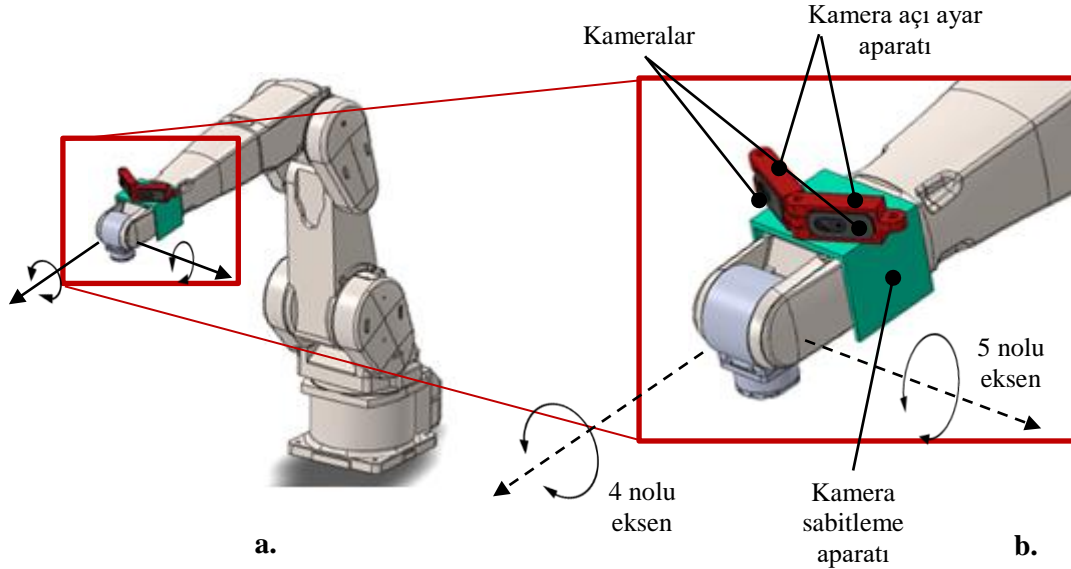
Daha sonra insan ve robot arasındaki mesafe Öklid mesafe denklemi kullanılarak bulunmuş bu mesafeye göre robotun hızı ayarlanmıştır (Bobka ve diğ., 2016). Bu çalışmaların ortak noktası kameralar sabit olduğu için belirli bir alanı incelemektedir. Hareketli sistemler üzerinde bulunan robotik sistemler için bu tarz sistemler yetersiz kalmaktadır.

Bu çalışmada öncelikle insan robot etkileşimini gerektiren bir senaryo kurgulanmış ve bu senaryo üzerinden gidilerek insan robot etkileşimini içeren çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu yapıda etkileşimin güvenli olabilmesi için robotun uç eklemine üzerine kameralar konumlandırılmış ve böylece robotun çevresini algılamasına çalışılmıştır. Görüntü işleme teknikleri ile yapılan çıkarımlar ve robotun hareket senaryosundan gelen bilgiler ile işbirliği içerisinde güvenli çalışmayı sağlayan bir algoritma oluşturulmuştur. Geliştirilen sistem ile insan ve robotu ayıran kafesli güvenlik bariyerleri ve çitleri sistemden çıkarılmış, böylece insan operatöre geniş bir çalışma alanı oluşturulmuştur. Geliştirilen metotlar ve elde edilen sonuçlara takip eden bölümlerde yer verilmiştir.

2. GÖRÜNTÜ İŞLEME METOD VE MATERYALLERİ

Önerilen metodu donanımsal olarak gerçeklemek için, çok eksenli geleneksel yapıda bir endüstriyel robotun uç eyleyicisinin hemen ardına (4. eksen üzerine) Şekil 1'de gösterildiği şekilde belirli bir açı ile iki adet USB arayüzüne sahip kamera konumlandırılmıştır. Bu iki kamera ile robotun ileri ve yanal yönlü hareketleri esnasında çevresindeki hareketli/hareketsiz objelerin tespiti amaçlanmaktadır.

Çalışmada, bu türden bir robot olarak Mitsubishi Electric firmasının RV-7FL-D modeli 6 eksenli endüstriyel robotu kullanılmıştır. Seçilen kameralar; kamera açıklığı 60°, 720p-30fps çözünürlük ve hız değerlerinde çekim yapabilen sabit odaklı standart kameralardır. Bu türden standart bir kamera tercih edilmesinin nedeni; basit ve düşük maliyetli parçalar kullanılarak bile böyle bir sistemin oluşturulabileceğini göstermektir.



Şekil 1:

a. 6 Eksenli bir Endüstriyel Robot ve Robotun 5. Eksenine Yerleştirilen Kameraların Konumlarını Gösteren Katı Model

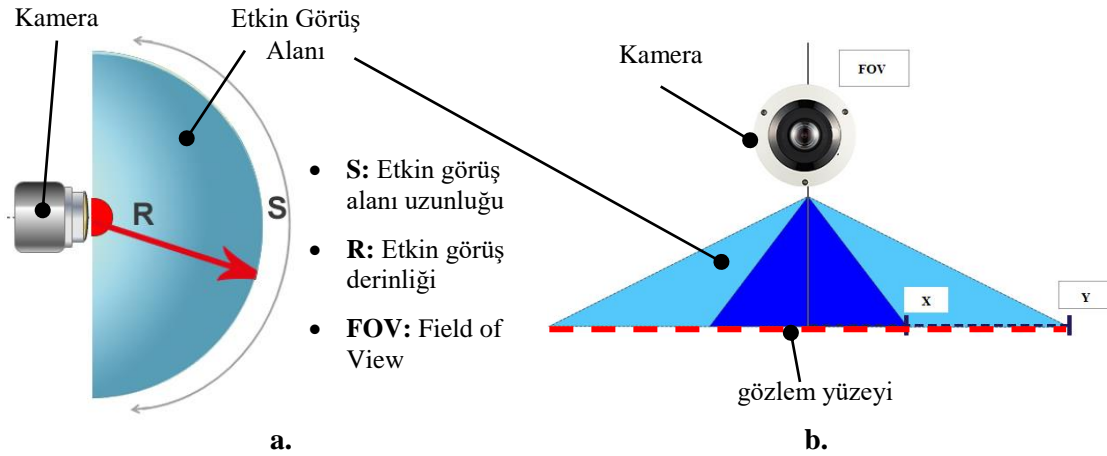
b. Robotun Uç Noktasına Yerleştirilen Kamera Sistemine İlişkin Detay Görüntü

Şekil 1'de görülen ve kameraların takılı olduğu konumlayıcı parçalar, kameraları robota (4. eksenin hareketine) sabitlemek ve uygun açılarda konumlandırmak için tasarlanmıştır. Üzerine

herhangi bir güç uygulanmadığı için eksenin hareketine engel olmamak kaydıyla robotun fiziksel yapısına göre istenilen şekil verilebilmekte ve üç boyutlu yazıcılar ile üretilebilmektedir. Bu sayede basit değişiklikler ile farklı robotlara da bağlantı sağlayabilecek tasarımların kolaylıkla ve düşük maliyetli bir şekilde gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Kameralardan elde edilen görüntülerin işlenmesi ve yorumlanması işlemi ise harici bir bilgisayar üzerinde MATLAB (MathWorks, 2019) programı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Görüntülerin yorumlanması ve geliştirilen algoritmadan elde edilen çıkarımlar sonucu üretilen hareket karar verileri, robota ait olan RT ToolBox 2 (Mitsubishi Electric, 2019) isimli denetim ve gözlem yazılımına gönderilmektedir. Bu noktada oluşturulan değerlendirme verisine göre robot hızı değiştirilmekte veya durdurulmaktadır.

2.1. Kameralardan Elde Edilen Görüntülerin Bir Araya Getirilmesi

Robotun etrafında gerçekleşen hareketleri tespit edebilmek için ilk akla gelen çözüm 180°'lik bir geniş alan merceğine sahip tek bir panoramik kamera kullanılmasıdır. Bu türden kameralar kullanım açısından kolaylık getirmelerine rağmen yüksek maliyetli olmalarının yanı sıra çözünürlük konusunda da bazı sıkıntılar oluşturmaktadır. Şöyle ki: 720p düşey çözünürlüğüne sahip bir kamera ile kafa ya da yakın büyüklüklerde bir geometrik şekli tespit etmek için gerekli çözünürlük değeri 30 piksel değeri yeterli olacaktır (eğer gerçek bir yüz tanıma işlemi gerçekleştirilmek istenirse daha yüksek çözünürlük değerlerine ihtiyaç duyulacaktır). Buradan kameranın etkin görüş alanının uzunluğunu hesaplanırsa istenilen etkin görüş derinliği de birkaç basit matematik işlemi ile elde edilebilmektedir.



Şekil 2:

*Tek (geniş) mercekli panoramik kamera için a. etkin görüş derinliği hesabı
b. Doğrusal bir gözlem yüzeyi üzerindeki çözünürlüğün değişimi*

Şekil 2.a'da görülen etkin görüş alanı uzunluğu:

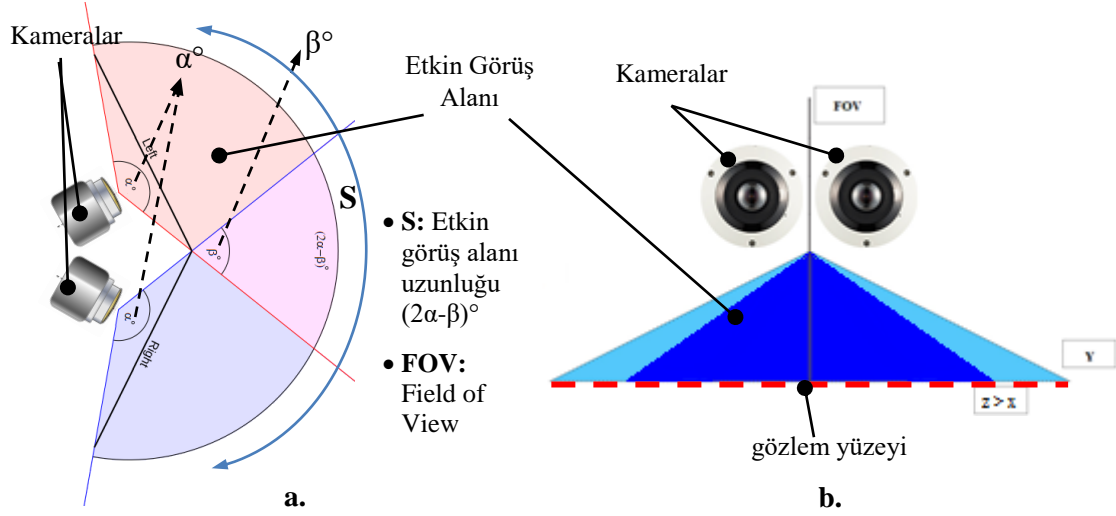
$$S = \frac{720 \text{ piksel}}{(30 \text{ piksel}/0.3 \text{ m})} = 7.2 \text{ m}$$

Basit bir geometrik hesap ile etkin görüş mesafesi ise:

$$R = \frac{2 * 7.2 \text{ m}}{2 * \pi} \cong 2.3 \text{ m}$$

Buna göre böyle bir kamera hedef aldığı (gözlediği) alandaki 2.3 metreye kadar olan mesafedeki kişilerin yüzlerini veya eşyaların üzerindeki geometrik işaretleri tespit edebilmekte, bunun ötesindeki nesnelere net ayırt edememektedir. Ayrıca Şekil 2.b'de verildiği gibi bir gözlem yüzeyi üzerinde kameradan elde edilen çözünürlük değeri merkezden dış kenara doğru değişmektedir. En iyi çözünürlük değeri görüntünün orta kısımlarında yer alan koyu mavi

alandaki iken açık mavi alanda olan kısımlar daha düşük ve en kötüsü de kenarlarda (sınırlarda) olmaktadır.



Şekil 3:

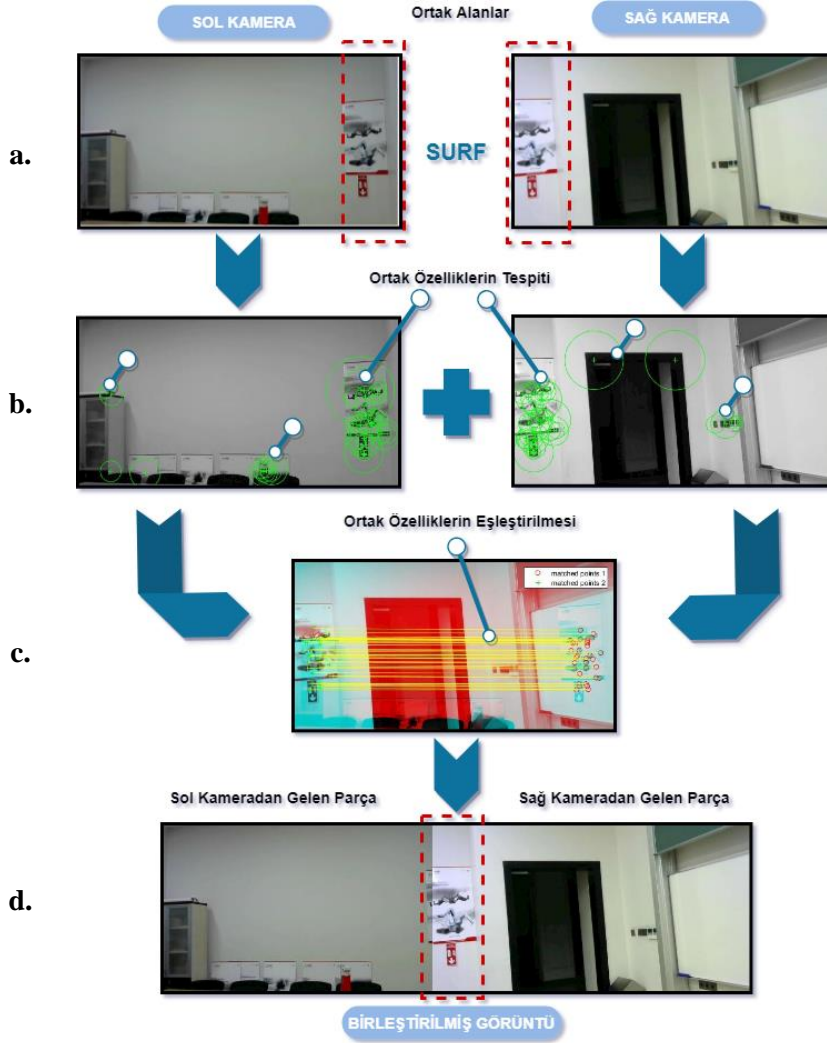
a. etkin görüş alanı hesabı
b. Doğrusal bir gözlem yüzeyi üzerindeki çözünürlüğün değişimi

Şekil 3.a incelendiğinde; Şekil 2.a'daki sistemden farklı olarak daha düşük görüş açılı (α°) ve sabit pozisyonlu iki kamera kullanılarak bir çoklu yapı oluşturulduğu görülmektedir. Bu yapıda kameralar görüş alanları birbirini üzerine binecek şekilde konumlandırılmaktadır. Bu durumda ikisinin görüş alanları üzerinde (β°) kadar kesişim bölgesi oluşmaktadır. Sonuç olarak da oluşturulan bu sistemin etkin görüş alanı uzunluğu (S) = $(2\alpha - \beta)^\circ$ kadar olmaktadır. Şekil 2.b incelenirken; bir gözlem yüzeyi üzerinde elde edilen en iyi çözünürlük değerinin görüntünün orta kısımlarında yer alan koyu mavi alanda iken açık mavi alanda olan kısımların daha düşük çözünürlük değerlerine sahip olacağı belirtilmişti. İki kamera kullanımı ile Şekil 3.b'de görüldüğü üzere koyu mavi alanların yani iyi çözünürlüklü bölgelerin miktarının arttığı anlaşılmaktadır.

Robot üzerinde Şekil 1'de detayı verildiği şekliyle konumlandırılmış kameraların arasındaki açıyı ayarlarken görüntüler arasında ölü bölge olmamasına (her iki kameranın etkin görüş alanının kesişim bölgesinin olmaması durumuna) dikkat edilmelidir. Aksi takdirde ölü bölgede bulunan insan ya da nesnelerin robota göre olan konumu ve haliyle uzaklığı tespit edilememektedir. Bu yüzden kameralar ayarlanırken aralarındaki açılar daha düşük ayarlanır ve bundan dolayı da ortak bölgelerin oluşmasına izin verilmektedir. Kesintisiz bir görüş alanının taranarak işlem yapılabilmesi için her iki kameradan elde edilen görüntüler panoramik olarak birleştirilerek sorunsuz, geniş açılı ve bütün bir görüntü elde edilmektedir.

Panoramik birleştirme işlemi için öncelikle, sağ ve sol kameralardan senkron bir şekilde anlık olarak 30 fps hızında görüntüler elde edilmektedir. Bu kameralar arasındaki yerleşim açısı, Şekil 3'te belirtildiği gibi her iki görüntü üzerinde de aynı objelerin bulunduğu ortak alanlar (bakınız Şekil 4.a – kesikli çizgiler ile belirtilmiş alanlar) olacak şekilde ayarlanmıştır. Görüntülerin kendi aralarındaki ortak alanlar SURF (Speeded-Up Robust Features) algoritması ile tespit edilerek ortak özellikleri çıkarılmaktadır (Şekil 4.b). SURF; bir resmin, aydınlatma, döndürme ve ölçeklendirmeye karşı değişmeyen bölgesel özelliklerini hızlı bir şekilde belirleyip tanımlayan bir algoritmadır (Bay ve diğ., 2014). Ardından tespit edilen bu ortak özellikler eşleştirilmekte ve bu eşleştirmeler dikkate alınarak her iki görüntü bir araya getirilerek birleştirilmektedir (Şekil 4.c). Sonuç olarak nispeten daha geniş açılı ve insan görüş açısına yakın tek bir görüntü elde edilmektedir (Şekil 4.d). Bu noktadan sonra tüm çıkarım ve

değerlendirme işlemleri bu tek görüntü üzerinden yürütülmektedir. Görüntü işleme algoritmalarının gerektirdiği süre yüzünden elde edilmiş olan bu ardıl panoramik görüntülerin değerlendirmeye alınma hızı 6 fps değerinde tutulmaktadır. Algoritmaların üzerinde koştuğu donanımların daha yüksek kapasiteli seçilmesi halinde bu hız daha da arttırılabilecektir.



Şekil 4:
Panoramik görüntü birleştirme işlemi adımları

2.2. İnsan-Robot ya da Nesne-Robot Arasındaki Mesafe ve Konumun Tespiti

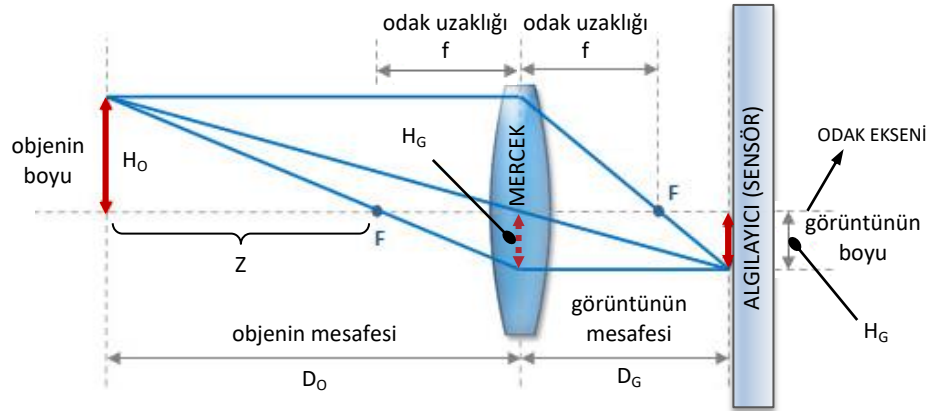
Robotun kendi çalışma alanında güvenli hareket edebilmesi için, önceki bölümde detayları anlatıldığı şekliyle bir araya getirilerek elde edilmiş olan panoramik çevre görüntüsünün üzerinden için birtakım çıkarımlar yapmak gerekmektedir. Bu noktada çıkarımlar açısından iki farklı durum ve öncelik oluşabilir.

- İlk olarak (öncelikle) görüntünün içerisinde insan yani operatör(ler) tespit edilmeye çalışılır. Bir insan gövdesi (görüntüsü) üzerinde en ayırt edici bölge yüz kısmıdır. Dolayısıyla görüntü üzerinde öncelikle yüz ya da yüzler tespit edilmeye çalışılmaktadır.
- Görüntü üzerinde hiç yüz tespit edilememişse, ki bu durum ya robot çevresinde hiç insan bulunmadığını ya da mevcutsa bile yüzünün görülmesini engelleyen bir pozisyonda olduğunu (yüzünün önünde bir obje <kutu vb.> bulunması ya da arkasının

dönük olması durumunu) gösterir, robot çevresindeki nesne ya da yüzü tespit edilemeyen insan için bunların üzerinde konumlandırılmış olan standart bir geometrik şekil tespit edilmeye çalışılmaktadır.

İlk öncelik sırasında bulunan yüz tespit çalışmalarında; panoramik çevre görüntüsü içerisinde insan yüzünü ayırt edebilmek için Viola ve Jones isimli araştırmacılar tarafından geliştirilen ve “Haar Cascade Sınıflandırıcı” olarak adlandırılan (Viola and Jones Object Detection Framework olarak da bilinmektedir) bir algoritma kullanılmaktadır (Viola ve Jones, 2001). Bu algoritma ile nesne tespiti, el, baş yüz gibi insan uzuvlarının tespiti hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Algoritmanın çalışmamızda uygulanması esnasında, daha önceden eğitilmiş ve insan başını algılamak için gerekli parametreleri içeren xml uzantılı bir dosya referans olarak kullanılmıştır. Bu parametreler ile görüntü üzerinde çıkarımı yapılan özelliklerin eşleşmesi sonucu insan yüzünün görüntüdeki yeri tespit edilmekte, buradan da insanın robota olan mesafesini ve konumunu bulmaya yönelik hesaplamalara geçilmektedir. Yüz tespit edilemeyen durumlarda ise aynı yöntemle bu kez özel bir geometrik şekil aranmaktadır. Bu şekil, ayırt edilmesini kolaylaştırmak adına insan/kıyafet üzerinde ve robotun çalışma çevresinde kolaylıkla rastlanmayan bir geometride ve renkte belirlenmelidir. Çalışmamızda bu türden bir şekil olarak üçgen seçilmiştir. Bu şekil ve renkte bir plaka (kırışarak ya da katlanarak şeklin bozulmasına izin vermeyecek yapıda) operatörlerin kıyafetinin ön ve arkasına, robot çalışma alanında bulunabilecek nesnelerin de üzerine iliştirilerek gerekli tanımlamaya imkân verilebilmektedir.

Panoramik çevre görüntüsü üzerinde tespit edilen yüz şeklinin genişliğinden yola çıkılarak, Şekil 5’te verilen optik düzen ve benzerliğe dayalı basit bir geometrik optik hesaplama ile insanın robot üzerinde konumlandırılmış kameraya, dolayısıyla da robota olan mesafesi tespit edilebilmektedir.



Şekil 5:

Görüntü üzerinden objenin robota olan mesafesini hesaplamada kullanılan optik düzen

Görüldüğü üzere objeden mercek üzerine çizilen üç belirleyici ışın (paralel ışın, merkezi ışın ve odak ışını) algılayıcı (sensör) üzerinde bir görüntü oluşturmaktadır. Üçgenlerdeki benzerlik kuralını; odak eksenini ile merkezi ışının oluşturduğu üçgenlere uygularsak (1) denklemi, odak eksenini ile odak ışınının oluşturduğu üçgenlere uygularsak (2) denklemi elde edilmektedir.

$$\frac{H_G}{H_O} = \frac{D_G}{D_O} \quad (1)$$

$$\frac{H_G}{H_O} = \frac{f}{Z} = \frac{f}{D_O - f} \quad (2)$$

(1) denkleminde D_G değerini elde etmek kolay olmadığından (2) numaralı denkleminin kullanılması tercih edilmiştir. Bu denklemde:

f: kameralarda kullanılan merceğin odak uzaklığını (cm cinsinden)

D_O : tespit edilen objenin (insan yüzü vb.) merceğe dolayısıyla robota mesafesi (cm cinsinden)

H_O : tespit edilen objenin (insan yüzü vb.) gerçek uzunluğu (cm cinsinden). Çalışmamızda bu değer sabit 18.5 cm olarak alınmıştır.

H_G : tespit edilen objenin (insan yüzü vb.) görüntü üzerinde tek bir doğrultuda kapladığı en büyük uzunluk (piksel cinsinden).

(2) denklemindeki parametreler incelendiğinde bir tanesi dışında hepsinin santimetre cinsinden olduğu, H_G parametresinin ise piksel olarak verildiği görülmektedir. Sonucun (yani ulaşılmaya çalışılan D_O mesafesinin) santimetre cinsinden bulunabilmesi için ön çalışma ile bir katsayı elde edilmiştir. Buna göre; bilinen uzunlukta (H_O) bir cismi, yine bilinen bir mesafeye (D_O) konulduğunda, odak uzaklığı (f) katalog bilgisini alınır ve tüm bunlar (2) denkleminde yerine konulursa olması gereken H_G uzunluğu santimetre cinsinden bulunabilir. Görüntü üzerinden okunan değer piksel olduğundan, iki denklem $H_{G-cm} = k * H_{G-px}$ şeklinde bir k katsayısı ile bağlanırsa bu katsayı; değeri bilinmeyen yeni D_O mesafe değerlerini hesaplamakta kullanılabilir.

Odak uzaklığını (f) katalog bilgisinden elde etmek yerine bazı kullanışlı kalibrasyon yöntemleri ile elde etmek de mümkündür. Kamera kalibrasyonu ile görüntü algılayıcılarının dâhili ve harici parametrelerinin elde edilmesi bilinen bir yöntemdir (Hartley ve Kang, 2007). Böylelikle herhangi bir görüntü üzerinden yapılan tespit üzerine (2) denkleminde D_O dışında tüm parametreler elde edilmiş olur. Buradan tespit edilen yüzün/geometrik şeklin (dolayısıyla insan/nesnenin) robota olan mesafesi bulunabilmektedir.

2.3. Farklı Çalışma Senaryoları için Görüntü Üzerinden Yapılan Örnek Çıkarımlar

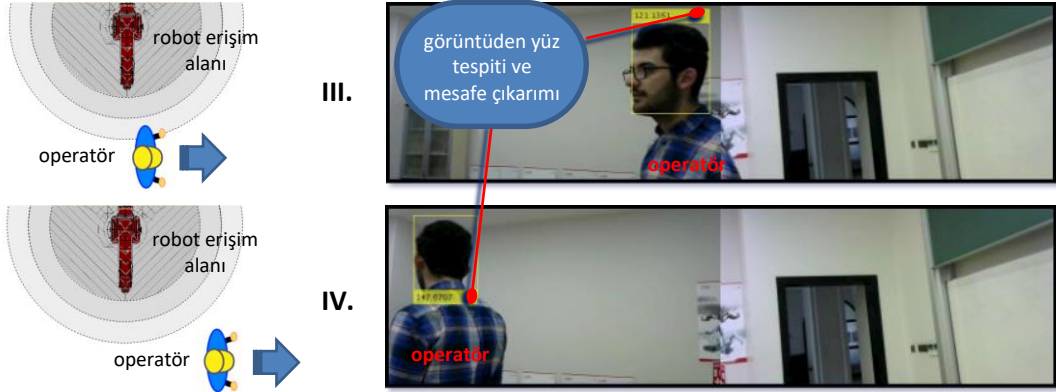
İnsan (operatör) ve robotun bir çalışma ortamındaki mevcut konumları ve yapacakları hareketler sonucu oluşabilecek potansiyel yeni konumları için farklı senaryolar tanımlanabilir. Bu senaryolardan birkaçı ve bunların gerçekleşmesi esnasında elde edilen panoramik görüntülerin üzerinden yapılan örnek çıkarımlar takip eden şekiller üzerinde gösterilmektedir.

Şekil 6'da gösterilen senaryoda operatör robotun çalışma alanının önünde paralel olarak ilerleyerek başka bir noktaya doğru ilerlemektedir. Bu senaryoda operatörün robot ile ilgili herhangi bir görevi bulunmamakla birlikte robotun çalışma alanını işgal etme potansiyeli bulunmaktadır.



Şekil 6:

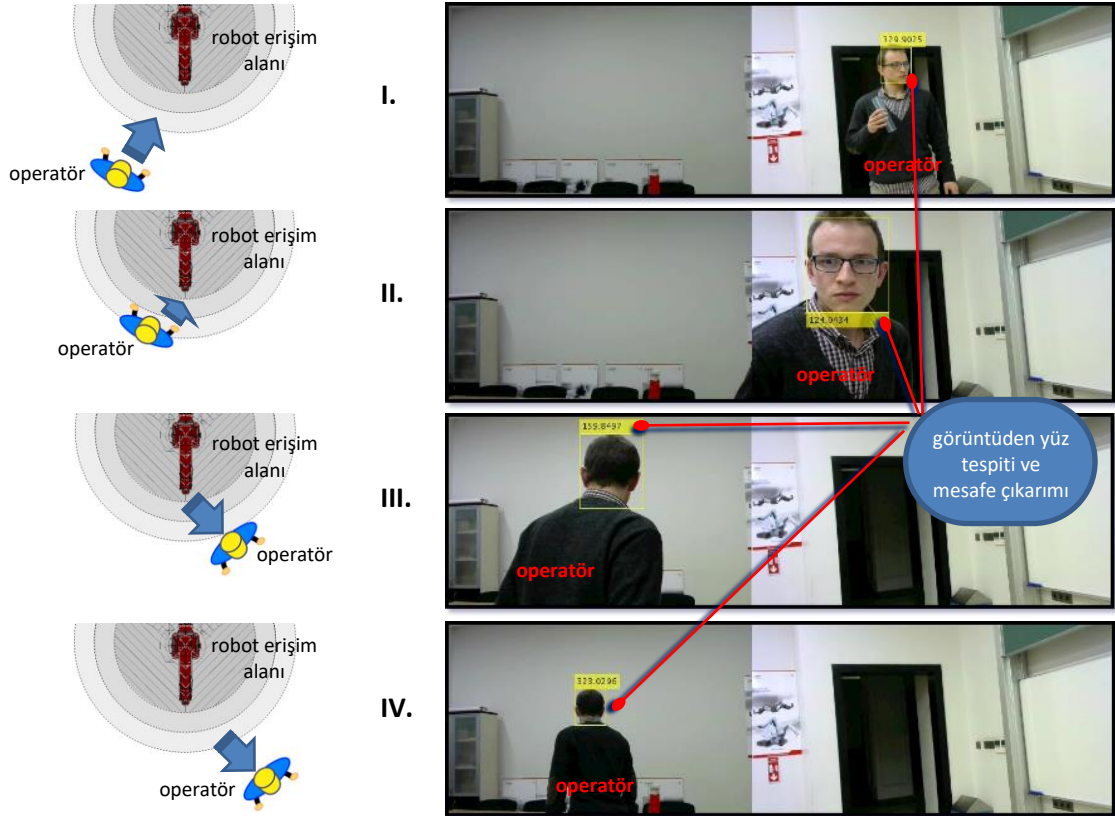
Operatörün robotun önünde paralel olarak ilerleyip geçtiği çalışma senaryosunda görüntü üzerinden gerçekleştirilen yüz tespiti ve mesafe çıkarımı



Şekil 6 (devamı):

Operatörün robotun önünde paralel olarak ilerleyip geçtiği çalışma senaryosunda görüntü üzerinden gerçekleştirilen yüz tespiti ve mesafe çıkarımı

Şekil 6'da I ve IV numaralarla gösterilen adımlarda panoramik görüntü üzerinden öncelikle operatör yüz tespiti yapılmaktadır (tespit edilen yüz sarı kutucuk içerisinde alınarak vurgulanmıştır). Ardından gerçekleştirilen çıkarımlar (piksel cinsinden tespit edilen yüzün boyu ve konumu) ve (2) numaralı denklemin kullanımı ile operatör ve robot arasındaki mesafe bulunmaktadır (bulunan mesafe cm cinsinden yüz tespit kutucuğunun altında belirtilmektedir).

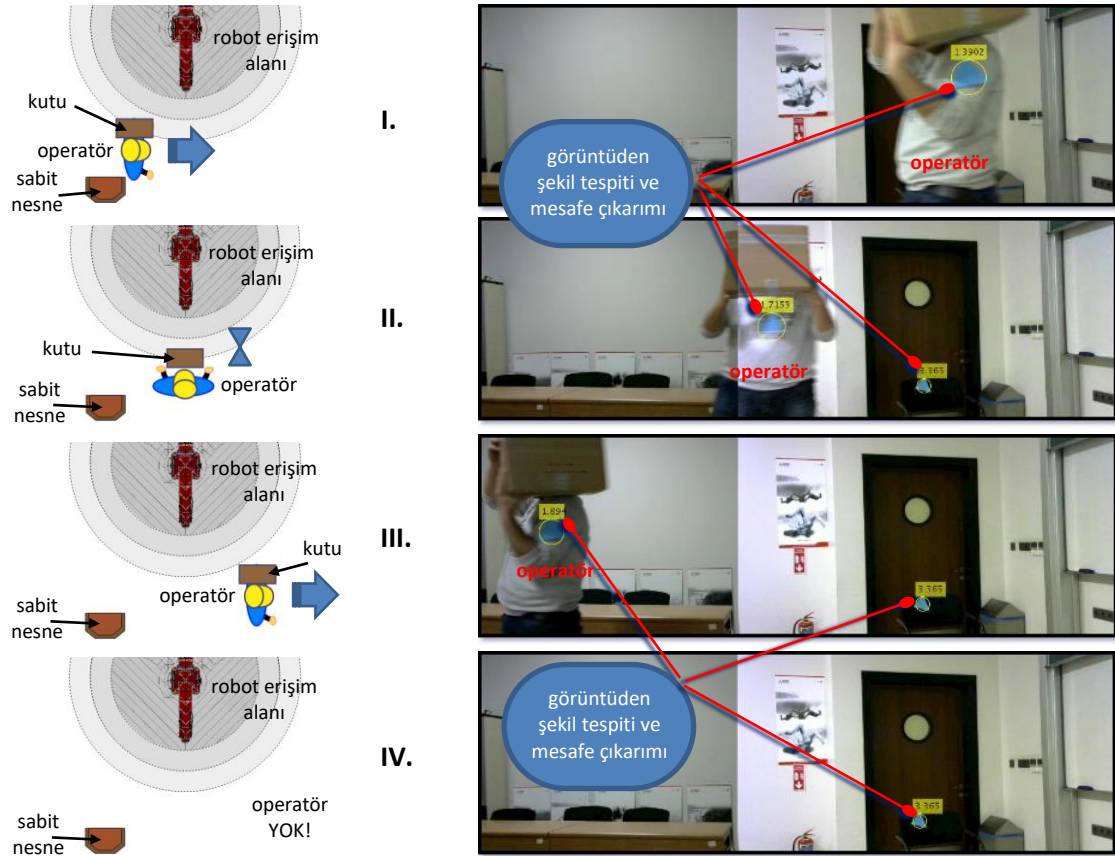


Şekil 7:

Operatörün robota doğru önce yaklaştığı ve sonra uzaklaştığı çalışma senaryosunda görüntü üzerinden gerçekleştirilen yüz tespiti ve mesafe çıkarımı

Şekil 7’de gösterilen senaryoda ise operatör robotun çalışma alanının doğrudan yönelmektedir. Bu senaryoda operatörün robot ile işbirliği halinde çalışması temsil edilmeye çalışılmıştır ve bu esnada operatör robotun çalışma alanının içinde bulunabilmektedir. Burada da bir önceki örnekte (Şekil 6’da) olduğu gibi I ve IV numaralarla gösterilen adımlarda panoramik görüntü üzerinden öncelikle operatör yüz tespiti yapılmaktadır. Bu çalışmada ilave olarak III ve IV adımlarında operatörün sırtı dönük olmasına (yüzü doğrudan gözükmemesine) rağmen tespit yapılmaya ve mesafe çıkarımı yapılmaya devam edilebilmektedir.

Şekil 8’deki son örnek senaryoda ise operatörün yüzünün ya da başının resim üzerinde gözükmediği ya da operatörün çalışma alanında hiç olmadığı ama hareket eden objelerin olabildiği durum canlandırılmıştır. Görüldüğü üzere operatörün taşıdığı kutu nedeniyle yüzü/başı gözükmemektedir. Bu gibi durumlara karşılık önlem olarak operatörün üzerinde farklı konumlarında (ön, arka ve kollarında) tanımlayıcı renk ve şekilde etiketler (örnekte mavi renkli üçgenler) kullanılmıştır. Görüntü işleme algoritması yüz ile birlikte resim üzerinde bu renkte şekilleri de tespit etmeye çalışmaktadır. Benzer etiketler, örnekte görüldüğü gibi tespiti istenen objeler üzerinde de (forklift, transpalet, OYA vb. gibi) uygulanabilmektedir.



Şekil 8:

Operatörün yüzünün/başının tespit edilemediği çalışma senaryosunda görüntü üzerinden gerçekleştirilen geometrik şekil tespiti ve mesafe çıkarımı

3. İNSAN VE ROBOTUN BİR ARADA ÇALIŞMASININ DÜZENLENMESİ

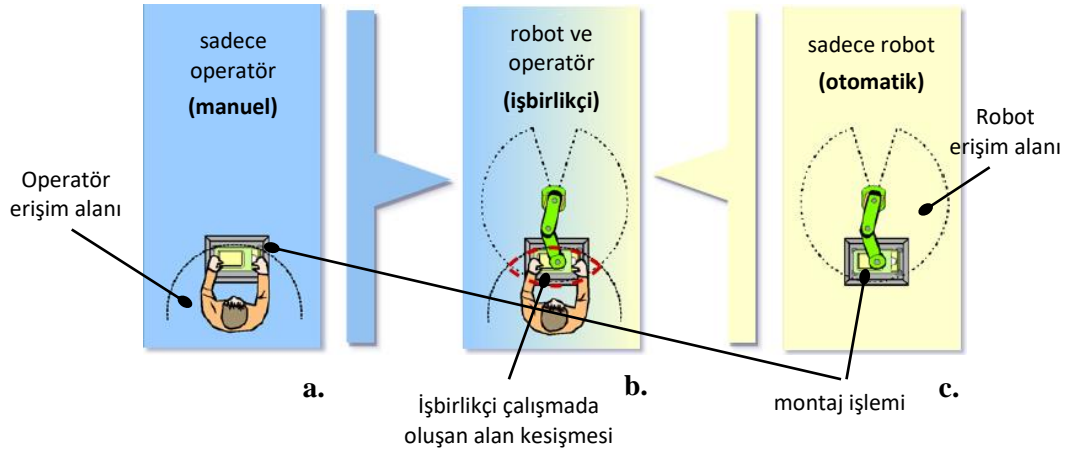
Endüstriyel üretim süreçlerinde her iki tarafın da sağladığı ve güçlü olan yanlarından faydalanmak için insan ve robotların bir arada kullanılmaları giderek yaygın bir hal almaktadır. Bu faydalardan bahsetmek gerekirse; örneğin bir robotlu otomatik montaj sistemi kesintisiz ve

yorulmadan aynı yüksek doğrulukla çalışabilme ve basit montaj işleri için yüksek verimlilik sağlama gibi avantajlara sahiptir. Bununla birlikte böyle sistemlerin kompleks işler için gereksinimi duyduğu yüksek programlama çabası nedeniyle esnekliği düşük olmaktadır. Diğer yandan insan ise, eşsiz senso-motorik yetenekleri sayesinde karmaşık işler (montaj, taşıma vb. gibi) söz konusu olduğunda çok hızlı adaptasyon sağlayabilmektedir. Ancak bu kez de kuvvet ya da hassasiyet gerektiren işlerde performans düşük olmaktadır. İşte bu nedenlerle iki tarafın iyi özelliklerini kullanıp zayıf yönlerinin üstesinden gelmek için insan ve robotun bir arada bir işbirliği içerisinde çalıştırılması ortaya çıkmıştır. İnsan ve robotun bir arada çalıştırılması aynı çalışma alanının kısmen ya da tamamen paylaşılması sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

İnsan ve robotların aynı çalışma alanını paylaşarak montaj ve taşıma/dağıtım işlemlerini üç farklı yapılandırma şeklinde yerine getirebilmektedir:

- Robot bir montaj işlemi gerçekleştirirken insan çalışan (operatör) taşıma/dağıtım işlemlerini yerine getirebilir.
- İnsan çalışan (operatör) bir montaj işlemi gerçekleştirirken robot taşıma/dağıtım işlemlerini yerine getirebilir.
- Hem insan çalışan (operatör) hem de robot montaj ya da taşıma/dağıtım işlemlerini aynı iş döngüsü içerisinde yerine getirebilir.

Bu çalışma şekli üç farklı yapılandırma için de ortak olarak Şekil 9'daki gibi bir alan kesişmesine sebep olmaktadır. Robot ve insan çalışanın etkileşiminde, bu kesişim alanında oluşabilecek olası çarpışmaların önlenmesi için; robot ile insan arasındaki mesafe belirli güvenlik sınırlarında tutulmaya ve bu sınırlara gelindiğinde ise robot çalışma hızının ayarlanmasına çalışılmaktadır.



Şekil 9:

*Ayrı ayrı çalışan operatör ve robotun işbirlikçi çalışma için bir araya getirilmesi;
a. sadece insanlı çalışma b. sadece robotlu çalışma c. işbirlikçi çalışma*

Şekil 9'daki gibi bir işbirlikçi çalışma ortamında robot ile insan arasındaki mesafenin güvenlik aralığında tutulması ve robot çalışma hızının buna göre ayarlanması işlemlerinin belirli standartlar dahilinde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu konudaki kısıtlamalar ve düzenlemeler işbirlikçi (collaborative) robotların ve bunların içerisinde yer aldığı sistemlere ilişkin yayınlanmış olan ISO/TS 15066 standardının içerisinde belirlenmiştir. 2016 yılında yayınlanmış olan bu standart öncesinde geçerli olan ve işbirlikçi özellikleri bulunmayan (tanımlanmayan) geleneksel robotların çalışmalarını düzenleyen ISO 10218-1:2006 ve ISO 10218-2:2011 (ANSI/RIA 15.06:2012) standartlarının işbirlikçi çalışma anlayışıyla güncellenmiş ve geliştirilmiş bir versiyonudur. 15066 standardı öncesinde robotların çalışma alanı yasaklanmış ve gözlenen fiziksel sınırlar içerisinde tanımlanmaktaydı. İşbirlikçi çalışma

I ya da II bölgelerine giriş yaptığında robotun hızı asgari koruyucu ayırma mesafesini sağlamak için güvenlik derecesinin gerektirdiği oranda (Orta Hız ya da Düşük Hız seviyelerine) düşürülmektedir. III numaralı bölgeye giriş olduğunda ise detayları yukarıda açıklandığı şekliyle güvenlik dereceli durma gerçekleşmektedir. Eğer asgari koruyucu ayırma mesafesi ihlal edilirse (IV numaralı bölgeye giriş durumunda), güvenlik önlemi almak için koruyucu durma gerçekleştirilmektedir.

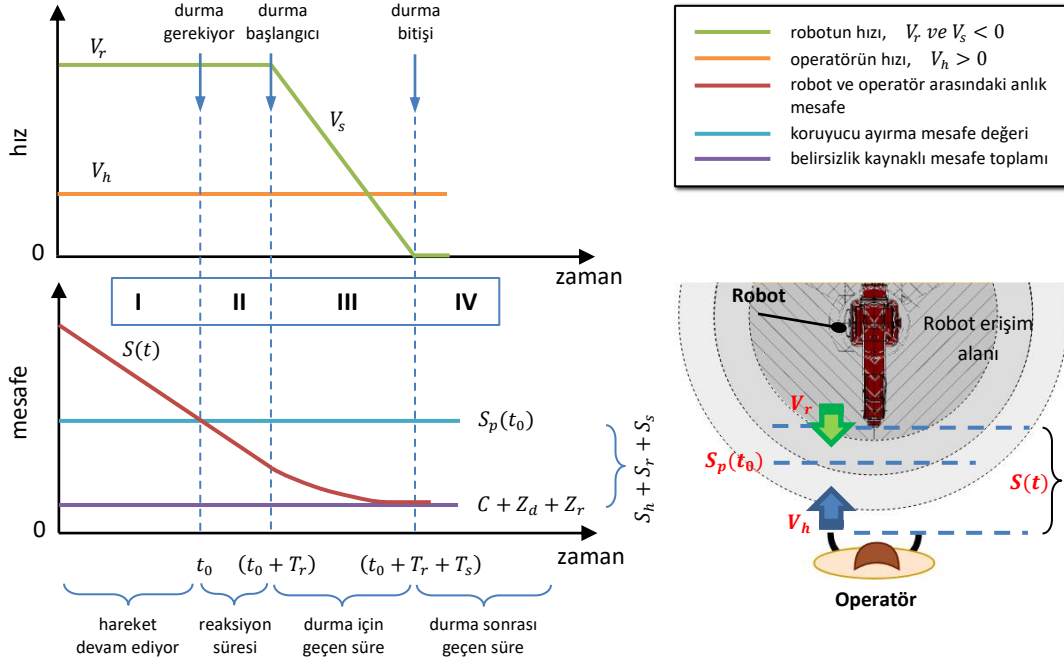
İşbirlikçi bir çalışma bu modlardan yalnız bir tanesi ile gerçekleştirilebildiği gibi birkaçının bir arada kullanımı da tercih edilebilmektedir. Yukarıda belirtilen çalışma modlarında adı geçen asgari koruyucu ayırma mesafesi aşağıdaki formül ile hesaplanabilmektedir (ISO, 2016):

$$S_p(t_0) = S_h + S_r + S_s + C + Z_d + Z_r \quad (3)$$

Bu denklemde:

- $S_p(t_0)$: asgari koruyucu ayırma mesafesi (mm cinsinden)
- S_h : operatörün çalışma ortamında robot doğrultusundaki konum değişimi (mm cinsinden)
- S_r : robotun çalışma ortamında operatör doğrultusundaki konum değişimi (mm cinsinden)
- S_s : robotun (ilgili hızda) durma mesafesi (mm cinsinden)
- C : koruyucu önlemlerin devreye girmesine kadar operatörün vücudunun bir bölümünün tehlike bölgesine doğru kat edebileceği mesafe (mm cinsinden)
- Z_d+Z_r : robotun ve operatörün konumlarının tespitinde oluşabilecek belirsizlik mesafesi (mm)

Görüldüğü üzere bu denklemde çok fazla sayıda etken koruyucu ayırma mesafe değerini etkilemektedir. Elde edilen koruyucu ayırma mesafesi ($S_p(t_0)$) ile anlık olarak çıkarımı yapılan operatörün robota olan mesafesi ($S(t)$) değerleri kullanılarak robotun hareketinin nasıl denetlendiğine (güvenlik derecelendirmeli) ilişkin bir örnek Şekil 11 üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 11:

Robot ve operatörün birbirine doğru yaklaştığı örnek bir durum için koruyucu ayırma mesafesi hesabında etkin olan zaman diyagramları

Şekil 11’deki grafiklerde I numara ile gösterilen zaman aralığında, grafik yanındaki çizimde de gösterildiği üzere, robot ve operatör sabit hızlarla (zıt yönde hareket ettiklerinden V_r ve V_s hızları negatif alınmaktadır) birbirlerine yaklaşmaktadır. İki arasındaki azalan mesafe değeri ($S(t)$) koruyucu ayırma mesafesi değerinin ($S_p(t_0)$) altına düştüğünde “durma” gereksinimi oluşmaktadır. Ancak bu karar ile eyleme geçme noktası arasında II numara ile gösterilen zaman bölgesinde gösterildiği gibi bir reaksiyon süresi olması doğaldır. İlave olarak eylemsizlik nedeniyle robotun durması için de III numaralı zaman bölgesinde gösterildiği kadar bir miktar daha süre geçecektir. Bu her iki ilave sürede robot, operatöre bir miktar daha yaklaşmaktadır. III numaralı zaman bölgesinin sonunda robot artık tamamen durmuştur ve IV numaralı zaman bölgesinde güvenlik derecelendirme koşulu sağlanana kadar beklemede kalmaktadır.

4. GELİŞTİRİLEN SİSTEMİN İŞLETİLMESİ (ALGORİTMANIN UYGULANMASI)

Bir endüstriyel robotun üzerine çalışmamızda önerdiğimiz şekilde konumlandırılmış olan kameralar kullanılarak öncelikle o robota kısıtlı da olsa bir görüş yeteneği kazandırılmaktadır. Bu noktada birden fazla kamera kullanıldığı için elde edilen görüntülerden üzerinde çıkarım yapılabilecek tek bir görüntü elde edilmesi gerekmektedir. Nihayetinde elde edilen görüntü robotun çevresi hakkında bir bilgi oluşturmakla birlikte, robotun kafessiz güvenli harekete edebilmesi için bu görüntü üzerinden robota tehdit oluşturabilecek ya da robotun tehdit oluşturabileceği, insan (operatör) ya da hareketli nesnelere (otonom araçlar) tespit edilmesi gerekmektedir. Tespit sadece yeterli olmayıp görüntü üzerine tespiti yapılan insan/objenin robota olan mesafesinin de çıkartılması gerekmektedir. Bu bilginin de elde edilmesiyle tanımlanmış olan güvenlik kuralları çerçevesinde robotun hareketleri ve çalışma modları denetlenmeye çalışılmaktadır.

Bahsedilen tüm bu işlemlerin tek bir yazılım üzerinden gerçekleştirilebilmesi için tüm bu ayrıklı operasyonların bir algoritma çerçevesinde uygulanması ve koordine edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla aşağıdaki sözde kod ile yansıtılan bir algoritma uygulanmaktadır:

Tablo 2. Uygulama için geliştirilen algoritmaya ait sözde kod

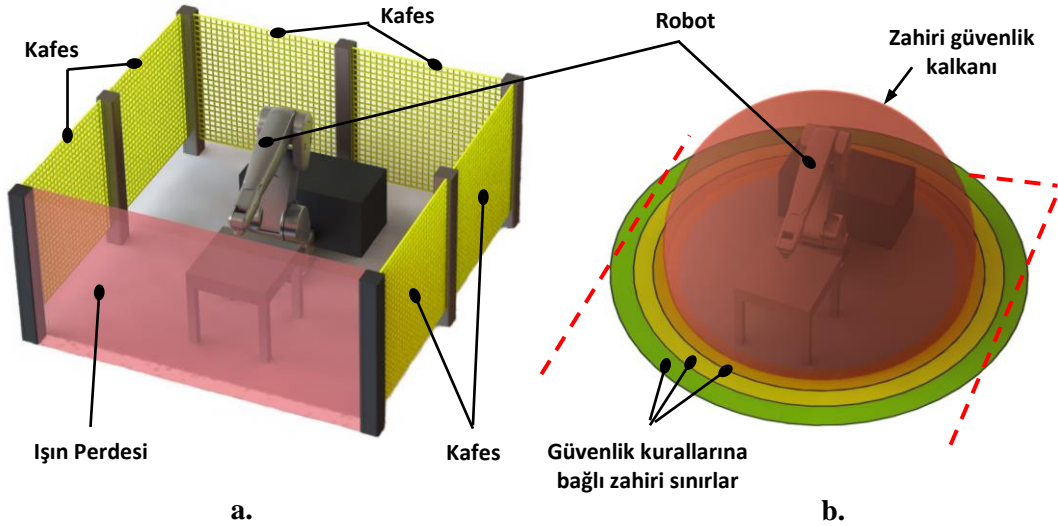
BAŞLA { Güvenlik Algoritması }	
<1>	Kameralar arasındaki açının ortak bir görüş alanı sağlayacak şekilde set edilmesi
<2>	(2) numaralı denklemde kullanılacak olan ve kameralara ait başlangıç parametre değerlerinin girilmesi { f_r, H_G, H_O }
<3>	(3) numaralı denklemde kullanılacak olan ve robota ve çalışma ortamına bağlı başlangıç parametre değerlerinin girilmesi { $C_r, S_{sr}, Z_d + Z_r$ }
<4>	TEKRAR ET { <i>başarım</i> → 0, <i>zaman</i> → 0}: <ul style="list-style-type: none"> <4.1> Kameralardan anlık görüntülerin elde edilerek kaydedilmesi <4.2> Kaydedilen görüntülerden ortak alanlar ve özelliklerin çıkarılması <4.3> Ortak özelliklerin eşleştirilmesi ve panoramik görüntünün oluşturularak kaydedilmesi <4.4> EĞER kayıt yapılabildiyse <ul style="list-style-type: none"> <4.4.1> <i>başarım</i> → 1
	-e KADAR (<i>başarım</i> == 1)
<5>	Panoramik görüntüden yüz tespiti algoritmasının çağırılması
<6>	EĞER yüz tespit edilemediyse <ul style="list-style-type: none"> <6.1> Panoramik görüntüden şekil tespit algoritmasının işletilmesi <6.2> EĞER şekil de tespit edilemediyse <ul style="list-style-type: none"> <6.2.1> <i>çıkartım</i> → 0, <i>mesafe</i> →
	YOKSA <ul style="list-style-type: none"> <6.3> Tespit üzerinden H_O parametresinin çıkarılması <6.4> (2) numaralı denklemde D_O (<i>anlık insan-robot mesafesi</i> = $S(t)$) mesafesinin bulunması <6.5> <i>mesafe</i> → D_O

Tablo 2 (devamı). Uygulama için geliştirilen algoritmaya ait sözde kod

.....
<7> mesafe, zaman parametreleri ve (3) numaralı denklem ile asgari koruyucu ayırma mesafesinin ($S_p(t_a)$) hesaplanması
<8> Belirlenmiş olan güvenlik kuralları (dereceleri) çerçevesinde robotun bir sonraki hareketinin belirlenmesi
{
<8.1> EĞER güvenlik derecesinde bir değişiklik var ise
<8.1.1> robotun işletim programından bir sonraki hareketin belirlenmesi
<8.1.2> güvenlik derecesinin gerektirdiği eylem ile robotun sürülmesi
YOKSA
<8.1.3> harekete DEVAM
}
<9> Tüm parametrelerin sıfırlanması
<10> ADIM 4'e GERİ DÖN
SON { Güvenlik Algoritması }

5. SONUÇLAR

İnsan ile robotun birlikte çalışmasını sağlayarak fiziksel olarak insanı zorlayabilecek/yorabilecek işlerin robota devredilmesi ve insanın ise sadece yetenek/zekâ gerektiren hassas işleri yapması yoluyla yaratılan işbirliği sayesinde, üretimde esneklik, verimlilik, kapasite ve kalite artırılabilir. Bu birlikte çalışma formunda (ya da teknik tabiriyle insan-robot etkileşiminde) insan ve robot aynı ortamı paylaştığı için çarpma/çarpışma olasılığından dolayı en önemli sorun güvenliği sağlamak olmaktadır. Güvenlik, geleneksel olarak kafes sistemleri, lazer tarayıcılar, ışık bariyerleri gibi çeşitli donanımlarla sağlanmaktadır (Şekil 12.a). Fakat bu sistemler çalışma ortamını kısıtlamakta, insan ile robotun birlikte çalışmasında avantaj olarak öne sürülen esneklik faktörünü ortadan kaldırmaktadır.



Şekil 12:

Robot ve insan arasındaki etkileşimin güvenliğini sağlamak için kullanılan yöntemler
a. geleneksel kafes ve ışık perdesi yöntemi **b.** çalışmada önerilen görü temelli sistem

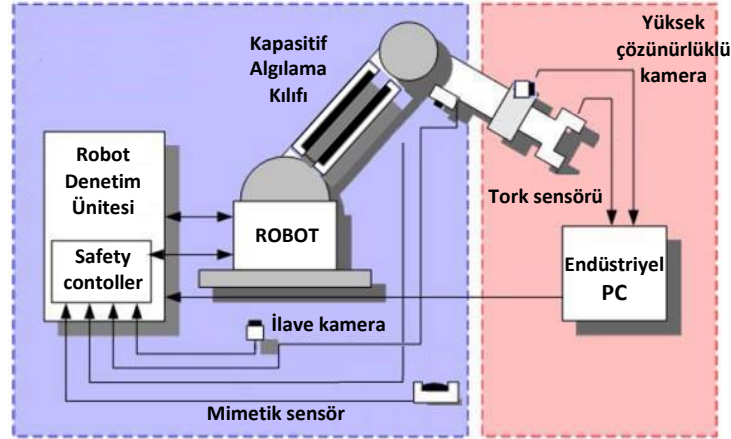
Çalışmamızda önerdiğimiz çözümde ise; kafes sistemini ve diğer önleyici sistemleri ortadan kaldırabilmek için kameralarla oluşturulmaya çalışılan görüntü işleme tabanlı sistem sayesinde robota bir nevi insana benzer görüş yeteneği kazandırılmaya çalışılmıştır. Bu noktada standart

kameralar ve görüntü işleme birimleri (single board computer) kullanılmasının nedeni; geleneksel robotlar üzerinde uygulanabilirliğinin yüksek olmasını sağlamaktır. Önceki bölümlerde belirtilen yöntemler ve kullanılan algoritmalar sayesinde Şekil 12.a’da görülen kafes sistemi ve ışık perdesi ortadan kaldırılarak Şekil 12.b’deki gibi robot üzerinde bir görünmez kalkan oluşturulabilmektedir. Bu alanın sınırları ve dışında yer alan güvenlik bölgeleri robotun türüne ve büyüklüğüne göre farklılaştırılabilmekte, tanımlanacak güvenlik kurallarına (yapılacak işe ve çalışma ortamına bağlı olarak değişebilmektedir) göre yeniden belirlenebilmektedir. Böylelikle daha esnek bir alan kullanım (kafes sistemi kullanan geleneksel yapılara göre) ortaya konularak çalışma alanından tasarruf edilebilmesi ve operatörler açısından rahat erişim imkanları yaratılabilecektir.

6. TARTIŞMA

Geliştirilen sistem, endüstriyel alanlarda yoğunlukla kullanılan standart çok eksenli robotların insan-robot etkileşimli çalışabilen formda yapılandırılabilmesi için gerekli olan dönüşümün düşük maliyetlerle gerçekleşmesi için bir örnek teşkil etmektedir. Bu çalışmanın ilerleyen aşamalarında (devamında):

- Daha yüksek özelliklere sahip kameralar kullanılarak elde edilen görüntüler üzerinden yapılan çıkarımlar daha keskin ve düşük hata ile gerçekleştirilebilir.
- Kameralardan elde edilen görüntülerin işlendiği birimler (kartlar) daha yüksek kapasiteli seçilerek işlem hızları ve dolayısıyla insan/robot pozisyonlarındaki belirsizlikler azaltılabilir.
- Güvenlik analizi gerçekleştirerek robotun hareketlerine karar veren denetim algoritmalarında modern ve akıllı metotlar kullanılarak performans artışı yakalanabilir.
- Robot üzerinde ve çevresinde Şekil 13’teki gibi konumlandırılacak akıllı ve yetenekli (smart) algılayıcılar ve sistemler ile (safely controller, tork sensörü, kapasitif algılama sensörü gibi) robotun işbirliği (etkileşim) seviyesi artırılabilir.



Şekil 13:

Çalışmanın sonraki aşamalarında yapılabilecek olası geliştirmeler

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonunca desteklenmiştir. Proje Numarası: 190Y008.

KAYNAKLAR

1. Augustsson, S., Gustavsson, L. ve Bolmsjö, G. (2014) “Human and Robot Interaction Based on Safety Zones in a Shared Work Environment”, *Proceedings of the 2014 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pp 118-119. doi: 10.1145/2559636.2563717
2. Bay H., Tuytelaars T. ve Van Gool L. (2006) “SURF: Speeded Up Robust Features” In: Leonardis A., Bischof H., Pinz A. (eds) *Computer Vision – ECCV 2006*. ECCV 2006. Lecture Notes in Computer Science, vol 3951. Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/11744023_32
3. Bobka, P., Germann, T., Heyn, J.K., Gerbers, R., Dietrich, F. ve Dröder, K. (2016) “Simulation Platform to Investigate Safe Operation of Human-Robot Collaboration Systems”, *Procedia CIRP* vol:44, pp 187–192. doi: 10.1016/j.procir.2016.01.199
4. Cervera, E., Garcia-Aracil, N., Martinez, E., Nomdedeu, L. ve del Pobol A.P. (2008) “Safety for a Robot Arm Moving Amidst Humans by Using Panoramic Vision”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2183-2188. doi: 10.1109/ROBOT.2008.4543530
5. Ebert, D.M. ve Henrich, D.D. (2002) “Safe Human-Robot-Cooperation: Image-Based Collision Detection for Industrial Robots”, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1826-1831. doi: 10.1109/IRDS.2002.1044021
6. Hartley, R.I. ve Kang, S.B. (2007) “Parameter-Free Radial Distortion Correction with Center of Distortion Estimation”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, volume: 29, issue: 8, pp. 1309–1321. doi: 10.1109/TPAMI.2007.1147
7. ISO (2016) “ISO/TS 15066:2016 – Robots and Robotic Devices -- Collaborative Robots”, Standart of the International Organization for Standardization (<https://www.iso.org/standard/62996.html>)
8. Krüger, J., Lien T.K. ve Verl, A. (2009) “Cooperation of Human and Machines in Assembly Lines”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol: 58, pp. 628–646. doi: 10.1016/j.cirp.2009.09.009
9. KUKA AG. (2019) “İnsan Robot İşbirliği” <https://www.kuka.com/tr-tr/teknolojiler/İnsan-robot-işbirliği>, erişim tarihi: 07.03.2019.
10. MathWorks, Inc. (2018), “MATLAB”, <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>, erişim tarihi: Mayıs 2019.
11. Mitsubishi Electric (2019), “RT Toolbox 2”, <https://www.mitsubishielectric.com/fa/products/rbt/robot/smerit/rt2/simulation.html>, erişim tarihi: Mayıs 2019.
12. Moriaka, M. ve Sakakibara, S. (2010) “A New Cell Production Assembly System with Human-Robot Cooperation”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol: 59 (1), pp 9-12 doi: 10.1016/j.cirp.2010.03.044
13. Nguyen, D.H., Hoffmann, M., Roncone, A., Pattacini, U. ve Metta, G. (2018) “Compact Real-time avoidance on a Humanoid Robot for Human-robot Interaction”, *Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 416-424. doi: 10.1145/3171221.3171245

14. Takakura, S., Murakami, T. ve Ohnishi, K. (1989) “An Approach to Collision Detection and Recovery Motion in Industrial Robot”, *Proceedings of the 15th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 421-426.doi: 10.1109/IECON.1989.69669
15. Tokçalar, Ö.K., İlhan, R., Şimşek, Ö. ve Durgun, İ. (2016) “Hibrit montaj sistemleri orta yük kapasiteli robotlarda insan-robot etkileşimi”, *Türkiye Robotbilim Konferansı – TORK 2016*
16. Viola, P. ve Jones, M. (2001) “Rapid Object Detection Using a Boosted Cascade of Simple Features”, *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.doi: 10.1109/CVPR.2001.990517
17. Yamada, Y., Suita, K., Imai, K. ve Ikeda, H. (1996) “A Failure-To-Safety Robot System for Human-Robot Coexistence”, *Robotics and Autonomous Systems*, volume: 18 issues: 1-2 pp. 283-291.doi: 10.1016/0921-8890(95)00075-5