

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİYEL BİR ROBOTUN GÜVENLİ VE İŞBİRLİKÇİ ÇALIŞMASINI
SAĞLAYACAK GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI SİSTEMİN GELİŞTİRİLMESİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Furkan DUMAN

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

TEMMUZ 2019

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİYEL BİR ROBOTUN GÜVENLİ VE İŞBİRLİKÇİ ÇALIŞMASINI
SAĞLAYACAK GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI SİSTEMİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Furkan DUMAN
(182081501)**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ekrem DÜVEN

TEMMUZ 2019

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 182081501 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Furkan DUMAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ENDÜSTRİYEL BİR ROBOTUN GÜVENLİ VE İŞBİRLİKÇİ ÇALIŞMASINI SAĞLAYACAK GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI SİSTEMİN GELİŞTİRİLMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

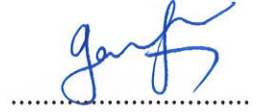
Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Ekrem DÜVEN**
Bursa Teknik Üniversitesi



Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Fahri VATANSEVER**
Bursa Uludağ Üniversitesi



Doç. Dr. Gökhan GELEN
Bursa Teknik Üniversitesi



Savunma Tarihi : 3 Temmuz 2019

FBE Müdürü : **Doç. Dr. Murat ERTAŞ**
Bursa Teknik Üniversitesi

.....
...../...../.....

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Furkan DUMAN

İmzası :

XXXXXX



Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmam boyunca bana desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ekrem DÜVEN başta olmak üzere bölüm hocalarıma, arkadaşlarıma ve hayatım boyunca beni her anlamda destekleyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamı 190Y008 proje numarası altında destekleyen Bursa Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Temmuz 2019

Furkan DUMAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
KISALTMALAR.....	vii
SEMBOLLER.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	14
1.1 Literatür Araştırması	14
1.2 Tezin Amacı ve Organizasyonu	19
2. MATERYEL ve YÖNTEM.....	21
2.1 Kullanılan Temel Yöntemler	21
2.1.1 Özellik tabanlı anahtar nokta çıkarımı.....	21
2.1.2 Haar Cascade algoritması	23
2.1.3 Bulanık mantık	24
2.2 Sistemde Kullanılan Donanımlar	26
2.2.1 Endüstriyel robot	26
2.2.2 USB kamera	27
2.3 Örnek Montaj Düzenegi	27
2.4 Görüntülerin Elde Edilmesi	30
2.4.1 SURF tanımlayıcısı ile görüntü birleştirme	32
2.4.2 Kamera kalibrasyonu	34
2.5 Görüntülerden Mesafe Çıkarımı Yapılması.....	35
2.6 Güvenlik Standartlarına Göre Hareket Kararı	41
2.7 Robot Üzerinde Koşturulan Programın Oluşturulması	45
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	47
4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER	52
KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ.....	57

KISALTMALAR

3B	: Üç Boyutlu
AK	: Az Kritik
AN	: Az Normal
AY	: Az Yavaş
ÇG	: Çok Güvenli
ÇK	: Çok Kritik
cm	: Santimetre
CPU	: İşlemci
ÇY	: Çok Yavaş
G	: Güvenli
HU	: Hızlı Uzaklaşma
HY	: Hızlı Yaklaşma
K	: Kritik
KS	: Kesin Sabit
N	: Normal
PC	: Personal Computer (Bilgisayar)
RGB	: Red/Green/Blue (Kırmızı/Yeşil/Mavi)
S	: Sabit
SD	: Sabit Durma
SIFT	: Scale-Invariant Feature Transform (Ölçek-Değişimsiz Özellik Dönüşümü)
SURF	: Speeded Up Robust Features (Hızlandırılmış Güçlü Özellikler)
T	: Tehlikeli
TCP/IP	: Transmission Control Protocol/Internet Protocol (İletim Denetimi Protokolü / Internet Protokolü)
U	: Uzaklaşma
USB	: Universal Serial Bus (Evrensel Seri Veriyolu)
Y	: Yaklaşma
Y	: Yavaş
YU	: Yavaş Uzaklaşma
YY	: Yavaş Yaklaşma

SEMBOLLER

D_G	: Görüntünün Mesafesi
D_O	: Objenin Mesafesi
f	: Odak Uzaklığı
H_G	: Görüntünün Boyu
H_{G-cm}	: Görüntünün Santimetre Cinsinden Boyu
H_{G-px}	: Görüntünün Piksel Cinsinden Boyu
H_O	: Objenin Boyu



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Beş farklı insanın kafasının önden ve yandan uzunlukları.....	37
Çizelge 2.2 : Bulanık mantık kural çizelgesi.	44
Çizelge 2.3 : Bulanık mantık fonksiyonlarının anlamı.	44



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : İnsan ve robotun birlikte çalışma senaryoları [33].	21
Şekil 2.2: Döndürmeye karşı değişmeyen köşe noktaları.	22
Şekil 2.3: Haar cascade sınıflandırıcı özellikleri [37].	24
Şekil 2.4 : Çeşitli üyelik fonksiyonları.	25
Şekil 2.5 : Endüstriyel robot ve öğretim kumandası [31].	26
Şekil 2.6 : a. Webcam model 1 b. Webcam model 2 [41].	27
Şekil 2.7 : Kurulan montaj düzeneğinin prototipi.	28
Şekil 2.8 : Kamera birleştirme parçası.	29
Şekil 2.9 : Kamera sistemi ile robot bağlantı parçası.	29
Şekil 2.10 : Kameraların robot üzerine konumlandırılmış hali.	29
Şekil 2.11 : Oluşturulan sistemin genel görüntüsü.	30
Şekil 2.12: Kamera birleştirme parçalarının birleştirilmiş hali.	30
Şekil 2.13 : Şekil 2.12'deki 1 numaralı aparata takılı kameradan alınan orijinal imge.	31
Şekil 2.14 : Şekil 2.12'deki 2 numaralı aparata takılı kameradan alınan orijinal imge.	31
Şekil 2.15 : Şekil 2.12'deki 3 numaralı aparata takılı kameradan alınan orijinal imge.	31
Şekil 2.16 : Uç uca eklenmiş çevre görüntüsü.	32
Şekil 2.17 : Tanımlayıcı noktaların imgeler üzerinde gösterimi.	33
Şekil 2.18 : 1 ve 2 no'lu görüntülerindeki eşleşen noktaların gösterimi.	33
Şekil 2.19 : 2 ve 3 no'lu görüntülerdeki eşleşen noktaların gösterimi.	33
Şekil 2.20 : Elde edilen panoramik çevre görüntüsü.	34
Şekil 2.21 : Dama tahtasının kalibrasyondan önceki (a) ve sonraki (b) hali [43].	34
Şekil 2.22 : Bir binanın kalibrasyondan önceki (a) ve sonraki (b) hali [43].	34
Şekil 2.23 : Dama tahtası ile kalibrasyon işlemi.	35
Şekil 2.24 : Kamera kalibrasyon işlemi esnasında alınan görüntüler.	35
Şekil 2.25: Görüntü üzerinden objenin robota olan mesafesini hesaplamada kullanılan optik düzen	36
Şekil 2.26 : İnsan ile robot arasındaki mesafenin insan başı tespit edilerek belirlenmesi.	38
Şekil 2.27 : Üçgen şekil içeren panoramik çevre görüntüsü.	38
Şekil 2.28 : Üçgen şekil içeren imgenin mavi alt uzayı.	39
Şekil 2.29 : Üçgen şekil içeren gri tonlamalı panoramik çevre görüntüsü.	39
Şekil 2.30 : Fark görüntüsü (Şekil 3.21-Şekil 3.22).	39
Şekil 2.31 : Siyah beyaz tonlamalı fark görüntüsü.	40
Şekil 2.32 : İnsan ile robot arasındaki mesafenin üçgen şekil tespit edilerek belirlenmesi.	40
Şekil 2.33 : ISO 15066 standardına göre işbirlikçi çalışma için robot hareketleri [46].	41

Şekil 2.34: Bulanık mantık kontrolü için oluşturulan zahiri bölgeler.	42
Şekil 2.35 : Mesafe için üyelik fonksiyonu.....	42
Şekil 2.36: Yaklaşım basamaklarının gösterimi.	42
Şekil 2.37 : Yaklaşım için üyelik fonksiyonu.	43
Şekil 2.38 : Hız için üyelik fonksiyonu.	44
Şekil 2.39 : Bulanık denetim yüzeyi.....	45
Şekil 2.40 : Hareket ve hız programının işlem adımları.	46
Şekil 3.1 : Gerçekleştirilen yazılıma ilişkin algoritmik diyagram.....	48
Şekil 3.2 : Ortak çalışma alanına parça bırakma senaryosu.....	49
Şekil 3.3 : Şekil 3.2’deki senaryonun mesafe ve yaklaşım verisine göre robot hızı. .49	
Şekil 3.4 : Ortak çalışma alanına parça bırakma senaryosu (tehlikeli alan ihlali).	50
Şekil 3.5 : Şekil 3.4’deki senaryonun mesafe ve yaklaşım verisine göre robot hızı. .50	
Şekil 3.6 : Operatörün robotun önünde paralel olarak ilerleyip geçtiği senaryo.....	51
Şekil 3.7 : Şekil 3.6’deki senaryonun mesafe ve yaklaşım verisine göre robot hızı. .51	
Şekil 4.1 : Robot ve insan arasındaki etkileşimin güvenliğini sağlamak için kullanılan yöntemler a. geleneksek kafes ve ı ışık perdesi yöntemi, b. çalışmada önerilen görü temelli sistem.....	52

ENDÜSTRİYEL BİR ROBOTUN GÜVENLİ VE İŞBİRLİKÇİ ÇALIŞMASINI SAĞLAYACAK GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI SİSTEMİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

İnsan ve robotun birlikte çalışması ile yaratılan iş birliği 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 ekipmanlarla sağlanmaktadır. Ancak bu sistemler çalışma ortamını kısıtlamakta, insan ile robotun birlikte çalışmasında avantaj olarak öne sürülen esneklik faktörünü ortadan kaldırmaktadır. Bu çalışmada, kafes ve diğer önleyici sistemleri ortadan kaldırabilmek için robot üzerine konumlandırılan kamera ve donanımlar ile oluşturulmaya çalışılan görüntü işleme tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur. Kullanılan kamera ve donanımların ihtiyaçları sağlayacak nitelikte, ancak düşük maliyetli standart ekipmanlardan seçilmesine dikkat edilmiştir. Böylelikle standart endüstriyel robotların etkileşime uygun formda çalıştırılabilmesi 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 özellik tabanlı 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 lazerli ve kafesli sistemlere göre avantajı ele alınmış ve ileride yapılabilecek çalışmalara ilişkin öngörüler verilmiştir.

Anahtar kelimeler: İnsan-robot etkileşimi, robotik sistemlerde güvenlik, robot görüşü.

DEVELOPING THE IMAGE PROCESSING BASED SYSTEM WHICH PROVIDES A INDUSTRIAL ROBOT TO WORK SAFELY AND COOPERATIVELY

SUMMARY

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. In this study, an image processing-based approach which is tried to be formed with the camera and hardware placed on the robot to eliminate cage and other preventive systems is presented. The camera and equipment used in the system were chosen to be of lowcost 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 feature based 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 advantages of the developed system compared to laser and lattice systems are discussed and predictions for future studies are given.

Keywords: Human-robot interaction, safety in robotic systems, robot vision.

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 giderek güçleşmektedir. Çeşitlilik talebini karşılamak için makineye farklı bir görev yüklemek yüksek maliyetli ve zaman alan bir süreçtir [1]. Bu nedenle ürün çeşitliliğinde esneklik sağlamak ve verimliliği artırmak için bu tarz makineler yapay zeka, robot görüşü, insan-robot etkileşimi gibi teknikler ile daha akıllı/yetenekli sistemlere dönüştürülmektedir.

İnsan robot iş birliği, özel üretim makinelerine göre daha esnek bir otomasyon yaklaşımıdır. İnsan ile robotun birlikte çalışmasının avantajları; fiziksel olarak insanı zorlayabilecek ve yorabilecek işlerin robota devredilerek, insanın sadece yetenek/zeka gerektiren hassas işleri yapması, aynı zamanda da denetleyici olarak ortamda bulunması olarak sıralanabilir. Bu işbirliği sayesinde insan operatörünün fiziksel olarak yıpranması en aza indirilmekte, üretimde esneklik ve verimlilik artırılmakta ve katma değerli işlemlerin tipe özel veya ürünle ilgili yatırım gerektirmeden yüksek kalitede yapılması sağlanmaktadır [2].

İnsan robot işbirliğinde insan ve robot aynı ortamı paylaştığı için çarpma/çarpışma olasılığından dolayı en önemli sorun güvenlidir [3]. Güvenlik ise genel olarak kafes sistemleri, lazer tarayıcılar gibi çeşitli ekipmanlar ile 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.

1.1 Literatür Araştırması

1979 yılında meydana gelen bir iş kazası sonucu endüstriyel bir robot, bir işçinin ölümüne sebep olmuştur [4]. Bu olayla birlikte aynı çalışma ortamını paylaşan insanlar ve endüstriyel robotların güvenliği konusu ilk defa 1980'li yıllarda ele alınmaya

başlanmıştır. 1983 yılında yapılan güvenlik çalışmalarına göre, bir robot sisteminin güvenli olabilmesi için bir insanın yaklaşımını tespit edip buna göre tepki vermesi gerektiği sonucuna varılmıştır [5].

1985'te Graham ve Meagher [6], işbirlikçi alanlarda güvenli olmayan koşullar meydana gelmesi durumunda robot sisteminden bağımsız bilgisayar kontrollü çeşitli sensörlerle düzeltici önlemler almışlardır.

1989'da Takakura ve diğerleri [7], tork sensörlü bir robot manipülatörü tasarlamışlar ve temas algılanması üzerine çalışan bir algoritma yazmışlardır. Bu yaklaşım sayesinde çarpışma olması halinde hem robotun hem de çarptığı nesnenin veya kişinin zarar görmemesi sağlanmıştır. Robotun hızının azaltılması ve kuvvetin sönümlenmesi nedeniyle tork sensörleri günümüzde bile birçok robot uygulamasında kullanılmaktadır.

1996'da Yamada ve diğerleri [8], robotun nesneye çarpmasını engellemek için kapasitif sensörleri kullanmışlardır. Bu yaklaşım sayesinde robot engeli dokunmadan çevresine yaklaştığında algılayabilmiş ve çarpışma engellenmiştir. Nesneyi çarpmadan önce algılamak büyük bir gelişme olmasına rağmen bu yaklaşımdaki sorun kapasitif sensörlerin farklı malzemelere farklı tepki vermesidir.

2002'de Heiligensetzer ve Wörn [9] [10], kapasitif yakınlık sensörleri ve haptik cihazlarla donatılmış bir robot içeren sistem tasarlamışlardır. 2004'de Heiligensetzer [11] kapasitif yakınlık ve robot parçalarını yastıklayarak(cushioning covering) kullanarak yaklaşımı sürdürmüştür. Bu çalışmada kullanılan robot çarpışma emici malzemeler ve kapasitif sensörler ile donatılmıştır. Bu malzemeler çarpışmanın çalışanlara zarar vermeden önce tespitini mümkün kılmıştır. Fakat bu sistemlerde olduğu gibi kuvvet algılayıcıları kullanılan sistemlerin insanlara zarar vermemesi için robotlar düşük hızlarda çalıştırılmışlardır. Heiligensetzer aynı zamanda robotları bu malzeme ile kaplamanın patentini almıştır.

Kulic ve Croft [12], insan ile robot etkileşiminde güvenliğini sağlamak için matematiksel bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu yaklaşımda empedans etkisi ile robota en yakın engel veya insan tespit edilmekte, engel veya insan ile robotun arasındaki mesafe ölçülmekte ölçülen bu mesafeye ise tehlike endeksi adı verilmektedir. Güvenlik sistemi her zaman tehlikeyi en yüksek kritik noktada azaltmaya çalıştığı için, yalnızca en yakın engeller göz önünde bulundurulmuştur; Robotun uzağındaki ilave engeller sistem davranışını

etkilememektedir. Robotun iki tarafında da herhangi bir engel yoksa, tehlike endeksi sıfır olduğundan robot planlandığı gibi ilerlemekte, engel yalnızca robotun bir tarafındaysa ve tehlike endeksi sıfır değilse, robotu tehlike endeksiyle orantılı olarak engelden uzağa doğru iterek sanal bir kuvvet (FSE) oluşturulmaktadır. Sanal kuvvet ile birlikte robota yeni bir rota belirlenip çarpışma engellenmektedir.

Bir kamera ağıyla birleşmiş, insan ve robotun bir arada bulunduğu sistem ilk defa doksanlı yılların başında Baerveldt tarafından [13]'de oluşturulmuştur. Bu çalışmada referans görüntüleri kullanılarak insan operatörleri ve diğer engeller tespit edilmiştir. Ancak bu yaklaşımın hesaplama zamanı oldukça yüksektir ve hafıza gereksinimi açısından da bu yaklaşım yetersiz kalmaktadır.

Brecht ve diğerleri [14], endüstriyel bir robotu korumak için yapay görüş tabanlı güvenlik sistemini önermişlerdir. Robot manipülatörünün hareket doğrultusunda dinamik bir engelle karşılaşması durumunda engel tespit edilip engelin etrafından dolaşacak şekilde yeni bir rota çizilmektedir. Yeni rota bulanık tabanlı kontrol algoritması ile çizilmektedir. Engelin tespit edilmesi için tavana yerleştirilmiş statik bir kamera yardımıyla küresel bir görüş sistemi oluşturulmuştur. Stereoskopik yeniden kurma (stereoscopic reconstruction) algoritması ile engellerin konumu ve boyutları elde edilmiştir.

Steinhaus ve diğerleri [15], hem yerel hem de küresel sensörlerin bir kombinasyonu olan bir sistem geliştirmişlerdir. Robotun tepesine bir lazer algılayıcıyı ve kafeslerin köşesinde olacak şekilde iki güvenlik kamerası yerleştirmişlerdir.. Ayrıca yerel rota planlamasını (local path planning) oluşturmak için referans görüntülerini ve dağınık çevre modelini (distributed environmental model) kullanmışlardır.

Winkler ve Suchy [16], endüstriyel robotların çarpışmadan kaçınmasına yönelik bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu yaklaşım yapay potansiyel (artificial potential) ve kuvvet alanları yöntemine (force fields) dayanmaktadır. Kuvvet alanı engellerin üzerine yerleştirilen sanal yüklerle (virtual charges) üretilmekte, sanal kuvvet (virtual force) ise çarpışmayı önlemek için manipülatör rotasının değiştirilmesi ile robota etki etmektedir. Engellerin pozisyonları, basit bir USB kamera kullanılarak görüntü işleme ile sürekli olarak belirlenmekte, böylece çarpışmadan kaçınmaya ek olarak hareketli engellerle örneğin diğer manipülatörlerle de çarpışma önlenmektedir.

Ebert ve Henrich [17], güvenliğin sağlanması için dört kameralı bir sistem tasarlamışlardır. Robotun çalışma alanının temsili görüntüsü kameralardan elde edilen görüntü setleri ile oluşturmuştur. Geri-kestirim (back-projection) gibi yöntemler ile ortamın üç boyutlu modeli oluşturmuştur. Daha sonra oluşturulan model kullanılarak boş ve dolu alanlar belirlenmiştir. Eğer robot belirlenen rotada giderken herhangi bir nesneye çarparsa ilgili alanlar dolu olarak işaretlenmiş, herhangi bir çarpışma olmadan belirlenen konuma ulaştı ise ilgili alanlar boş olarak işaretlenmiştir. Bu şekilde oluşturulan model üzerinde engeller tespit edilmiş olmaktadır.

2009'da Krüger ve diğerleri [18] tavana yerleştirdiği üç RGB (red,green,blue) kamera sayesinde insan operatörü ile robotun temas edebileceği alanları izlemişlerdir. Her kamera farklı bir bilgisayara bağlıdır. İnsan operatörünün uç noktaları ten rengi bileşeni kullanılarak ve robotun geometrisi, kameralar yardımıyla iki boyutlu olarak algılanmıştır. Her kameradan elde edilen iki boyutlu veriler daha sonra sahnenin üç boyutlu bir modelini hesaplayan bir bilgisayara aktarılmıştır. Bu model, çalışan ile robot arasındaki mekânsal mesafeyi belirlemek için kullanılmakta ve hesaplanan mesafeye göre robotun kontrol programına müdahale edilmektedir.

Cervera ve diğerleri [19], robotun tabanına yerleştirilen ve tavana doğru bakan iki adet balıkgözü kamera ile 360°'lik panoramik bir görüntü oluşturulup robotun yakın çevresinin güvenliği sağlamayı amaçlamışlardır. Güvenlik problemiyle başa çıkmak için iki farklı görsel uygulama sunulmuştur. Bir yandan, manipülatörün hareketini izleyebilen balıkgözü kameralarına dayanan görsel denetim yaklaşımı, diğer taraftan ise robot çalışma alanında ve çevresindeki alanda hareket eden herhangi bir nesneyi izlemek için global bir aydınlatma değişikliği tespiti ile birleştirilmiş uyarlamalı bir arka plan modellemesi geliştirmişlerdir.

2012'de De Luca ve Flacco [20], çalışmalarında insan ve robotun temas halinde olmasını ve istenmeyen çarpışmalardan kaçınması amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda insan ve robotun bir arada güvenli bir şekilde bulunması için çok katmanlı bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Hem propriozeptif (proprioceptive) bilgiler içeren kalıntı tabanlı bir yöntem kullanarak hem de dış duyarlı (exteroceptive) sensör tarafından verilen derinlik bilgisini kullanarak çarpışmadan kaçınma yöntemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen kontrol algoritmaları, bir KUKA LWR-IV [21] manipülatöründe uygulanmış ve robotun bir insan varlığında bir görevi yerine getirdiği üç boyutlu görüntü alabilen bir kamera ile donatılmış bir senaryoda test edilmiştir.

Aynı zamanda bu çalışmada, güvenli birlikte çalışma koşullarında, insan operatörün, hareketlerini kullanarak güvenli fiziksel işbirliği aşamalarını etkinleştirilmekte ve devre dışı bırakılabilmektedir.

Ostermann [22], dinamik nesnelerden kaçınmak için üç boyutlu kamera yardımıyla robotik görüntü sistemi inşa etmiştir. Bu robotik görüntü sistemi; bir robot, bir sensör ve mantıksal bir işlem biriminden meydana gelmektedir. Donanım tarafında, bir 3B kamera çalışma alanı hakkında veri sağlamaktadır. Bilgisayarda çalışan kontrol programı ile elde edilen 3B verilerin analizine dayanarak, bağlı robota komutlar gönderilmekte ve hareketleri kontrol edilmektedir.

2010'da Arai ve diğerleri [23], Endüstriyel çift kollu bir robotun kafessiz bir düzenekte insan ile işbirliğini araştırmışlardır. Lazer tarayıcılar, derinlik sensörleri ve PILZ [24] tarafından geliştirilen ve içerisinde kamera barındıran SafetyEye adlı cihaz ile kafessiz insan-robot etkileşimi stratejisi kurmuşlardır. Düzeneği oluştururlarken insan operatörünün stresini göz önünde bulundurarak kullanıcı merkezli bir tasarıma odaklanmışlardır.

2010'da Morioka ve Sakakibara [25], robotların ve insan operatörlerinin kendi özelliklerine en uygun işleri üstlendikleri yeni bir hücre üretim sistemi tasarlamaya amaçlamışlardır. Bu yeni sistem parça besleme istasyonu (parts feeding station), montaj istasyonu (assembly station) ve güvenlik yönetimi istasyonu (Safety management technology) olmak üzere üç alt sistemden oluşmaktadır. Güvenlik yönetim istasyonu incelendiğinde insan operatörünün dâhil olabileceği alan ışık perdesi ile kontrol edilmektedir. İnsan operatörünün bir uzvu alana girdiğinde ışık perdesi bozulur ve robot manipülatörünün hızı ve hareket alanı kısıtlanmaktadır. Hız kısıtlaması sayesinde manipülatörlerin insan operatörüne sert bir şekilde vurması önlenmekte, hareket aralığı kısıtlaması ile de insan operatörünün manipülatörler ve çevresindeki cihazlar arasında sıkışıp kalmasının önüne geçilmektedir. Yukarıda belirtilen kısıtlamalar robot kontrol ünitesinde iki bağımsız CPU tarafından denetlendiğinden, yüksek güvenilirlik mümkün kılınabilmektedir.

Safeea ve diğerlerinin [26] çalışmasında robotu ve insan operatörünü silindirler ile temsil ederek aralarındaki mesafeyi bulmayı amaçlamışlardır. Geometrik temel yapılar arasındaki minimum mesafenin silindir olarak hesaplanması için yeni bir yöntem önermişlerdir. Silindirler, insanları, robotları ve nesneleri genel olarak temsil etmek

için iyi bir yaklaşım sağladıkları için seçilmiştir. Önerilen yöntem kullanılarak sistem robotun insan operatörüne en yakın noktasını bulmakta ve buna göre potansiyel saha yöntemini (potential field method) [27] kullanarak yeniden yörünge ayarlaması çevrimiçi olarak gerçekleştirilmektedir. böylece insan operatörüne ve robot arasında çarpışmadan kaçınma sağlanmaktadır.

Augustsson ve diğerleri [28] ise çalışmalarında ahşap prefabrik müstakil ev için duvar üreten bir firmada elemanların montajı, vidalama, çivileme gibi işlemler yapan robot sistemlerinde güvenlik denetiminin yapılması için içerisinde 3B kamera ve kontrol ünitesi içeren SafetyEye [24] adlı cihazı kullanmışlardır. SafetyEye kullanılarak emniyet bölgeleri oluşturulur. Emniyet bölgelerine giriş yapıldığında PLC aracılığıyla robotlara gerekli bilgiler gönderilmiştir.

Bobka ve diğerleri [29] çalışmasında insan robot etkileşimi sistemlerinin güvenlik ve verimlilik açısından değerlendirilmesini sağlayan bir yazılım aracı geliştirilmiştir. Endüstriyel robot modelleri, geometrik, kinematik ve dinamik terimlerle yazılımda tanımlanmaktadır. Ayrıca bu yazılımda ortam ve işyerleri modelleri, gerçek ve öngörülen alan ve nesne modelleri, gerçekçi hareket dizilerine sahip insan modelleri yer almaktadır. Derinlik kamerası kullanılarak insan hareketleri ve çalışma ortamı modelleri simülasyon programına eklenmektedir. Simülasyonda insan veya nesne ile robot arasındaki mesafe iki nokta arasındaki Öklid mesafe denklemi kullanılarak bulunmakta ve hız ayarlaması yapılmaktadır.

Günümüzde insan robot etkileşimi için üretilmiş olan KUKA LBR iiwa [1], ABB YuMi [30] ve diğerleri gibi modern robotik sistemler, insan operatörünü ve kendilerini doğrudan veya dolaylı tork izlemesi kullanarak tehlikeli kuvvetlerden korumaktadır. Ancak bu sistemler keskin, sivri veya ayırıcı nesnelere karşı sınırlı koruma sağlayabilmektedir [29].

1.2 Tezin Amacı ve Organizasyonu

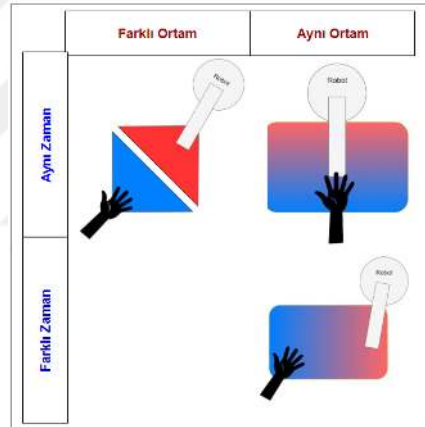
Bu tez kapsamında standart bir çok eksenli endüstriyel robotun içerisinde çalıştığı kafes ve diğer geleneksel önleyici sistemlerin görüntü işleme tekniklerine dayalı bir çözüm ile ortadan kaldırılması ve robotun bir nevi işbirlikçi hale getirilmesi amaçlanmıştır. Endüstriyel robot olarak Mitsubishi Electric firmasının RV-7FL-D modeli 6 eksenli robotu [31] kullanılmıştır. Bu amaçla öncelikle insan ve robotun olası

birlikte çalışma durumlarını yansıtan senaryolar oluşturulmuştur. Bu senaryolar temel olarak insan ve robotun aynı ortamı aynı amaç ile ya da farklı amaç için kullanmaları ve aynı ortam aynı zaman ya da farklı zamanlarda kullanmaları üzerine kurgulanmıştır. Ardından insan ve robotun güvenli bir şekilde senaryolarda yer alabilmeleri için robotun üzerine konumlandırılacak ve görüntü temelli çalışacak donanım ve yazılım geliştirilmiştir. Bu sistemden elde edilen insan operatörünün konum ve rol bilgisi kullanılarak robotun anlık hızı ve çalışma modu bulanık mantık tabanlı denetim ile belirlenmiş ve ilgili uluslararası güvenlik standartlarını sağlayacak şekilde uygulanmıştır. Görüntü işleme ve değerlendirme yazılımı ile denetim algoritmaları MATLAB programı [32] kullanılarak bir PC üzerinde yürütülmektedir. Elde edilen veriler TCP/IP protokolü kullanılarak ethernet üzerinden robota gönderilmektedir.

Bu tez dört ana bölümden meydana gelmektedir. İlk bölümde, literatür araştırmasını ve tezin amacı ile kapsamını bulundurun giriş kısmı bulunmaktadır. İkinci bölümde, tez çalışmasında kullanılan temel yöntemler, donanımlar, kurulan deney düzeneği görüntülerin elde edilmesi, mesafe çıkarımı yapılması ve güvenlik standartlarına göre hareket çıkarımı anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde, oluşturulan sistemin örnek uygulamalarına yer verilmiştir. Dördüncü bölümde ise çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler sunulmaktadır.

2. MATARYEL ve YÖNTEM

İnsanlar ve robotlar arasındaki iş birliği olası çalışma senaryoları zamansal ve mekansal ayrıma göre Şekil 2.1’de gösterildiği gibi dörde ayrılır. Bunlar farklı zamanlarda ve farklı ortamlarda çalışan insanlar ve robotların çalışma modu, aynı anda ve farklı mekanlarda çalışan insanlar ve robotların çalışma içeriği birbiriyle eşleştirilebildiğinden otarşik (kendi kendine yeterli olma) çalışma modu, aynı çalışma ortamında çalışan insanlar ve robotların senkronize çalışma modu ve aynı çalışma ortamında insanlar ve robotlar eşzamanlı olarak çalıştığında işbirlikçi çalışma modudur [33].



Şekil 2.1 : İnsan ve robotun birlikte çalışma senaryoları [33].

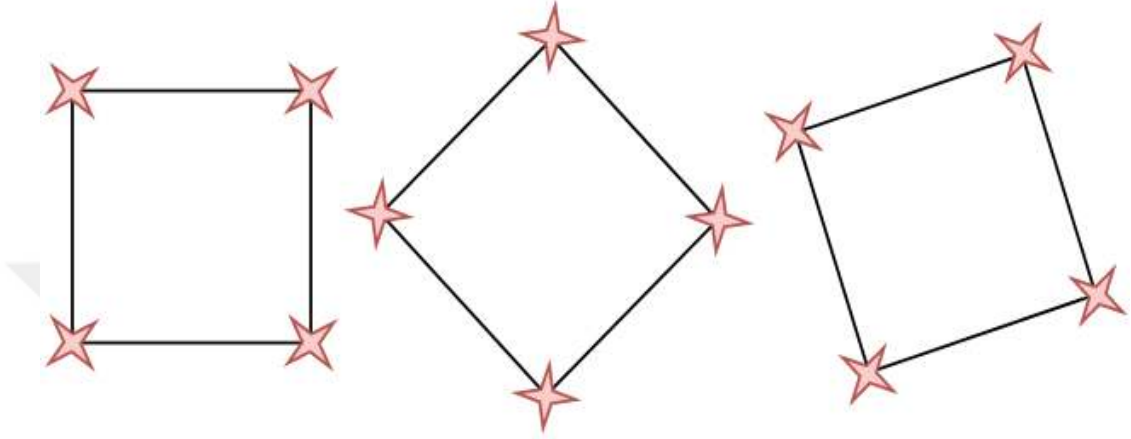
Bu tez kapsamında yapılan çalışmada, parça montajı yapan endüstriyel robota insan operatörü parça temini yapmaktadır. Bu işlem sırasında insan operatörü robotun çalışma alanına dahil olmaktadır. Aynı zamanda ve aynı çalışma ortamında gerçekleşen bu senaryo aynı zaman, aynı ortam işbirlikçi çalışma senaryosuna örnektir.

2.1 Kullanılan Temel Yöntemler

2.1.1 Özellik tabanlı anahtar nokta çıkarımı

Bilgisayar görüşü alanındaki birçok uygulamanın bir kısmı, aynı nesnenin veya sahnenin iki görüntüsü arasındaki ortak noktaları tespit etmektir. Ortak noktalar

genellikle görüntüdeki köşeler ve lekeler gibi ayırt edici özellikteki noktalar olmaktadır. Aynı görüntü üzerinde aynı noktaların elde edilebilmesi için noktaların özelliklerinin döndürme ve ölçeklendirme işlemine karşı değişmemesi gerekmektedir. Örnek bir görüntü döndürme işlemine tabi tutulursa köşe özellikleri bozulmayacağından döndürmeye karşı değişmeyen özelliklerden biri belirlenebilmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2: Döndürmeye karşı değişmeyen köşe noktaları.

Fakat bu köşelerin özellikleri ölçeklendirme işlemi sonucunda değişebilmektedir. Bu yüzden David G. Lowe, [34]'de bir görüntünün döndürme, ölçeklendirme ve aydınlatmaya karşı değişmeyen bölgesel özelliklerini belirleyip tanımlayan SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) adında bir tanımlayıcı önermiştir [35].

SIFT algortiması toplam dört adımda gerçekleşmektedir:

1. Ekstremum noktaları ölçek uzayında bulma.
2. Anahtar noktanın yerine tespit etme.
3. Anahtar noktanın oryantasyonunu belirleme.
4. Anahtar nokta tanımlayıcılarını oluşturma.

İlk olarak anahtar noktaların tespit işlemi için imgeye farklı ölçeklerde gaussian filtresi uygulanır. Gauss filtresi ile yumuşayarak bulanık hale gelen bu imgelerin farkı alınarak gaussian farkı (Difference of Gaussian) elde edilmektedir. Gaussian farkının ekstremum noktaları anahtar noktaları vermektedir. Bu işlemle birlikte çok fazla anahtar nokta elde edilmektedir. Bir sonraki işlemde ise iyi konumlanmamış ve düşük zıtlığa sahip noktalar elimine edilir. Daha sonra kalan anahtar noktaların oryantasyonu

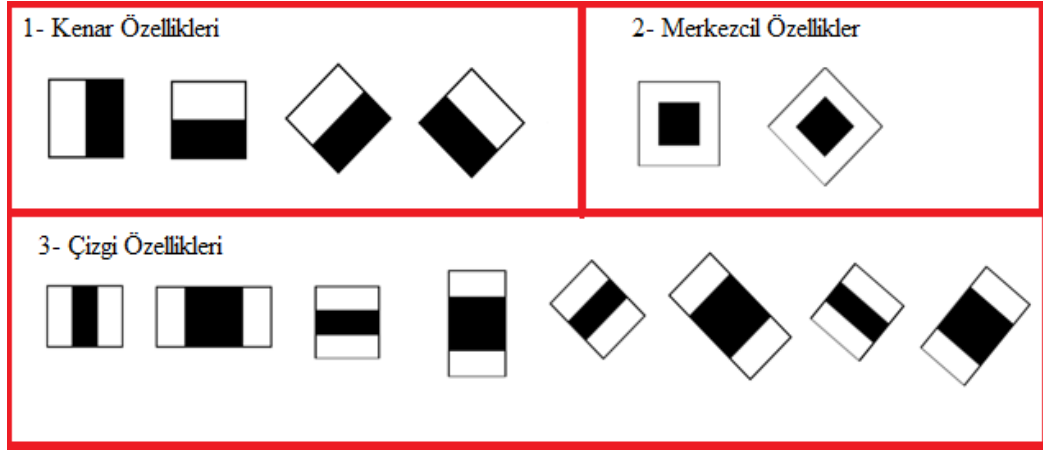
belirlenir. Oryantasyonu ve konumları bilinen bu noktalar anahtar nokta tanımlayıcı veya ilgi noktaları şeklinde adlandırılır [34].

SIFT algoritması yapılan uygulamalarda yavaş kaldığı için 2006 yılında Bay H. ve arkadaşları tarafından, [36] SURF (Speeded-Up Robust Features) algoritması geliştirilmiştir. SURF tanımlayıcısı da döndürme ve ölçeklendirme ile imgede meydana gelen değişikliklerden etkilenmemektedir. SURF tanımlayıcısı geliştirilirken kısmen SIFT tanımlayıcısından esinlenilmiştir. SIFT tanımlayıcısından farkı ise daha hızlı, belirgin ve tekrarlanabilir olmasıdır. SURF tanımlayıcısı detektör olarak Fast-Hessian detektörünü kullanmaktadır. SURF detektörü Hessian matrisinin determinantına dayanmaktadır. Hessian matrisinin determinantının maksimum olduğu konum görüntü bölgelerinin (blob) elde edilmesinde kullanılmaktadır. Ölçek ve konum seçimi için iki farklı yöntem kullanmaktan ziyade, her ikisi içinde Hessian matrisinin determinantı kullanılmaktadır. Diskriminant olarak da adlandırılan Hessian matrisinin determinantı görüntünün 2. dereceden türevi yardımıyla görüntüdeki maksimum ve minimum noktaların bulunmasında kullanılmaktadır [36]. Bu şekilde LoG(Laplacian of Gaussian) ile görüntünün 2. Dereceden türevi alınarak ölçek uzayında sabit değişmeyen kilit noktalar yani ilgi noktaları elde edilmektedir.

2.1.2 Haar Cascade algoritması

Viola ve Jones isimli araştırmacılar tarafından geliştirilen ve “Haar Cascade Sınıflandırıcı” olarak adlandırılan algoritma herhangi bir nesneyi, el, baş, yüz gibi insan uzuvlarını hızlı bir şekilde tespit etmek için kullanılmaktadır [37]. Sınıflandırıcı çalıştırılmadan önce eğitilmesi gerekmektedir. Sistem eğitilirken pozitif ve negatif imgeler kullanılır. İçerisinde tespit edilecek nesnenin bulunduğu imgelere pozitif, bulunmadığı imgelere ise negatif imgeler adı verilir. Sistem eğitilirken, program aracılığıyla pozitif imgelerde tespit edilecek nesne dikdörtgen içine alınarak işaretlenir. Sınıflandırıcının doğru bir şekilde çalışması için nesnenin doğru bir şekilde sınırlandırılması gerekmektedir. Hedef nesne işaretlendikten sonra Şekil 2.3’de gösterilen özellikler kullanılarak öznitelikteki siyah alanların piksel değerleri toplamı ile beyaz alanların piksel değerleri toplamının farkı sonucunda özniteliğin yoğunluğu Denklem 2.1’deki eşitlik kullanılarak hesaplanır [38].

$$f(x) = \sum_{\text{SiyahAlan}} (\text{Yoğunluk}) - \sum_{\text{BeyazAlan}} (\text{Yoğunluk}) \quad (2.1)$$



Şekil 2.3: Haar cascade sınıflandırıcı özellikleri [37].

Bu hesaplama sonucunda zayıf sınıflandırıcılar elde edilmektedir. Daha sonra zayıf sınıflandırıcılar birleştirilerek güçlü sınıflandırıcılar oluşturulmakta ve eğitim işlemi tamamlanmaktadır. Eğitim tamamlandıktan sonra xml uzantılı bir dosya oluşturulmaktadır. Daha sonra kullanılacak program içerisine bu dosya yüklenerek tespit işlemi gerçekleştirilmektedir.

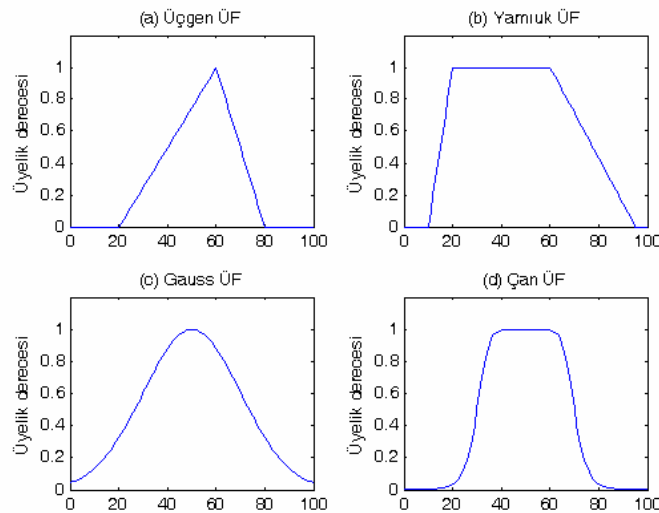
2.1.3 Bulanık mantık

Lotfi A. Zadeh tarafından [39]'da 1965 tarihinde öne sürülen ve 1970'li yıllardan sonra pratik uygulamalarda sıklıkla kullanılan bulanık mantık, kontrol yöntemlerinden biridir. Zadeh bu çalışmasında insan düşüncesinin büyük çoğunluğunun bulanık olduğunu, kesin olmadığını belirtmiştir. Zadeh'in bu ifadesi ile birlikte insanların kesinlik ifade etmeyen birtakım bilgileri kullanarak karar verebilme özelliğinin makinelerden daha iyi olduğu yerlerde, bu özellikler makinelere adapte edilirse daha iyi bir performans alınması gerektiği anlaşılmaktadır. Klasik mantık 0 ve 1 gibi kesin değerlerle sınırlanırken, bulanık mantık farklı olarak hızlı, yavaş, az hızlı, çok hızlı, ılık çok sıcak, sıcak, soğuk gibi ara değerleri dikkate almaktadır. Bu doğrultuda bulanık mantık denetim sisteminin daha iyi ve gerçekçi kontrollerin gerçekleştirilmesine katkı sağlamıştır. Başlangıçta bulanık mantık bilim adamları tarafından mühendislik alanlarına uygun bir kontrol yöntemi olarak görülmemiştir. Bu nedenle 1965 yılında ortaya çıkmasına rağmen 4-5 yıl kadar sonra endüstriyel uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. İngiltere'de 1974 yılında S. Assilian ve E. Mamdani tarafından [40]'da buhar makinesinin kontrolünü gerçekleştirmek için dönemdeki kontrol yöntemlerinin

yetersizliği sebebiyle bulanık mantığın denenmesi bulanık mantık ile gerçekleştirilen ilk büyük uygulama olmuştur.

Bulanık mantığın problem çözme yaklaşımı dilsel kurallar kullandığı için bir insanın herhangi bir problemi çözerken kullandığı yaklaşıma benzemektedir. İnsanın bir problemi çözerken kullandığı yaklaşım genel olarak şu şekilde tanımlanabilmektedir: Kararlarını verirken kullandığı bilgiyi hassas olmayan değerleri veya sınıflandırmaları göz önünde tutarak değerlendirir ve eğer-sonra(if-then-else) kurallarını kullanarak yaptığı eylemlerin doğruluğunu kanıtlar.

Klasik küme kuramına göre bir eleman o kümenin ya elemanıdır ya da değildir. Kümeye kısmi üyeliği olmamaktadır. Üyelik değeri 1 ise kümenin tam elemanı 0 ise elemanı değildir. Bulanık mantık ise insanların nesnelere verdiği üyelik değerlerini taklit etmektedir. Örneğin klasik kümelerle göre sıcaklık 24°C 'nin üstünde sıcak, altına düşerse sıcak değildir kabulü yapıldığında bu kabule göre $23,5^{\circ}\text{C}$ sıcak değildir sonucu çıkmaktadır. Dolayısıyla klasik küme mantığının hiç bir esnekliği yoktur. Gerçek dünyada ise sınırlar bu kadar keskin değildir. Endüstriyel denetleyici için bu durum ele alınır ise denetleyicideki fiziksel büyüklüklerin dahil olduğu kümeler birbirlerinden böyle keskin sınırlarla ayrılmışlarsa denetim çıktısı ani değişiklikler göstermektedir. Bulanık kümelerde ise üyelik dereceleri $[0, 1]$ aralığında sonsuz sayıda değişmektedir. Değişen bu değerlerin tümüne üyelik fonksiyonu adı verilmektedir. Şekil 2.4'de bazı üyelik fonksiyonları gösterilmektedir. Şekildeki fonksiyonlara ek olarak sigmoidal ve iki boyutlu üyelik fonksiyonları da vardır.



Şekil 2.4 : Çeşitli üyelik fonksiyonları.

Bulanık mantık işlemleri sırasıyla aşağıdaki gibidir:

- Problemin çözümü için bulanık mantığın uygun olup olmadığı tespit edilir.
- Ele alınan sistemin durum, giriş ve çıkış değişkenleri dizileri tanımlanır. Algılayıcılardan gelen ölçümler giriş, denetim ve çıkış değişkenleri dizilerini üretir.
- Giriş ve çıkış parametreleri için üyelik işlevleri tanımlanır. Üyelik fonksiyonlarının sayısı ve şekli sistem davranışlarına ve tasarımcıya bağlıdır.
- Bilginin esas bölümü, uzman dilsel kuralları, sezgisel olarak elde edilen bilgileri, giriş ve çıkış parametrelerini içerir. Böylelikle bulandırma işlemi yapılabilir ve hangi kuralın uygulanacağı belirlenir.
- Belirlenen kurala göre giriş verilerine göre çıkışı belirlemek için kural tablosu oluşturulur.

İşlemler tekrar gözden geçirilirse, bulanık sistem, dışarıdan aldığı değişkenlerle karar verme mekanizmasını sağlayan üyelik fonksiyonlarını hazırlayarak ve kurallar süzgecinden geçirerek en uygun çıktıyı almayı sağlamaktadır [39].

2.2 Sistemde Kullanılan Donanımlar

2.2.1 Endüstriyel robot

Standart endüstriyel robotlar yüksek dayanıklılık, hız ve hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanmış üç veya daha fazla eksenli olan robotlardır. Tez kapsamında Mitsubishi Electric firması tarafından üretilen Melfa RV-7 FL-D olarak adlandırılan altı serbestlik dereceli Şekil 2.5’de yer alan endüstriyel robot kullanılmıştır [31]. Bu robot, 908 milimetre erişim mesafesine ve yedi kilogram yük taşıma kapasitesine sahiptir.



Şekil 2.5 : Endüstriyel robot ve öğretme kumandası [31].

Ayrıca robot, Şekil 2.5’de yer alan öğretme kumandasına (teach pendant) ve çeşitli haberleşme protokollerini gerçekleştirebilecek denetleyiciye sahiptir. Robotun kontrolü ve programlanması Mitsubishi firması tarafından geliştirilen RT Toolbox2 [31] adlı yazılımı ile gerçekleştirilir. Robotun programlanması ise Melfa Basic-V [31] programlama dili ile gerçekleştirilmiştir.

2.2.2 USB kamera

Bu çalışmada güvenli bir şekilde işbirliğinin sağlanması için geniş açılı bir robot ön alan görüntüsüne ihtiyaç vardır. Geniş açılı görüntü elde etmek için üç adet USB kamera kullanılmıştır. Bu amaçla kullanılan kameralar Logitech markasının C310 HD webcam modelidir (Şekil 2.6a). Bu kameranın 60°’lik bir görüş açısı ve maksimum 720p çözünürlüğü vardır [41]. Çalışmada bu türden bir kamera tercih edilmesinin nedeni amaçlanan türde bir sistemi gerçekleştirmek için düşük maliyetli çözümlerin de yeterli olabileceği göstermektedir.



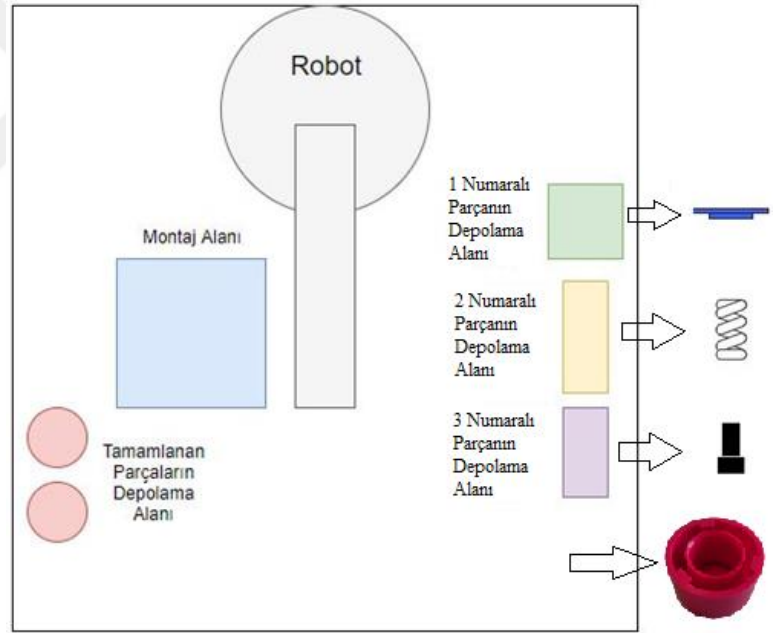
Şekil 2.6 : a. Webcam model 1 b. Webcam model 2 [41].

Robotun uç işlevcisine yerleştirilen kamera ile robotun çalışma alanı (tablası) üzerindeki parçaların konum bilgisi elde edilmektedir. Bu kamera ise Logitech markasının HD Pro webcam C920 modelidir. Diğer kameralara göre daha üstün olan bu kameranın 90°’lik bir görüş açısı ve maksimum 1080p çözünürlüğü vardır (Şekil 2.6b)[41]. Ayrıca odak uzaklığını kamera görüntüye göre ayarlamaktadır. Bu kameranın tercih edilme nedeni ise tespit edilmek istenen parçaların küçüklüğü ve gerekli ölçüm hassasiyetinin yüksekliğidir.

2.3 Örnek Montaj Düzenegi

Bu çalışma kapsamında kurgulanan örnek montaj sistemi Şekil 2.7’deki gibidir. Bu sistemde montaj işlemi robot tarafından yapılmaktadır. Montajlanan ürünler ise

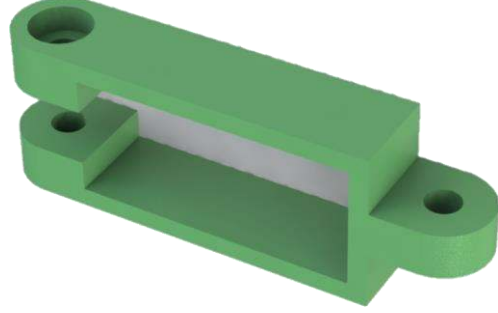
depolama alanına bırakılmaktadır. Birleştirilecek parçalar depolama alanlarının yanlarında ok ile gösterildiği gibidir. Dördüncü parça için herhangi bir depolama alanı belirlenmemiştir. Dördüncü parçayı insan operatörü masaya rastgele bırakacaktır. Rastgele bırakılan parçanın konumu görüntü işleme algoritmalarıyla tespit edilerek montaj işlemi başlamaktadır. Parçayı tanıma işlemi renk ve şekil özelliği kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Tanıma işleminden sonra parçanın konumu tespit edilmektedir. Konumu tespit edilerek robot ile alınan parçanın oryantasyonu montaj modülü üzerinde yer alan sensör ile belirlenip uygun montajlama alanına bırakılmaktadır. Daha sonra sırasıyla üçüncü ve ikinci parça kendi depolama alanlarından alınarak, dördüncü parçanın yani gövdenin içine yerleştirilmektedir. Bu işlemlerden sonra birinci parça depolama alanından alınarak oryantasyon testi yapılarak diğer parçaların üstüne yerleştirilip döndürülerek sıkıştırılmaktadır. Sıkıştırma işlemiyle beraber montajı tamamlanan parça depolama alanına bırakılmaktadır.



Şekil 2.7 : Kurulan montaj düzeneğinin prototipi.

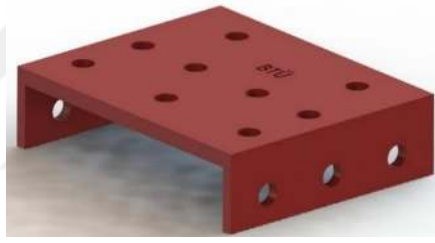
Operatör(insan), yeni gövde bırakmak, depolama alanlarında eksilen ürünleri tamamlamak ve montajlanan ürünlerin depolama alanını boşaltmak için robotun çalışma alanına girmesi gerekmektedir. Bu durumda insan ve robotun güvenliği robotun dördüncü eksenine yerleştirilen geniş açılı görüntü alan bir kamera sistemi ile sağlanmaya çalışılmıştır. Bu sistem Şekil 2.6a'daki kamera kullanılarak oluşturulmuştur. Geniş açılı görüntü elde etmek için üç kamera kullanılmıştır. Bu kameraların uygun açılarda yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu işlem için Şekil 2.8'deki

parça tasarlanmış ve üç boyutlu yazıcı ile her bir kamera için ayrı ayrı üretilmiştir.  kamera, bu parçalar kullanılarak uygun pozisyonda bir arada tutulmakta ve geniş açılı bir görüntü elde edilmektedir..



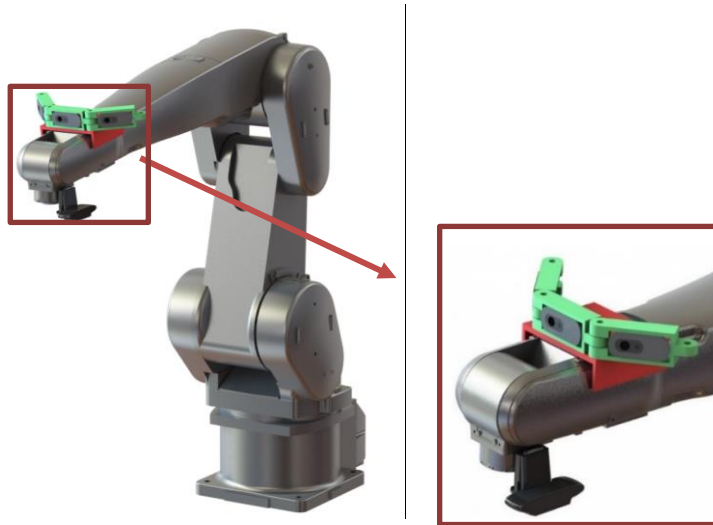
şekil 2.8 : Kamera birleştirme parçası.

Birleştirilen kameraların çevreyi iyi görebilmesi için robotun dördüncü ekseninin üzerine yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu işlem için şekil 2.9'daki parça tasarlanmış ve üç boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiştir.



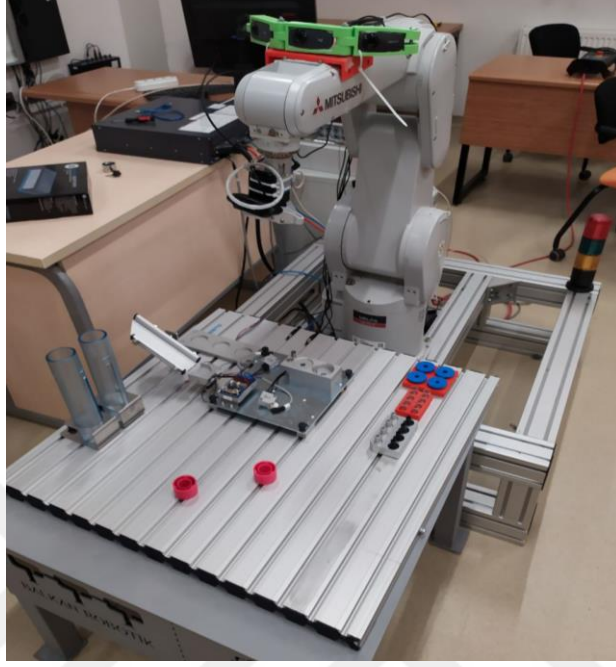
şekil 2.9 : Kamera sistemi ile robot bağlantı parçası.

Üretilen parçalar kameralarla birleştirildikten sonra şekil 2.10'deki gibi robotun dördüncü eksenini üzerine konumlandırılmıştır.



şekil 2.10 : Kameraların robot üzerine konumlandırılmış hali.

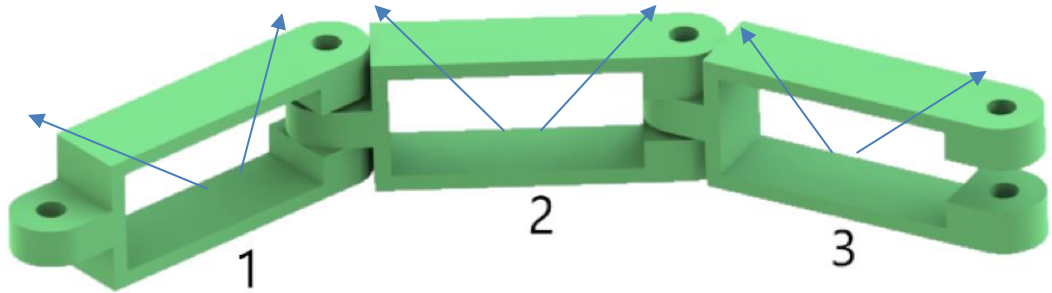
Üretilen parçalar kameralarla birleştirildikten sonra ve montaj sistemi platforma yerleştirildikten sonra kurulan sistemin genel görüntüsü Şekil 2.11’deki gibidir. Genel görüntüde hem kameralar hem de kurulan montaj düzeneği görülmektedir.



Şekil 2.11 : Oluşturulan sistemin genel görüntüsü.

2.4 Görüntülerin Elde Edilmesi

Bu bölümde öncelikle insan ve robotun bir arada görev yaptığı senaryolarda işbirlikçi görevlerin güvenli ve doğru bir şekilde yerine getirilmesi için geliştirilen görüntü işleme tabanlı yazılım ve aşamaları açıklanmaktadır. Robotun dördüncü eksenine yerleştirilen üç kameralı düzenek ile robot ile insan operatörünün birlikte çalışabileceği alan izlenmektedir. Şekil 2.12’de kameraları bir arada tutan aparatın son hali görülmektedir. Şekil 2.12’nin üzerindeki oklar bağlı olan kameraların temsili görüş açıları göstermektedir.



Şekil 2.12: Kamera birleştirme parçalarının birleştirilmiş hali.

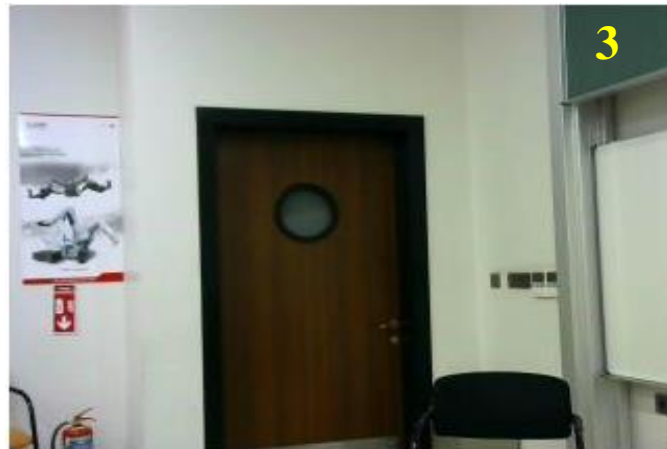
Uygun açılarda yerleştirilen kameralar programın çalıştırılması ile Şekil 2.13, Şekil 2.14 ve Şekil 2.15 görüldüğü gibi görüntüler almaya başlamaktadır.



Şekil 2.13 : Şekil 2.12'deki 1 numaralı aparata takılı kameradan alınan orijinal imge.



Şekil 2.14 : Şekil 2.12'deki 2 numaralı aparata takılı kameradan alınan orijinal imge.



Şekil 2.15 : Şekil 2.12'deki 3 numaralı aparata takılı kameradan alınan orijinal imge.

Kameralar arasındaki açıyı ayarlarken görüntüler arasında ölü bölge olmamasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde ölü bölgede bulunan insanın robota uzaklığı tespit edilememektedir. Bu yüzden kameralar ayarlanırken aralarındaki açılar daha düşük ayarlanmakta ve bundan dolayı da ortak bölgeler oluşmaktadır. Şekil 2.16’de bu görüntülerin uç uca eklenmesi durumunda elde edilen görüntü görülmektedir. Bu durumda da hatalı sonuçlar elde edilmesi çok büyük olasılıktadır. Bu yüzden görüntüler birleştirilirken panoramik olarak birleştirilerek sorunsuz, geniş açılı ve bütün bir çevre görüntüsü elde edilmektedir. Kameralardan anlık olarak alınan görüntüleri panoramik birleştirmek için kameralardan elde edilen ilk görüntülerin yorumlanması gerekmektedir. Görüntülerin uç uca eklenmiş görüntüsünden de çıkarıldığı gibi görüntüler arasında ortak özellikte bölgeler bulunmaktadır (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 : Uç uca eklenmiş çevre görüntüsü.

Bu çalışma gerçek zamanlı bir çalışma olduğu için SIFT yerine SURF tanımlayıcısı ile özellik çıkarımı yapılmaktadır. Bu ortak özellikteki alanlar SURF (Speeded-Up Robust Features) tanımlayıcısı ile tespit edilmekte ve görüntülerin ortak özellikleri çıkarılmaktadır. Birinci görüntünün sağ tarafı ile ikinci görüntünün sol tarafı, ikinci görüntünün sağ tarafı ile üçüncü görüntünün sol tarafında ortak alanlar mevcuttur. Bu ortak alanlar dikkate alınarak görüntüler birleştirilmektedir. Görüntülerin bu şekilde birleştirilmesine özellik tabanlı görüntü hizalama ve dikiş (image alignment and stitching) denir [42].

2.4.1 SURF tanımlayıcısı ile görüntü birleştirme

SURF tanımlayıcısında ilk olarak ilgi noktaları Hessian matrisi yaklaşımı ile bulunmaktadır. İlgi noktaları genelde köşeler ve lekeler gibi görüntüdeki farklı noktalar olarak belirlenir. Bir ilgi noktasının en önemli özelliği ise farklı görüntüleme koşullarında aynı fiziksel özellikleri vermesidir. Daha sonra her ilgi noktasının

bölgesi, tanımlayıcı adı verilen bir özellik vektörü ile Şekil 2.17'deki gibi temsil edilmektedir.

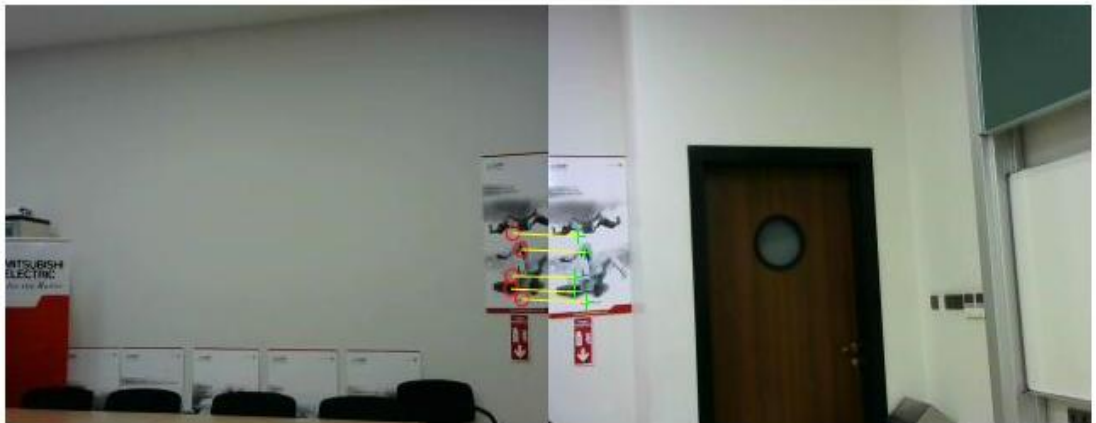


Şekil 2.17 : Tanımlayıcı noktaların imgeler üzerinde gösterimi.

Son olarak da tanımlayıcı vektörler farklı görüntüler arasında Şekil 2.18 ve Şekil 2.19'deki gibi eşleştirilmektedir. Eşleşmeler görüntülerdeki aynı özellikteki tanımlayıcılar arasında olmaktadır.



Şekil 2.18 : 1 ve 2 no'lu görüntülerindeki eşleşen noktaların gösterimi.



Şekil 2.19 : 2 ve 3 no'lu görüntülerdeki eşleşen noktaların gösterimi.

Bu şekilde imgeler arasındaki özelliklere göre ortak bölgelerin uzunluğu bulunmakta ve Şekil 2.20'deki gibi birleştirilerek panoramik çevre görüntüsü elde edilmektedir.

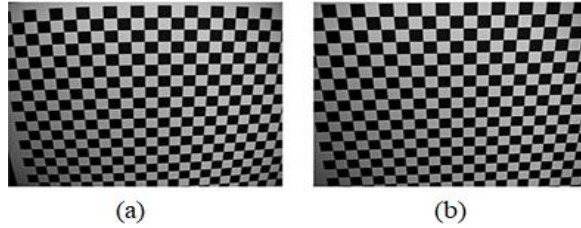
Böylelikle işlem yapılacak görüntü sayısı teke indirilmektedir. Bundan sonraki tüm işlemler bu tek çevre görüntüsü üzerinden yapılmaktadır.



Şekil 2.20 : Elde edilen panoramik çevre görüntüsü.

2.4.2 Kamera kalibrasyonu

Tez kapsamında kullanılan USB webcam gibi kameraların hassas ölçüm yapabilmeleri için kalibre edilmesi gerekmektedir. Kamera kalibrasyonu ile görüntü algılayıcılarının dâhili (içsel matris, odak uzaklığı vb.), harici ve Şekil 2.21’de görüldüğü gibi dama tahtasında ve Şekil 2.22’de görüldüğü gibi bina görüntüsünde meydana gelen radyal ve teğetsel lens bozulma parametrelerini bulunabilmektedir [43]. Fotogrametrik yöntemler ile kameraya ait iç yöneltme parametreleri kullanılarak cisim koordinatları elde edilebilmektedir. Kamera kalibrasyonu ile ise bu işlemin tam tersi üç boyutlu uzayda koordinatları bilinen cisim noktaları ile kameraya ait iç yöneltme parametreleri elde edilmektedir [44].

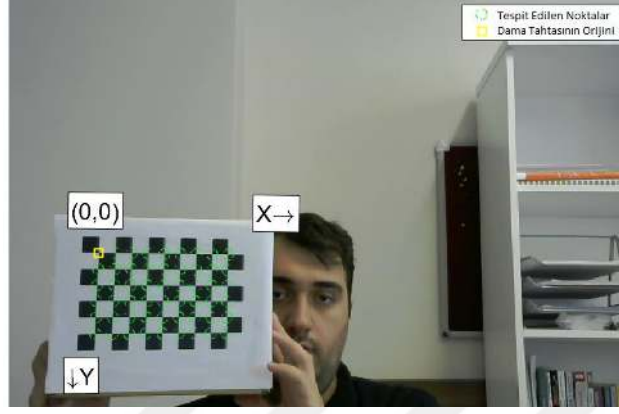


Şekil 2.21 : Dama tahtasının kalibrasyondan önceki (a) ve sonraki (b) hali [43].



Şekil 2.22 : Bir binanın kalibrasyondan önceki (a) ve sonraki (b) hali [43].

İç yönelme parametrelerini bulmak için Şekil 2.23'deki gibi bir dama tahtası kullanılmaktadır. Kamera kalibrasyonu yazılımı ile dama tahtasının orijini ve karelerin köşeleri tespit edilmektedir. Üç boyutlu uzayda tespit edilen bu koordinatlarına göre de iç yöneltme parametreleri elde edilmektedir.



Şekil 2.23 : Dama tahtası ile kalibrasyon işlemi.

Şekil 2.24'de görüldüğü gibi dama tahtasının birden fazla görüntüsü kullanılarak kalibrasyon işlemi tamamlanmakta ve kalibrasyon sonucunda elde edilen parametreler programın devamında kullanılmak üzere kaydedilmektedir.



Şekil 2.24 : Kamera kalibrasyon işlemi esnasında alınan görüntüler.

2.5 Görüntülerden Mesafe Çıkarımı Yapılması

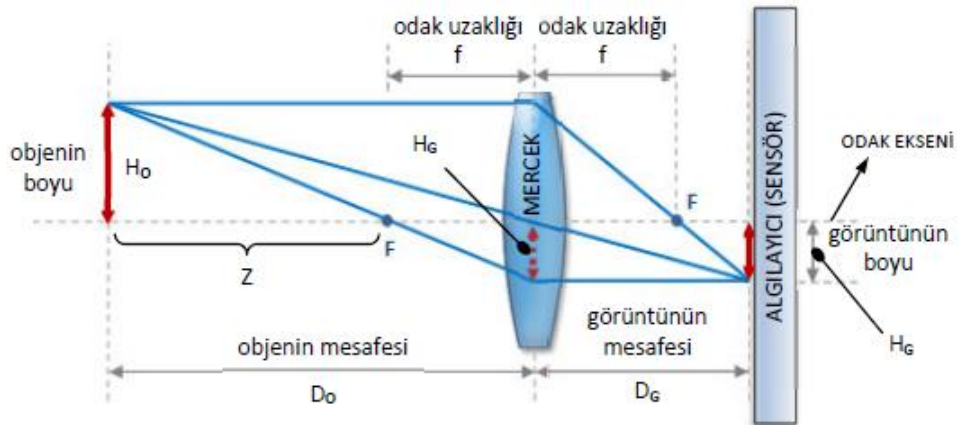
Robotun kendi çalışma alanında güvenli hareket edebilmesi için, şekildeki panoramik çevre görüntüsünün üzerinden birtakım çıkarımlar yapmak gerekmektedir. Bu noktada çıkarımlar açısından iki farklı durum ve öncelik oluşabilmektedir.

- İlk olarak (öncelikle) görüntünün içerisinde insan yani operatör(ler) tespit edilmeye çalışılır. Bir insan gövdesi üzerinde en ayırt edici bölge kafa ve yüz kısmıdır. Dolayısıyla görüntü üzerinde öncelikle insanın başı ve yüzü 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 gösterir, robot çevresindeki nesne ya da kafası kapalı olan (görünmeyen) insan için bunların üzerinde konumlandırılmış olan standart geometrik şekil tespit edilmeye çalışılmaktadır.

İlk öncelik sırasında insan başı tespit çalışmalarında; panoramik çevre görüntüsü içerisinde insan başını ayırt edebilmek için haar cascade sınıflandırıcısı kullanılmıştır.

Xml dosyası MATLAB programında kullanılarak imge üzerinde insan başı aranır.

Hassasiyet çok düşük olmamasında dolayı panoramik çevre görüntüsü üzerinde tespit edilen yüz şeklinin genişliğinden yola çıkılarak, Şekil 2.25’de 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 2.25: Görüntü üzerinden objenin robota olan mesafesini hesaplamada kullanılan optik düzen

Şekil 2.25’de görüldüğü üzere objeden mercek üzerine çizilen uç belirleyici ışın (paralel ışın, merkezi ışın ve odak ışını) algılayıcı üzerinde bir görüntü oluşturmaktadır. Üçgenlerdeki benzerlik kuralını; odak eksenini ile merkezi ışınının oluşturduğu üçgenlere uygularsak denklem 2.2, odak eksenini ile odak ışınının oluşturduğu üçgenlere uygularsak denklem 2.3 elde edilmektedir.

$$\frac{H_G}{H_O} = \frac{D_G}{D_O} \quad (2.2)$$

$$\frac{H_G}{H_O} = \frac{f}{Z} = \frac{f}{D_O - f} \quad (2.3)$$

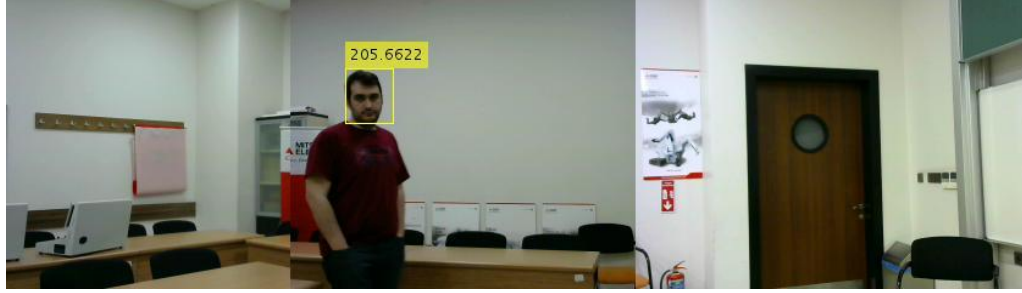
Denklem 2.2'deki D_G değerini elde etmek kolay olmadığından denklem 2.3'ün kullanılması tercih edilmiştir. Bu denklemde; f santimetre cinsinden kameralarda kullanılan merceğin odak uzaklığı, D_O tespit edilen objenin (nesne, insan başı vb.) merceğe dolayısıyla robota santimetre cinsinden uzaklığı, H_O tespit edilen objenin (nesne, insan başı vb.) santimetre cinsinden genişliği, H_G tespit edilen objenin (nesne, insan başı vb.) görüntü üzerinde piksel cinsinden genişliğidir. H_O değeri bu çalışmada Çizelge 2.1'de görüldüğü üzere beş farklı insanın kafa ölçülerinin ortalamaları alınarak 19,1 cm olarak belirlenmiştir.

Çizelge 2.1 : Beş farklı insanın kafasının önden ve yandan uzunlukları.

	Örnek-1	Örnek-2	Örnek-3	Örnek-4	Örnek-5
Önden Görünüş (cm)	16,0	17,0	18,0	18,0	17,5
Yandan Görünüş (cm)	20,0	22,5	21,5	20,5	20,0

Denklem 2.3'deki parametreler incelendiğinde bir tanesi dışında hepsinin santimetre cinsinden olduğu, H_G parametresinin ise piksel olarak elde edildiği görülmektedir. Sonucun yani D_O mesafesinin santimetre cinsinden bulunabilmesi için bir ön çalışma ile katsayı elde edilmektedir. Buna göre; bilinen uzunlukta (H_O) bir nesneyi yine bilinen bir mesafeye koyulduğunda ve odak uzaklığı (f) için katalog bilgisini alındığında tüm bunlar denklem 2.3'de yerine koyulursa olması gereken H_G santimetre cinsinden bulunabilmektedir. Oysa görüntü üzerinden okunan değer piksel olarak alınmıştır. Bu ikisini $H_{G-cm} = k * H_{G-px}$ şeklinde bir k katsayısı ile bağlarsak bu katsayı değerini bilinmeyen bir D_O mesafe değerini hesaplamakta kullanılmaktadır. Veya daha kolay olması için odak uzaklığı piksel cinsinden elde edilebilir. Odak uzaklığının (f) değeri katalog bilgisinde santimetre cinsinden olduğu için ve bu değeri piksel cinsinden elde etmek için kamera kalibrasyonu sonucu elde edilen odak uzaklığı değeri kullanılabilir. Böylelikle herhangi bir görüntü üzerinden yapılan tespit üzerine denklem 2.3'deki D_O dışında tüm parametreler elde edilmiş olur. Buradan tespit edilen insan başının robota olan mesafesi şekilde görüldüğü üzere bulunabilir. Şekilde tespit

edilen insan başı sarı dikdörtgen ile sınırlandırılmış ve dikdörtgenin çevresine insan ile robot arasındaki D_0 mesafe verisi santimetre cinsinden yazılmıştır.



Şekil 2.26 : İnsan ile robot arasındaki mesafenin insan başı tespit edilerek belirlenmesi.

Bu yöntem insan operatörünün kafasının görüldüğü durumlarda iyi sonuç vermektedir. Fakat robot ve insan operatörü sürekli hareket halinde olduğu için veya insanın kafasının görünmesini engelleyen bir engel (kutu koli vb.) olduğu durumda kameralar insan kafasını görememektedir. Bu durumlarda güvenlik açığı oluşmaması için insan operatörünün kıyafetinin üzerine temsili bir mavi üçgen yerleştirilmiştir. Kameralardan alınan görüntülerde insan kafasının görünmemesi halinde program üçgen şekli tespit edip uzaklık ölçümü yapmaktadır. Üçgen şekli kırışarak ya da katlanarak şeklin bozulmasına izin vermeyecek yapıda olduğu için seçilmiştir. Üçgen şekli operatörlerin yanı sıra tesiste kullanılan hareketli nesnelerin (mobil robotlar vb.) üzerlerine yerleştirilerek mesafe ölçümü yapılabilir. Tespit edilecek olan üçgen şekil mobil bir robotu temsilen bir sandalyenin üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 2.27). Üçgen tespit işlemleri bu görüntü üzerinden anlatılacaktır.



Şekil 2.27 : Üçgen şekil içeren panoramik çevre görüntüsü.

Üçgen şekilden mesafe çıkarımı yapılırken işlem yükünün fazla olmaması için basit bir algoritma geliştirilmiştir. İlk olarak renge göre bölütleme işlemi yani mavi bölümün ön plana çıkartılması işlemi yapılmıştır. Bölütleme işleminin ilk aşaması kırmızı, yeşil ve mavi altuzaylı imgeden sadece mavi alt uzayının Şekil 2.28'deki seçilmesidir.



Şekil 2.28 : Üçgen şekil içeren imgenin mavi alt uzayı.

İkinci aşamada ise imgenin altuzayları denklem 2.4'deki gibi katsayılarla çarpılarak gri tonlamalı imge Şekil 2.29'deki gibi elde edilmiştir.

$$Gri Seviye = (0,2989 * Kırmızı) + (0,587 * Yeşil) + (0,114 * Mavi) \quad (2.4)$$



Şekil 2.29 : Üçgen şekil içeren gri tonlamalı panoramik çevre görüntüsü.

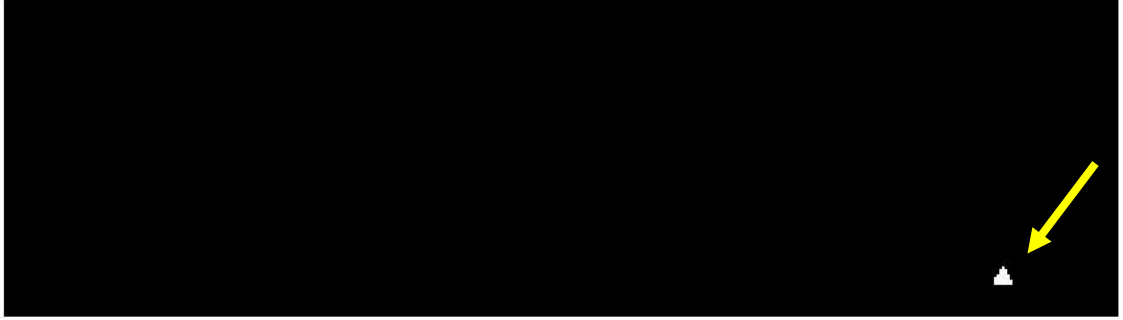
Son olarak ise mavi ve gri tonlamalı imgelerin farkı alınmıştır (Şekil 2.30).



Şekil 2.30 : Fark görüntüsü (Şekil 3.21-Şekil 3.22).

Daha sonra elde edilen bu fark görüntülerine göre bir eşik değeri belirlenmiş ve bu değer imgeye uygulanarak siyah beyaz görüntü oluşturulmuştur. İmgede meydana

gelen küçük gürültüler basit görüntü işleme teknikleri ile yok edilmiş ve sadece üçgen şeklin kaldığı Şekil 2.31’deki görüntü elde edilmiştir.



Şekil 2.31 : Siyah beyaz tonlamalı fark görüntüsü.

Ortaya çıkan üçgen şeklin en uzun kenarı ve alanı tespit edilerek şeklin üçgen olup olmadığı denklem 2.5’deki formüle göre test edilmiştir. Bu formüle üçgenini en uzun kenarının değerini ve alanının değerini girdiğimizde çıkan sonuç eğer 1.30’dan büyük ise şeklin üçgen olduğu sonucuna varılmaktadır [45].

$$K_{\text{şekil}} = \frac{\pi * (\text{büyük eksen uzunluğu})}{4 * (\text{alan})} \quad (2.5)$$

Üçgen şekil, imge üzerinde bulunduktan sonra uzaklığını ölçmek için insan uzaklığını tespit etmek için kullandığımız denklem 2.3 kullanılır. Üçgenin uzun kenarının uzunluğu yani H_0 değeri 12 cm’dir. Aynı kameralar kullanıldığı için odak uzaklığının (f) değeri aynıdır. Geriye kalan H_G değeri ise programda üçgen tespit edildikten sonra elde edilir. Sonuç olarak D_0 değerinin santimetre cinsinden hesaplanması için k katsayısı elde edilmiş ve D_0 değeri gibi hesaplanmış olur (Şekil 2.32). Hesaplanan D_0 değeri üçgenin etrafında sarı renkte çizilen çemberin yanına Şekil 2.32’de görüldüğü gibi cm cinsinden yazılmıştır.



Şekil 2.32 : İnsan ile robot arasındaki mesafenin üçgen şekil tespit edilerek belirlenmesi.

2.6 Güvenlik Standartlarına Göre Hareket Kararı

İşbirlikçi 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 robotların ve bunların içerisinde yer aldığı sistemlere ilişkin yayınlanmış olan ISO/TS 15066 [46] standardının içerisinde belirlenmiştir. 2016 yılında yayınlanmış olan bu standart öncesinde geçerli olan ve işbirlikçi özellikleri bulunmayan geleneksel robotların çalışmasını düzenleyen ISO 10218-1:20069 [46] ve ISO 10218-2:2011 [46] standartlarının işbirlikçi çalışma anlayışıyla güncellenmiş ve geliştirilmiş bir versiyonudur. 15066 standardı öncesinde robotların çalışma alanı yasaklanmış ve gözlenen fiziksel sınırlar içerisinde tanımlanmaktaydı. İşbirlikçi çalışma ise ancak bu fiziksel olarak sınırlanmış sınırlar içerisinde özel olarak tasarlanmış robotların insanlarla doğrudan birlikte çalışması olarak ifade edilmekteydi. 15066 standardı ile bu tanım; robot sisteminin(iş parçası dahil) ve insanın üretim işlemi sırasında eşzamanlı olarak görevleri doğrudan fiziksel sınırlar olmadan ortak bir çalışma alanı içinde gerçekleştirebilmesi şeklinde genişletilmiştir.

ROBOTUN HAREKET ETME DURUMLARI		Operatörün Ortak Çalışma Alanındaki Konumu	
		Dışında	İçinde
Robotun Ortak Çalışma Alanındaki Konumu	Dışında	Devam	Devam
	İçinde ve Hareket Ediyor	Devam	Koruyucu Durma
	İçinde ve Güvenlik Dereceli DURMA Modunda	Devam	Devam

Şekil 2.33 : ISO 15066 standardına göre işbirlikçi çalışma için robot hareketleri [46].

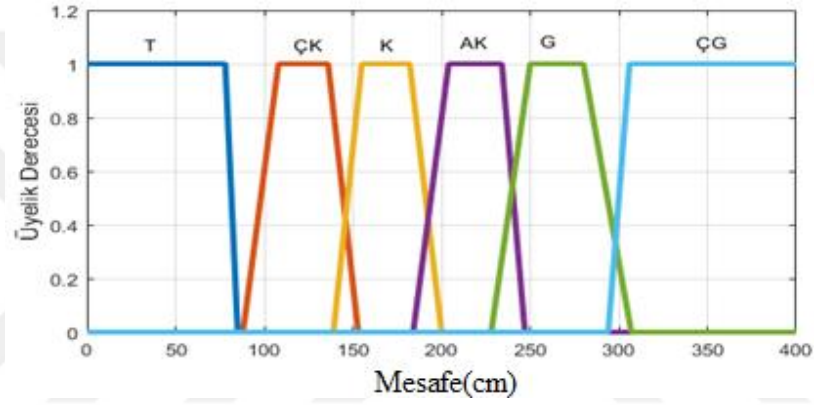
Standartlara göre robotun hızının ayarlanması gerekmektedir. Daha keskin değerler yerine direkt mesafeye ve insan yönelimine bağlı olarak değişebilen hız değeri bulanık mantık kontrol yöntemi ile belirlenmiştir.

Bu çalışmada robotun çalışma hızı belirlenirken hız değişikliklerinin keskin ve büyük olmaması için bulanık mantık ile kontrol edilmiştir. Gözlemlenen mesafe verisine ek olarak operatörün yönelimi (yaklaşım) de hesaba katılarak robot hızı belirlenir. Mesafe verisi tehlikeli, çok kritik, kritik, az kritik, güvenli ve çok güvenli olmak üzere yedi farklı üyelikten oluşur. Bu bölgeler Şekil 2.34’de gösterildiği gibi ayrılmıştır. Şekil

2.35’de ise bu bölgelere göre oluşturulan mesafe için üyelik fonksiyonu gösterilmektedir.

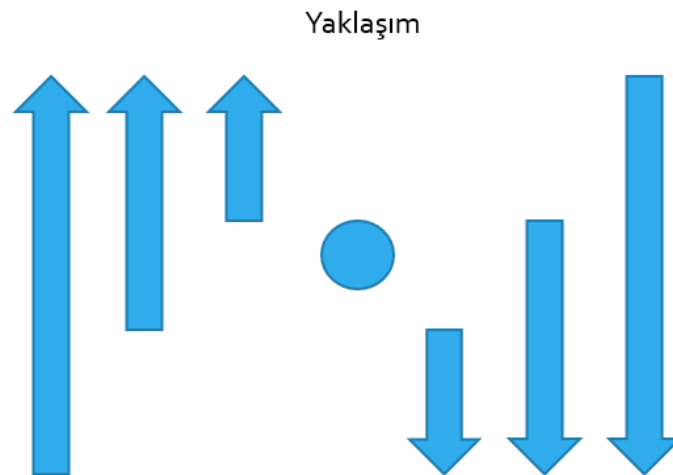


Şekil 2.34: Bulanık mantık kontrolü için oluşturulan zahiri bölgeler.



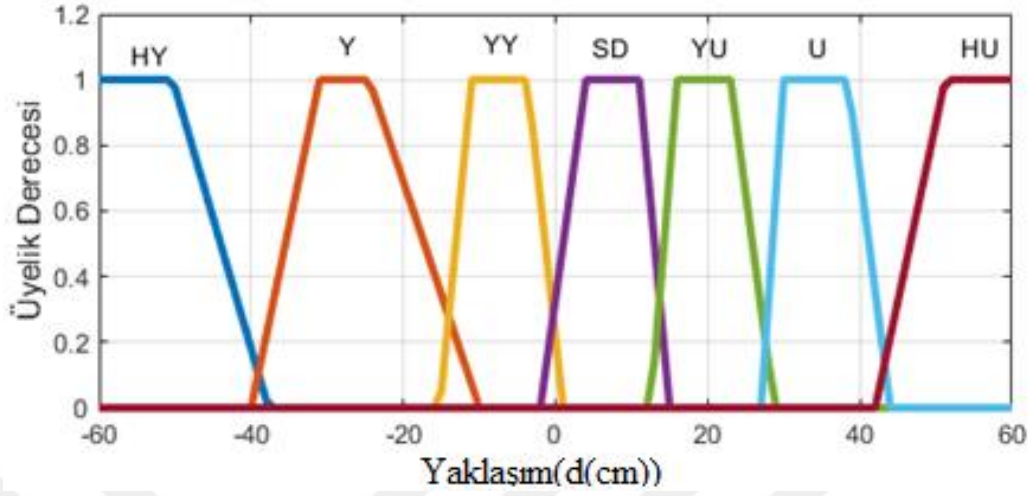
Şekil 2.35 : Mesafe için üyelik fonksiyonu.

Yaklaşım verisi de insanın robota göre hareketini temsil etmektedir. Hızlı yaklaşım, yaklaşım, yavaş yaklaşım, sabit durma, yavaş uzaklaşma, uzaklaşma ve hızlı uzaklaşma olmak üzere yedi farklı yaklaşım üyeliği mevcuttur (Şekil 2.37).



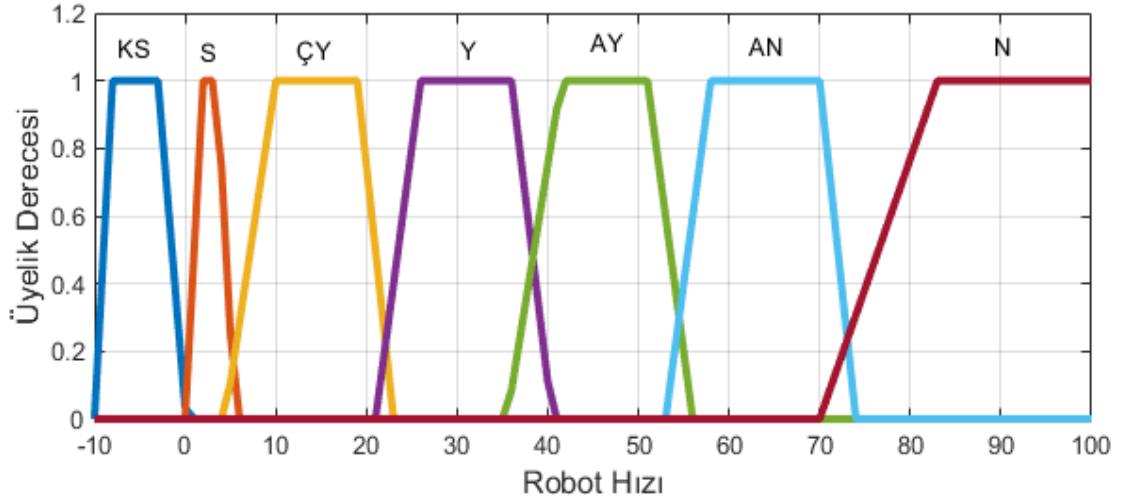
Şekil 2.36: Yaklaşım basamaklarının gösterimi.

Yaklaşım verisi için oluşturulan üyelik fonksiyonu ise Şekil 2.37'deki gibidir. Örneğin insan robota doğru bir normal bir hareket ediyorsa hızlı yaklaşım yapmaktadır.



Şekil 2.37 : Yaklaşım için üyelik fonksiyonu.

Robotun hızı belirlenirken ise yüzdelik verisi elde edilmektedir. Örneğin robotun maksimum hızı 50 m/s ise ve kontrol yöntemi sonucu gelen hız verisi 10 ise bu maksimum hızın %10'u hesaplanarak yeni hız 5 m/s olarak bulunur. Üyelik fonksiyonları kesin sabit, sabit, çok yavaş, yavaş, az yavaş, az normal ve normal hız olmak üzere 7 fonksiyondan oluşmaktadır (Şekil 2.38). Üyelik fonksiyonları 15066 standardına göre oluşturulmuştur. Bu standarda göre otomatik modda çalışan bir robot dört farklı teknik kullanılarak işbirlikçi yapıda çalıştırılabilmektedir, Bu modlardan güvenlik dereceli çalışma (durma) modu ve hız ve mesafe gözlemeli çalışma modu kullanılarak durma anı ve anlık hızı belirlenebilmektedir. Kesin sabit değeri operatörün robotun erişim alanına girmesi (negatif kısım) durumunda robotun çalışmasını tamamen durması için oluşturulmuştur. Kesin sabit (KS) ismiyle kesin durma modunun sabit fonksiyonundan ayırt edilip anlamlandırılabilmesi için değeri negatif seçilmiştir. Sabit fonksiyonu (S) ise robotun anlık olarak duraklamasını sağlar. Bu esnada robot aktif durumdadır ve sadece icrasına ara vermiştir. Operatörün kritik alandan çıkması halinde çalışmasına kaldığı yerden devam eder. %5 ile %100 değeri arasında standarda uygun bir şekilde hız değerleri belirlenmiştir. Bu hız değerleri Çok yavaş (ÇY), yavaş (Y), az yavaş (AY), az normal (AN), ve normal (N) üyelik fonksiyonları ile ifade edilmiş ve robotun hızının daha efektif bir şekilde belirlenmesi için Şekil 2.38'deki gibi oluşturulmuştur. Şekilde görüldüğü gibi hız üyelik fonksiyonlarının kısaltması şekillerin üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.38 : Hız için üyelik fonksiyonu.

Şekil 2.33'daki robot hareketleri ve oluşturulan üyelik fonksiyonlarına göre Çizelge 2.2'deki gibi kural çizelgesi oluşturulur.

Çizelge 2.2 : Bulanık mantık kural çizelgesi.

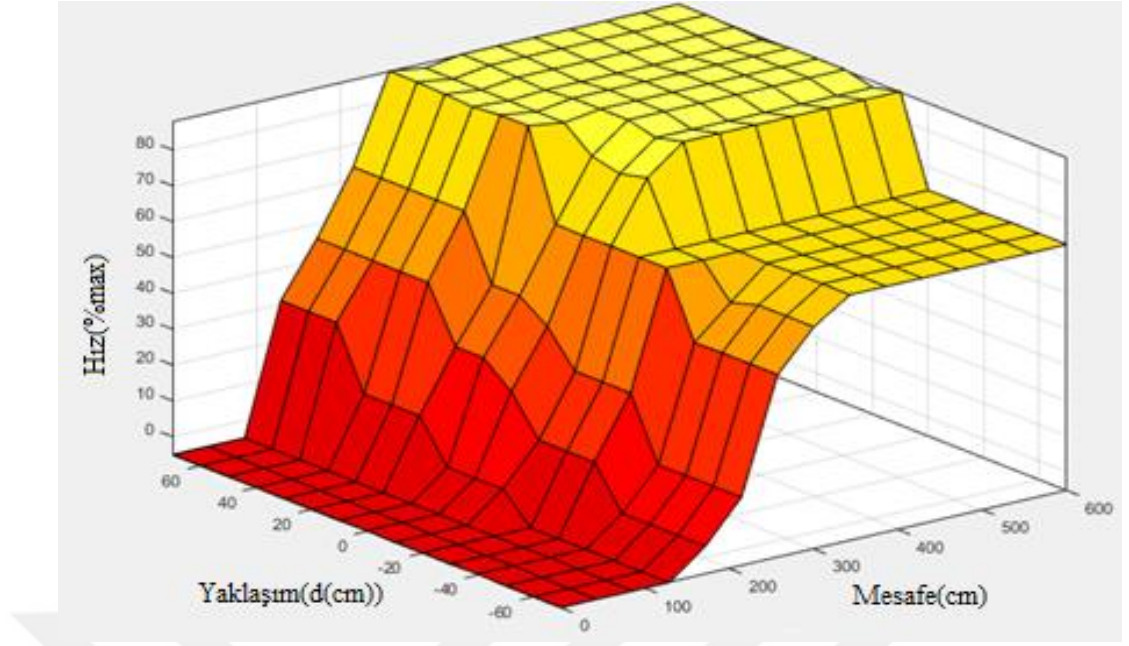
	HY	Y	YY	SD	YU	U	HU
T	KS	KS	KS	KS	KS	KS	KS
ÇK	KS	KS	S	S	ÇY	ÇY	Y
K	S	ÇY	ÇY	Y	Y	AY	AY
AK	ÇY	Y	Y	AY	AY	AN	AN
G	AY	AN	AN	AN	N	N	N
ÇG	AN	AN	N	N	N	N	N

Çizelge 2.2'de verilen kısaltmaların anlamları Çizelge 2.3'deki gibidir.

Çizelge 2.3 : Bulanık mantık fonksiyonlarının anlamı.

Mesafe Fonksiyonları	Yaklaşım Fonksiyonları	Hız Fonksiyonları
Tehlikeli (T)	Hızlı Yaklaşma (HY)	Kesin Sabit (KS)
Çok Kritik (ÇK)	Yaklaşma (Y)	Sabit (S)
Kritik (K)	Yavaş Yaklaşma (YY)	Çok Yavaş (ÇY)
Az Kritik (AK)	Sabit Durma (SD)	Yavaş (Y)
Güvenli (G)	Yavaş Uzaklaşma (YU)	Az Yavaş (AY)
Çok Güvenli (ÇG)	Uzaklaşma(U)	Az Normal (AN)
-	Hızlı Uzaklaşma (HU)	Normal (N)

Oluşturulan bu bulanık mantık kontrol sistemin bulanık denetim yüzeyi Şekil 2.39'daki gibidir.



Şekil 2.39 : Bulanık denetim yüzeyi.

Elde edilen bu hız verisinin görüntü işleme yazılımından robotun yazılımına gönderilmesi gerekmektedir.

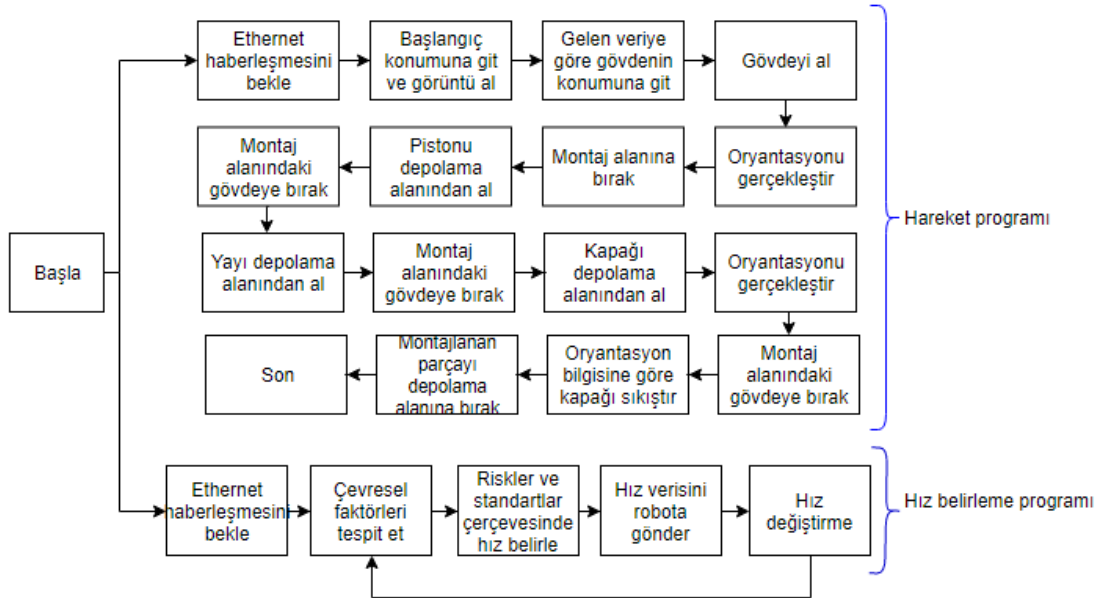
Bu işlem için Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP) ve ethernet haberleşmesi kullanılmıştır. Ethernet haberleşmesinde robot sunucu (server) MATLAB programı ise istemci (client) olarak seçilmiştir.

2.7 Robot Üzerinde Koşturulan Programın Oluşturulması

Robota istenilen hareketlerin yaptırılabilmesi için Mitsubishi Electric firması tarafından geliştirilen RT Toolbox2 programı ile yine aynı firma tarafından geliştirilen Melfa Basic-V robot programlama dili kullanılmıştır. RT Toolbox2 programı ile kodlama, robot hareketlerinin kontrollü, robotun haberleşmesi, servo motor, giriş çıkışlar gibi ayarları yani robotla alakalı neredeyse her şey yapılabilir. Robot yazılımı da Melfa Basic-V dili kullanılarak bu programın içerisinde yazılmaktadır. Melfa Basic-V robot programlama dili hareket komutları, haberleşme komutları ve kontrolörün ayar değerlerini değiştiren komutlar gibi komutları içermektedir. Bu tarz modern robot programlama dilleri basit komut setleri barındırdığı için kolay anlaşılabilir ve uygulanabilir dillerdendir. Melfa Basic-V, satır yapılı yani komut satırlarıyla programlama yapılan bir dildir. Program yazılırken iki bölüme ayrılarak yazılmaktadır. Birinci bölüme robot değişkenleri ve pozisyon listeleri gibi bilgiler

yazılmakta ikinci bölüme ise komut ifadeleri yazılmaktadır. Her bir komut satırının önüne satır numarası yazılır ve devamına da ilgili kod gelecek şekilde yazılmaktadır.

Bu çalışmada robot yazılımı hız belirleme programı ve hareket programı olarak ikiye ayrılır. İki farklı program paralel olarak çoklu görevlendirme (Multitask) ile çalışmaktadır. Çoklu görevlendirme robotun hareket programından bağımsız bir şekilde çevre ekipmanlarının kontrolü, haberleşme ve giriş çıkış durumlarını kontrol etme gibi fonksiyonlar için kullanılabilir. Robot yazılımı 32 adet paralel program çalıştırabilme imkanı sunmaktadır. Görüntü işleme yazılımından robot yazılımına güncel hız verisi devamlı geldiği için ana programın kesintiye uğramaması için çoklu görevlendirme ile iki program (hareket ve hız belirleme programı) paralel olarak çalıştırılmıştır. Hareket programının ve hız belirleme programının akış diyagramı Şekil 2.40'deki gibidir. Diyagramın üst kısmında hareket programı, alt kısımda ise hız programı anlatılmıştır. Robot bu çalışmada montaj işlemi yapmaktadır. Montaj işlemi için gerekli olan malzemeleri ise operatör dışarıdan tedarik etmektedir. Hareket programında montaj işlemi hız belirleme programında ise robotun çalışma alanına dahil olan operatörün veya robotun güvenliğini sağlamak için hız değiştirme işlemi yapılmaktadır.



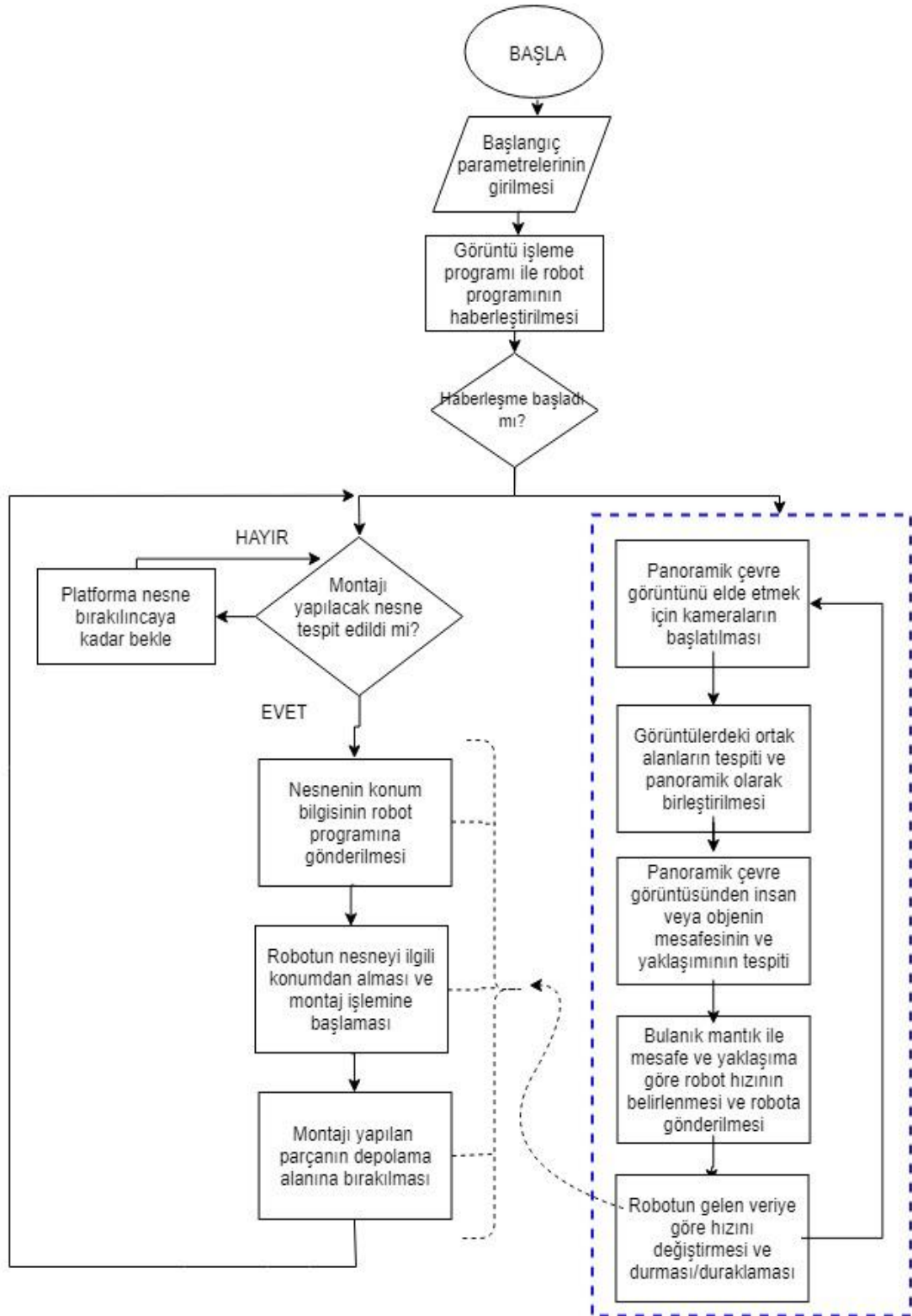
Şekil 2.40 : Hareket ve hız programının işlem adımları.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bir endüstriyel robotun üzerine çalışmamızda önerdiğimiz şekilde konumlandırılmış olan kameralar kullanılarak öncelikle o robota kısıtlı olsa da bir görüş yeteneği kazandırılmaktadır. Bu noktada birden fazla kamera kullanıldığı için elde edilen görüntülerden çıkarım yapabilmek için tek bir görüntü elde edilmesi gerekmektedir. Nihayetinde elde edilen görüntü robotun çevresi hakkında bir bilgi oluşturmakla birlikte, robotun kafessiz güvenli hareket edebilmesi için bu görüntü üzerinden robota tehdit oluşturabilecek ya da robotun tehdit oluşturabileceği, insan (operatör) ya da hareketli nesnelerin (otonom araçlar) tespit edilmesi gerekmektedir. Tespit işlemi tek başına 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 hızı denetlenmeye çalışılmaktadır. Ayrıca robotun uç işlevcisine yerleştirilen kamera ile nesne ve nesnenin konumu tespit edilerek robota bir görme yetisi kazandırılmış ve daha esnek çalışması sağlanmıştır.

Bahsedilen tüm bu işlemlerin robot kontrol programı hariç tek bir yazılım üzerinden gerçekleştirebilmesi için tüm bu ayrık operasyonların bir algoritma çerçevesinde uygulanması ve koordine edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla Şekil 3.1'deki akış diyagramı ile yansıtılan algoritma uygulanmaktadır. Akış diyagramında hem MATLAB tarafından yürütülen hem de RT Toolbox2 programında yürütülen algoritmalar ve programların iletişimi genel olarak gösterilmiştir. MATLAB programı RT Toolbox2 programında parallel olarak yürütülen iki algoritma ile ayrı ayrı haberleşmektedir.

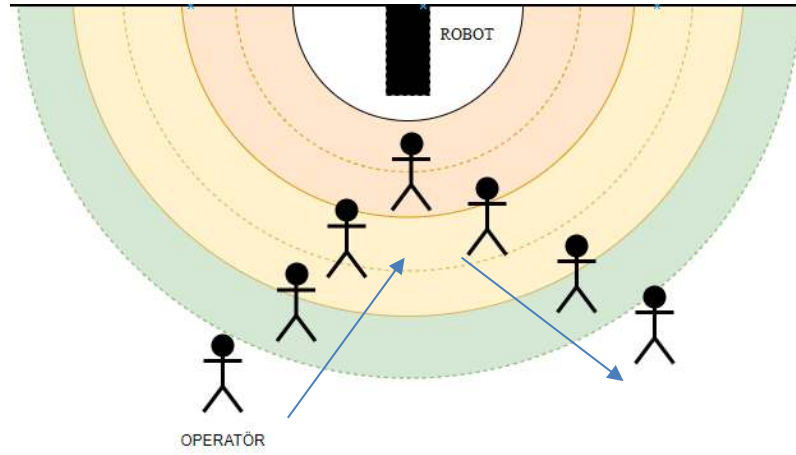
MATLAB programı çalıştırılan görüntü işleme yazılımı ile RT Toolbox2 programında çalıştırılan hız belirleme programı ve hareket programının haberleştirilmesi ile algoritma gerçekleştirilmektedir. Görüntü işleme ve haberleşme işlemlerinden ve sisteme bağlı olan donanım sayısından dolayı gerçek zamanlı çalışan programda bazı yavaşlıklar oluşmaktadır. Kameralardan saniyede 30 görüntü alınmasına rağmen MATLAB programı saniyede yaklaşık 8 görüntü işlemektedir.



Şekil 3.1 : Gerçekleştirilen yazılıma ilişkin algoritmik diyagram.

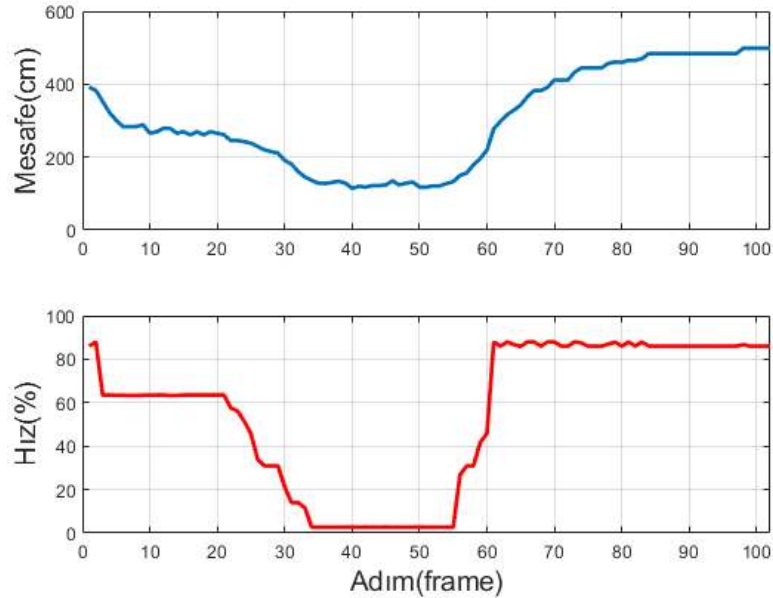
İnsan (operatör) ve robotun bir çalışma ortamındaki mevcut konumları ve yapacakları hareketler sonucu oluşabilecek potansiyel yeni konumları için farklı senaryolar tanımlanabilir. Bu senaryolardan birkaçı ve bunların gerçekleşmesi esnasında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sunulmuştur.

Gerçekleştirilen ilk senaryoda bir operatörün çalışma alanına girip çıkması Şekil 3.2’de gösterildiği gibi gerçekleşmiştir.



Şekil 3.2 : Ortak çalışma alanına parça bırakma senaryosu.

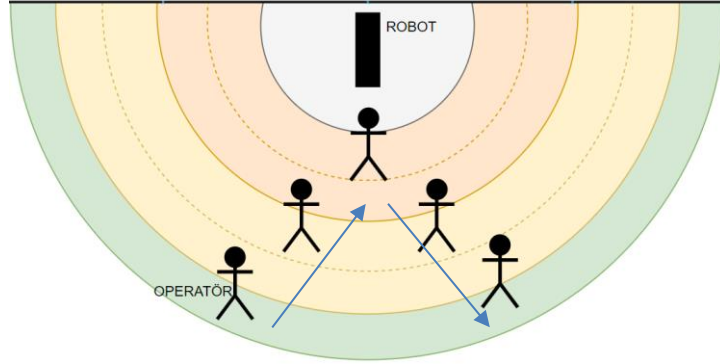
Bu senaryoda operatör işbirlikçi çalışma sisteminde üzerine düşen görevi gerçekleştirmiş yani çalışma alanına çok tehlikeli olmayacak şekilde parça bırakıp çıkmıştır. Belirlenen hız modlarına göre operatör robota en yakın halinde robotun hızı 0’dır (Şekil 3.3’de 20. ve 26. adım arası). Bu anda robot durmuştur fakat aktif haldedir. Operatör işlemi bitirip tekrar uzaklaşmaya başladığında robotta Şekil 3.3’de 26. adımdan sonraki adımlarda görüldüğü gibi çalışmaya devam etmektedir.



Şekil 3.3 : Şekil 3.2’deki senaryonun mesafe ve yaklaşım verisine göre robot hızı.

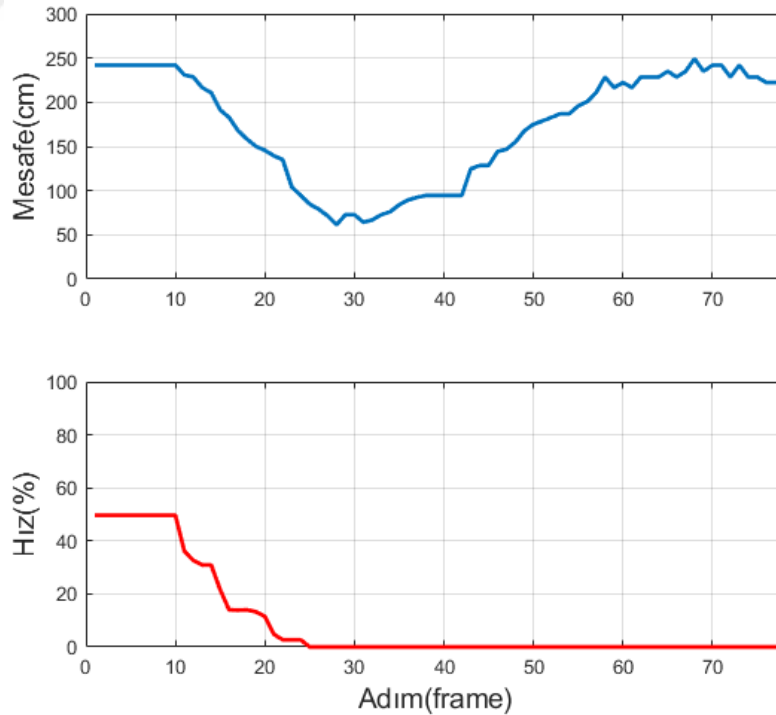
Gerçekleştirilen ilk senaryoda bir operatörün çalışma alanına girip çıkması Şekil 3.4’de gösterildiği gibi gerçekleşmiştir. Operatör ok yönünde hareket etmektedir.

Operatör bu senaryo da ise robot erişim alanına gerektiğinden fazla girmiş ve robotun kesin sabit (KS) moduna girmesine sebep olmuştur. Robot, Şekil 3.5’de de görüleceği üzere operatörün 22. adımında kalıcı olarak durmuştur. Çalışmaya devam edebilmek için robotu tekrar başlatmak gerekmektedir.



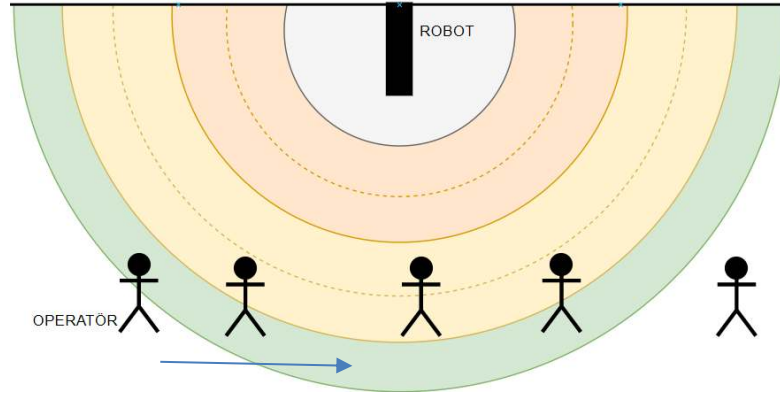
Şekil 3.4 : Ortak çalışma alanına parça bırakma senaryosu (tehlikeli alan ihlali).

Operatörün hareketinin düzgün olmasına rağmen Şekil 3.5’de görüldüğü gibi mesafe verisinde gürültü şeklinde dalgalanmalar oluşmaktadır. Bu gürültüler mesafe ölçümü yapılırken insan kafası tespiti sırasında oluşmaktadır.



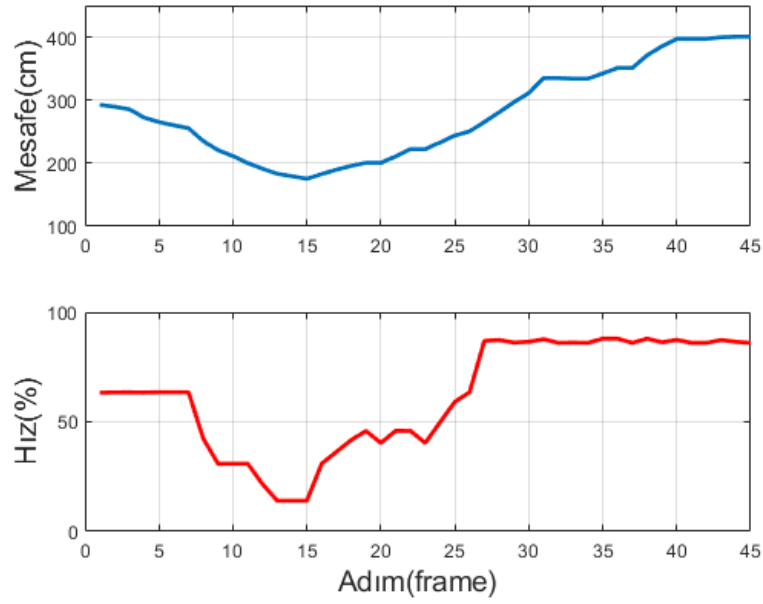
Şekil 3.5 : Şekil 3.4’deki senaryonun mesafe ve yaklaşım verisine göre robot hızı.

Bir başka senaryoda ise operatör, başka çalışan veya bir başka nesne (mobil robot vb.) robotun önünden geçmektedir. Gerçekleşen senaryo temsilen Şekil 3.6’deki gibidir.



Şekil 3.6 : Operatörün robotun önünde paralel olarak ilerleyip geçtiği senaryo.

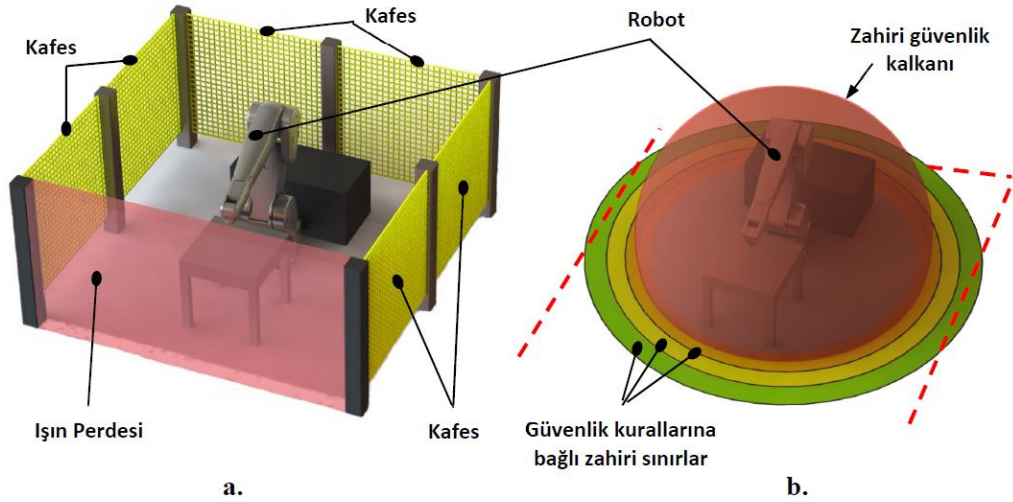
Gerçekleştirilen bu senaryodaki mesafe ve yaklaşım verisine göre elde edilen mesafe ve hız grafiği ise şekildeki gibidir. Robot hızı standarda uygun bir şekilde değişmektedir.



Şekil 3.7 : Şekil 3.6'deki senaryonun mesafe ve yaklaşım verisine göre robot hızı.

4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER

Çalışmamızda önerdiğimiz çözümde 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 kullanılmasının nedeni; geleneksel robotlar üzerinde uygulanabilirliğinin yüksek olmasını sağlamaktır. Önceki bölümlerde belirtilen yöntemler ve kullanılan algoritmalar sayesinde Şekil 4.1.a'da görülen kafes sistemi ve ışık perdesi ortadan kaldırılarak Şekil 4.1.b'deki gibi robot üzerinde bir görünmez kalkan oluşturulabilmektedir.



Şekil 4.1 : Robot ve insan arasındaki etkileşimin güvenliğini sağlamak için kullanılan yöntemler **a.** geleneksek kafes ve ışık perdesi yöntemi, **b.** çalışmada önerilen görüntü temelli sistem.

Bu alanın sınırları ve dışında yer alan güvenlik bölgeleri robotun türüne ve büyüklüğüne göre farklılaştırılabilir, tanımlanacak güvenlik kurallarına (yapılacak iş ve çalışma ortamına bağlı olarak değişebilmektedir) göre yeniden belirlenebilmektedir. Böylelikle daha esnek bir alan kullanım (kafes sistemi kullanan geleneksek yapılara göre) ortaya konularak çalışma alanından tasarruf edilebilmesi ve operatörler açısından rahat erişim imkanları yaratılabilecektir.

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 konumlandırılacak akıllı ve yetenekli (smart) algılayıcılar ve sistemler ile (safety controller, tork sensörü, kapasitif algılama sensörü gibi) robotun işbirliği (etkileşim) seviyesi arttırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **KUKA Robotics İnsan Robot İşbirliği** (t.y.). Erişim: 10 Ekim 2018, <https://www.kuka.com/tr-tr/teknolojiler/İnsan-robot-işbirliği/>.
- [2] **Tokçalar, K. Ö., İlhan, R., Şimşek, Ö., Durgun, İ.**, (2016). Hibrit Montaj Sistemleri Orta Yük Kapasiteli Robotlarda İnsan - Robot Etkileşimi, *Türkiye Robotbilim Konferansı (TORK2016)*, (ss.40-43). İstanbul : Gedik Üni., Kasım 2-3.
- [3] **Nguyen, D. H. P., Hoffmann, M., Roncone, A., Pattacini, U., Metta, G.**, (2018). Compact Real-Time Avoidance on a Humanoid Robot for Human-Robot Interaction, *IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI'18)*, (ss.416-424). Chicago, Mart 5-8.
- [4] **Ottawa Citizen - Google News Archive Search.** (t.y.). Erişim: 11 Ocak 2019, <https://news.google.com/newspapers?id=7KMyAAAAIABAJ&sjid=Bu8FAAAAIBAJ&pg=3301,87702>.
- [5] **Sugimoto, N. & Kawaguchi, K.** (1983). Fault Tree Analysis of Hazards Created by Robots, *13th International Symposium on Industrial Robots and Robot*, 7, 9–13.
- [6] **Graham, J. H., & J. F. Meagher, J. F.** (1985). A Sensory-Based Robotic Safety System, *IEE Proc. D Control Theory Appl.*, 132(4),183.
- [7] **S. Takakura, S., Murakami, T., Ohnishi, K.** An Approach to Collision Detection and Recovery Motion in Industrial Robot, *15th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, (ss. 421–426). Philadelphia, Kasım 6-10.
- [8] **Yamada, Y., Suita, K., Imai, K., Ikeda, H., Sugimoto, H.** (1996). A Failure-to-Safety Robot System for Human-Robot Coexistence, *Robotic Autonomous System*, 18(1), 283–291.
- [9] **Heiligensetzer, P., & Wörn, H.** (2002). Safe Human-Robot Cooperation in Industrial Production. VDI Berichte, 1679, 197-204.
- [10] **Heiligensetzer, P., & Wörn, H.** (2002). Safeguarded Human-Robot Interaction in Production. *Information Systems Research*, 1(2), 3.
- [11] **Heiligensetzer, P.** (2004). U.S. Patent No. 6,748,298. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [12] **Kulić, D., & Croft, E. A.** (2006). Real-Time Safety for Human–Robot Interaction. *Robotics and Autonomous Systems*, 54(1), 1-12.
- [13] **Baerveldt, A. J.** (1992). Cooperation between Man and Robot: Interface and Safety, *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, (ss. 183-187). Tokyo, Japan, Eylül, 1-3.
- [14] **Brecht, F., Bart, W., Luc, B., Ramon, L. G. J., Carlos, T. F.** (2010). Industrial Robot Manipulator Guarding Using Artificial Vision. *Robot Vision*. (ss. 430-454) IntechOpen.

- [15] Steinhaus, P., Ehrenmann, M., Dillmann, R. (1999). MEPHISTO A Modular and Extensible Path Planning System Using Observation, *International Conference on Computer Vision Systems* (ss. 361-375). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [16] Winkler, A., & Suchý, J. (2011). Vision Based Collision Avoidance of Industrial Robots, *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 9452-9457.
- [17] Ebert, D. M., & Henrich, D. D. (2002). Safe Human-Robot-Cooperation: Image-Based Collision Detection for Industrial Robots, *IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, 2, 1826-1831.
- [18] Krüger, J., Lien, T. K., Verl, A. (2009). Cooperation of Human and Machines in Assembly Lines, *CIRP annals*, 58(2), 628-646.
- [19] Cervera, E., Garcia-Aracil, N., Martinez, E., Nomdedeu, L., Del Pobil, A. P. (2008). Safety for A Robot Arm Moving Amidst Humans by Using Panoramic Vision, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (ss. 2183-2188).
- [20] De Luca, A., & Flacco, F. (2012). Integrated Control for PHRI: Collision Avoidance, Detection, Reaction and Collaboration, *4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)* (ss. 288-295).
- [21] KUKA AG. (t.y.). Erişim: 4 Nisan 2019 <https://www.kuka.com/>.
- [22] Ostermann, B. (2009). *Industrial Jointed Arm Robot Evading Dynamic Objects*. Bonn-Rhein-Sieg Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Bilgisayar Bilimleri Bölümü, Sankt Augustin.
- [23] Arai, T., Kato, R., Fujita, M. (2010). Assessment of Operator Stress Induced by Robot Collaboration in Assembly, *CIRP annals*, 59(1), 5-8.
- [24] Pilz - Emniyetli Otomasyon - Pilz TR. Erişim: 4 Haziran 2019 <https://www.kuka.com/>.
- [25] Morioka, M., & Sakakibara, S. (2010). A New Cell Production Assembly System with Human–Robot Cooperation, *CIRP annals*, 59(1), 9-12.
- [26] Safeea, M., Mendes, N., Neto, P. (2017). Minimum Distance Calculation for Safe Human Robot Interaction, *Procedia Manufacturing*, 11, 99-106.
- [27] Khatib, O. (1985). Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2, (ss. 500-505).
- [28] Augustsson, S., Christiennin, L. G., Bolmsjö, G. (2014). Human and Robot Interaction Based on Safety Zones in A Shared Work Environment, *ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction* (ss. 118-119). ACM.
- [29] Bobka, P., Germann, T., Heyn, J. K., Gerbers, R., Dietrich, F., Dröder, K. (2016). Simulation Platform to Investigate Safe Operation of Human-Robot Collaboration Systems. *CIRP*, 44, 187-192.
- [30] YuMi - Hep birlikte otomasyonlu bir geleceğe doğru. You and me. - Endüstriyel Robotlar ABB. (t.y.). Erişim: 17 Ocak 2019. <https://new.abb.com/products/robotics/tr/endustriyel-robotlar/yumi>.
- [31] MITSUBISHI ELECTRIC Global website. (t.y.). Erişim: 4 Nisan 2019 <https://www.mitsubishielectric.com/en/index.html>.

- [32] **MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink.** (t.y.). Erişim: 12 Haziran 2019. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [33] **Müller, R., Vette, M., Mailahn, O.** (2016). Process-Oriented Task Assignment for Assembly Processes with Human-Robot Interaction, *CIRP*, 44, 210-215.
- [34] **Lowe, D. G.** (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *International journal of computer vision*, 60(2), 91-110.
- [35] **Brown, M., & Lowe, D. G.** (2007). Automatic Panoramic Image Stitching Using Invariant Features, *International journal of computer vision*, 74(1), 59-73.
- [36] **Bay, H., Tuytelaars, T., & Van Gool, L.** (2006). Surf: Speeded Up Robust Features, *European conference on computer vision*, (ss. 404-417). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [37] **Viola, P., & Jones, M.** (2001). Rapid Object Detection Using A Boosted Cascade of Simple Features. *CVPR (1)*, 1, 511-518.
- [38] **Menezes, P., Barreto, J. C., Dias, J.** (2004). Face Tracking Based on Haar-Like Features and Eigenfaces. *IFAC/EURON Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (500)*.
- [39] **Zadeh, L. A.** (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
- [40] **Mamdani, E. H., & Assilian, S.** (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, 7(1), 1-13.
- [41] **Logitech.** (t.y.). Erişim: 4 Nisan 2019 <https://www.logitech.com/>.
- [42] **Szeliski, R.** (2007). Image alignment and stitching: A tutorial. *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision*, 2(1), 1-104.
- [43] **Hartley, R., & Kang, S. B.** (2007). Parameter-Free Radial Distortion Correction with Center of Distortion Estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 29(8), 1309-1321.
- [44] **Taşdemir, Ş., Ürkmez, A., Yakar, M., & İnal, Ş.** (2009). Sayısal görüntü analiz işleminde kamera kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesi. 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, 13-15.
- [45] **Cuşkun, Y., Duman, F., Basık, H., Gün, F., Kaplan, K., Ertunç, H. M.** (2016). Görüntü İşleme Tabanlı 4 Eksenli Çok Amaçlı Robot Mekanizması, *Elektrik - Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı* (ss. 247-251). Bursa: E.M.O. Aralık 1-3.
- [46] **ISO - International Organization for Standardization.** (t.y.). Erişim: 15 Haziran 2019 <https://www.iso.org/home.html>

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Furkan Duman
Doğum Tarihi ve Yeri : 13.08.1993 / ISPARTA
E-posta : furkan.duman@btu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Araştırma Görevlisi – Bursa Teknik Üniversitesi (Ekim 2017 – devam ediyor)
- Stajyer – Kocaeli Üniversitesi Sensör Laboratuvarı (Ağustos 2014- Eylül 2014)
- Stajyer – Subor A. Ş. (Temmuz 2015- Ağustos 2015)

DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Cuşkun, Y., Duman, F., Basık, H., Gün, F., Kaplan, K., & Ertunç, H. M.** (2016). Görüntü İşleme Tabanlı 4 Eksenli Çok Amaçlı Robot Mekanizması, *Elektrik - Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO 2016)*, (ss. 247–251), Bursa EMO, Aralık 01-03.