



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA PROGRAMI

**GÖRÜNTÜ İŞLEME İLE PİKSEL ÇAKIŞTIRMAYA DAYALI MESAFE
TESPİT YÖNTEMİ**

DOKTORA TEZİ

Haydar YANIK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Bülent TURAN

TOKAT- 2022



Çalışmayı Destekleyen Kuruluş Bilgileri

“Bu tez çalışması Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Projeler Birimi tarafından 2020/106 proje numarası ile desteklenmiştir”

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi Bülent TURAN danışmanlığında hazırlamış olduğum “Görüntü İşleme İle Piksel Çakıştırmaya Dayalı Mesafe Tespit Yöntemi” adlı Doktora tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

19/10/2022

Haydar YANIK



JÜRİ KABUL VE ONAY

Haydar YANIK tarafından hazırlanan “Görüntü İşleme ile Piksel Çakıştırmaya Dayalı Mesafe Tespit Yöntemi” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 19.10.2022 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından **Oy Birliği** ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı Soyadı)

İmzası

Üye (Başkan) :Prof.Dr.Sefa TARHAN

.....

Üye (Danışman) :Dr.Öğr.Üyesi Bülent TURAN

.....

Üye :Dr.Öğr.Üyesi M.Serhat CAN

.....

Üye :Dr.Öğr.Üyesi Erhan BERGİL

.....

Üye :Dr.Öğr.Üyesi Mehmet TAŞTAN

.....

ONAY

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

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

Teşekkür

Çalışma süresince akademik ve sosyal tecrübelerini benden esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Bülent TURAN' a,

Doktoraya başlamamda bize güvenen ve desteğini esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Sefa TARHAN' a,

Çalışmama desteklerini esirgemeyen saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi M. Serhat CAN hocama,

Akademik ve sosyal desteğini esirgemeyen arkadaşım Çetin Cem BÜKÜCÜ ve Recep TOPUZ' a,

Eğitim ve çalışma hayatımda desteğini biran bile esirgemeyen sevgili eşim Zehra Şahin YANIK'a, bu süreçte zamanımı ayıramadığım kızım Bilgesu ve oğlum Utku Tuna'ya, hayatımın her anında yanımda olan annem Hanım ve babam Mehmet YANIK'a sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

ÖZET

GÖRÜNTÜ İŞLEME İLE PİKSEL ÇAKIŞTIRMAYA DAYALI MESAFE TESPİT YÖNTEMİ

Haydar YANIK

Yüksek Lisans, Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr.Öğr.Üyesi Bülent TURAN

Aralık, 2022 90 sayfa

Günümüzde görüntü sensörleri (kameralar), görüntü analizi (sınıflandırma, bölütleme vb.) ve sentezi (nesne tespit, takip, mesafe tespiti vb.) için yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışmada lazer-metre, lidar-metre, radar ve benzeri endüstriyel amaçlar için kullanılabilecek, görüntü işleme tabanlı bir ölçüm cihazının (görüntü metre) geliştirilmesi için teorik temellerin atılması amaçlanmıştır. Bu amaçla literatürdeki görüntü işleme tabanlı mesafe tespit yöntemleri incelenmiştir. Bu yöntemlerde başarıyı olumsuz etkileyen temel etkenler tespit edilip, bu etkenlerden etkilenmeyen yeni bir yöntem önerilmiştir. Öncelikle önerilen yöntemin teorik temelleri atılmıştır. Bu teorik temeller donanımsal ve yazılımsal bileşenlerden oluşturulmuştur. Çalışmada bu teorik temeller verilip, donanımsal ve yazılımsal bileşenlerin tasarımları yapılmıştır. Böylece, donanımsal ve yazılım bileşenlere sahip elektromekanik bir sistem geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemde bir adet sabit, bir adet hareketli kamera kullanılmıştır. Hareketli kamera için 0.01mm/adım hassasiyette lineer motor ve 526.375 adım/devir hassasiyette çalışan açısız motor kullanılmıştır. Çalışmada 1-800 m arasında uzaklığa sahip hedefler için ölçümler gerçekleştirilmiştir. Total Station ile mm hassasiyette ölçülen hedef noktalar referans olarak kabul edilmiştir. İkinci bir ölçüm cihazı olarak lazer metre kullanılmıştır. Belirlenen hedef uzaklıklar için görüntü metre ile hem teorik hesaplamalar hem de deneysel ölçümler yapılmıştır. Teorik ve deneysel ölçüm sonuçları kullanılarak, geliştirilen cihazın ölçüm hataları belirlenmiştir. 19 ayrı mesafe için deneysel ölçüm sonuçları ile teorik hesaplamalar karşılaştırıldığında deneysel sonuçların ortalama hatası %1.2 olmuştur. Ayrıca geliştirilen ölçüm cihazı ile elde edilen deneysel ölçüm sonuçları lazer metre ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Görüntü metre ile yapılan ölçümler sonucunda %2'nin altında başarı oranına ulaşılmıştır. Görüntü metre ile belirli mesafelerde yapılan 19 ayrı ölçüm noktası için hata ortalaması %1.244 olarak bulunmuştur. Aynı mesafeler için lazer metre ile yapılan ölçümlerde bu oran %1.425 olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Görüntü işleme ile mesafe ölçümü, stereo kamera ile mesafe ölçümü, üçgenleme metodu, görüntü metre, hassas mesafe ölçümü

ABSTRACT

DISTANCE DETECTION METHOD BASED ON PIXEL REGISTRATION WITH IMAGE PROCESSING

Yanık, Haydar

Master's Thesis, Division of Mechatronics Engineering

Advisor: Asst. Prof. Dr. Bülent TURAN

Dec.2022, 90 page

Today, image sensors (cameras) are widely used for image analysis (classification, segmentation, etc.) and synthesis (object detection, tracking, distance detection, etc.). In the study, it was aimed to lay the theoretical foundations for the development of an image processing-based measuring device (image meter), which can be used for laser-meter, lidar-meter, radar and similar industrial purposes. For this purpose, image processing-based distance detection methods in the literature were examined. In these methods, the main factors that negatively affect the performance were determined, and a new method that was not affected by these factors was proposed. First, the theoretical foundations of the proposed method were laid. These theoretical foundations were created from hardware and software components. In the study, these theoretical foundations were given and the designs of hardware and software components were made. Thus, an electromechanical system with hardware and software components was developed. In the developed system, one fixed and one moving camera were used. A linear motor with 0.01mm/step sensitivity and an angular motor operating with 526.375 steps/revolution sensitivity were used for the motion camera. In the study, measurements were carried out for targets with a distance of 1-800 m. Target points with mm precision with Total Station were accepted as reference. A laser meter was used as a second measuring device. Both theoretical calculations and experimental measurements were made with the image meter for the determined target distances. Using the theoretical and experimental measurement results, the measurement errors of the device were determined. When the experimental measurement results were compared with the theoretical calculations for 19 different distances, the average error of the experimental results was 1.2%. In addition, the experimental measurement results of the device were compared with the laser meter measurement results. As a result of the measurements of the image meter, the success rate was below 2%. The mean error was found to be 1.244% for 19 separate measurement points at certain distances with the image meter. For the same distances, this rate was 1.425% in measurements with laser meters.

Keywords: Distance measurement with image processing, distance measurement with stereo camera, triangulation method, image meter, sensitive distance measurement

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
TABLO LİSTESİ.....	viii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ ve KURAMSAL TEMELLER	5
2.1 Literatür Özetleri.....	5
2.1.1 Mono kameralı mesafe ölçüm sistemleri.....	5
2.1.2 Stereo kameralı mesafe ölçüm sistemleri	8
2.1.3 Derin öğrenme ile mesafe ölçüm sistemleri	11
2.2 Kuramsal Temeller	16
2.2.1 Mono kameralar ile mesafe tespiti.....	18
2.2.2 Stereo kameralar ile mesafe tespiti	22
2.2.3 Görüntü işleme tabanlı mesafe ölçümünde piksel bağımlılığı	26
2.2.4 Piksel bağımsız mesafe ölçümü: teorik temeller	26
3. MATERYAL	29
3.1 Donanım.....	30
3.1.1 Kamera.....	31
3.1.2 Mini PC	32
3.1.3 Lineer ve açısal aktüatörler.....	33
3.1.4 G-Sniper lazer mesafe ölçer	34
3.1.5 Total station	35
3.1.6 Kontrol kartı	36
3.2 Yazılım	38
3.2.1 Hedef nesne seçimi ve şablon oluşturma.....	39
3.2.2 Ara yüz programı.....	40
4. YÖNTEM.....	41
4.1 Literatürde kullanılan yöntemler ve yaşanan problemler	41
4.1.1 Farklı mesafeler için Δx değerinin Z ve L' ye bağlı değişimi.....	43
4.2 Önerilen Yöntem: Piksel Bağımsız Mesafe Ölçümü.....	47
4.2.1 B Kamerası görüntü alma açısının tespiti.....	47
4.2.2 B Kamerası β ile uyumlu l mesafenin bulunması (Optimum $l = l_g$)	49
4.2.3 Nesnenin arka plandan ayrıştırılması	53
5. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	55

5.1 Görüntü Metre ile Mesafe Ölçümü	57
5.2 Görüntü Metre, Lazer Metre ve Total Station Ölçüm Sonuçları	63
5.3 Mekanik Donanımın Ölçüm Başarımına Etkisi.....	64
5.4 Sistem Yazılımının Ölçüm Başarımına Etkisi.....	64
5.5 Ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi.....	66
6. SONUÇLAR	68
7. KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

Açıklama

Δx	İki görüntü ekranındaki hedef konumlarının piksel farkı(piksel)
β	Hareketli lens için elektromekanik sisteminden alınan en uygun lens açısı(derece)
l	Lens konumları arasındaki mesafe(m)
Z	Hedef nesnenin kameralara olan uzaklığı
lb	Lensler arası başlangıç mesafesi(metre)
lg	Lensler arası hesaplanan en uygun mesafe(metre)
t	Zaman(saniye)
a	Lens görüntü alma açısı
wp	Kamera yatay çözünürlüğü
$Px1$	Hedef nesne yatay çözünürlüğü
$Px2$	Hedef nesne dikey çözünürlüğü
Po	Hedef nesne merkez pikseli
Δs	Hedef nesnenin farklı konuma göre toplam piksel değişimi
Δl	Lensler arası mesafe değişimi
P	Hedef
$lmin$	Lensler arası mesafenin erişebileceği min. mesafe
$lmax$	Lensler arası mesafenin erişebileceği max. mesafe
r	Hedef nesnenin kamera görüntülerindeki temsili konumu
n	Motor adım sayısı
d	Motor adım hassasiyeti
l_s	Standart lineer mekanik hata
l_r	Rastgele lineer mekanik hata
l_{seg}	Bölütleme hatası
β_s	Standart açısal mekanik hata
β_r	Rastgele açısal mekanik hata

Kısaltmalar

fov
PPM
GM
A
B
MR
HSV
DSP
CNN
SURF
GUI
MVS
NCC
MRF
KITI
WIFI
OPENCN
OPENCV
LM
GM
TS
Sec.

Açıklama

Kamera görüş alanı
Metre başına düşen piksel sayısı
Görüntü metre
Referans kamera
Hareketli kamera
Mobil robot
Hue, Saturation ve Value
Digital signal processing
Convolutional Neural Network
Speed Up Robust Feature
Graphical User Interface
Multi-View Stereo
Normalised Cross-Correlation
Markov Random Field
Veri seti
Wireless Fidelity
Open-source Control Module for ROS
Open Source Computer Vision Library
Lazer metre
Görüntü metre
Total station
Dakika

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kamera görüş alanı.....	19
Şekil 2.2. Mono kameralarda görüntü alanının değişimi.....	19
Şekil 2.3. Standart stereo görüntü şablonu (Soyaslan, 2016)	23
Şekil 2.4. l sabitken aynı Δx kaymasına sahip farklı mesafelerdeki nesneler ..	27
Şekil 2.5. B kamerasının lineer hareketi, eksen çizgileri ve hedef nesne	28
Şekil 3.1. Görüntü metre.....	30
Şekil 3.2. Stereo kameralar	31
Şekil 3.3. Raspberry Pi3 ve dokunmatik ekran.....	32
Şekil 3.4. Lineer aktuatör nema 17 step motor	33
Şekil 3.5. Dynamixel PM42-010-S260-R Açısız aktuatör ve bileşenleri	34
Şekil 3.6. G-sniper 1000 m mesafe ölçer.....	34
Şekil 3.7 Nikon DTM 362 Total Station.....	35
Şekil 3.8. OpenCR1.0 Kontrol kartı	36
Şekil 3.9. GM ile mesafe ölçümü	38
Şekil 4.1. Stereo görüntü platformu.....	41
Şekil 4.2. Stereo görüntü platformu ve görüntü ekranları	42
Şekil 4.3. 1000 m için örnek tasarım	44
Şekil 4.4. 900 m için örnek tasarım	44
Şekil 4.5. 800m için örnek tasarım	45
Şekil 4.6. 600 m için örnek tasarım	45
Şekil 4.7. Stereo görüntü çakıştırma	48
Şekil 4.8. Görüntü ekranlarındaki hedef nesne konumu.....	48
Şekil 4.9. l_+ nin hesaplanması.....	50
Şekil 4.10. l_- nin hesaplanması	50
Şekil 5.1. Görüntü metre (Image Meter).....	56
Şekil 5.2. Görüntü metre' de açısız hareket.....	58
Şekil 5.4. l_+ ve l_- nin hesaplanması	61

TABLO LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. Mesafenin piksel bazlı alan değişimine etkisi(Yanik vd., 2021).....	22
Tablo 2.2. Piksele dayalı yöntemde mesafenin ölçüm hatası üzerindeki etkisi	25
Tablo 3.1. OpenCr1.0 teknik özellikleri	37
Tablo 4.1. l_b , l_g , β değerlerinin mesafe hesabına etkisi.....	51
Tablo 5.1 $l_b = 0.25$ m iken mesafeye bağlı ölçülen β açıları	59
Tablo 5.2 GM ile teorik olarak hesaplanan ölçüm değerleri (TH)	62
Tablo 5.3 Ölçüm karşılaştırma tablosu.	63
Tablo 5.4 Teorik Hesaplanan ile GM ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması	66
Tablo 5.5 Donanımsal ve yazılımsal hataların ölçüm sonucuna etkisi.....	67

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle üretimde insani duyguların ve insan gücünün yerini, makine ve makine duyusu olan sensörler almaya başlamıştır. Sensörler, ortamdaki olayların veya farklılıkların tespit edilip bir başka sistem tarafından algılanmasını sağlamaktadırlar. Sensörler sadece makinaların ürün hakkında bilgi sahibi olmasına değil aynı zamanda üreticinin de ürün hakkında bilgi sahibi olmasına da olanak sağlamaktadırlar.

Kameralar; görüntü bilgisinin elektronik devreler üzerinde işlenmesi ve bu verinin makine veya bilgisayar tarafından algılanmasını sağlayan görüntü sensörleridir. Görüntü işleme, görüntü sensörü tarafından alınan bilgilerin işlenmesi ve analizi demektir (Vyas vd., 2018). Görüntü işlemede hammadde görüntü verisidir. Görüntü verisi içerisinde görüntüye ait birçok bilgiyi saklamaktadır (Kılınç & Gözde, 2020; Kurnaz & Gül, 2018; Ülkir vd., 2021). Görüntülerin içerisinde sakladığı bu bilgiler görüntü işleme teknikleri kullanılarak ortaya çıkarılmaktadır. Bölütleme, nesne tespiti/takibi, morfolojik işlemler vb. görüntü işleme teknikleri ile görüntüye ait bilgilerin elde edilmesinde hız ve doğruluk beklenmektedir (Selçuk vd., 2018; Yanık vd., 2021). Mesafe bilgisi de görüntü içindeki bilgilerden biridir (Yanık vd., 2021).

Mesafe ölçümü endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstride mesafe tespitine yönelik ihtiyaçlar ultrasonik sensörler, radarlar, lazer metreler vb. ölçüm sistemleri ile karşılanmaktadır. Radar sistemlerinin pahalı ve fazla enerji harcaması, lazer kullanılan sistemlerde yansıtıcı yüzey ile ilgili problemler ve lazerin canlı sağlığı üzerine etkilerinin tam belirlenmemiş olması, ultrasonik sensörlerin ise sadece kısa mesafelerde etkili kullanılabilmesi mesafe ölçüm sistemlerinin dezavantajları olarak görülmektedir. Görüntü sensörlerin gelişmesi ile mesafe ölçüm sistemlerine ek olarak görüntü işleme ile mesafe ölçüm sistemleri de bazı çalışmalarda tercih edilmektedir.

Nesne mesafesinin, görüntü içerisindeki bazı bilgilerin kullanılması ile bulunabileceği bir çok araştırmacı tarafından kabul edilmektedir (Hassan vd., 2017; Katada vd., 2014; Phelawan vd., 2012; Seshadrinathan vd., 2017; Shortis, 2015; Takatsuka vd., 2003). Araştırmacılar genel olarak tek kameralı (mono) veya çok kameralı (stereo) sistemlerden elde edilen görüntüleri kullanarak görüntü işleme ile mesafe tespiti yapmaya çalışmışlardır. Mono kamera ile yapılan mesafe ölçüm sistemleri için tercih edilen alan değişimi yöntemi, farklı zamanlarda alınan hedef nesne görüntüsünün zamana bağlı kapladığı alan değişimini temel almaktadır (Ashoori & Mahlouji, 2017; Oh & Jungsik Park, Sang Hwa Lee, Boo Hwan Lee, 2013; Yamaguti & Oe, y.y.). Mono kameralar ile mesafe ölçüm sisteminde tercih edilen bir başka yöntem “hedef tahtası” yöntemidir. Bu yöntem ölçüleri bilinen bir hedef tahtasının hedef nesnenin yanına konulması temeline dayanır (Seshadrinathan vd., 2017; Yanik vd., 2021). Stereo kamera kullanılarak yapılan mesafe tespit yöntemlerinde ise iki farklı noktaya konumlanan kameralardan alınan görüntünün piksel olarak yer değişimi ve bu yer değişim ile birlikte kurulan bir üçgen kullanılmaktadır (Fan vd., 2018; Gan vd., 2018; Hantao, 2005; Liang vd., 2017; Mahammed vd., 2013; Mayer vd., 2015; Nagar & Verma, 2015; Solak & Bolat, 2016; Theodosios vd., 2014; Zeglazi vd., 2018). Bu yöntem literatüre “üçgenleme” (Triangulation) yöntemi olarak girmiştir (Hassan vd., 2017; Nagar & Verma, 2015; Seshadrinathan vd., 2017; Takatsuka vd., 2003; Yanik vd., 2021). Stereo kameralı derinlik haritası çıkarımı ise görüntü içerisindeki nesnelerin bir birine göre durumlarını inceleyen, kısmi olarak mesafe bilgisi içeren çalışmalardır (Budiharto vd., 2011; Campbell vd., 2008; Gan vd., 2018; Hantao, 2005; Hassan vd., 2017; He vd., 2017; Holzmann & Hochgatterer, 2012; Jiao vd., y.y.; Kytö vd., 2011; Lai vd., 2012; Mancini vd., 2017; Mez vd., 2012; Montiel-Ross vd., 2012; Oh & Jungsik Park, Sang Hwa Lee, Boo Hwan Lee, 2013; Robert & Deriche, y.y.; Soyaslan, 2016; Stein vd., 2010; Tao vd., 2013; Tsung-Shiang, 2015; Ummenhofer vd., 2017; Vedula vd., 2005; Yanik vd., 2021).

Mono veya stereo kamera kullanılarak yapılan mesafe tespit yöntemlerindeki ortak taraf her ikisinin de piksele dayalı yöntemler olmasıdır. Piksele dayalı yöntemlerde pikselin görüntü ekranı içerisindeki durumu veya yer değiştirmesi kullanılmaktadır. Mesafe arttıkça piksel genişliği artacaktır. Çünkü; mesafeye bağlı olarak değişen “Kamera Görüş Alanı” (Field of View, FoV) ve sabit odaklı kameralar için değişmeyen

Görüntü işleme ile yapılan mesafe tespit sistemleri incelendiğinde; çalışmalarda genel olarak laboratuvar ortamının tercih edildiği veya doğruluk paylarının mesafe arttıkça azaldığı ve genel olarak çalışmaların 100 m' nin altında olduğu görülmektedir (Ashoori & Mahlouji, 2017; Hassan vd., 2017; Jung & Ho, 2010; Katada vd., 2014; Oh & Jungsik Park, Sang Hwa Lee, Boo Hwan Lee, 2013; Phelawan vd., 2012; Shortis, 2015).

GM' de, elektromekanik sistemin oluşturduğu iki öznitelik olan; lensler arası mesafe ve açı bilgisi, görüntü ekranlarındaki hedef nesnenin konumunu temel almaktadır. Stereo kamera görüntüsü içindeki hedef nesne konumları hareketli kameranın açısal hareketi ile çakıştırılmakta daha sonra hareketli kameranın lineer hareketi ile hedef nesneye ait piksel genişliği belirlenmektedir. Hedef nesneye ait piksel genişliği lensler arası optimum mesafenin bulunmasında kullanılmaktadır. Böylece geleneksel yöntemlere göre daha uzak mesafelerde ve daha hassas ölçümler yapılabilir.

Çalışmamız giriş dahil 6 bölümde ele alınmıştır.

2. Bölümde literatürdeki çalışmaların karşılaştırmaları, deneysel ve teorik metotlar ile mono ve stereo kameralar da mesafe ölçüm yöntemleri ile çalışmanın kuramsal temelleri verilmiştir.

3. Bölümde donanım içerikleri ve gereksinimleri, yazılım bileşenlerin ölçüm başarımına etkisi ile prototipin kullanıcı tarafından kullanılmasını sağlayacak ara yüzün (GUI) tasarlanması ve yazılımın geliştirilmesi için kullanılacak yöntemler verilmiştir.

Bu bölümde, çalışma hazırlığı aşamasında mesafe ölçüm cihazı prototipinde kullanılacak donanımlar, bu donanımların prototipin geliştirilmesi için sahip olması gereken gereksinimlerinden bahsedilmiştir.

4. Bölümde ise açının sistem kararlılığına etkisi, lensler arası mesafenin ölçüm sonucuna etkisi ve sistemin hassasiyetini etkileyen etkenler verilmiştir.

5. Bölümde çalışmanın geleneksel yöntemlerden farkı ortaya konulmuştur.

6. Bölümde ise çalışma sonuçları ve gelecek çalışmalara ait varsayımlar verilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETLERİ ve KURAMSAL TEMELLER

2.1 Literatür Özetleri

Literatür incelendiğinde görüntü ile mesafe ölçümü için 3 farklı ölçüm metodu söz konusudur. Bunların ilki tek kamera kullanılarak yapılan “Mono Kameralı” mesafe ölçüm sistemleri, diğeri iki farklı konuma konumlandırılan kameralardan alınan görüntünün görüntü ekranlarındaki konumlarını kullanan “Stereo Kameralı” mesafe ölçüm sistemi ve son olarak hedef nesnenin görüntü içerisinde oluşturduğu, “Görüntü Derinlik Haritası” ile nesne mesafesi yorumlayarak yapılan ölçüm sistemleridir.

2.1.1 Mono kameralı mesafe ölçüm sistemleri

Mono kameralı sistemlerde, görüntü ekranında oluşan nesnenin görüntü ekranında kapladığı piksel sayısı ile görüntü mesafesi arasında bir ilişki olduğu, bu ilişkiden çıkarılabilecek bir orantı ile mesafe tespiti yapılabileceği öngörülmektedir. Mono kameralar ile yapılan çalışmalarda kullanılan bir diğer yöntem de görüntü içinde boyutları bilinen bir hedef tahtasının kullanılmasıdır. Hedef tahtasının boyutlarının bilinmesi ve kapladığı alanın Δx değerinin belirlenmesi ile mesafe tespiti gerçekleştirilebilmektedir. Literatür incelendiğinde mono kameralı sistemlere ait çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Rahman ve ark. çalışmalarında hedefin gerçek ölçüleri ile piksel genişliği arasındaki ilişkiden faydalanarak, sonuç tahmini için %98.76 gibi yüksek bir doğruluk oranını yakalamışlardır. Çalışmalarını 80-200 cm aralığında, siyah zemin önünde 30x6.5 cm büyüklüğe sahip dikdörtgen, üçgen, silindir ve dairesel nesnelerin mesafe ölçümü için gerçekleştirmişlerdir (Rahman vd., 2008).

N. Yamaguti ve ark. çalışmalarında, kamera hareketi ile nesne mesafesi arasındaki ilişkiyi ve kamera parametrelerini kullanarak nesne mesafesi için bir yöntem

geliştirmişlerdir. Kamerayı doğrusal hareket ettirerek alınan iki görüntünün (t ve $t+1$ zamanlarda) piksel farklılıklarını kullanarak mesafeyi ölçmeye çalışmışlardır. Çalışmalarını 50-150 mm aralığında hareket eden kamera ile alınan farklı yüzey biçimlerine sahip nesneler üzerinde test etmişlerdir. 50 mm kamera hareketi ile 500 mm uzaklıkta bulunan hedef için yapılan ölçümde 499.6 mm ölçüm sonucunu, 100 mm kamera hareketi ile yapılan ölçümde 498.1 mm ve 150 mm kamera hareketi ile yapılan ölçümde 50.3 mm ölçüm sonucu aldıklarını belirtmişlerdir (Yamaguti & Oe, y.y.).

Murphey ve ark. askeri alanda kullanılmak üzere, hareketli bir araç üzerine monte edilen bir kamera ile sabit bir nesne arasındaki mesafeyi ölçmeyi amaçlamışlardır. Aracın sabit hızla nesneye doğru hareketi sırasında alınan iki görüntü arasındaki alan değişimi ve araç hızından faydalanılarak tespit edilen mesafe değişiminden bir tablo oluşturulmuştur. Bu tablodan yararlanılarak nesne ile araç arasındaki mesafe tahmini yapmışlardır. İlk olarak saniyede 10 görüntü karesi, daha sonra da 15 görüntü karesi alınarak bir karşılaştırma yapmışlardır. Sonuç olarak kısa mesafede doğruluk oranının iyi olduğu fakat uzun mesafelerde bu oranın azaldığını, düzensiz nesnelerde ise mesafe ölçümünün farklı sonuç verdiği, kamera çözünürlüğünün mesafe ölçümlerine etki edeceği ve paralel iki kamera ile daha iyi çözüm üreteceğini savunmuşlardır (Murphey vd., 2000).

Pornsuwancharoen ve ark. iki araç arasındaki mesafeyi görüntü işleme metodu ile ölçmek için yeni bir teknik geliştirmeyi amaçlamışlardır. Her 2 saniyede alınan resim örneklerinden araç plaka pozisyonu tespit edip referans nokta olarak alındıktan sonra görüntüleri işlemişlerdir. Alınan her resimde plakanın ekranda olmasına dikkat etmişlerdir. Daha sonra plakanın kapladığı alan ile veri bankasındaki görüntülerdeki plaka alanı karşılaştırması yapılarak mesafe tahminini gerçekleştirmişlerdir. Bu sayede iki araç arasındaki mesafeyi ölçüp, gerekli durumda araç fren sisteminin devreye girebileceğini ileri sürmüşlerdir (Phelawan vd., 2012).

Seshadrinathan ve ark., 3d kamera ile iki nokta arasındaki mesafenin ölçümü için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ölçüm yapılacak nesnenin önüne veya yanına ölçüleri bilinen bir hedef tahtası konulmaktadır. Hedef nesnenin görüntü içinde kapladığı alan piksel cinsinden bulunmakta ve hedef nesnenin mesafe ölçüsü bulunmektedir. Bu

çalışmada 1800 ölçüm üzerinde ölçüm yapılmış olup, kullanılan metottun üçgenleme metoduna göre daha iyi sonuç verdiğini ileri sürmüşlerdir (Seshadrinathan vd., 2017).

Mirzabaki çalışmasında mono kamera ile derinlik tespiti için, büyüklüğü bilinen bir objenin farklı bakış pozisyonuna göre tek kamera ile hedef mesafeyi tahmin edebileceklerini öne sürmüşlerdir. Bu doğrultuda nesnenin büyüklüğünden başka hiçbir veriye ihtiyaç duyulmadan kamera ile arasındaki mesafeyi ölçmüşlerdir. Çalışmalarında Lagrange interpolasyon denklem çözümünü kullanmışlardır. Lagrange interpolasyonunda kullanılacak parametre değişkenleri birbirine bağlı olarak değişmektedir. Bu parametreleri hesaplarken iki durumda değerlendirmişlerdir. İlki interpolasyon fonksiyonunun temelini oluşturan yükseklik ve kameranın dikey açısı, diğeri ise birinci durumda elde ettikleri verileri kullanarak ortaya koydukları fonksiyonda işlenmesi. Hazırlamış oldukları algoritma şu şekildedir;

- Konumu ve yüksekliği bilinen bir kameradan görüntü elde edilir,
- Alınan görüntüdeki nesnenin alt kenar uzunluğu hesaplanır,
- Kamera pozisyonu değiştirilir ve ikinci bir örnek resim alınır,
- Alınan görüntüdeki nesnenin alt kenar uzunluğu hesaplanır,

Birinci ve ikinci görüntüden elde edilen alt kenar uzunluklarını (piksel cinsinden) hazırlamış oldukları bir fonksiyonda işleyerek mesafe tahmini yapmışlardır.

Mirzabaki çalışma sonucunda gerçek genişliği 17 mm olan pikselin ölçüm sonucunda 19.4 mm olduğu ve gerçek mesafesi 280 mm olan hedef uzaklığın, 286 mm ölçüm sonucu aldığı çalışmada vermiş olduğu en iyi ölçüm sonucudur (Mirzabaki, 2008).

M.Takatsuka ve ark. çalışmalarında; Mono kamera ve lazer ışığı kullanılarak bir ölçüm metodu geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında sabit bir koordinat düzleminde bulunan kamera ve üç ayrı noktadan alınan lazer işaretçisi ile obje arasındaki mesafeyi üçgenleme (Triangulation) metodu ile ölçmeyi başarmıştır. Çalışmada bilinen üç ayrı lazer noktasından cisme örnek ışın demetleri gönderilir, daha sonra bu demetlerin cisimden yansması ve cisim ile yaptığı açı kullanılarak nesne ile kamera arasındaki mesafeyi tespit etmişlerdir (Takatsuka vd., 2003).

2.1.2 Stereo kameralı mesafe ölçüm sistemleri

Stereo kameralı mesafe ölçüm sistemleri, iki farklı konuma konumlandırılan iki adet kameranın almış olduğu görüntüler kullanılarak yapılan mesafe tespit ölçüm sistemidir. Literatür incelendiğinde stereo kameralı sistemlere ait çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Ashoori ve Mahlouji çalışmalarında insan görme organı gözü baz alarak sağ gözde ve sol gözde oluşan görüntü farklılığından faydalanılarak cismin derinlik veya uzaklık bilgisi ile iki araç arasındaki mesafe için bir tahmin metodunu ileri sürmüşlerdir. Bu sayede gelecekte caddelerde akıllı araçların haritalar yardımı ile rahatça dolaşabileceğini düşünmüşlerdir. Çalışmalarında stereo kamera kullanmışlardır. Yazılımlarını MATLAB da geliştirmiş olup laboratuvar ortamında %89.9 doğruluk oranına ulaşmışlardır. İzlemiş oldukları algoritma şu şekildedir;

1. Sağ ve sol kameralar kalibre edilir
2. Alınan görüntüler karşılaştırılıp görüntü üzerinde iyileştirmeler yapılır
3. Görüntüler gray scala renk dönüşümü elde edilir
4. Nesnenin sınır noktaları belirlenir.
5. Hedef plakanın merkez noktası hesaplanır ve konumu koordinat sisteminde belirlenir.
6. Plaka mesafesi hesaplanır.

Çalışmalarında 5m' den daha uzak mesafelerde hata paylarının arttığını ve trafikte 5 m gibi bir mesafenin yeterli olacağını savunmuşlardır. Kamera pozisyonlarının daha uygun olması durumunda daha iyi sonuçların elde edileceği ve kamera açısının da önemli bir parametre olduğunu ileri sürmüşlerdir (Ashoori & Mahlouji, 2017).

Hassan ve ark. çalışmalarında; düşük maliyetteki iki web kamera kullanarak üç boyutlu bir kamera düzeneği geliştirmiş olup, bu sistem ile 1-5.5 m arasındaki ölçüm yapmayı amaçlamışlardır. Her iki kameradan alınan görüntü, kamera optik merkezlerine göre üçgenleme metodunu kullanmak koşuluyla bir derinlik tahmini fonksiyonuna tabi tutulmuşlardır. Böylelikle derinliğe ait bilgiyi hesaplamışlardır. Çalışma sonuçlarına göre maksimum ve minimum hata payları %5.358 ile %0.001 olarak hesaplanmış ve

ortalama hata payını %1.735 olarak bulmuşlardır. Hareketli sistemlerde örnekleme alınırken iki kameranın da aynı anda tetiklenmesi gerektiği aksi halde sonuçlardaki hatanın artacağını savunmuşlardır (Hassan vd., 2017).

Nagar ve Verma çalışmalarında gerçek zamanlı bir mesafe tespit yöntemi için, iki kameradan alınan görüntünün karşılaştırmasından faydalanarak mesafe tahmini yapmayı amaçlamışlardır. Dış etkenlerden daha az etkilenecek olduğunu ileri sürdükleri bu sistemde, üçgenleme metodunu kullanmışlardır. Step motor üzerine yerleştirilen kameralar; sol kamera için saat yönünün tersine 0.9^0 açısal hareket ile, diğer step motor için saat yönüne doğru 0.9^0 açısal hareketle, cismin sağına geçene kadar hareket ettirilmiştir. Bu sayede cisim her iki kamerada da görüntü alanına girmesini sağlamışlardır. Daha sonra görüntü ekranlarında nesneler aynı noktada karşılaştırılmıştır. Kurulan basit bir üçgen ile üçgenleme metodu kullanılarak cisim ile kamera arasındaki mesafe hesaplanmıştır. İki kamera arasındaki mesafenin en az 20 cm olması görüşün savunulmuştur. Kamera hareketi için step motor ve kontrol için ise mikrokontrolör kullanılmıştır (Nagar & Verma, 2015).

Shortis çalışmasında; Su altında görüntü işleme tekniği ile balıkların çeşitliliği ve boyutlandırılmasını yapabilecek bir çalışma için kamera kalibrasyon tekniği gerçekleştirmiştir. Bu sayede ölçüm yapılacak sistemin doğru bir şekilde ölçüm yapıp, ekosistemdeki balık çeşitliliği konusunda bilgi sahibi olunabileceklerini ileri sürmüştür. Su altındaki canlıların ölçümlerini yaparken kameranın pozisyonunun sonucu etkileyeceğini belirtmiştir. İki adet GoPro Hero 2 kamera kullanılmıştır. Hava ortamındaki hatanın 0.03-0.1 piksel arasında olduğu bu hata oranının su altında 0.1-0.3 piksel olduğu kanısına varmış ve standart hata oranı belirlemiştir. Su altındaki kalibrasyonda ışık yansımalarının da önemli olduğunu belirtmiştir. İyi bir ölçüm için uygun bir ışık ve görüntü netliğine ihtiyaç olacağını önemini belirtmiştir (Shortis, 2015).

Duran ve Turan çalışmalarında iki araç arasındaki mesafeyi hesaplayan stereo kameralı bir prototip geliştirmişlerdir. Parmak ucu stili diye adlandırdıkları yöntemlerinde, kameralar belirli bir açı (20^0) ile konumlandırılmıştır. İki kamera arasında 150 cm mesafe bulunmaktadır. Öndeki aracın yatay konumları sistem tarafından alınmaktadır.

Bu bilgiler bir yapay sinir ağı eğitim modeline giriş verisi olarak vermişlerdir. Çalışmalarının temelinde Teo-in modelinden esinlenmiş ve yapay sinir ağı eğitim modeli kullanmışlardır (Duran & Turan, 2022).

Katada ve ark. 3D kamera ile geleneksel mesafe ölçümlerinde kullanılan üçgenleme metoduna göre daha doğru bir sonuç verecek yeni bir metod geliştirdiklerini öne sürmüşlerdir. Geleneksel üçgenleme metodunda birbirine paralel yerleştirilen iki kameradan alınan görüntünün birbirine göre durumu kıyaslanarak yapıldığını, TEO-IN stili üçgenleme metodu diye adlandırdıkları yeni ölçüm sisteminde ise iki kameranın orta noktasından sanal bir dikme noktası belirlenerek yapıldığını belirtmişlerdir. 500 mm ile 2000 mm ölçümler arasında geleneksel üçgenlemeden daha iyi bir sonuç aldıklarını ileri sürmüşlerdir. Sundukları yöntemin ölçüm limitleri, geleneksel üçgenleme metoduna göre daha büyük olduğu ve ölçüm doğruluğunun yüksek olduğunu ortaya koymuşlardır (Katada vd., 2014).

Oh ve ark. Kore Savunma Geliştirme Ajansı tarafından desteklenen çalışmalarında, hareketli nesne mesafesini, FIR stereo kamera kullanarak, görüntü derinliği ölçümünün hata modellemesini gerçekleştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarını gerçek zamanlı ve dış mekânda gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında kamera odak uzaklıkları $f=25\text{mm}$, görüntü boyutu 384×288 piksel (p), görüntünün kamera ile arasındaki açıların $30^\circ \times 23^\circ$, piksel aralığı $p=0.035\text{ mm}$ ve kameralar arası 300 mm alınarak iç ve dış mekânda ölçüm yapabilecek için bir sistem kurulmuştur. İç mekânda 40 m , 60 m ve 80 m mesafede ölçüm yapabilmek için kamera arasındaki mesafeyi 0.5 m ile 1 m arasında değiştirerek gerçekleştirmişlerdir. 60 m ve 40 m uzaklıktaki nesneler için 0.5 m ve 1 m kameralar arası uzaklık yeterli olurken 80 m ' de; 1 m kamera uzaklık mesafesi yetersiz kalmıştır. Alınan verilerin, histogram eşitleme ile derinlik bilgileri karşılaştırıldığında 0.5 p bir hata payının olduğunu ortaya koymuştur. Dış ortamda yapılan çalışmada ise 15 m ' den 80 m ye kadar hareketli bir araç 172 m/s sabit hızla hareket ettirilirken, ardışık her iki saniyedeki pozisyonu takip edilmiştir. İç ve dış ortamlarda alınan hata paylarının birbirlerine yakın olduğunu ve bu değerlerin stokastik (rastlantısal) parametreler ile düşürebilir olduğunu belirtmişlerdir (Oh & Jungsik Park, Sang Hwa Lee, Boo Hwan Lee, 2013).

2.1.3 Derin öğrenme ile mesafe ölçüm sistemleri

Mono ve stereo kameralar ile yapılan mesafe tespit yöntemlerine paralel olarak görüntü işleme ile yapılan engel tespiti ve derinlik haritası oluşturma çalışmaları da kısmi mesafe bilgisi üreten çalışmalardır. Derinlik haritası kullanımda görüntü öbeğinin pikselleri arasındaki benzerlik/farklılık, görüntünün şekilsel benzerliği ile birlikte bizlere derinlik haritasını oluşturmada yardımcı olur (Kytö vd., 2011). Otonom araçlar için engel arama ise daha önceden öğretilmiş nesnelerden farklı olarak etiketlenen nesnelerin engel olarak algılanmasını temel almaktadır. Bu sayede engellerin belirli olan başka bir konuma uzaklıkları hesaplanmaktadır.

Derinlik haritası çıkarımı için farklı araştırmacılar farklı yöntemler kullanmışlardır. Bu yöntemlerden bazıları şunlardır.

- Odaklanma ve yazışma ile derinlik kestirimi (Petrović vd., 2013; Zhang vd., 2008)
- Işık alanı derinlik kestirimi (Casas vd., 2018; Tao vd., y.y.).
- Spekülerlik ile çoklu görüş stereo (Dongbo Min vd., 2013; Watanabe, 2010).
- Yaygın-speküler ayırma ve renk sabiti (Jin vd., 2003; Kato, Zoltan, 2011; Tong vd., 2007).

Literatür incelendiğinde derinlik haritası çıkarımı ve mesafe tespitine yönelik çalışmalardan bazıları şunlardır;

Lai ve ark. çalışmalarında mobil robotların menzil bilgisi edinmesi için, fiziki özellikleri belli olan bir nesnenin iki kameradan ortak alınan stereo görüntünün DSP ile işlenmesi sonucu mesafe tespit eden bir sistem önerilmektedir. Aynı eksende ve aralarında 6 cm bulunan iki kameradan alınan stereo görüntü HVS formatında simüle edilmiştir. Harris sınır tarama algoritması sayesinde noktasal özellikler ortaya konulmuştur. Sağ ve sol kameradan alınan görüntülerden biri referans kabul edilip iki görüntünün birleşmesi ile ortaya çıkan farklılıklardan eşitsizlik haritası ve eşitsizlik değeri oluşturulmuştur. Bu eşitsizlik haritasından faydalanılarak referans görüntüye göre mesafe kestirimi yapılmıştır. 120 cm de yapılan nesne ölçümlerinde %99 başarı elde etmişlerdir (Lai vd., 2012).

Montiel ve ark. çalışmalarında derinlik (mesafe) kestirimi ölçümleri için kamera kalibrasyonuna ihtiyaç duymayan, mobil robot (MR) navigasyonu için stereo görüşü elde eden yeni bir yöntem sunmuşlardır. Ortamdan elde edilen stereo görüntülerden, eşitsizlik algoritması (iki farklı kameradan alınan görüntünün farklılıkları) uygulanarak, mevcut görünüm için bir derinlik haritası elde etmişlerdir. MR çevreyi araştırırken bu harita ile çevrenin bilişsel haritası yavaş yavaş oluşturulur. MR, mevcut görüşlerini kullanarak çevresi hakkında eş zamanlı bilgi alır, yörüngesinde bir engel var ise yoldaki engeller hakkındaki bilgiler ana bilgisayardaki genel planlayıcıya gönderilir. İki görüntüdeki aynı pikseller arasında yapılan kaydırma miktarı, engelin derinlik mesafesine bağlıdır ve bu da görüntüde eşitsizlik olarak adlandırılır. Daha yüksek eşitsizlik, engelin kameralara daha yakın olduğu anlamına gelir. En az eşitsizlik, nesnenin kameralardan uzak olduğu anlamını taşır. Nesne çok uzaksa, eşitsizlik sıfırdır. Bu sol görüntüdeki nesnenin sağ görüntü ile aynı piksel konumunda olduğu anlamına gelir. Oluşturulan görüntüde engellerin derinlik bilgisini hesaplamak için ilk adım, iki görüntü arasındaki piksellerin eşleşmesi için ilgili noktaları belirlemektir. Bu ilgili noktalar engel kenarı özelliğine göre seçilir. Daha sonra derinlik mesafesi kayma eşitsizliğe göre hesaplanır. Farklılık, belirli bir karşılık gelen noktada değişen piksel miktarına dayanarak hesaplanır. Eşitsizlik problemini çözmek için literatüre aşağıda verilen önerileri kazandırmışlardır (Montiel-Ross vd., 2012).

- Teklik. Her görüntünün, diğer görüntüde en fazla bir eşleşmesi vardır.
- Benzerlik. Her yoğunluk renk alanı, diğer görüntüdeki benzer bir yoğunluk renk alanıyla eşleşir.
- Sıralama. İki görüntüdeki noktaların sırası genellikle aynıdır.
- Süreklilik. Dengesizlik değişiklikleri derinlik kenarları hariç, bir yüzey boyunca yavaşça değişir.
- Epipolar kısıtlama. Resimdeki bir noktaya bakıldığında, diğer resimdeki eşleşme noktası tek bir çizgi boyunca uzanmalıdır.

Zhong ve ark. çalışmalarında yoğun eşitsizlik haritalarını doğrudan stereo girişlerden hesaplamayı öğrenebilen basit bir yapısal sinir ağı mimarisi tasarlamayı amaçlamışlardır. Buradaki fikir, çözgü hatasını en aza indiren bir derinlik haritası bulmayı amaçlayan, öğrenme sürecini yürütmek için kayıp fonksiyonu olarak görüntü

çözgü hatasını (eşitsizlik haritası artıkları yerine) kullanmaktır. Ağları farklı görünmeyen görüntülere ve farklı kamera ayarlarına kendinden uyarlanmaktadır. Metodlarının KITTI veri seti ve Middlebury veri setinde diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha iyi bir sonuç verdiğini belirtmişlerdir (Zhong vd., 2017).

Liang ve ark. çalışmalarında Stereo eşleme algoritmaları genellikle, eşleştirme maliyet hesaplaması, eşleştirme maliyet toplaması, eşitsizlik hesaplaması ve eşitsizlik iyileştirme adımlarından oluşur. Mevcut CNN tabanlı metotlar, yalnızca dört adımın parçalarını çözmek için CNN'i benimser ve farklı adımlarla başa çıkmak için farklı ağlar kullanırlar, bu da toplam optimal çözümü elde etmelerini zorlaştırır. Çalışmalarında, stereo eşleşmenin tüm adımlarını içerecek bir ağ mimarisi önermişlerdir. Başlangıçtaki eşitsizlik ve paylaşılan özellikler, iki giriş görüntüsü arasındaki uyumun doğruluğunu ölçen özellik sabitliğini hesaplamak için kullanılır. İlk eşitsizlik ve özellik sürekliliği daha sonra ilk eşitsizliği iyileştirmek için bir alt ağ sunulur. Önerilen yöntemi, Sahne Akışı ve KITTI veri setleri üzerinde değerlendirilmiştir. Bu durum hem çok hızlı bir çalışma süresi sağlarken, hem de KITTI 2012 ve KITTI 2015 bench-marklarında son teknoloji performansa yakın bir performans göstermiştir (Liang vd., 2017).

Budiharto ve ark. çalışmalarında kapalı mekanlarda engelden kaçan bir hizmet robot için yüz tanıyan, hareketli engelleri belirleyebilen ve robotun manevralarını yapmak için 3 ana modül geliştirmişlerdir. Kalman filtresi ile hareketli bir engelin bir sonraki hareketi ve konumu tahmin edilip ona göre kendi hareket hızı ve yönünü belirleyebilmektedir. Stereo vizyon ve ultrasonik sensörlerin entegrasyonunun, servis robotu ile engeller arasındaki mesafe tahmini için sensörler olarak kullanılabilir olduğu kanıtlanmıştır. Çalışmalarında stereo görüntü ile engelden kaçan bir robot tasarlamışlardır. Çalışmada ortaya çıkaran robot, hareket eden engellere çarpmadan bir kupayı istenen konuma götürmeyi başarmıştır. Yapılan çalışmada hareketli insanlar birer engel olarak belirlenmiştir. Hareketli engellerin hızları, doğrultuları ve uzaklıkları stereo kameralar ile tespit edilerek muhtemel çarpışmalardan kendilerini korumuşlardır (Budiharto vd., 2011).

Petrović ve ark. çalışmalarında bir takip robotu önermişlerdir. Bu tür robotların çalışma senaryolarında insan takibi için görüş sisteminin, insanı tespit edebilmesi, insana olan

mesafeyi hesaplayabilmesi ve insanı izleyebilmesi, aralarında sabit bir mesafe bırakması gerektiğinin altını çizmişlerdir. Stereo kameradan biri referans olarak belirlenip, her birinden alınan görüntüler karşılaştırılarak eşitsizlik haritası oluşturulmaktadır. Önerilen sistemdeki sonuç eşitsizlik haritası, bağlı bir piksel etiketleme tabanlı yöntem kullanılarak bölümlere ayrılmıştır. Farklı mesafelerden alınan nesneler için derinlik haritasını oluşturmuşlardır. Kalman filtresi ile geliştirilen robot; konuma ait bilgileri kameradan alarak sürekli yeni veriler ile değiştirmiştir. Geliştirilen metodu hem açık hem de kapalı ortamda değişik senaryolar ile deneyip bir insanın takibinde sistem performansını test etmişlerdir (Petrović vd., 2013).

Tsung ve Shiang çalışmalarında stereo görüntüden nesnelerin mesafeleri ölçmek için bir sistem geliştirmişlerdir. Çalışmaları görüntü alma ile başlayıp, alınan her iki görüntüde Otsu algoritması ile nesneleri arka plandan ayırt edilmesi, nesne algılanması, bölütleme yoluyla bir ön işlem uygulanması ve görüntünün bölümlerine ayrılması ile devam eden bir proses içerisinde işlenmesi ve daha sonra görüntüler karşılaştırılarak devam etmektedir. Mesafe ölçümü yapmadan önce görüntünün eşitsizlik değerinin (Speed Up Robust Feature (SURF) yöntemi ile) bilinmesi gerekmektedir. Nesne ile kamera arasındaki mesafeyi ekipman eksikliği nedeni ile stereo kamera yerine tek kamera kullanarak farklı noktalardan alınan iki görüntü üzerinden belirlemişlerdir. Yöntemlerinde alınan iki örnek görüntü noktasının nesne ile aralarındaki mesafe ve kamera odak mesafelerini kullanmışlardır. Kamera odak uzaklığı değiştirilerek alınan örneklemelerde odak uzaklığını arttırarak daha düşük hatalı sonuçlar alacaklarını belirtmişlerdir. 900 mm de alınan örneklemede hata payının 70 mm'lik odak mesafesinde %0.44 (4 mm), 34 mm'lik odak mesafesinde %8.32 (74 mm) ve 24 mm'lik odak mesafesinde %16.39 (147.5 mm) ölçümler yapmışlardır (Tsung-Shiang, 2015).

Campbell ve ark. çalışmalarında Multi-View Stereo (MVS) için kullanılan derinlik haritalarının kalitesini iyileştirmek için yeni bir algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritmaları giriş görüntülerinde her piksel için derinliği tahmin edilip ve algoritmaları iki aşamada ilerlemişlerdir. Başlangıçta, her bir piksel için “Normalleştirilmiş Çapraz Korelasyonu” (Normalised Cross-Correlation, NCC) eşleşen bir metrik olarak kullanılıp, olası derinlik değerleri için bir derinlik değer kümesi oluşturuluyor. Daha sonra her piksele derinlik ataması veren çok etiketli ayrık bir “Markov Rastgele Alanı”

(Markov Random Field, MRF) modelinde çözmüşlerdir. Bu süreçteki en önemli özelliklerden biri, MRF modelinde doğru derinlik için yeterli veri bulunmaması durumunda dahil edilmesidir. Çalışmalarında deneysel sonuçların, yöntemlerinin, seyrek veri setlerinde çalışırken mevcut en son rekonstrüksiyon algoritmaları üzerinde performansta önemli bir gelişme sunduğunu savunmuşlardır. NCC eşleştirme tekniğinin arıza modlarını açıkça hesaba katarak, gerçek yüzeyi gürültüyle doğru bir şekilde belirleyen, küçük eşleştirme pencerelerinin kullanımına izin veren derinlik haritaları üretebilmişlerdir (Campbell vd., 2008).

Zhang ve ark. çalışmalarında sadece pikseller arasındaki renk yoğunluk ayrımlarını değil aynı zamanda piksellerin birleşmesi ile oluşan çoklu karelerin oluşturduğu geometrik benzerliği de kullanan otomatik bir derinlik tahmin yöntemi sunmaktadırlar. Bu şekilde pikseller arası yoğunluk ve şekil yönünden benzerliğini kullanarak daha az enerji ile daha iyi sonuç alacaklarını savunmuşlardır. Bu sayede oluşturulan derinlik haritasında sadece sınırların belirlenmesini sağlamayıp aynı zamanda videodaki görüntü karelerinin uyum sınırını da belirlemişlerdir. Çalışmalarının tek bir nesneye yönelik olmadığı ve video işlemeye de uygun olduğunu savunmaktadırlar (Murphey vd., 2000).

Robert ve Deriche çalışmalarında şimdiye kadar yapılan çalışmalarda derinlik haritası kestiriminde 3 farklı yöntem izlemişlerdir. Bunların ilkinde kamera tarafından alınan görüntünün komşulukları, görüntünün şekli ve ayırım çizgileri kullanılmıştır. İkincisin de gri skalaya alınan görüntünün görünümüne ait yoğunluk haritasından faydalanmışlardır. Son kullanılan yöntem ise görüntünün ölçeklendirilmesi ile (küçültme) daha hızlı ve daha az enerji tüketen bir sistemden faydalanmışlardır. Burada pikseller arası ilişki “Euler-Lagrange” denklemi ile ayrıştırılarak derinlik tahmini edilmiştir. Çalışmalarında bu 3 farklı yöntemin birleştirilmesi ile daha yüksek doğruluğa sahip bir yöntem sunmuşlardır (Robert & Deriche, y.y.).

Mancini ve ark. otonom mobil robotlar için çevrelerini anlayabilen ve derinlik tahmini yürütebilen bir sistem sunmuşlardır. Çalışma sonuçlarını KITİ veri seti ile kıyaslamışlardır. Çalışmalarında komşu pikseller arasında “Fully Convolutional Network” ile çözüm önermektedirler. Kameralar arası 60 cm olan bir platform kurulumu bu platformdan Zurich Forest ve Perugia Countryside veri seti ile derinlik tahminini

gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar KITİ veri seti ile karşılaştırılır olması ve farklı sensörlerden gelen bilgilere entegre olması yönünden başarılı olduğunu savunmuşlardır (Mancini vd., 2017).

Tao ve ark. Işık alan nesneler için kamera ile derinlik tahmini üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Mevcut derinlik tahmini yapan algoritmaların parlak yüzeyler için net sonuç vermemesi üzerine ışık alan kamera derinlik tahmini algoritması sunmuşlardır. Bu algortmada hem dağınık hem de spesifik yansımalar birden fazla ışık kaynağına maruz bırakmışlardır. Bu işlemleri de 3 adımda yapmışlardır. İlkinde ışık kaynağı olmadan bir görüntü ve derinlik elde edilmiştir. İkincisinde ise ışık kaynağının rengi tahmin edilmiş ve son olarak da yansıma açılarını dikkate alınmıştır (Tao vd., y.y.).

Wedel ve ark. çalışmalarında gerçek zamanlı hareket eden bir araçtan öndeki engelin algılanmasına yönelik bir engel belirleme algoritması sunmuşlardır. İki standart adımda engel algılamasını önermektedirler. Bunların ilki görüntü uzayından sahnenin derinliği tahmin eden bir hipotez, diğeri ise zaman içerisinde görüntüdeki değişim hipotezinin belirlenmesinde öngörülmektedir. Araç üzerine monte edilen sabit bir kameranın sol kenarı referans optik eksen kabul ediliyor. Kameranın odak uzaklığı ve referans kullanılarak yol koordinat bilgileri hesaplanıyor. Kamera alınan görüntünün derinliği art arda gelen görüntülerden pasif bir sensör tarafından hesaplanmaktadır. 10 m/sec. giden bir araç için tehlikeden kaçınılması gereken minimum mesafenin 45 m olacağı ve çalışmaların da 69 m' den hatayı saptadıklarını belirtmişlerdir (Wedel vd., 2006).

2.2 Kuramsal Temeller

Endüstride mesafe tespitine yönelik ihtiyaçlar ultrasonik sensörler, radarlar, lazer metreler (Lidar) vb. ile karşılanmaktadır. Ultrasonik sensörler ses dalgalarını kullanarak hedef nesneden geri yansımalarını temel alan sensörlerdir. Bu sensörlerin maliyetlerinin düşük oluşu, hızlı sonuç üretmeleri ve kısa mesafede etkili olması nedeni ile birçok basit uygulamada tercih edilmektedirler. Araç/engel algılama, sıvı seviye tespiti, ürün algılama gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Radarlar ise ultrasonik sensörlerden farklı

olarak hedef nesneye gönderdikleri radyo dalgaları ile taşınan elektromekanik sinyallerin geri dönüşünü temel almaktadır. Radar sistemlerin ultrasonik sistemlere göre daha pahalı oluşu ve daha fazla enerji tüketmeleri dezavantaj gibi görünse de daha uzak (~100km) mesafede çalışabilmesinden tercih edilmektedir. Lazer sistemleri de radarlar gibi elektromekanik sinyal gönderip alan ve arada geçen süreyi temel alan sistemlerdir. Harita mühendisliği ve inşaat sektörü lazer metreyi en çok tercih eden alanlardır. Lazer kullanılan sistemlerde yansıtıcı yüzey ile ilgili problemleri ve lazerin canlı sağlığı üzerine etkilerinin tam belirlenmemiş olması dezavantaj olarak görülmektedir (HealthOrganization), 1998).

Literatürde mesafe ölçümüne yönelik, mono veya stereo kamera kullanılarak yapılan görüntü işleme tabanlı çalışmalarda bulunmaktadır. Bu çalışmalarda başarımları etkileyen etkenlerin neler olduğu ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Mesafe tespitine yönelik çalışmalar incelendiğinde ise mono kamera sistemlerinde ek ekipman, farklı bakış açıları ve görüntüden örnek alma zamanı (Yamaguti & Oe, y.y.) veya hedef tahtası kullanılması (Seshadrinathan vd., 2017), stereo kameralı sistemlerinde görüş açısı (Soyaslan, 2016) ve lens arası mesafe değişkenlerinin tek bir parametre olarak kullanıldığı görülmektedir.

Literatürde incelenen çalışmalar sonucunda mesafe ölçüm başarımlarını etkileyen etkenler “Mono kameralı mesafe tespiti” ve “Stereo kameralı mesafe tespiti” başlıkları altında ayrıntılı olarak verilmiştir.

Genel olarak derinlik haritası oluşturma çalışmaları görüntü içindeki tek bir nesneye odaklanmamaktadır. Genellikle nesnenin mesafesinden çok nesnelerin birbirlerine göre yakınlık ya da uzaklıkları ile ilgilenilmektedir. Bununla birlikte nesnelerin mesafelerini tespit edebilen derinlik haritalama çalışmalarında stereo kameralar ile mesafe tespitinde yaygın olarak kullanılan üçgenleme metodu kullanılmaktadır. Bu sebeple çalışmalar genellikle yakın mesafeler için gerçekleştirilmiştir. Orta ve uzak mesafelerin tespiti için (>10m) yapılan derinlik haritası oluşturma çalışmasına literatürde rastlanmamıştır.

Kameraların birbirlerine göre paralel veya açılı olarak konumlandırılması ve kameralar arası mesafenin ayarlanmasına yönelik Oh ve ark., Nagar ve Verna, Ashoori ve Mahlouji çalışmalarında değinmiş ve kamera açılarının kameralar arası mesafe ile

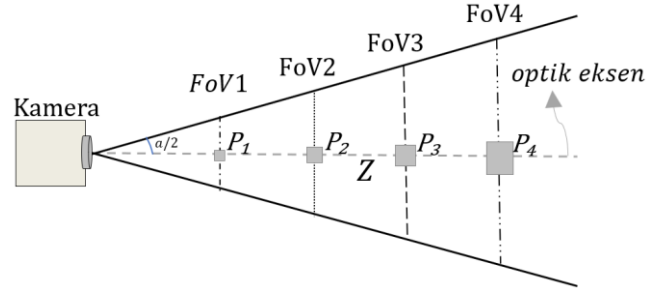
desteklenmesi ile daha doğru bir sonuç vereceğini öne sürmüşlerdir. Daha önce yapılan çalışmalarda kamera konumları açılı olsa bile kameralar arası mesafe sabit tutulmuş ve sistem tarafından bir parametre olarak düşünülmemiştir (Ashoori & Mahlouji, 2017; Nagar & Verma, 2015; Oh vd., 2013). Derinlik haritası ile mesafe kestirimi için yapılan çalışmalarda ise yeterli ölçüm hassasiyetine ulaşılmadığı ve uzak mesafede ölçüm yapabilen çalışmalara rastlanılmadığı görülmüştür.

Çalışmada stereo kamera ile nesne mesafesi tespiti için geliştirilen GM; stereo ve mono kameralı görüntü işleme ile yapılan mesafe tespit çalışmalarından farklı olarak elektromekanik bir sistem üzerine kurulan, stereo kameralı bir yöntem ve sistemdir. Bu sistemde stereo kameralardan biri referans görüntüyü sağlayan sabit kamera olurken, diğeri açısall ve lineer hareket edebilmektedir. Açısall hareket edebilmesi hedef nesneye en yakın açısall hassasiyeti ve lineer olarak hareket edebilmesi, belirlenen açısall pozisyonda en uygun kameralar arası mesafenin belirlenmesi için kullanılmıştır. GM' ye ait bilgiler “Yöntem” kısmında ayrıntılı olarak verilmiştir.

2.2.1 Mono kameralar ile mesafe tespiti

Bu çalışmalarda mesafe iki farklı yöntem ile bulunmaktadır. Bunlardan ilki nesnenin kapladığı alan ile aynı uzaklıktaki hedef tahtasının kapladığı alanın kıyaslanması ile, diğeri de ardışık görüntülerdeki nesnenin kapladığı alan değişimi ile elde edilmektedir (Yanik vd., 2021).

Şekil 2.1' de α sabit yatay görüş açısına sahip kameraya ait görüş alanının mesafe ile değişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Kamera görüş alanı

P_1 , P_2 , P_3 ve P_4 farklı uzaklıktaki hedef nesneye ait bir pikseli, FoV_1 , FoV_2 , FoV_3 , FoV_4 ise mesafeye bağlı kamera görüş alanını temsil etmektedir. Bu değişim Eşitlik1' de formüle edilmektedir.

α : kamera görüş açısı,

Z : P_0 'ın platformdan uzaklığı,

wp : kameranın çözünürlüğü

wp_x : kameranın yatay çözünürlüğü

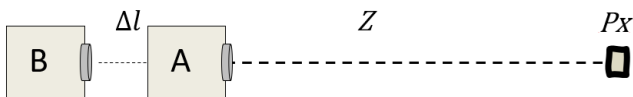
wp_y : kameranın dikey çözünürlüğü

$$FoV = \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) * Z * 2 \quad (1)$$

$$PPM = \frac{wp}{FoV} \quad (2)$$

Kameraya ait FoV değeri mesafe ile değişmektedir. Bu da PPM değerini etkilemektedir. PPM Eşitlik 2 ile hesaplanmaktadır.

Şekil 2.2' de, mono kamera ile mesafe tespitinde kullanılan alan değişimi yöntemi verilmektedir.



Şekil 2.2. Mono kameralarda görüntü alanının değişimi

Eşitlik 3, Eşitlik 4, Eşitlik 5, Eşitlik 6 ve Eşitlik 7’ de; farklı zaman aralığında kamera konumları arasındaki yer değişimi Δx , hedef nesnenin kameranın ilk konumu ile arasındaki mesafe Z , Z mesafesindeki bir pikselin genişliği Px , Z mesafesindeki kare şeklindeki hedef nesnenin genişliği lx ve hedef nesnenin kapladığı toplam piksel sayısı S_1 olarak alındı.

$$FoV_1 = \tan\left(\frac{a}{2}\right) * Z * 2 \quad FoV_2 = \tan\left(\frac{a}{2}\right) * (Z + \Delta x) * 2 \quad (3)$$

$$PPM_1 = \frac{wp_x}{FoV_1} \quad PPM_2 = \frac{wp_x}{FoV_2} \quad (4)$$

$$Px_1 = \frac{1}{PPM_1} \quad Px_2 = \frac{1}{PPM_2} \quad (5)$$

$$S_1 = \frac{Lx^2}{Px_1^2} \quad S_2 = \frac{Lx^2}{Px_2^2} \quad (6)$$

Hedef nesnenin görüntü ekranındaki alan değişimi Δs ise Eşitlik 7’ deki gibi hesaplanır.

$$\Delta s = S_2 - S_1$$

$$\Delta s = Lx^2 \left(\frac{1}{Px_1^2} - \frac{1}{Px_2^2} \right)$$

$$\Delta s = Lx^2 * wp_x^2 * \left(\frac{1}{\left(\tan\left(\frac{a}{2}\right) * Z * 2\right)^2} - \frac{1}{\left(\tan\left(\frac{a}{2}\right) * (Z + \Delta x) * 2\right)^2} \right)$$

$$\Delta s = \left[Lx * \frac{wp_x}{\left(2 * \tan\left(\frac{a}{2}\right)\right)} \right]^2 * \left[\frac{1}{Z^2} - \frac{1}{(Z + \Delta x)^2} \right] \quad (7)$$

Burada; lx ; sabit, wp_x ; sabit, a ; sabit olduğundan Δs değişimi Z ve Δx ile ters orantılı olarak değişmektedir. Z mesafesi, ölçülmek istenen mesafe olduğu için Δx bu ölçüm mesafesinde sonucu etkileyen en önemli faktördür. Δs değerinin yüksek çıkması ölçüm doğruluğunu arttıracaktır. Fakat belli bir mesafeden sonra bu değeri arttırmak için Δx ’in artması yeterli olmayacak veya sistemin ergonomikliğini ortadan kaldıracaktır. Δx ’in değişimi orta ve uzak mesafelerde Δs değişimine etkisi 0 piksele eşit olacağından sonuç üretilmeyecektir.

Bu durumda;

t_1 görüntüsü için;

$$s_1 = (Nesne\ genişliği/P_x) * (Nesne\ yüksekliği/P_y)$$

t_2 görüntüsü için;

$$s_2 = (Nesne\ genişliği/P_x) * (Nesne\ yüksekliği/P_y)$$

$$\Delta s = s_1 - s_2$$

Boyutları 10x5 m olan bir nesne için Z uzaklığı 20 m, $\Delta l = 0.5$ m, wpx=4608 p olduğunda;

S_1 için;	FoV=23.09401 m,	PPM=199.5323,	$P_x = P_y = 0.005012$ m
-------------	-----------------	---------------	--------------------------

$$S_1 = \frac{10}{0.005012} * \frac{5}{0.005012} = 1990656 p$$

S_2 için;	FoV=23.67136 m,	PPM=194.6656,	$P_x = P_y = 0.005137$ m
-------------	-----------------	---------------	--------------------------

$$S_2 = \frac{10}{0.005137} * \frac{5}{0.005137} = 18947355 p$$

$$\Delta s = 95920.96 p$$

$\Delta l = 0.2$ m olduğunda ise S_2 alanı ve Δs değişecektir;

S_2 için;	FoV=23.32495 m,	PPM=197.5567,	$P_x = P_y = 0.005062$ m
-------------	-----------------	---------------	--------------------------

$$S_2 = \frac{10}{0.005062} * \frac{5}{0.005062} = 1951432 p$$

$$\Delta s = 39223.79 p$$

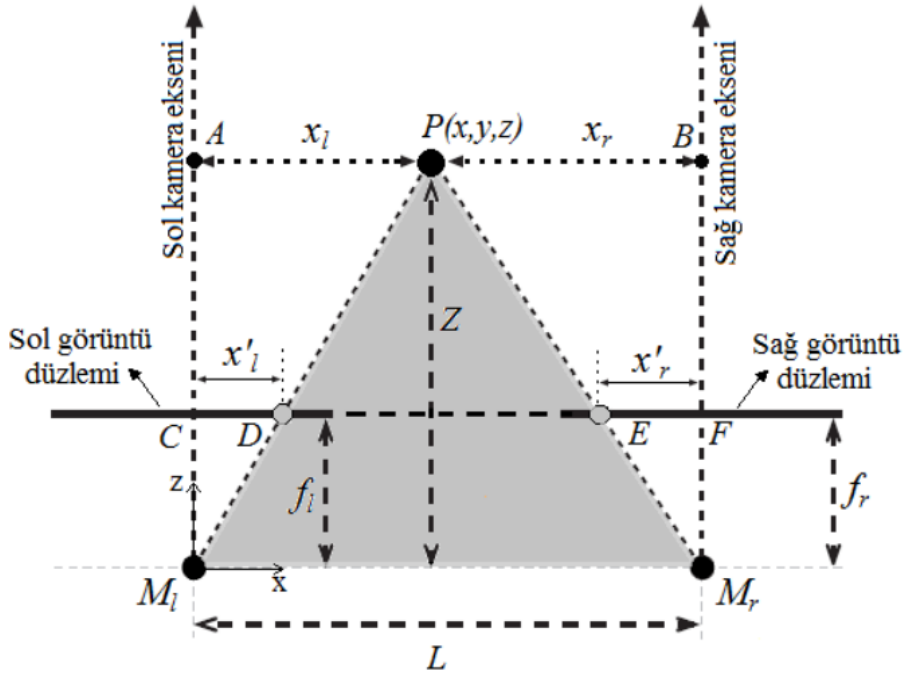
Tablo 2.1' de iki farklı büyüklükteki nesneye ait, piksel bazlı alan değişiminin, mesafeye bağlı olarak hesaplanan değerleri verilmektedir. Burada görüntü çözünürlüğü, nesne büyüklüğü ve kamera görüntü alma açısı sonuca direk etki eden etkenlerdir.

Tablo 2.1. Mesafenin piksel bazlı alan değişimine etkisi(Yanık vd., 2021)

Nesne boyutları	Z (m)	Δs (Piksel) $\Delta_l = 0.1$ m için	Δs (Piksel) $\Delta_l = 0.2$ m için	Δs (Piksel) $\Delta_l = 0.5$ m için
2x1 m	5	49472	96117	221111
	10	6276	12368	29611
	15	18689	3701	8985
	20	790	1569	3837
	30	234	468	1151
	40	99	198	488
	60	29	59	146
	100	6	13	32
	600	0	1	1
10x5 m	5	1236794	2402922	5527772
	10	156895	309198	740289
	15	46718	92517	224636
	20	19758	39224	95921
	30	5869	11680	28770
	40	2479	4940	12212
	60	735	1467	3641
	100	159	318	790
	600	1	1	4

2.2.2 Stereo kameralar ile mesafe tespiti

Birbirine paralaks olan iki kameranın almış oldukları görüntülerin, görüntü ekranlarındaki fark kullanılarak yapılan bir mesafe tespit sistemidir.



Şekil 2.3. Standart stereo görüntü şablonu (Soyaslan, 2016)

Şekil 2.3’ de standart bir stereo görüntü ekranı verilmiştir. Sol kameranın lens merkezi M_l , odak uzaklığı f_l , sağ kameranın lens merkezi M_r , odak uzaklığı f_r , lens merkezleri arasındaki mesafe ise L alınmıştır. P hedef pikselin sağ kameranın eksenine uzaklığı X_r , sol kameranın eksenine uzaklığı X_l dir. Burada kameraların birbirlerine denk olduğu ve odak uzaklıklarının aynı ve f olduğu varsayılmaktadır ($f_l = f_r = f$).

Stereo kamera konumları ve kamera görüntü ekranlarında hedefin koordinat noktası sayesinde basit bir üçgen oluşturulur. Genel trigonometrik hesaplamalar ile hedef nesnenin kameralara olan uzaklığı hesaplanır. Buradaki dezavantaj mesafeye bağlı olarak Px (Z mesafesindeki bir pikselin genişliği) değişmesi ve buna bağlı ölçüm hassasiyeti ve çözünürlüğünün Px ters orantılı olmasıdır.

$$\Delta x = PPM * l \quad (8)$$

Kameralar arası mesafenin piksel olarak hesaplanması Eşitlik 8’ de verilmiştir. Eşitlik 8’ de Δx , hedef nesnenin kamera görüntü ekranlarındaki konumları arasındaki farkın piksel olarak değişimini, PPM , 1 m’ deki piksel sayısını ve l , lensler arası mesafeyi ifade etmektedir.

Kameralar arası mesafenin ($l=0.2$ m) Px bağılı olarak değişimi α (60°) ve wpx (4608 p) sabit alındığında; 10 m ve 11 m mesafede FoV ve PPM değerlerine bağılı olarak lensler arası mesafelerin piksel (p) olarak kayma miktarı (Δx) değeri 80 p ve 72 p hesaplanmıştır. Bu değerler kameralara ait görüntü ekranlarındaki hedef nesne merkezlerinin arasındaki farkı vermektedir. Buda 10 m de referans görüntü ekranında hedef nesne koordinatı r ise diğer kameraya ait görüntü ekranında hedef nesne koordinatı $r+80$ p anlamına gelmektedir. 11 m için ise kameralara ait görüntü ekranlarındaki koordinatları r ve $r+72$ p olacaktır. Mesafenin artmasıyla iki görüntü ekranlarındaki hedef nesne koordinatları arasındaki piksel farkları azalacaktır. 180 m de iki görüntü arasındaki fark 4p iken (r ve $r+4$ p) bu değer 200 m de de aynı olacaktır. 550 m-600 m arasında 0 p, 550 m-600 m, 600 m-900 m, 900 m-1000 m de her iki kameraya ait görüntü ekranlarındaki koordinat farkı 0 p olacaktır. Bu ölçüm duyarlılığı ve mesafeleri Tablo 2.2' de verilmektedir. Literatürdeki çalışmalarda mesafe arttıkça ölçüm doğruluğunun azalması piksel temelli çalışmalar olmasından kaynaklanmaktadır (Yanik vd., 2021). Tablo 2.2' de üçgenleme yöntemi ile yapılan ölçümlerde, mesafenin ölçüm sonuçlarındaki hata üzerine etkisi verilmektedir.

Tablo 2.2. Piksele dayalı yöntemde mesafenin ölçüm hatası üzerindeki etkisi

Z (m)	FoV (m)	$P_x = \frac{1}{PPM}$	PPM (piksel/m)	$\Delta x = (PPM * l)$	Ardışık mesafeler arası piksel farkı		Ardışık mesafeler arası max hata (m)
10	11.547	0.00250	400.00	$400 * 0,2 =$ ~80 p		iki mesafe	
11	12.701	0.00276	362.31	$362.31 * 0.2 =$ ~72 p	8p/1 m	10 m- 11 m	$(1/8) * (1/2) =$ 0.0625 m
12	13.856	0.00300	333.33	~67 p	5p/1 m	11 m- 12 m	$(1/5) * (1/2) = 0.1$ m
20	23.094	0.00501	199.60	~40 p	13p/8 m	12 m- 20 m	$(8/13) * (1/2) = 0.3075$ m
30	34.641	0.00751	133.15	~27 p	13p/10 m	20 m- 30 m	$(10/13) * (1/2) =$ 0.384 m
150	173.2	0.375	26.6	~5 p	22p/120 m	30 m- 150 m	$(120/22) * (1/2) = 0.7$ m
180	207.846	0.0451	22.17	~4 p	1p/30 m	150 m- 180 m	$(30/1) * (1/2) = 15$ m
200	230.94	0.05	19.95	~4 p	0p/20 m	180 m- 200 m	$(20/0) * (1/2) = \infty$ m
260	300.2	0.06	15.3	~3 p	1p/60 m	200 m- 260 m	$(60/1) * (1/2) = 30$ m
400	461.8	0.10	9.9	~2 p	1p/140 m	260 m- 400 m	$(140/1) * (1/2) = 70$ m
550	635.08	0.137	7.25	~1 p	1p/150 m	400 m- 550 m	$(150/1) * (1/2) = 75$ m
600	692.820	0.15035	6.651	~1 p	0p/50 m	550 m- 600 m	$(50/0) * (1/2) = \infty$ m
900	1039.23	0.22552	4.434	~1 p	0p/300 m	600 m- 900 m	$(300/0) * (1/2) = \infty$ m
1000	1154.70	0.25058	3.990	~1 p	0p/200 m	900 m- 1000 m	$(200/0) * (1/2) = \infty$ m

Görüntü işleme ile yapılan stereo kameralı mesafe tahminlerinde kullanılan geleneksel yöntemler incelendiğinde hem kısa hem de uzun mesafelerde hassas ölçüm gerçekleştirilen, çok parametrelili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Var olan çalışmalarda ise tahminlerin doğruluk derecesinin düşük olması ve bu yöntemlerin birçoğunun laboratuvar ortamında ve tek bir parametre ile gerçekleştirildiği görülmektedir.

2.2.3 Görüntü işleme tabanlı mesafe ölçümünde piksel bağımlılığı

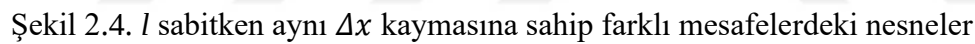
Literatür incelendiğinde görüntü işleme tabanlı mesafe ölçümünde işlemlerin piksel bazlı yapıldığı görülmektedir. Mono kameralar ile yapılan ölçümlerde alan hesabı piksel kare olarak, stereo kameralarda nesnenin kayma miktarı piksel olarak bulunmakta ve bu parametreler üzerinden mesafe ölçümü gerçekleştirilmektedir. Stereo kameralarda lensler arası mesafenin ölçüm sonucu üzerinde etkili olduğu birçok çalışmada belirtilmekle birlikte çoğu çalışmada sabit olarak kullanılmakta, bazılarında ise farklı lensler arası mesafeler kullanılmakla birlikte ölçüm esnasında sabit tutulmaktadır. Yani farklı lensler arası mesafeler kullanılarak ölçümler yapılmakta ve birbirleri ile karşılaştırılmaktadır. Ancak ölçüm esnasında uygun lensler arası mesafenin tespiti yapıldığı ve bu mesafe ile ölçümün gerçekleştirildiği bir çalışma yoktur. Bu sebeple lensler arası mesafe hiçbir çalışmada aktif bir parametre olarak kullanılmamıştır. Sonuç olarak ölçümlerde sadece piksel bazlı oluşturulan parametreler ($\Delta s, \Delta x$) kullanılmaktadır.

Stereo ve mono kameralar ile mesafe tespiti başlıkları altında mesafe ölçümünde kullanılan parametreler ile yapılabilecek ölçümlerin sonuçları denklemler oluşturularak hesaplanmış ve hesaplama sonuçları tablolarda verilmiştir. Tablo 2.1 ve Tablo 2.2 incelendiğinde piksel bazlı yöntemlerin mesafe arttıkça başarı oranının düştüğü açıkça görülmektedir. Araştırmacılar da bu doğrultuda sonuçlar bildirmektedir. Özellikle yöntemlerin yakın mesafelerde etkili olduğu ancak mesafe arttıkça hata oranının arttığı çalışmalarda açıkça belirtilmektedir. Ancak literatürde piksel bağımlılığını açıkça belirten ve piksel bağımsızlığını hedefleyerek bu amaçla geliştirilmiş bir yöntem bulunmamaktadır.

2.2.4 Piksel bağımsız mesafe ölçümü: teorik temeller

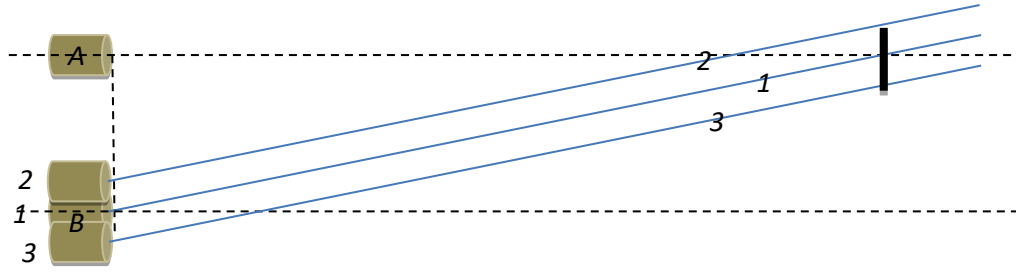
Çalışmamız literatürde görülen eksikliğin giderilmesine odaklanmıştır. Yani bu çalışmada stereo kameralar ile yapılan ölçümlerde kullanılan piksel bazlı parametrenin yanında ayarlanabilir lensler arası mesafe değişkeni ile elde edilecek ikinci bir

Ölçülen nesne mesafesi arttıkça nesnenin görüntü ekranında kaplayacağı alanın giderek küçüleceği açıktır. Nesne daha az sayıda piksel ile ifade edilecektir. Nesnenin boyutlarının değişmediği gerçeğini ele aldığımızda mesafe arttıkça her bir pikselin nesnenin üzerinde ifade ettiği alan büyüyecektir. Bu sebeple literatürdeki çalışmalarda mesafe arttıkça nesnenin kamera görüntülerindeki Δx azalmaktadır ve Δx 'in mesafe bilgisini ifade gücü azalmaktadır.



27

Mesafe hesaplama aşamasında araştırmacı nesnenin hangi konumda (P_1, P_2, P_3) olduğunu bilemez. Bu sebeple hata değerinin miktarı ve yönü hakkında bilgi üretemez. Nesne konumunun (P_1, P_2, P_3) durumu hakkında bilgi üretebilecek bir yöntemin geliştirilmesi hatanın miktarı ve yönü hakkında bize bilgi verebilir. Böylece elde edilen geri bildirim ile mesafe daha hassas bulunabilir.



Şekil 2.5. B kamerasının lineer hareketi, eksen çizgileri ve hedef nesne

Şekil 2.5' te B hareketli kamerasının ilk kayma (Δx) hesabının gerçekleştirilmesi sonrasında kameraların yerleştirildiği eksenle lineer olarak ileri ve geri hareketi sonrasında hedef nesnenin görüntü içinde lokasyonunun değiştirilmesi ele alınmıştır. Bu hareketler ile B hareketli kamera görüntüsü içinde hedef nesne lokasyonu kontrollü bir şekilde değiştirilerek nesneyi ifade eden bir pikselin genişliği hareketin her adımında yeniden Δx hesaplanarak bulunabilir. Bu bilgi mesafe hesabında geri bildirim olarak kullanılabilir. Böylece hatanın miktarı ve yönü hakkında çıkarım yapılabilir. Ya da hesaplama aşamasında bu bilgi kullanılarak daha hassas sonuçlar elde edilmesi sağlanabilir.

3. MATERYAL

Çalışmada, stereo kameralar kullanılmaktadır. Görüntü alma açıları ve kamera lensleri arası mesafeler hassas bir şekilde değiştirilerek literatürde kullanılan üçgenleme metodu geliştirilmiştir. Böylece üçgenleme metodundan ve kamera çözünürlüklerinden kaynaklanan olumsuzluklar ortadan kaldırılmıştır.

Bu amaç doğrultusunda görüntü işleme tabanlı bir mesafe tespit cihazı prototipi geliştirilmiştir. Prototip aşağıdaki donanım ve yazılımlardan oluşmaktadır;

- **Kamera:** Görüntü almak için 2 adet yüksek çözünürlüklü kameraya,
- **Lineer enkoder:** Kamera lensleri arası mesafenin hassas bir şekilde ayarlanabilmesi ve bu parametrenin dijital ortama aktarılabilmesi için step motor ve enkoderli lineer bir aktüatöre,
- **Açısal aktuatör:** Hareketli kamera açısının hassas bir şekilde ayarlanabilmesi ve bu parametrenin dijital ortama aktarılabilmesi için servo motorlu açısal bir aktüatöre,
- **Mini PC:** Aktarılan görüntüleri ve elde edilen sonuçları kullanıcıya aktarabilecek, işleyip sonuç üretebilecek, prototipin kullanılması için geliştirilecek ara yüzü (GUI) işletecek dokunmatik ekrana sahip bir mini pc,
- **Yazılım:** Kullanıcının ilk ayarlamaları yaparak ölçüm işlemini başlatabileceği ve sonuçları alabileceği ara yüz üzerinden kontrol edilebilen bir yazılıma,
- **Tripod:** Cihazın stabil bir şekilde görüntü almasını sağlayacak bir tripoda sahiptir.

Çalışma sonucunda geliştirilen prototip;

- Görüntü işleme teknikleri kullanarak nesne bölütleme ve nesne konumunu belirlemektedir,
- Farklı kamera görüntülerinde seçilen nesnenin konumunu belirleyebilmektedir,

- Elde ettiği verileri kullanarak servo ve step motor sürücülerini kontrol edebilmektedir,
- Belirlenen parametreleri kullanarak oluşturulacak denklemleri işleyebilmektedir,
- Görülebilir büyüklükte olan belirli bir nesnenin kameraya olan uzaklığını hassas bir şekilde tespit edebilmektedir,
- Açık ve kapalı ortamlarda kullanılabilir.

3.1 Donanım



Şekil 3.1. Görüntü metre

Şekil 3.1’ de GM’ ye ait gerçek bir görüntü verilmiştir. GM biri sabit diğeri hareketli iki görüntü sensöründen (kamera) oluşmaktadır. Hareketli kameranın açısal ve lineer hareketlerinin hassas bir şekilde gerçekleşmesi için elektromekanik bir sisteme sahiptir. Ayrıca kameralardan alınan görüntüleri ve aktüatörlerden alınan bilgileri işleyebilecek bir mini PC içermektedir.

3.1.1 Kamera



Şekil 3.2. Stereo kameralar

Şekil 3.2’ de prototipte kullanılan kameralar ait görüntüler verilmiştir.

Üçgenleme metodunda mesafe tespiti kamera çözünürlüğü ile ilişkilidir. Ancak mesafe arttıkça FoV’ da (Field of view – Görüş alanı) artmakta bu sebeple belirli büyüklüğe sahip bir nesne uzak mesafelerde görüntü içinde daha az yer kaplamaktadır. Bu da piksel farklarının mesafe bilgisini yeterince ifade etmemesine sebep olmaktadır. Literatürdeki çalışmalar sadece piksel farklarına dayandırıldığı için mesafe arttıkça görüntüden mesafe çıkarımı yapmak imkansızlaşmaktadır. Bu sebeple öncelikle piksel farkı yerine açı tespit edilmektedir ve açı ile uyumlu lensler arası mesafe bulunarak bu problem ortadan kaldırılmaktadır. Açının hesaplanması aşamasında da çözünürlük önem arz etmektedir. Açının hesaplanması ile ilgili çalışma ayrıntılı olarak yöntem kısmında verilmiştir.

Çalışmada, offline mesafe ölçüm görüntü sensörü olarak “Nikon Coolpix B600” kameralar kullanılmıştır. Çalışma gerçek zamanlı çalışması için ise “Piranha 4K aksiyon” kameralar kullanılmıştır.

3.1.2 Mini PC



Şekil 3.3. Raspberry Pi3 ve dokunmatik ekran

Mini PC ve dokunmatik panele ait görüntü Şekil 3.3’ te verilmiştir.

Mini PC olarak kullanıcı ile bilgi alışverişinin yapılabilmesi için dokunmatik ekrana, kameralardan ve diğer aktüatörlerden bilgi alışverişi yapmak için uygun soketlere ve WiFi modülüne, geliştirilen GUI’yi ve yazılımı işletebilmesi için uygun bir işletim sistemine sahip “RASPBERRY Pİ 3 Model B” tercih edilmiştir.

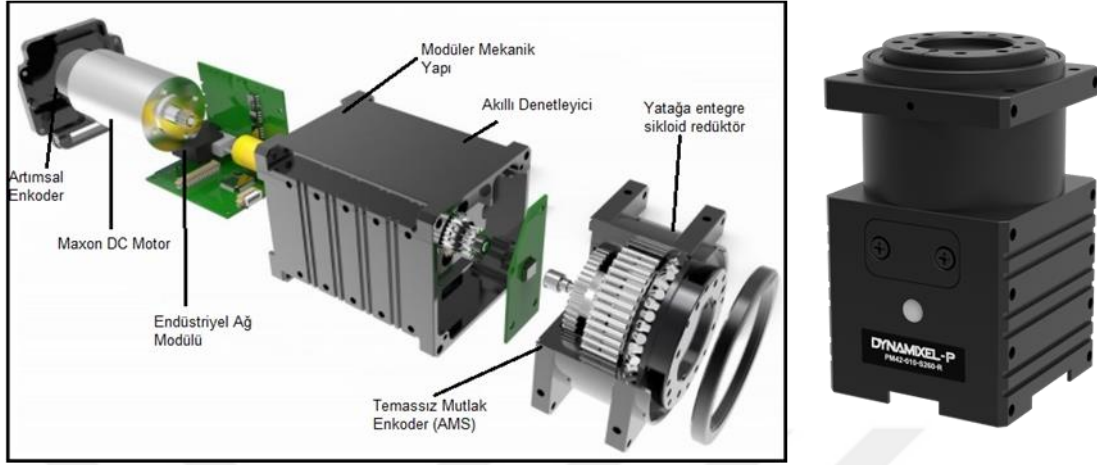
3.1.3 Lineer ve açısıl aktüatörler



Şekil 3.4. Lineer aktüatör nema 17 step motor

Şekil 3.4’ te lineer hareketi sağlayan step motor görülmektedir.

Üçgenleme yönteminde başarımın düşük olmasının sebebi uygun lens aralığının ayarlanamaması ve kullanılan stereo kameraların görüntü alma eksenlerinin birbirine paralel ve sabit olmasıdır. Bu sebeple geliştirilecek prototipte lens aralığını hassas bir şekilde ayarlayabilen “Vidalı Milli Bipolar NEMA 17” step motor ve “400 Adım Artımsal Optik Rotary Enkoder”dan oluşan lineer aktüatör, referans kameraya (A) göre hareketli olan kameranın (B) eksen açısını hassas bir şekilde ayarlayabilen “Dynamixel PM42-010-S260-R” servo motor ve bu bilgiyi dijitalleştirip ana yazılıma aktarılmasını sağlayan “OpenCR1.0” kontrol kartından oluşmaktadır.



Şekil 3.5. Dynamixel PM42-010-S260-R Açısal aktuatör ve bileşenleri

3.1.4 G-Sniper lazer mesafe ölçer

GM ile yapılan ölçümlerin kıyaslanması için kullanılmıştır.



Şekil 3.6. G-sniper 1000 m mesafe ölçer

Şekil 3.6’ da nesne mesafesinin ölçülmesinde kullanılan lazer metre (LM) görülmektedir. G-Sniper 1000 m lazer mesafe ölçer, 5x zoom ve max 1 m hata payı ile ölçüm yapmaktadır.

3.1.5 Total station

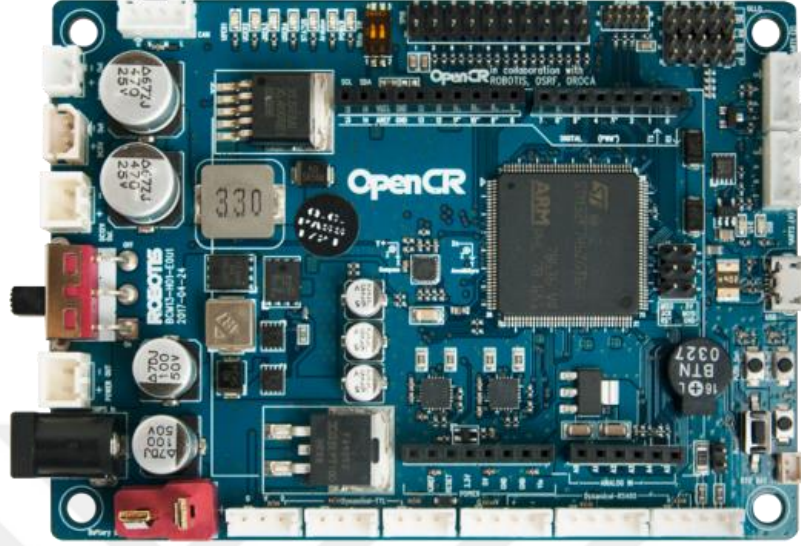
GM ile yapılan ölçümlerin doğruluğunun kıyaslanması için kullanılmıştır.



Şekil 3.7 Nikon DTM 362 total station

Şekil 3.7’ de Nikon DTM 362 Total station (TS) verilmiştir. Nikon DTM 362; $\pm (3 + 2 \text{ ppm} \times D)$ mm mesafe ölçüm hassasiyeti hem prizmalar hem de reflektör tabaka için aynı mesafe doğruluğuna sahip, sadece 1,6 saniye 1 mm mesafe çözünürlüğü ile ölçüm yapabilmektedir.

3.1.6 Kontrol kartı



Şekil 3.8. OpenCR1.0 Kontrol kartı

Şekil 3.8’ de kontrol artına ait bir görsel verilmiştir.

Tablo 3.1. OpenCr1.0 teknik özellikleri

Bölümler	Özellikleri
Mikrokontrolör	STM32F746ZGT6 / 32-bit ARM Cortex®-M7 with FPU (216MHz, 462DMIPS)
Sensörler	Jiroskop 3-Eksen, Akselerometre e-Eksen, Magnetometre 3-Eksen (MPU9250)
Programlayıcı	ARM Cortex 10pin JTAG/SWD konektör
	USB Device Firmware Upgrade (DFU)
	Seri
Genişleme Pinleri	Arduino bağlantısı x 32 pin (L 14, R 18)
	Sensör modülü x 4 pin
	Genişleme konektörü x 18 pin
Haberleşme	USB (Micro-B USB connector/USB 2.0/Host/Peripheral/OTG)
	TTL (B3B-EH-A / Dynamixel)
	RS485 (B4B-EH-A / Dynamixel)
	UART x 2 (20010WS-04)
	CAN (20010WS-04)
LED'ler ve Butonlar	LD2 (kırmızı/yeşil) : USB haberleşme
	Kullanıcı LED x 4 : LD3 (kırmızı), LD4 (yeşil), LD5 (mavi)
	Kullanıcı butonu x 2
Güç	Harici Enerji Kaynağı
	5 V (USB VBUS), 7-24 V (Batarya veya SMPS)
	Varsayılan batarya : LI-PO 11.1V 1,800mAh 19.98Wh
	Varsayılan SMPS : 12V 5A
	Harici çıkışlar
	12V@1A(SMW250-02), 5V@4A(5267-02A), 3.3V@800mA(20010WS-02)
	RTC (Real Time Clock) için harici batarya portu (Molex 53047-0210)
	Güç LEDi: LD1 (kırmızı, 3.3 V power on)
	Reset butonu x 1 (kartın power reset edilmesi için)
	Power on/off anahtarı x 1

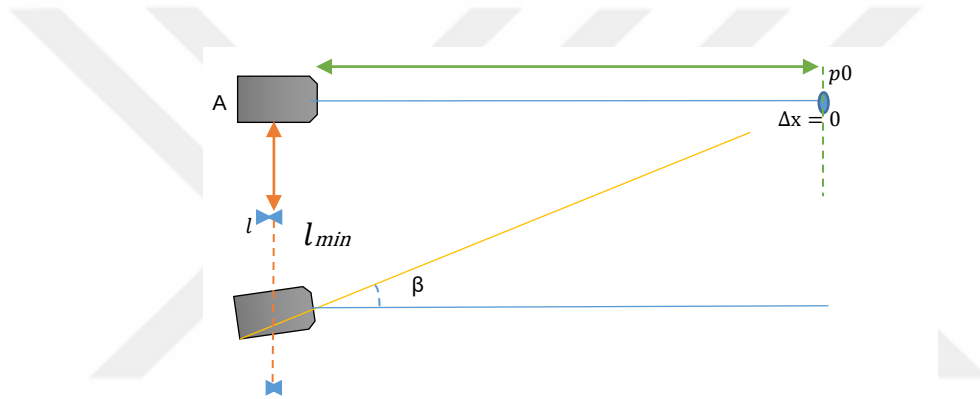
Tablo 3.1' de OpenCr 1.0 kartına ait teknik özellikler verilmiştir.

OpenCr 1.0 kontrol kartı, elektromekanik sistem ile mini PC arasındaki veri transferini sağlayan, aynı zamanda lineer ve açısız aktüatörün konum kontrollerini denetleyen bir

ara kontrol kartıdır. Yazılım tarafından işlenen veriler sonucunda kameraların istenilen açı ve lineer hareketleri OpenCr 1.0 kart tarafından eşzamanlı olarak sağlanılmaktadır.

3.2 Yazılım

Çalışmada mesafe tespiti, kameralar ve nesne arasında dik üçgen oluşturulmasına ve dik üçgen üzerindeki uzun dik kenarın (Z) trigonometrik denklemlerle hesaplanmasına dayanmaktadır.



Şekil 3.9. GM ile mesafe ölçümü

Şekil 3.9’ de stereo kameralı mesafe ölçüm sisteminin şematik gösterimi verilmiştir. Burada; β açısı ve l değerleri hassas bir şekilde hesaplanarak, mesafede (uzun dik kenar - Z) hassas bir şekilde bulunabilir.

Literatürdeki çalışmalarda mesafe tespiti için her iki kamera görüntüsü arasında meydana gelen piksel farklarının kullanıldığı görülmüştür. Çalışmada birbirine paralel görüntü alma eksenine sahip kameralar ve kameralara ait görüntü ekranlarındaki nesnenin Δx miktarı elektromekanik sistem tarafından hesaplanmıştır. Bu kayma miktarı görüntü alma ekranında piksel olarak ifade edilmektedir. Kameraların açısal hareketi bu kayma miktarını sıfır yapan açısal değer servo motor tarafından üretilmektedir. Böylece iki kamera ve nesne arasında bir dik üçgen oluşturulur. Kamera lensleri arası mesafe ve hareketli kameranın eksen açısı sistemin geri bildirimine göre değişir. Hareketli

kameranın açısı ve lensler arası mesafe hassas bir şekilde bulunarak nesne mesafesi ölçülmüştür.

Bu noktada mesafe ölçümündeki hassasiyeti B kamerasının açısal hareket ve lineer hareket çözünürlüğü önemlidir. Açısal çözünürlük ne kadar küçük olursa olsun mesafe arttıkça hassasiyeti azalmaktadır. Ancak açı belli bir değere sabitlendikten sonra çok küçük miktarlarda lineer hareketle desteklendiğinde ve en uygun lensler arası mesafe tespit edildiğinde mesafe hassas bir şekilde belirlenir.

GM' de, stereo kameralar kullanılarak alınan görüntülerin PYTHON-OPENCV kütüphanesi kullanılması ile nesnenin kameralara olan mesafesi ölçülmüştür. Hazırlanan yazılımda referans kamera görüntü ekranında hedef nesne seçilir. Seçilen hedef nesne ve komşu pikselleri arasında bir şablon oluşturulur. Seçili şablon içerisinde orta piksel bizim hedefimizi temsil etmektedir. Hareketli kamerada seçili şablonun daha geniş (50 p X 50 p) komşu pikselleri ile hedef pikseli içerisinde barındıran büyük şablon ön taraması yapılmaktadır. Bu tarama sonucunda benzerlik oranı istenilen seviyede (%40) olursa bu şablonun Y eksen değerleri dışında kalan kısmı hareketli görüntü ekranından çıkartılır. Bu işlem hem işlem hızını arttıracak hem de sistemsel hatayı en aza indirecektir. Referans görüntü koordinatları ile seçili şablon merkez koordinatları arasındaki fark 0 olana kadar sistem elektromekanik olarak açısal ve lineer hareket ettirilmektedir. Yazılım algoritmasına ait daha ayrıntılı bilgi Bölüm 3.2.1 ve Bölüm 4' te verilmiştir.

3.2.1 Hedef nesne seçimi ve şablon oluşturma

Çalışmada görüntü içindeki belli bir nesnenin mesafesinin prototipe olan uzaklığının tespiti üzerine durulmuştur. Yani hedef nesne bellidir. Bu sebeple bölütleme işlemi gerçekleştirilebilir. Sementasyon aşamasında hedef nesne referans kamera (A) görüntü ekranında ve Hareketli B kamerası görüntü ekranında görünmesi yeterli olacaktır. Seçilen hedef nesneye ait bir pikselin seçilmesi yeterli olacaktır.

Bölütleme hedef nesne ve hedef piksel komşu pikselleri ile oluşturulan bir şablon kullanılarak 3 aşamada yapılmaktadır.

- 1. Aşama geniş şablonun ana görüntü ekranında bulunması ve bir çerçeveye alınması ile başlar. Burada bulunan şablon ile seçilen hedef nesne ile komşu piksellerin oluşturduğu şablonun benzerlik oranı belli bir oranın üzerinde olması durumunda 2. aşamaya geçiş sağlanır.
- 2. Aşamada ise büyük şablondan daha küçük bir şablon görüntüsü oluşturulur ve 1. Aşama yapılan işlem tekrar edilir.
- 3. Aşamada küçük şablonda merkez piksel ile seçili piksel eşleştirilmesi sağlanır. Daha sonra referans kamera görüntü ekranındaki seçili piksel ile hareketli kamera görüntü ekranında bulunan merkez piksel arasındaki vektörel mesafe hesaplanır ve OPENCR1.0 ile sistemin haberleşmesi sağlanır.

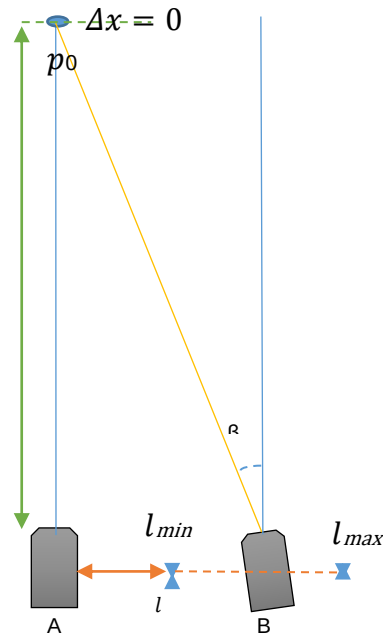
3.2.2 Ara yüz programı

Ara yüz programı (GUI) sistemin son kullanıcı ile arasındaki terminaldir. Kullanıcı ara yüzü kullanıcı ile bilgi alışverişi yapılmasını sağlamaktadır. Örneğin kullanıcı başlangıç şartlarını oluşturduktan sonra (nesnenin referans kamera görüntüsü içinde bir işaretçi ile işaretlenmesi, tripot ayarlarının yapılması ile stabil çalışma ortamının sağlanması, gerekli ayarların yapılması vb) mesafe tespit işleminin başlaması için komut ara yüz programı üzerinden dokunmatik ekran aracılığıyla verilir. Sonuçlar ekran aracılığıyla kullanıcıya aktarılır. Bölütleme işleminin gerçekleştirilmesi, kamera görüntüleri üzerindeki nesne koordinatlarının çakıştırılması için lineer/açısal aktüatörlerin kontrolü, çakıştırma işleminden sonra parametrelerin tespiti ve işlenmesi geliştirilen yazılımlar ile gerçekleştirilir ve mesafe ölçüm sonucu ara yüz programı aracılığıyla kullanıcıya aktarılır.

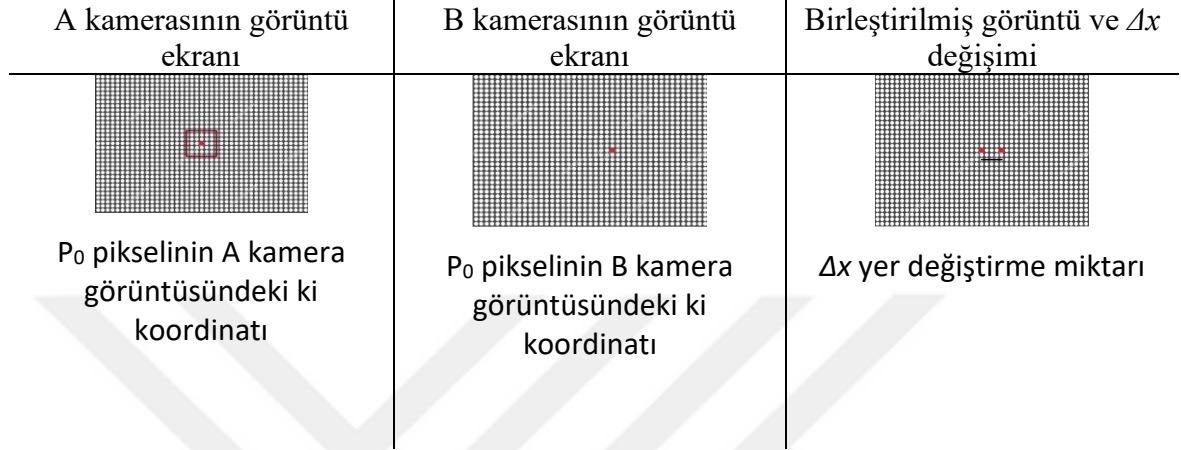
4. YÖNTEM

4.1 Literatürde kullanılan yöntemler ve yaşanan problemler

Stereo görüntüde bir nesneye ait derinlik çıkarımı yapabilmek için nesnenin iki farklı noktadan görüntüsünün alınması gerekmektedir. İki farklı noktadan alınan görüntüdeki yer değişikliği ve bu iki nokta arasındaki mesafe bilinirse o nesneye ait derinlik hakkında bir çıkarım yapabiliriz (Gan vd., 2018; Katada vd., 2014; Kılınç & Gözde, 2020; Kurnaz & Gül, 2018; Lai vd., 2012; Oh vd., 2013; Theodosios vd., 2014; Vyas vd., 2018; Yanik vd., 2021). Literatürde kullanılan üçgenleme yönteminde kamera çözünürlüklerinin yüksek olmasının mesafe tespitinde önemli olduğu bir çok araştırmacı tarafından kabul edilmiştir (Hantao, 2005; Kytö vd., 2011; Nagar & Verma, 2015; Yanik vd., 2021; Zeglazi vd., 2018).



Şekil 4.1. Stereo görüntü platformu



Şekil 4.2. Stereo görüntü platformu ve görüntü ekranları

Şekil 4.1' de P_0 Z uzaklığındaki belirli bir nesnenin üzerindeki bir piksellik alanı temsil etmektedir. Şekil 4.2' de ise hedef nesnenin görüntü ekranlarındaki görüntü piksel kayması verilmiştir. Görüntü işleme tabanlı stereo kameralı mesafe tespit çalışmalarında, P_0 'ın birbirine paralel olarak konumlandırılan iki kameradan alınan görüntüsündeki Δx kayması ve iki kamera arasındaki mesafe bilgisi kullanılarak bir mesafe tahmini yapılmaktadır. Δx kayma miktarı kameralar arası mesafeye (l), nesne ile kameralar arasındaki mesafeye (Z) ve kameraların çözünürlüğüne bağlıdır. Örneğin kameraların yatay çözünürlüğünün 1 piksel olduğunu düşünürsek mesafeler ne olursa olsun Δx her zaman 0 olacaktır. Bu durumda mesafe tespit imkanı olmayacaktır. Kamera yatay çözünürlüğünün ve l mesafesinin artırılması Δx 'in artmasına sebep olurken, Z mesafesinin artması Δx 'in azalmasına sebep olmaktadır. Kamera çözünürlüklerinin artırılması maliyet ve işlem yükü sebebiyle belli bir değerden sonra anlamını kaybetmektedir. l mesafesinin artırılması ise cihazın kullanım kolaylığını olumsuz etkilemektedir. Ancak donanım maliyeti ve işlem yükünün artması sebebiyle çözünürlük, cihazın kullanımını olumsuz etkilemesi sebebiyle ise l mesafesi istenen düzeyde artırılamamaktadır. Sonuç olarak optimum çözümler üretilmemektedir.

Literatürdeki yöntemlerde PPM (Pixel per meter) sayısı Δx 'i etkileyen en temel ve önemli değerdir. Δx 'i etkileyen ikinci değer ise görüntülenmek istenilen alanın yatay genişlik (FoV) değeridir. Görüntülenecek nesne veya alanın kameraya olan uzaklığı arttıkça FoV değeri artacağından dolayı mesafe arttıkça PPM değeri azalacaktır. Bu da görüntüyü kalitesizleştirecek ve Δx azalacaktır.

Şekil 2.1' de bir kameranın Fov alanının Z mesafesine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Sabit odak uzaklıklı bir kamerada hedef nesne ne kadar uzaksa kameranın FoV alanı o kadar geniştir. *FoV* genişliğinin artması *PPM* değerini düşürür. Bu da uzak mesafedeki nesne üzerindeki piksel genişliğini artırır ve görüntü kalitesizleşir. Eşitlik 8' de verilmiştir. Ancak yüksek çözünürlüklü kameralar kullanılsa da mesafe arttıkça mesafesi tespit edilecek nesnenin ekranda daha az yer kaplayacağı (belirli büyüklüğe sahip nesne için) açıktır. Bu sebeple yüksek mesafelerde paralel görüntü alma eksenine sahip stereo kamera görüntülerinde ekranda oluşan nesne görüntüleri arasında piksel bazında fark oluşmayacağı ve mesafe hesaplamasının mümkün olmayacağı açıktır.

4.1.1 Farklı mesafeler için Δx değerinin Z ve L' ye bağlı değişimi

Aşağıda stereo kameralar ile Δx kayma miktarına bağlı olarak, P_0 noktasının kameralara olan uzaklığını hesaplayan 4 ayrı örnek verilmiştir. Burada yüksek çözünürlüklü (4608 p X 3456 p) ve 60° sabit görüntü alma açılı kamera kullanıldığı ve l mesafesinin 0.2 m olarak kullanıldığı varsayılmıştır.

Örnek 1:1000 m için:

$$FOV = \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) * Z * 2 = \tan\left(\frac{60}{2}\right) * 1000 * 2 = 1154.7 \text{ m}$$

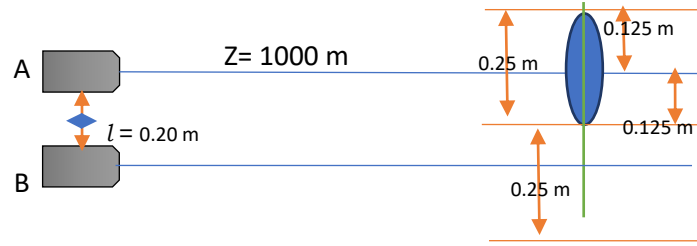
$$PPM = \frac{wp}{FOV} = \frac{4608}{1154} = 3.9$$

Lensler arası mesafeye düşen piksel sayısı;

$$\Delta x = PPM * l = 3.9 * 0.2 = 0.78 \text{ p} \sim 1 \text{ p}$$

$$\text{piksel genişliği} = \frac{FOV}{\text{yatay piksel sayısı}}$$

$$\text{piksel genişliği} = \frac{FOV}{wp} = \frac{1154.7}{4608} = 0.25 \text{ m} \text{ olarak bulunur.}$$



Şekil 4.3. 1000 m için örnek tasarım

Şekil 4.3' de, A kamerasının görüntü ekranında nesne x koordinatı r ise B kamerasının görüntü ekranında nesne koordinatı $r + 1$ olacaktır. Sonuç olarak iki kamerada oluşan görüntüler arasında 1 p kayma vardır. Bunun sebebi bu mesafedeki bir nesnenin PPM değerinin lensler arası mesafeye etkisidir.

Örnek 2: 900 m için;

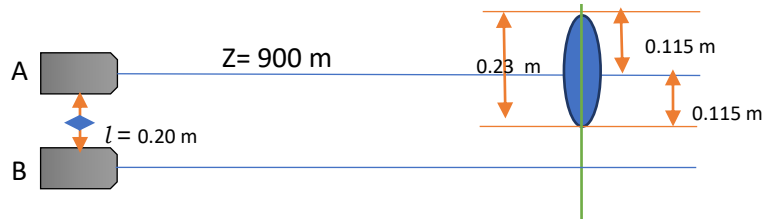
$$FOV = 1039.23 \text{ m}$$

$$PPM = 4.43$$

Lensler arası mesafeye düşen piksel sayısı;

$$\Delta x = 0.86 \text{ p} \sim 1 \text{ p}$$

Piksel genişliği = 0.23 m olarak bulunur



Şekil 4.4. 900 m için örnek tasarım

Şekil 4.4' de, A kamerasının Görüntü ekranında nesne x koordinatı r ise B kamerasının görüntü ekranında nesne koordinatı $r + 1$ olacaktır. Sonuç olarak iki kamerada oluşan görüntüler arasında 1 p kayma vardır.

Örnek 3: 800 m için;

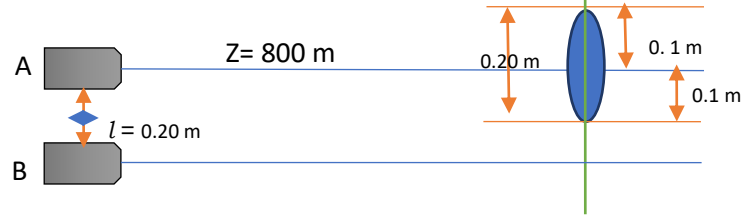
$$FOV = 923.7 \text{ m}$$

$$PPM = 4.98$$

Lensler arası mesafeye düşen piksel sayısı;

$$\Delta x = 0.996 p \sim 1 p$$

Piksel genişliği=0.20 m olarak bulunur.



Şekil 4.5. 800m için örnek tasarım

Şekil 4.5’ da A kamerasının Görüntü ekranında nesne yatay x koordinatı r ise hareketli B kamerasının görüntü ekranında nesne koordinatı $r + 1$ olacaktır. Sonuç olarak iki kamerada oluşan görüntüler arasında 1 p kayma vardır.

Örnek 4:600 m için;

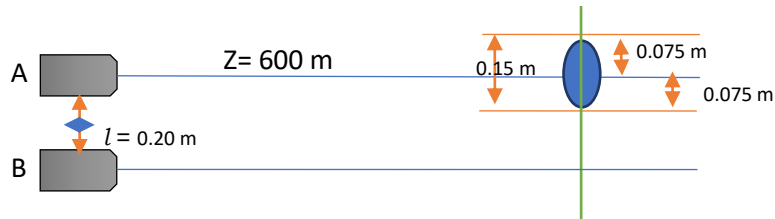
$$FOV = 692.8 \text{ m}$$

$$PPM = 6.65$$

Lensler arası mesafeye düşen piksel sayısı;

$$\Delta x = PPM * 0.2 = 6.65 * 0.2 = 1.33 p \sim 1 p$$

$P_x=0.15$ m olarak bulunur.



Şekil 4.6. 600 m için örnek tasarım

Şekil 4.6’ da A kamerasının Görüntü ekranında nesne x koordinatı r ise B kamerasının görüntü ekranında nesne koordinatı $r + 1$ olacaktır. Sonuç olarak iki kamerada oluşan görüntüler arasında 1 p kayma vardır.

Yukardaki 4 örnek için, yüksek çözünürlüklü kamera kullanılmasına rağmen yatay eksenindeki piksel farkı (Δx) 600, 800, 900 ve 1000 m için değişmemektedir. Buda mesafe tespit sisteminin 4 uzaklık değeri için de aynı sonucu vermesi anlamına gelir ki başarımın düşük olduğu ve kabul edilemeyeceği açıktır.

Literatürde stereo ve mono kameralar kullanılarak görüntü işleme tabanlı mesafe tespit çalışmaları bulunmaktadır. Ancak bu çalışmalarda %4'ün altında hata payı ile ölçebilen sonuçlar elde edilmemiştir (Hantao, 2005; Mayer vd., 2015; Vyas vd., 2018). Mono kameralar ile yapılan çalışmalarda iki temel problem görülmektedir. Bunlardan ilki hedef tahtası kullanılması (Fan vd., 2018) yada nesne boyutları hakkında bilgi sahibi olunmamasıdır (Gan vd., 2018). Çünkü bu yöntemler nesnenin görüntü içinde kapladığı alan üzerinden çıkarım yapmaktadırlar. İkinci temel problem ise mesafe arttıkça nesnenin kapladığı alandaki değişimin çok küçük değerler ile ifade edilmesi hatta belli bir mesafeden sonra görüntü ekranındaki hedef nesne koordinatlarında değişmemesi olarak görülmektedir (Kurnaz & Gül, 2018; Vyas vd., 2018; Yanik vd., 2021). Bunun sebebi ise mesafe arttıkça PPM değerinde azalması olmuştur (Kytö vd., 2011).

Stereo kameralar ile yapılan çalışmalarda ise mesafe tespiti yatay (x) eksenindeki Δx 'in hesaplanmasını temel almaktadır (Fan vd., 2018; Gan vd., 2018; Hantao, 2005; Nagar & Verma, 2015; Solak & Bolat, 2016; Theodosios vd., 2014; Ülkir vd., 2021; Ummenhofer vd., 2017; Vyas vd., 2018; Yanik vd., 2021). Mono kameralardaki ikinci probleme benzer şekilde stereo kameralarda da mesafe arttıkça kayma miktarı azalmakta hatta çözünürlüğe ve kamera lensleri arası mesafeye bağlı olarak belli bir mesafeden sonra 0 piksele (Δx) ulaşmaktadır.

Tablo 2.2' de farklı nesne mesafelerinde FoV, piksel genişliği, PPM, Δx , piksel farkı ve max hata değerleri birlikte verilmiştir. Tablo 2.2' de görüleceği üzere mesafe arttıkça PPM değerinin düşmesi maksimum hatanın artmasına sebep olmaktadır.

Tablo 2.2' de verilen değerler incelendiğinde 11 m' de $1/8=0.125$ m ortalama çözünürlükle ölçüm yapılabilirken, 12 m' de çözünürlüğün ortalama 0.2 m' ye, 20 m' de 0.615 m' ye, 30 m' de 0.769 m' ye düştüğü ve mesafeye bağlı olarak doğrusal olmayan bir grafik oluşturduğu hatta mesafedeki yüksek artışlarda çözünürlük elde edilemediği görülmektedir.

Çalışmamız, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak piksel ve dolayısıyla $\Delta x'$ den bağımsız bir halde ölçüm yapabilmesidir. Hesaplamanın $\Delta x'$ den bağımsız hale getirilmesi 2 aşamada gerçekleştirilecektir. İlk aşamada $\Delta x=0$ yapılacaktır. Bunun için hareketli kameranın görüntü alma eksen açısı hassas bir şekilde ayarlanacaktır. Böylece Δx değişimi mesafe hesaplamasında kullanılmayacaktır. Ancak uzak mesafelerde pikselin kapladığı alanın giderek büyümesi ve açının yeterince hassas ayarlanamaması mesafe ölçümünün yeterince hassas yapılamamasına sebep olur. Bu yüzden ikinci aşamada belirlenen açı ile uyumlu lensler arası mesafe belirlenecektir açı ve lensler arası mesafenin birbirine uyumlu olarak bulunması sonucunda açısı ve kısa dik kenar uzunluğu bilinen dik üçgen üzerinden uzun dik kenar uzunluğu hesaplanarak kamera ile nesne arası mesafe hesap edilecektir. Burada önemli olan açı ve kısa dik kenar uzunluklarının hassas ve birbiri ile uyumlu olarak hesaplanmasıdır. Açının ve kısa dik kenar uzunluğunun bulunması için geliştirilen yöntemler aşağıda verilmiştir.

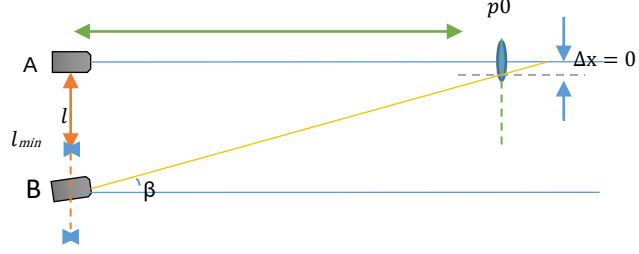
4.2 Önerilen Yöntem: Piksel Bağımsız Mesafe Ölçümü

4.2.1 B Kamerası görüntü alma açısının tespiti

Görüntü işleme tabanlı mesafe tespit çalışmalarında pikseller elbette olmak zorundadır ve birbirinden farklı pozisyonlara sahip 2 farklı kamera kullanıldığında aynı nesne her iki kamerada farklı pozisyonlarda görüntülenecektir. Ancak kameraların görüntü alma eksen açıları ile oynanarak nesne görüntüleri aynı pozisyona taşınabilir. Böylece $\Delta x'$ den bağımsız bir çalışma yapabilmek için $\Delta x'$ in 0 olduğu an yakalanabilir. Görüntünün insan gözü ile yakalanmasına benzer şekilde.

Çalışma bu temel üzerine odaklanarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmamızda farklı noktalarda konumlanan sabit (A) ve hareketli (B) kameraları kullanılmıştır. B kamerasından alınan görüntü, referans kameradan (A Kamerası) alınan görüntü ile üst üste karşılaştırılması planlanmaktadır. Böylece Δx değeri 0 olacaktır. $\Delta x'$ in 0 olduğu anda B kamerası görüntü alma eksen açısı ve l mesafesi hassas olarak tespit edilebildiği

takdirde nesnenin kameralara olan uzaklığı hassas olarak tespit edilebilir. Bu durum Eşitlik 9’ da verilmiştir.

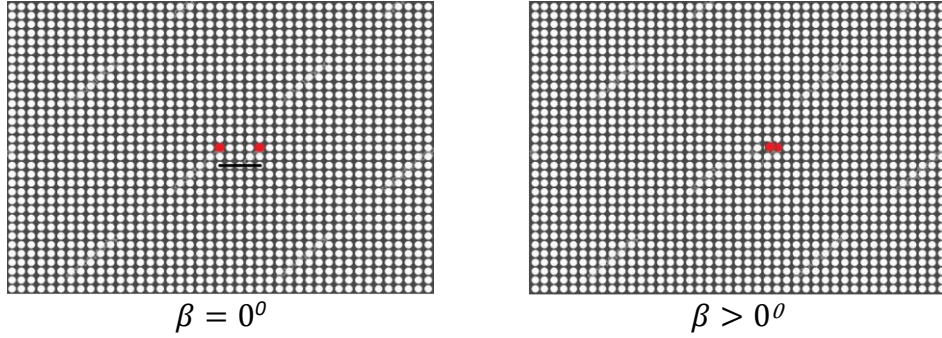


Şekil 4.7. Stereo görüntü çakıştırma

$\Delta x = 0$ yapan β açısı ve l değeri ayarlandığında Eşitlik 9 ile hedef nesne mesafesi hesaplanabilir.

$$Z = \frac{l}{\tan \beta} \quad (9)$$

Eşitlik 9’ da önemli olan parametrelerin (β, l) hassas olarak belirlenmesidir. Özellikle mesafe arttıkça parametrelerdeki en ufak değişiklik ölçüm hassasiyetini azaltmaktadır.



Şekil 4.8. Görüntü ekranlarındaki hedef nesne konumu

Şekil 4.7’ de tasarlanan prototipte B kamerasının açısal hareketi sonrasında kamera eksen çizgileri, Şekil 4.8’ de ise bu eksen çizgilerinin görüntü ekranındaki piksel kaymasına etkisi verilmiştir.

A ve B kameralarında oluşan nesne görüntülerinin çakışma işlemi hareketli B kamerasının açısal ve lineer hareketleri ile sağlanacaktır. Öncelikle B kamerası açısal hareket ettirilerek $\Delta x=0$ yakalanacaktır. Böylece β açısı tespit edilecektir. Ancak bu çakıştırma bize mevcut l_b mesafesi (0.2 m) için optimum β açısını vermez. Çünkü B kamerasını hareket ettiren açısal aktüatörün çözünürlüğü bunun için yeterli olmayacaktır. Ayrıca aktüatörün çözünürlüğü yeterli olsa bile görüntü içinde pikselin kapladığı alan mesafe arttıkça gerçekte daha büyük bir alana karşılık gelmektedir. Bu da Şekil 13 ve 14’ de görüleceği üzere $\Delta x=0$ olsa bile açının yeterince hassas bulunmasına yeterli olmaz. $\Delta x=0$ yapan β açısı aşağıda verilen Eşitlik 10 ile bulunur.

$$\Delta x = PPM * ((l_b) - (Z * \tan(\beta)))$$

$$0 = PPM * ((l_b) - (Z * \tan(\beta))) \quad (10)$$

$$0 = ((l_b) - (Z * \tan(\beta)))$$

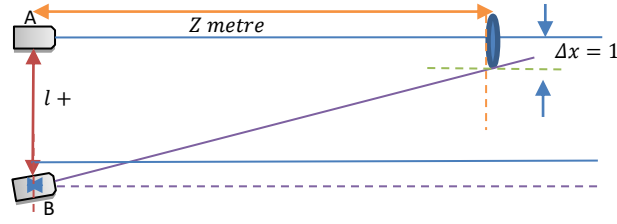
$$\tan(\beta) = \frac{l_b}{Z} \Rightarrow \beta = \tan^{-1}\left(\frac{l_b}{Z}\right) \text{ denklemiyle bulunabilir.}$$

Ancak pratikte görüntüler üzerinden Δx hesaplanacak, Δx sıfır olana kadar B kamerası açısal hareket ettirilecek, Δx ’i sıfır yapan açı β açısı olarak kullanılacaktır.

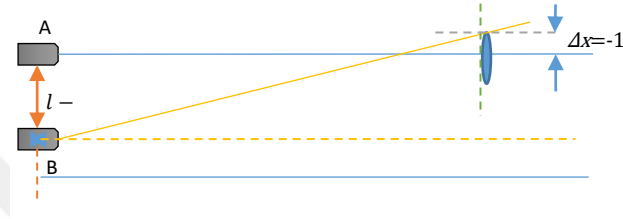
4.2.2 B Kamerası β ile uyumlu l mesafenin bulunması (Optimum $l = l_g$)

Açısal aktüatör kullanılarak $\Delta x=0$ yapan β açısı belirlendikten sonra tam çakışmayı sağlayacak l mesafesi tespit edilir. l mesafesi lineer aktüatörün hareketi ile ayarlanır. Tam çakışmayı sağlayan en uygun l mesafesi (l_g) lineer aktüatörün başlangıçta kullanılan l mesafesini artırması ile $\Delta x=l$ eşitliğinin ilk elde edildiği l_+ ve azaltması ile $\Delta x=-l$ eşitliğinin ilk elde edildiği l_- değerlerinin bulunması ile Eşitlik 11’ de verildiği şekilde hesaplanır.

$$l_g = \frac{l_+ + l_-}{2} \quad (11)$$



Şekil 4.9. l_+ nin hesaplanması



Şekil 4.10. l_- nin hesaplanması

Şekil 4.9 ve 4.10’ da lens mesafelerinin negatif ve pozitif sınırlarına ait teorik şekiller verilmiştir.

Böylece β açısı ve bu açı ile kullanılacak en uygun l mesafesi (l_g) bulunduktan sonra denklem 4 aşağıdaki şekilde güncellenerek Z mesafesi hesaplanır. Burada önemli olan β açısının ve l_g mesafesinin birbirlerine uyumlu olarak hassas bir şekilde bulunmasıdır. Çalışmada öncelikle β açısı sabit l_b mesafesi (0,2 m) için bulunur. Ancak bu değer hassas bir açı değeri değildir. Denklem (4) ile kullanıldığında Z mesafesi için hassas sonuçlara ulaşılamaz. β açısı belirlendikten sonra en uygun l mesafesi (l_g) hesaplandıktan sonra birbirleri ile uyumlu hassas değerler elde edilmiş olur. Ayrıca çalışmada mesafe tespiti için kullanılması planlanan Eşitlik 4 güncellenerek Eşitlik 12’ de verilmiştir.

$$Z = \frac{l_g}{\tan \beta} \quad (12)$$

Çalışmada belirlenen yöntemin başarımı farklı mesafeler kullanılarak yapılan hesaplamalar ile doğrulanmıştır. Doğrulama aşamasında Δx değerinin hesaplanması için

kullanılan Eşitlik 1-2-3 numaralı denklemler kullanılarak geliştirilmiş ve Eşitlik 13' de verilmiştir. Denklemde $Z * \tan(\beta)$ gerçek uzaklık ve hesaplanan açı değeri ile bulunan gerçek l mesafesidir. l_+ , $\Delta x = 1$ yapan ilk l değeridir. l mesafesinin pozitif yönde artırılmasıyla hesaplanır. l mesafesinin negatif yönde artırılmasıyla da benzer şekilde aynı denklemle l_- değeri hesaplanır.

$$\Delta x = PPM * ((l_+) - (Z * \tan(\beta))) \quad (13)$$

Tablo 4.1. l_b , l_g , β değerlerinin mesafe hesabına etkisi

Z (m)	FoV (m)	PPM (piksel)	Δx (piksel)	l_b (m)	$\Delta x=0$ yapan β açısı	$l = Z * \tan(\beta)$ (m) Olmaları gereken l	l_+ (m)	l_- (m)	l_g (m)	$Z = \frac{l_b}{\tan\beta}$ (m) %hata	$Z = \frac{l_g}{\tan\beta}$ (m) %hata
1000	1154.70	3.99	0.80	0.2	0.011	0.191986220	0.318	0.066	0.1920	1041.74 %4.17	1000.07 %0.007
950	1096.90	4.20	0.84	0.2	0.011	0.182386909	0.302	0.063	0.1825	1041.74 %9.57	950.58 %0.06
900	1039.23	4.43	0.87	0.2	0.011	0.172787598	0.286	0.059	0.1725	1041.74 %15.75	898.5 %0.17
800	923.76	4.98	0.99	0.2	0.011	0.153588976	0.254	0.053	0.1535	1041.74 %30.125	799.53 %0.059
350	404.14	11.40	2.28	0.2	0.033	0.201585550	0.246	0.157	0.2015	347.24 %0.79	349.85 %0.04
300	346.41	13.30	2.66	0.2	0.033	0.172787615	0.211	0.135	0.1730	347.24 %15.75	300.36 %0.12
250	288.67	15.96	3.19	0.2	0.044	0.191986255	0.224	0.160	0.1920	260.43 %4.17	250.01 %0.004
100	115.47	39.90	7.98	0.2	0.110	0.191986453	0.205	0.179	0.1920	104.17 %4.17	100.07 %0.07
75	86.60	53.21	10.64	0.2	0.154	0.201586014	0.211	0.192	0.2015	74.41 %0.79	74.97 0.04
72	83.14	55.42	11.09	0.2	0.154	0.193522573	0.203	0.184	0.1935	74.41 %3.35	71.99 %0.014
50	57.73	79.80	15.96	0.2	0.220	0.191987161	0.199	0.185	0.1920	52.08 %4.16	50.00 %0.0
20	23.09	199.50	39.90	0.2	0.572	0.199672300	0.200	0.199	0.1995	20.03 %0.15	19.98 %0.1
10	11.55	399.00	79.80	0.2	1.144	0.199692203	0.201	0.198	0.1995	10.01 %0.1	9.99 %0.1

Tablo 4.1' de l_g değeri hesaplandıktan sonra β açısıyla kullanıldığında uzak mesafeler için çok hassas ölçümler gerçekleştirilebilmektedir. l_b değeri ile β açısının birlikte kullanıldığı durumda uzak mesafelerde ölçüm değeri çok büyük hatalar vermektedir. 800 , 900, 950 ve 1000 m için ölçüm sonucu 1041.74 m hesaplanmaktadır. Dolayısıyla farklı mesafeler için aynı ölçüm sonucu verebilmektedir. Ancak l_g ve β ile yapılan

hesaplama 1000 m için 1000.07 m, 950 m için 950.58 m, 900 m için 898.5 m, 800 m için 799.53 m gibi düşük hata oranları olup başarı oranları l_b 'nin sabit alınmasına göre daha yüksek olmaktadır.

$\Delta x=0$ yapan β açısı aşağıda verilen Eşitlik 10 ve Eşitlik 11 ile hesaplanmaktadır. Bu değer aynı zamanda servo motorun adım sayısı (n) ve adım hassasiyeti (d) ile de ilişkilidir. Pratikte görüntüler kullanılarak Δx hesaplanacak, B kamerası açısal hareket ettirilerek $\Delta x=0$ yapan β açısı bulunmaktadır.

Yakın mesafelerde her iki hesaplama yöntemi aynı başarıyı yakalayabilmektedir. l_b ile β açısının birlikte kullanıldığı durumda maksimum hata oranı %30.125 ile 800 m' de hesaplanmaktadır. l_g ile β açısının birlikte kullanıldığı durumda maksimum hata oranı %0.17 ile 900 m de hesaplanmaktadır. Bu değer %1' in çok altındadır. Ancak l_b değeri ile β açısının birlikte kullanıldığı durum Tablo 2.1' de verilen Δx tabanlı çalışmalardan iyi olsa da %30 gibi kabul edilemeyecek hata oranları verebilmektedir.

Ayrıca Tablo 4.1' de 350 m, 75 m'lerde l_g değeri l_b değerine çok yakın çıkmaktadır. Bazı mesafelerde l_b ile yapılan hesaplama kabul edilebilir sonuçlar çıksa dahi, bu sonuçlar tesadüfi olmaktadır.

Tablo 4.1' de l_+ ve l_- değerleri incelendiğinde en büyük değer 0.318 m, en küçük değer 0.053 m'dir. Bu değerlerin çok büyük bir aralıkta olmaması, lineer aktuatörün boyunu, dolayısıyla prototipin ölçülerini etkilemektedir. Ayrıca kameraların kaplayacağı alan, dolayısıyla birçok kameranın fiziksel boyutları l_- nin 0.053 m' ye düşmesine izin vermeyecektir. Bu sebeple l_+ ve l_- değerlerinin daha küçük bir aralıkta tutulması prototipin optimum kullanımı için önemlidir. Mesafe bağlı FoV değerinin değişimi, dolayısıyla pikselin kapladığı alanın değişimi, l_+ ve l_- değer aralığı değiştirmektedir

Tablo 4.1' de Δx tabanlı çalışmalardan iyi olsa da %30 gibi kabul edilemeyecek hata oranları verebilmektedir. Tablo 4.1' de l_+ ve l_- değerleri incelendiğinde en büyük değer 0.318 m, en küçük değer 0.053 m dir. Bu değerler çok büyük bir aralıkta olmamakla beraber lineer aktuatörün boyunu dolayısıyla prototipin ölçülerini etkilemektedir. Ayrıca kameraların kaplayacağı alan dolayısıyla birçok kamera ölçüsü

lens aralığının 0.053 m' ye düşmesine izin vermeyecektir. Bu sebeple l_+ ve l_- değerlerinin daha küçük bir aralıkta tutulması prototipin optimum kullanımı için önemlidir. l_+ ve l_- değer aralığı, mesafe arttıkça FoV değerinin büyümesi ve dolayısıyla pikselin kapladığı alanın büyümesi sebebiyle artmaktadır.

Tablo 4.1' de elde edilen değerlere bölütleme aşamasında hatasız sonuçlar elde edildiği takdirde ulaşılabilir. Bölütleme aşamasında yapılacak hatalar hata oranlarının artmasına sebep olacaktır. Bölütleme aşamasında yapılabilecek hatalar düşünüldüğünde iki durum karşımıza çıkar bunlar aşağıda verilmiştir.

- Eğer A ve B kamera görüntülerinde bölütleme aşamasında aynı hatalar yapılırsa bu durum hata oranını artırmaz.
- Eğer görüntülerden birinde doğru diğerkinde yanlış bölütleme yapılırsa ve bu Δx değerini etkilerse hata oranı artar.

4.2.3 Nesnenin arka plandan ayrıştırılması

Mesafesi ölçülecek hedef nesne bilinmektedir. Mesafe ölçüm işlemi başlangıcında hedef nesne referans kamera (A) görüntüsü içinde pointer ile işaretlenmektedir. Pointer A kamerası görüntüsünün merkezinde olmalıdır. Böylece nesne A kamerası görüntüsünün merkezine yerleştirilir. Pointer tarafından seçilen piksel ve komşu piksellerleri ile oluşan 2 farklı şablon oluşturulur. Şablonun biri 50 X 50'lik bir piksel gurubundan oluşan "büyük şablon", diğeri ise büyük şablona göre daha küçük olan ve 10 X 10'luk bir piksel gurubundan oluşan "küçük şablon" olmalıdır. İlk durumda ana görüntü ekranında büyük şablon taranarak bir arama yapılır. Bu arama sonucunda benzerlik oranı belli bir oranın üzerinde ise (bu oran ölçüm öncesinde belirlenen bir benzerlik değeridir ve kullanıcı tarafından manuel olarak girilmektedir.) bu şablonun Y eksenini dışında kalan kısım hareketli kamera görüntü ekranında yok sayılır. Artık hareketli kameranın küçük şablon eşleştirmesi için aranacak alan görüntünün X eksen genişliği ve büyük şablondan kalan Y eksen sınırlarındadır. Bu sayede hem işlem hızını arttırmış, hemde hata payını en aza indirilmektedir. Hareketli kameranın ekranında

bulunan küçük şablon benzerlik oranı istenilen seviyede ise artık merkez piksel 100 piksel arasında taranır ve bulunur.

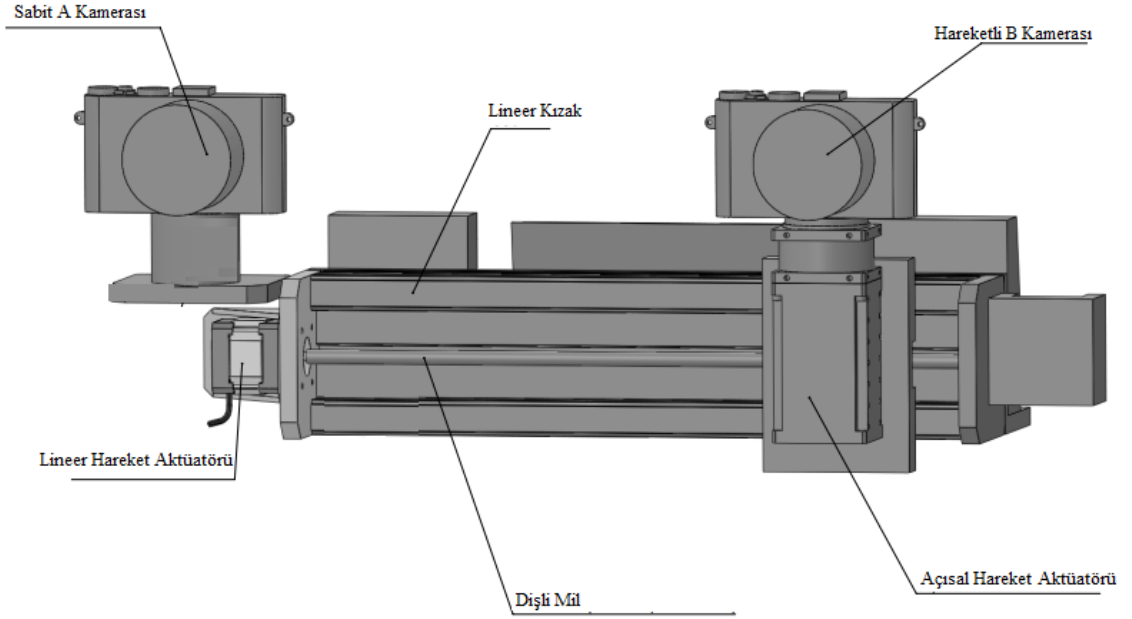


5. BULGULAR ve TARTIŞMA

Görüntü işleme tabanlı mesafe tespit sistemleri piksel bağımsız hale getirilebilirse ölçüm hassasiyeti artırılabilir. Bu sebeple çalışmamızda hedef nesne mesafesi bulunurken piksel değişimi/farkı parametre olarak kullanılmamaktadır.

Açısal değişim miktarı arttıkça ölçüm çözünürlüğünün hem yakın hem de uzak mesafelerde aynı oranda etkisi azalmaktadır. Bu da açısal değişimin mümkün olduğu kadar küçük tutulması gerektiğini göstermektedir. Bununla birlikte açısal değişim 0.001^0 alınsa bile uzun mesafelerde ölçüm hassasiyeti çok düşük olmaktadır.

Hedef uzaklaştıkça, açısal hareketin ölçüm tahmini üzerine etkisi azalmaktadır. Bunun sebebi, mesafeye bağlı açısal hareket edebilen kameranin ardışık iki optik eksenlerinin P0 noktasına olan uzaklığının artmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte mesafe ile pikselin görüntü içinde kapladığı alanın artması $\Delta x = 0$ olmasını sağlar. Uzak mesafede tam çakışmanın sağlanması, kameralar arasındaki mesafenin hassas bir şekilde ayarlanması ile çözülebilir. Böylece uzaklığın hesaplanmasında kullanılacak olan β ve l parametreleri en optimum şekilde bulunması ile hassas bir hesaplama gerçekleştirilir. β ve l parametrelerinin hesaplanması Bölüm 4.2' de ayrıntılı olarak verilmektedir.



Şekil 5.1. Görüntü metre (Image Meter)

Şekil 5.1’ de GM’ ye ait prototip tasarım verilmektedir. Tasarımda kameralar arası mesafeyi kontrol eden lineer aktüatör (linner hassasiyet 1mm), açısall konumlanmayı sağlayan açısall aktüatör (açısall hassasiyet $>0.001^0$) kullanılmaktadır.

Stereo kameradan bir tanesi sabit olarak referans noktaya konumlandırılır. Diğeri ise açısall ve lineer hareket edebilen bir elektromekanik sistem üzerine konumlandırılmaktadır.

Tasarlanan prototipin çalışma aşamaları aşağıda verilmektedir.

- Referans görüntüdeki hedef nesnenin görüntü bölütlemesi,
- B kamera görüntüsünde hedef nesnenin tespiti ve görüntü bölütleme,
- B kamerası açısall hareketi ile $\Delta x = 0$ yapan ideal β açısının belirlenmesi,
- En uygun kameralar arası mesafenin belirlenmesi(l),
- Mesafe hesabı (Z)

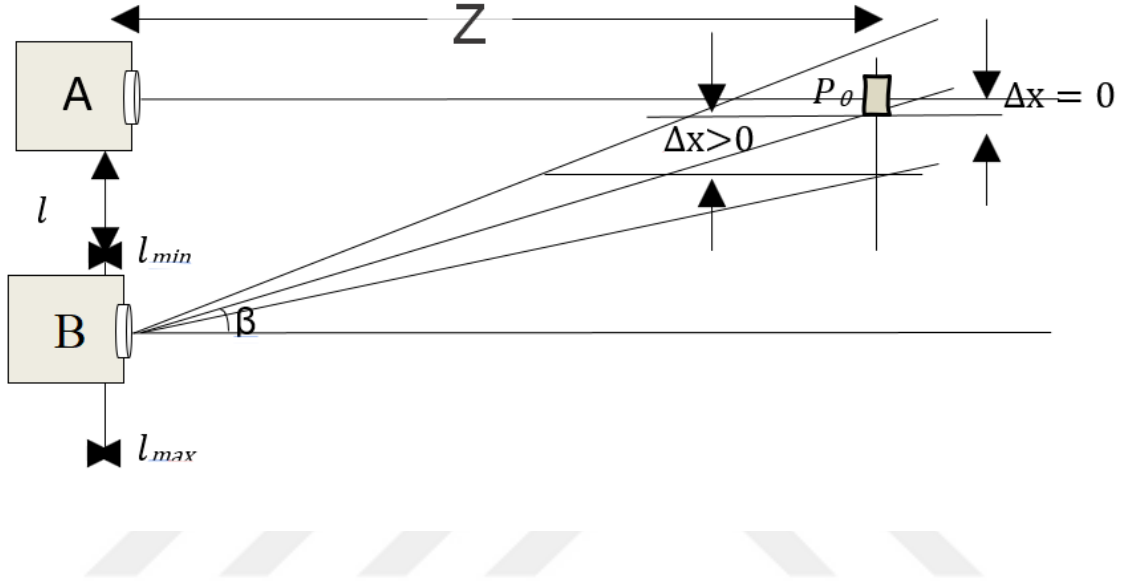
Sistemin temel algoritması ise aşağıdaki gibidir.

ALGORITMA 1: görüntü işleme ile mesafe tespit işlemi	
GİRİŞ	:a Kamera (Referans) Görüntüsü B Kamera Görüntüsü
ÇIKIŞ	:Hedef Nesne Mesafesi (Z)
İLK DEĞERLER	: $\beta = 0^0$, $l = 0.250\ m$
Eğer referans görüntüde hedef nesne işaretlendiyse	
Hedef nesneyi arka plan görüntüsünden ayırt et	
Hedef nesneyi B kamera görüntüsünde bul ve arka plan görüntüsünden ayırt et	
Δx hesapla	
($\Delta x > 0$) Koşulu sağladığı sürece	
β açısını 1 kademe artır (0.001^0)	
Δx hesapla	
Bitir	
β açısını kaydet	
($\Delta x < 1$) Koşulu sağladığı sürece	
l değerini 1 kademe artır ($0.001\ m$)	
Δx hesapla	
Bitir	
l_+ değerini kaydet	
İlk l değerine dön ($0.200\ m$)	
($\Delta x > -1$)Koşulu sağladığı sürece	
l değerini 1 kademe azalt ($0.001\ m$)	
Δx hesapla	
Bitir	
l_- değerini kaydet	
l_g değerini hesapla ve kaydet	
Mesafeyi hesapla (Z)	
Hiçbir koşul sağlanmazsa	
Başa dön	
Bitir	

5.1 Görüntü Metre ile Mesafe Ölçümü

Görüntü işleme tabanlı mesafe tespit çalışmalarında pikseller elbette olmak zorundadır ve birbirinden farklı pozisyonlara sahip iki farklı kamera kullanıldığında aynı nesne her iki kamerada farklı pozisyonlarda görüntülenecektir. Ancak kameraların görüntü alma eksen açıları ile oynanarak nesne görüntüleri aynı pozisyona taşınabilir. Böylece $\Delta x'$ den bağımsız bir çalışma yapabilmek için $\Delta x'$ in 0 olduğu an yakalanmalıdır (Görüntünün insan gözü ile yakalanmasına benzer şekilde). GM ile mesafe ölçüm bu

temeller üzerinde çalışmaktadır. Çalışmamızda farklı noktalarda konumlanan A ve B kameraları kullanılmaktadır. B kamerası görüntü ekranı içindeki hedef nesne konumunun, A referans kamerası görüntü ekranı içindeki hedef nesne konumu ile karşılaştırılması sağlanmıştır. Böylece Δx değeri 0 olacaktır. Δx 'in 0 olduğu anda, açısal hareketli B kamerasının pozisyonu elektromekanik sistemden alınır (β ve l).



Şekil 5.2. Görüntü metre' de açısal hareket

A kamerasından seçilen piksel ve komşu pikselleri ile oluşturulan şablon B kamera görüntüsünden taranarak bulunur. Bu eşleştirme belirli bir benzerlik (%40) oranının sağlanması ile bir sonraki aşamaya geçer. Bu aşamada bulunan şablonun Y eksen koordinatları dışında kalan kısım B kamerası ekranından çıkartılır. Her iki kamera görüntü ekranlarındaki merkez piksellerin arasındaki piksel farkı (Δx) hesaplanır. Daha sonra A ve B kameralarında oluşan nesne görüntülerinin arasındaki fark B kamerasının açısal ve lineer hareketleri ile değişir. Öncelikle B kamerası açısal hareket ettirilerek $\Delta x=0$ yakalanmaktadır. Böylece β açısı tespit edilmektedir. Ancak bu karşılaştırma bize mevcut l_b mesafesi (0.25 m) için optimum β açısını vermeyecektir. Çünkü B kamerasını hareket ettiren açısal aktüatörün çözünürlüğü bunun için yeterli olmayacaktır. Buna rağmen görüntü içinde pikselin kapladığı alan hedef nesne mesafesi ile doğru orantılı artacağından hedef nesne merkez noktası ile tam karşılaşma gerçekleştirilemese bile (bkz. Şekil 5.2-5.3) bu noktanın içinde bulunduğu piksel ile karşılaşma gerçekleşecek ve $\Delta x=0$ olacaktır.

Başlangıç pozisyonunda A ve B kameraları birbirine paralel ve kameralar arasındaki mesafe (l_b) 0.25 m'dir. l_b mesafesi ve servo motorun ilk adımından sonra alacağı en küçük açı bilgisi; sistemin ölçebileceği max mesafeyi belirlemektedir. Bu durum Eşitlik 9' da verilmektedir. Bu kapsamda seçilen açısal servo motorumuzun bir tam turda 32768 adım atması ve enkoderin bu hassasiyeti desteklemesi gerekmektedir. Çünkü her bir adım yaklaşık 0.0109° olacaktır. Böylece ölçülebilecek max. mesafe Eşitlik 9 kullanılarak yaklaşık 1051 m olarak bulunur. Piyasada 32768, 64500, 207720, 607000, 1003846 adım/tur sahip mutlak enkoderli servo motor bulunmaktadır. 32768 adım/tur tercih edilmesinin sebebi uzaklık limitinin 1000 m ile sınırlı olmasıdır.

Lineer hareket sonucunda lensler arası mesafenin min. $l_- = 0.15\text{ m}$ ve max. $l_+ = 0.35\text{ m}$ olması planlanmaktadır. Böylece aynı β açısı ile farklı mesafeler ölçülebilecek ve mesafe ölçüm çözünürlüğü (l/Δ_z) artacaktır.

Tablo 5.1 $l_b = 0.25\text{ m}$ iken mesafeye bağlı ölçülen β açıları

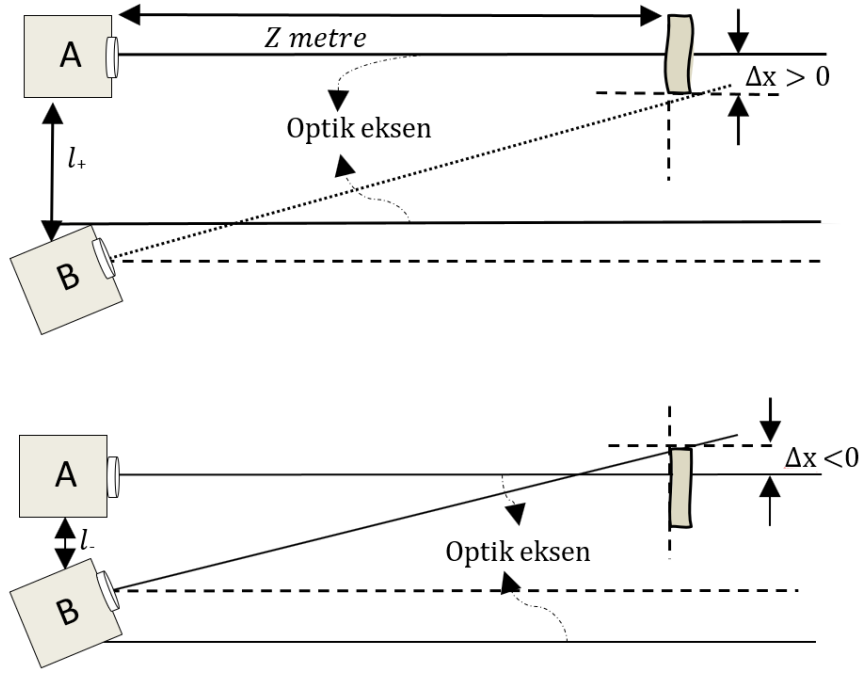
TS Mesafe	l_b	β -ölçülen	z	Hata
6.723	0.25	1.7425487	8.2175771	22.23%
10.412	0.25	0.9894593	14.475099	39.02%
16.288	0.25	0.8754822	16.359933	0.44%
21.054	0.25	0.6837542	20.947974	0.50%
35.268	0.25	0.3756421	38.131348	8.12%
48.271	0.25	0.2472702	57.927951	20.01%
48.796	0.25	0.2375488	60.298612	23.57%
55.669	0.25	0.2437845	58.756231	5.55%
66.322	0.25	0.1698535	84.330926	27.15%
160.578	0.25	0.0866421	165.32302	2.95%
225.617	0.25	0.0698754	204.99257	9.14%
276.274	0.25	0.0602155	237.87795	13.90%
355.363	0.25	0.0363524	394.03019	10.88%
368.634	0.25	0.0295649	484.49153	31.43%
489.651	0.25	0.0276355	518.31679	5.85%
511.367	0.25	0.0224588	637.7876	24.72%
563.972	0.25	0.0227246	630.32767	11.77%
645.866	0.25	0.0202875	706.04778	9.32%
801.955	0.25	0.0165754	864.16886	7.76%

Tablo 5.1’ de GM ile ölçülen $l_b = 0.25 \text{ m}$ sabit tutularak, $\Delta x=0$ yapan β açılara ait bir tablo verilmiştir. Bu tablo incelendiğinde $l_b = 0.25 \text{ m}$ iken en fazla hatanın TS ile 368.634 m ölçülen mesafenin GM ile (sadece β açısı kullanılarak) 484.49153 m ölçüldüğü görülmektedir. Sabit l_b değerinde en iyi ölçümün ise TS ile 16.288 m ölçümü 16.359933 m ölçerek vermiştir. Bu durum teorik olarak “Yöntem” kısmında anlatılmış, burada ise ölçüm sonuçları tablo halinde verilmiştir. Açısal çözünürlüğümüz ne kadar yüksek olursa olsun uzak mesafedeki hata payı, sadece açı verisi ile azalmayacağı aşikardır.

Açısal aktüatör kullanılarak $\Delta x=0$ yapan β açısı belirlendikten sonra tam çakışmayı sağlayacak l mesafesinin sınırları belirlenmektedir. l mesafesinin l_+ ve l_- sınırları lineer aktüatörün doğrusal hareketi ile ayarlanmaktadır. Tam çakışmayı sağlayan en uygun l_g değeri lineer aktüatörün sınırları ve adım çözünürlüğü kullanılarak hesaplanır. Eşitlik 13 ve Eşitlik 14’ te l mesafesinin artması (0.2 m, 0.201 m, 0.202 m,, 0.350 m) ile $\Delta x=-1$ yapan (Eşitlik 13) ilk l değeri l_+ değerini verirken, l mesafesinin azalması (0.2 m, 0.199 m ,0.198 m ,0.197 m,, 0.150 m) ile $\Delta x=+1$ yapan (Eşitlik 14) ilk değer ise l_- değerlerini verir. Daha sonra bu değerler Eşitlik 11’ de kullanılarak l_g değeri hesaplanır (teorik olarak $\Delta x \geq 0.5$ koşulunda $\Delta x=+1$, $\Delta x \leq -0.5$ koşulunda -1 alınmaktadır).

$$-1 = \Delta x = PPM * ((l_-) - (Z * \tan (\beta))) \quad (13)$$

$$+1 = \Delta x = PPM * ((l_+) - (Z * \tan (\beta))) \quad (14)$$



Şekil 5.4. l_+ ve l_- nin hesaplanması

Şekil 5.4' te l_+ ve l_- değerlerinin sınırları verilmektedir. Böylece β açısı ve bu açıyla birlikte kullanılacak en uygun l mesafesi bulunduğundan sonra Eşitlik 9 aşağıdaki şekilde güncellenerek Z mesafesi hesaplanmaktadır (Eşitlik 12). Burada önemli olan β açısının ve l_g mesafesinin birbirlerine uyumlu olarak hassas bir şekilde bulunmasıdır.

Tablo 5.2 GM ile teorik olarak hesaplanan ölçüm değerleri (TH)

TS (m)	GM ile elde edilen parametreler				Z Hesaplanan (m)	TS/TH % Hata
	l_- (mm)	l_+ (mm)	l_g (mm)	β Açısı		
6.723	199	201	200	1.705	6.719	0.06
10.412	198	202	200	1.1	10.416	0.04
16.288	198	203	201	0.704	16.317	0.18
21.054	195	201	198	0.539	21.047	0.03
35.268	191	201	196	0.319	35.203	0.18
48.271	188	201	195	0.231	48.242	0.06
48.796	189	203	196	0.231	48.614	0.37
55.669	196	211	204	0.209	55.788	0.21
66.322	195	213	204	0.176	66.411	0.13
160.578	164	206	185	0.066	160.602	0.01
225.617	185	245	215	0.055	223.974	0.73
276.274	177	247	212	0.044	276.061	0.08
355.363	160	250	205	0.033	355.928	0.16
368.634	166	259	213	0.033	368.950	0.09
489.651	126	250	188	0.022	489.618	0.01
511.367	132	261	197	0.022	511.755	0.08
563.972	145	288	217	0.022	563.843	0.02
645.866	167	329	248	0.022	645.880	0.00
801.955	53	255	154	0.011	802.141	0.02

Tablo 5.2’ de GM ile teorik olarak hesaplanan ölçüm değerleri mevcuttur. Tablo 5.1 ile kıyasladığımızda en fazla hatanın 48.796 m’ de %0.36 olduğu ve en iyi ölçümün ise 645.866 m’ de ~ % 0 hatalı bir ölçümün olduğu görülmektedir.

Çalışmada belirlenen yöntemin başarımı, farklı mesafeler kullanılarak yapılan hesaplamalar ile teorik olarak hesaplanmış ve GM ile yapılan ölçüm sonuçları, bulunan l ve β değerleri Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’ de verilmiştir.

5.2 Görüntü Metre, Lazer Metre ve Total Station Ölçüm Sonuçları

Tablo 5.3 Ölçüm karşılaştırma tablosu.

TS (m)	LM (m)	GM ile ölçülen parametreler				GM (m)	Hata	
		l_+ (mm)	l_- (mm)	$l_{ort.}$ (mm)	β		TS/GM	TS/LM
							%	%
6.723	6.8	246.85	166.12	206.485	1.742548675	6.787	0.96	1.15
10.412	10.3	241.54	115.24	178.390	0.989459280	10.329	0.80	1.08
16.288	16.5	289.75	209.54	249.645	0.875482155	16.337	0.30	1.30
21.054	20.8	257.46	238.54	248.000	0.683754210	20.780	1.30	1.21
35.268	35.6	267.84	203.56	235.700	0.375642103	35.950	1.93	0.94
48.271	48.8	242.85	176.75	209.800	0.247270173	48.613	0.71	1.10
48.796	47.6	240.65	158.05	199.350	0.237548754	48.082	1.46	2.45
55.669	53.6	263.57	201.12	232.345	0.243784513	54.607	1.91	3.72
66.322	65.4	244.51	145.43	194.970	0.169853452	65.768	0.84	1.39
160.578	165.8	297.62	196.86	247.240	0.086642104	163.498	1.82	3.25
225.617	218.8	304.53	233.54	269.035	0.069875422	220.601	2.22	3.02
276.274	278.3	255.55	318.54	287.045	0.060215487	273.127	1.14	0.73
355.363	358.8	318.67	135.67	227.170	0.036352423	358.047	0.76	0.97
368.634	370.2	242.65	135.80	189.225	0.029564875	366.712	0.52	0.42
489.651	486.7	318.47	146.37	232.420	0.027635486	481.869	1.59	0.60
511.367	512.6	248.56	154.25	201.405	0.022458762	513.815	0.48	0.24
563.972	565.6	317.42	138.45	227.935	0.022724579	574.695	1.90	0.29
645.866	659.8	308.97	154.24	231.605	0.020287541	654.095	1.27	2.16
801.955	810.5	306.82	165.24	236.030	0.016575422	815.878	1.74	1.07

*Hata oranları TS Ölçü cihazı referans alınarak GM ve LM için hesaplanmıştır.

Tablo 5.3' te aynı hedefin; GM, LM ve TS ölçüm değerleri verilmiştir. GM' ye göre en büyük hata 225.617 m' de %2.22 hata oranı olarak yakalanmıştır. En iyi sonuç ise 16.288 m' de %0.30 ve 511.367 m' de %0.48 olarak elde edilmiştir. Hedef nesne büyüklükleri kamera tarafından görülebilir olarak seçilmiştir.

Ölçümler doğal ortamdaki nesneler belirlenerek gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple ölçüm mesafeleri standart bir aralığa sahip değildir. Ve tam değerlerden oluşmamaktadır.

5.3 Mekanik Donanımın Ölçüm Başarımına Etkisi

Elektromekanik sistem, sabit ve hareketli parçalardan oluşmaktadır. Bu durum, mesafe ölçüm başarımını olumsuz etkilemektedir. Bu noktada 2 farklı hata türü oluşma riski vardır. Bu hatalar “Standart mekanik hata” ve “Rastgele mekanik hata” dır.

Standart mekanik hata; ölçüm cihazının üretimi aşamasında meydana gelmektedir. Farklı zaman dilimlerinde yapılan ölçümlerde bu hata değişmez.

Rastgele mekanik hata; her bir ölçüm esnasında farklı hatalar meydana gelmektedir. Daha önce meydana gelen hatalardan bağımsız olarak oluşan hata türüdür.

Her iki hata türü de ölçüm cihazının üretim aşamasında minimum düzeye çekilebilecek hatalardır. Günümüzde benzer hassasiyete sahip mekanik donanımlar üretilebilmektedir. Örnek olarak otomotiv sektöründe araç tekerleklerinin aynı açılarda senkronize hareketi, haritacılık sektöründe TS ölçü cihazı, CNC tezgahlarının parça işleme aparatları vb. verilebilir. Prototip cihazın üretimi ve kullanımı esnasında bu hataların beklenenden fazla olduğu görülmüştür. Cihazın profesyonel olarak seri üretimi gerçekleştirildiğinde bu hataların çok daha düşük olacağı öngörülmektedir.

5.4 Sistem Yazılımının Ölçüm Başarımına Etkisi

Ölçüm için hedef nesnenin arka plandan ayrıştırılması gerekmektedir. Bunun için görüntü işleme tekniklerinden görüntü bölütleme işlemleri yapılmaktadır. Bu aşamada her zaman doğru görüntü bölütleme gerçekleşmemektedir. Bu da ölçüm hatasına sebep olabilmektedir. Ancak günümüzde görüntü işleme tekniklerinin başarı oranı gittikçe artmaktadır. Ayrıca kullanıcı ekran üzerinden görüntü bölütlemenin doğruluğunu kontrol edebilir ve gerektiğinde manuel olarak müdahale edebilir.

Tablo 4.1’ de elde edilen değerlere bölütleme aşamasında hatasız sonuçlar elde edildiği takdirde ulaşılabilir. Görüntü bölütleme aşamasında yapılacak hatalar hata oranlarının artmasına sebep olmaktadır. Bölütleme aşamasında yapılabilecek hatalar için; A ve B kamera görüntülerinde bölütleme aşamasında aynı hatalar yapılırsa bu

durum hata oranını artırmayacaktır, eğer görüntülerden birinde doğru diğeri yanlış bölütleme yapılırsa ve bu Δx değerini etkilerse hata oranını artıracakı öngörülmektedir.

Donanım ve yazılım hataları hedef nesne mesafe eşitliklerine eklenerek Eşitlik 15' deki halini alır.

$$Z = \frac{l_g + l_s + l_r + l_{seg}}{\tan(\beta + \beta_s + \beta_r)} \quad (15)$$

Eşitlik 15' de;

l_s = Standart lineer mekanik hata

l_r = Rastgele lineer mekanik hata

l_{seg} = Bölütleme hatası

β_s = Standart açısal mekanik hata

β_r = Rastgele açısal mekanik hata

Eşitlik 15' de görüntü bölütleme hatası sadece lineer eksen üzerinde etkili olarak ifade edilmektedir. Bunun sebebi bu hatanın küçük olacağı öngörüldüğünden sadece l_g mesafesinin değişimiyle ifade edilebilir.

Eşitlik 15' de belirtilen hataların limitleri 0'dır. Donanım hataları uygun bir üretim sürecinde 0'a çok yakın gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir. Görüntü bölütleme hataları da görüntü işleme uygulamalarının gelişimi düşünüldüğünde 0 yakın bir değer olarak ulaşılabilir niteliktedir. Çalışmada belirlenen hatalar ayrı ayrı bulunmamıştır. Belirlenen bütün hatalar ölçüm hatası olarak bulunmuştur.

5.5 Ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi

Tablo 5.4’ te Bölüm 4.2’ de anlatılan teorik temellere göre hesaplanan değerler, GM ile yapılan ölçüm sonuçları ve sistemi etkileyen toplam hata ektisi verilmiştir. Tablo 5.4 incelendiğinde mutlak hatanın rastgele ve rastgele hatalardan kaynaklı ve mesafeden bağımsız olduğu görülmektedir. Mutlak hataların sistem kuruluş aşamasında olduğu ve sistemin hassas bir şekilde üretilmesi ile bu hataların azaltılabilir olması GM’yi bir mesafe ölçüm cihazı olarak kullanmamızı sağlayabilir.

Tablo 5.4 Teorik Hesaplanan ile GM ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

TS Ölçümü	Teorik Hesaplanan (TH)			GM ile ölçülen			TH/GM
	l_{ort}	β	Z (m)	l_{ort}	β	Z (m)	Hata %
6.723	200	1.705	6.719	206.485	1.7425487	6.787	1.01%
10.412	200	1.1	10.416	178.39	0.9894593	10.329	0.84%
16.288	201	0.704	16.317	249.645	0.8754822	16.337	0.12%
21.054	198	0.539	21.047	248	0.6837542	20.78	1.27%
35.268	196	0.319	35.203	235.7	0.3756421	35.95	2.12%
48.271	195	0.231	48.242	209.8	0.2472702	48.613	0.77%
48.796	196	0.231	48.614	199.35	0.2375488	48.082	1.09%
55.669	204	0.209	55.788	232.345	0.2437845	54.607	2.12%
66.322	204	0.176	66.411	194.97	0.1698535	65.768	0.97%
160.578	185	0.066	160.602	247.24	0.0866421	163.498	1.80%
225.617	215	0.055	223.974	269.035	0.0698754	220.601	1.51%
276.274	212	0.044	276.061	287.045	0.0602155	273.127	1.06%
355.363	205	0.033	355.928	227.17	0.0363524	358.047	0.60%
368.634	213	0.033	368.95	189.225	0.0295649	366.712	0.61%
489.651	188	0.022	489.618	232.42	0.0276355	481.869	1.58%
511.367	197	0.022	511.755	201.405	0.0224588	513.815	0.40%
563.972	217	0.022	563.843	227.935	0.0227246	574.695	1.92%
645.866	248	0.022	645.88	231.605	0.0202875	654.095	1.27%
801.955	154	0.011	802.141	236.03	0.0165754	815.878	1.71%

Tablo 5.5 Donanımsal ve yazılımsal hataların ölçüm sonucuna etkisi

TS Ölçümü	TH		GM		Hata farkı
	Z (m)	Hata %	Z (mm)	Hata %	
6.723	6.719	0.06%	6.787	0.95%	0.89%
10.412	10.416	0.04%	10.329	0.80%	0.76%
16.288	16.317	0.18%	16.337	0.30%	0.12%
21.054	21.047	0.03%	20.78	1.30%	1.27%
35.268	35.203	0.18%	35.95	1.93%	1.75%
48.271	48.242	0.06%	48.613	0.71%	0.65%
48.796	48.614	0.37%	48.082	1.46%	1.00%
55.669	55.788	0.21%	54.607	1.91%	1.69%
66.322	66.411	0.13%	65.768	0.84%	0.70%
160.578	160.602	0.01%	163.498	1.82%	1.80%
225.617	223.974	0.73%	220.601	2.22%	1.49%
276.274	276.061	0.08%	273.127	1.14%	1.06%
355.363	355.928	0.16%	358.047	0.76%	0.60%
368.634	368.95	0.09%	366.712	0.52%	0.44%
489.651	489.618	0.01%	481.869	1.59%	1.58%
511.367	511.755	0.08%	513.815	0.48%	0.40%
563.972	563.843	0.02%	574.695	1.90%	1.88%
645.866	645.88	0.00%	654.095	1.27%	1.27%
801.955	802.141	0.02%	815.878	1.74%	1.71%

Tablo 5.5’ te TH mesafe ve bu mesafelerin TS göre hata yüzdeleri, GM ile yapılan ölçüm sonuçları ve bu ölçüm sonuçlarının TS göre hata yüzdeleri ile bu iki hata payları arasındaki fark verilmiştir. Bu fark elektromekanik sistemin donanımsal ve yazılımsal hatalarından kaynaklanmaktadır. Yapılan ölçüm sonuçlarında görüldüğü üzere sistemin standart denilebilecek bir hatası yoktur. Bu hataların çoğunun donanımsal olması ve ölçüm sonuçlarına daha fazla etkisi sistemin donanımsal gereçlerinden gelmektedir. Donanımsal hataların giderilmesi ile yapılacak ölçümlerde hata oranının en yüksek olduğu 225.617 m de hata oranı %2.22’nin altına ineceği öngörülmektedir.

6. SONUÇLAR

Çalışmada literatürdeki görüntü işleme tabanlı mesafe tahmin yöntemleri incelenmiştir. Mono ve stereo kameralar ile yapılan çalışmaların piksel odaklı çalışmalar olduğu görülmüş ve bu çalışmaların başarı oranlarının düşüklüğüne sebep olan faktörleri, ortadan kaldıracak yöntemler geliştirilmiştir. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak elektromekanik bir sisteme dayalı olan GM ile mesafe tespiti yapan bir cihaz elde edilmiştir. GM'nin uzak ve yakın mesafede ölçüm sonuçlarının diğer çalışmalara göre daha başarılı olduğu ortaya konulmuştur.

Çalışmada sistemin doğruluğu, geliştirilen denklemler ile ispat edildi. GM ile yapılan ölçüm sonuçları Tablo 5.3' te verilmiştir. Elde edilen verilere göre 225.617 m mesafeyi, 269.035 m ölçerek %2.22 oranda ölçüm hatası, GM ile yapılan en yüksek hata oranı olmuştur. Karşılaştırmada kullanılan bir diğer ölçüm cihazı olan LM ise aynı mesafeyi %3.02 hata ile 218.8 m ölçmüştür. En iyi ölçüm olarak da; TS ile ölçülen 16.288 m mesafe, LM ile %1.30 hata oranı ile 16.5 m ölçülürken, GM ile %0.30 hata oranı ile 16.337 m ölçmüştür. Literatürde incelenen çalışmalar arasında bu mesafede ve bu hata oranında ölçüm yapabilen bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Karşılaştırmalarda referans olarak TS ölçümleri (mm hassasiyette) alınmıştır. 19 ayrı hedef nesne için yapılan ölçümlerde LM'nin hata ortalaması 1.425 olurken, GM' nin ölçüm hata ortalaması 1.244 olmuştur. GM ile yapılan ölçüm hatalarının sistem sonucunu maksimum %2.22 oranında etkilediği ve bu hataların donanımsa/yazılımsal olduğu (Bölüm 5.4, Tablo 5.3 ve 5.4) ve çözüm önerileri ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Bu hataların ortadan kaldırılması ile GM, uzak ve yakın mesafede %2 hata payının altında ölçüm yapabilecek bir cihaz olacaktır.

Hedef nesnenin kamera tarafından görülebilir olmaması durumunda veya Tablo5.4' te 801.955 m' deki gibi l_{min} değerinin elektromekanik sınırlar dışında kalması halinde, kameraların büyütme özellikli seçilmesi bu tarz dezavantajları ortadan kaldıracaktır. Bu büyütme katsayısının da geliştirilen denklemlere entegre edilmesi ile daha küçük hedef

ve donanımsal sınırlar dışında kalan nesneler için bir çözüm yolu üretilebilir. Bu sayede göz ile görülebilen sabit her nesne mesafesi GM ile ölçülebilir.



7. KAYNAKLAR

- Ashoori, M. E., & Mahlouji, M. (2017). Measuring the Distance between the Two Vehicles Using Stereo Vision with Optical Axes Cross. *Modern Applied Science*, 12(1), 165. <https://doi.org/10.5539/mas.v12n1p165>
- Budiharto, W., Santoso, A., Purwanto, D., & Jazidie, A. (2011). Multiple Moving Obstacles Avoidance of Service Robot using Stereo Vision. *IAES-Telkomnika*, 9(3), 433–444. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v9i3.733>
- Campbell, N., Vogiatzis, G., Hernández, C., & Cipolla, R. (2008). Using Multiple Hypotheses to Improve Depth-Maps for Multi-View Stereo. *Proc. 10th Europ. Conf. on Computer Vision (ECCV)*, 1–14. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88682-2_58
- Casas, S., Luo, W., & Urtasun, R. (2018). IntentNet: Learning to Predict Intention from Raw Sensor Data. *Proceedings of The 2nd Conference on Robot Learning*, 87(CoRL), 947–956. <http://proceedings.mlr.press/v87/casas18a.html>
- Dongbo Min, Jiangbo Lu, & Minh N. Do. (2013). Joint Histogram-Based Cost Aggregation for Stereo Matching. İçinde *IEEE Trans on Pattern Analysis and Intelligence Machine* (C. 46, Sayı 6, ss. 883–885). <https://doi.org/978 0 7340 3893 7>
- Duran, O., & Turan, B. (2022). Vehicle-to-vehicle distance estimation using artificial neural network and a toe-in-style stereo camera. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 190(November 2021), 110732. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110732>
- Fan, R., Ai, X., & Dahnoun, N. (2018). Road Surface 3D Reconstruction Based on Dense Subpixel Disparity Map Estimation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 27(6), 3025–3035. <https://doi.org/10.1109/TIP.2018.2808770>
- Gan, Y., Xu, X., Sun, W., & Lin, L. (2018). Monocular Depth Estimation with Affinity, Vertical Pooling, and Label Enhancement. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in*

- Bioinformatics*), 11207 LNCS, 232–247. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01219-9_14
- Hantao, L. (2005). *Distance Determination from Pairs of Images from Low Cost Cameras*. August, 1–95.
- Hassan, M. F. A., Hussain, A., Saad, M. M. H., & Win, K. (2017). 3D Distance Measurement Accuracy on Low-Cost Stereo Camera. *Scientific International*, 29(3), 599–605.
- He, Y., Liang, B., Zou, Y., He, J., & Yang, J. (2017). Depth errors analysis and correction for time-of-flight (ToF) cameras. *Sensors (Switzerland)*, 17(1), 1–23. <https://doi.org/10.3390/s17010092>
- HealthOrganization), W. (1998). Health risks from the use of laser pointers. İçinde *Indian pediatrics* (C. 35, Sayı 11, ss. 1155–1158).
- Holzmann, C., & Hochgatterer, M. (2012). Measuring distance with mobile phones using single-camera stereo vision. *Proceedings - 32nd IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, ICDCSW 2012*, 88–93. <https://doi.org/10.1109/ICDCSW.2012.22>
- Jiao, J., Cao, Y., Song, Y., & Lau, R. (y.y.). *Look Deeper into Depth: Monocular Depth Estimation with Semantic Booster and Attention-Driven Loss*. 1–17. <http://www.cs.cityu.edu.hk/~rynson/papers/eccv18b.pdf>
- Jin, H., Soatto, S., & Yezzi, A. J. (2003). *Multi-view Stereo Beyond Lambert 1 Introduction*. 404, 1–35.
- Jung, J. Il, & Ho, Y. S. (2010). Depth map estimation from single-view image using object classification based on Bayesian learning. *3DTV-CON 2010: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video*, 4–7. <https://doi.org/10.1109/3DTV.2010.5506309>
- Katada, K., Chen, S., & Zhang, L. (2014). The Triangulation of Toe-in Style Stereo Camera. *Proc. 2nd International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2014*, 18–21. <https://doi.org/10.12792/icisip2014.007>
- Kato, Zoltan, J. Z. (2011). *Markov Random Fields in Image Segmentation*. *Collection Foundation and Trends in Signal Processing* (C. 5, Sayı 1).

- Kılınç, M., & Gözde, H. (2020). Detection of buried anti-personnel mines in thermal images by circular hough transformation supported active thermography method. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(2), 697–707. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.507225>
- Kurnaz, Ç., & Gül, B. K. (2018). Determination of the relationship between sodium ring width on iris and cholesterol level. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(4), 1557–1568. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416452>
- Kytö, M., Nuutinen, M., & Oittinen, P. (2011). *Method for measuring stereo camera depth accuracy based on stereoscopic vision*. January, 786401. <https://doi.org/10.1117/12.872015>
- Lai, X. B., Wang, H. S., & Xu, Y. H. (2012). A real-time range finding system with binocular stereo vision. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 9, 1–9. <https://doi.org/10.5772/50921>
- Liang, Z., Feng, Y., Guo, Y., Liu, H., Chen, W., Qiao, L., Zhou, L., & Zhang, J. (2017). *Learning for Disparity Estimation through Feature Constancy*. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.438>
- Mahammed, M. A., Melhum, A. I., & Kochery, F. A. (2013). 10.1.1.380.1690. 2(2), 5–8.
- Mancini, M., Costante, G., Valigi, P., Ciarfuglia, T. A., Delmerico, J., & Scaramuzza, D. (2017). Toward Domain Independence for Learning-Based Monocular Depth Estimation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(3), 1778–1785. <https://doi.org/10.1109/LRA.2017.2657002>
- Mayer, N., Ilg, E., Häusser, P., Fischer, P., Cremers, D., Dosovitskiy, A., & Brox, T. (2015). *A Large Dataset to Train Convolutional Networks for Disparity, Optical Flow, and Scene Flow Estimation*. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.438>
- Mez, S., Hb, T., & Hrc, T. (2012). *Nástrojová legovaná ocel pro práci za studena*. *Mechanické vlastnosti*. 801–804. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2012.6288005>
- Mirzabaki, M. (2008). A New Method for Height Estimation in Depth. *8th WSEAS International Conference on SIGNAL, SPEECH and IMAGE PROCESSING*

- (SSIP'08), 29–33. <http://www.wseas.org/conferences/2008/spain/ssip/> ISBN: 978-960-6474-008-6
- Montiel-Ross, O., Sepúlveda, R., Castillo, O., & Quiñones, J. (2012). Efficient stereoscopic video matching and map reconstruction for a wheeled mobile robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 9, 1–13.
<https://doi.org/10.5772/50526>
- Murphey, Y. L., Chen, J., Crossman, J., Zhang, J., & Sieh, L. (2000). *DepthFinder, A Real-time Depth Detection System for Aided Driving*. 2(Mi), 122–127.
- Nagar, S., & Verma, J. (2015). *Distance Measurement Using Stereo Vision*. 07(01), 632–639.
- Oh, J. H., & Jungsik Park, Sang Hwa Lee, Boo Hwan Lee, J.-I. P. (2013). *Error Modeling of Depth Measurement Using Fir Stereo Camera Systems*. 470–475.
<https://doi.org/10.1107/S0567740874007321>
- Oh, J. H., Park, J., Lee, S. H., Lee, B. H., & Park, J. Il. (2013). Error modeling of depth measurement using fir stereo camera systems. *3rd International Conference on Digital Information Processing and Communications, ICDIPC 2013*, 470–475.
- Petrović, E., Leu, A., Ristić-Durrant, D., & Nikolić, V. (2013). Stereo vision-based human tracking for robotic follower. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10. <https://doi.org/10.5772/56124>
- Phelawan, J., Kittisut, P., & Pornsuwancharoen, N. (2012). A new technique for distance measurement of between vehicles to vehicles by plate car using image processing. *Procedia Engineering*, 32, 348–353.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1278>
- Rahman, A., Salam, A., Islam, M., & Sarker, P. (2008). An Image Based Approach to Compute Object Distance. İçinde *International Journal of Computational Intelligence Systems* (C. 1, Sayı 4, ss. 304–312).
<https://doi.org/10.1080/18756891.2008.9727627>
- Robert, L., & Deriche, R. (y.y.). *Dense Depth Map Reconstruction : A Minimization and Regularization Approach which Preserves Discontinuities*.
- Selçuk, T., Çolakoğlu, A. S., & Alkan, A. (2018). Bread texture analysis and

- development of user interface using image processing techniques. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(1), 31–41.
<https://doi.org/10.17341/gazimmfd.406777>
- Seshadrinathan, K., Nestares, O., Wu, Y., Corporation, I., & Clara, S. (2017). Accurate measurement of point to point distances in 3D camera images. *IS&T International Symposium on Electronic Imaging 2017*, 20–25.
<https://doi.org/https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2017.15.DPMI-065>
- Shortis, M. (2015). Calibration techniques for accurate measurements by underwater camera systems. *Sensors (Switzerland)*, 15(12), 30810–30827.
<https://doi.org/10.3390/s151229831>
- Solak, S., & Bolat, E. D. (2016). Distance estimation using stereo vision for indoor mobile robot applications. *ELECO 2015 - 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 685–688.
<https://doi.org/10.1109/ELECO.2015.7394442>
- Soyaslan, M. (2016). *Stereo kamera sisteminde aykırılık haritaları yardımıyla nesne uzaklıklarının tespit edilmesi Object distance detection through disparity map in stereo camera system*. 111–119.
- Stein, G. P., Gdalyahu, Y., & Shashua, A. (2010). Stereo-assist: Top-down stereo for driver assistance systems. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, 723–730. <https://doi.org/10.1109/IVS.2010.5548019>
- Takatsuka, M., West, G. A. W., Venkatesh, S., & Caelli, T. M. (2003). Low-cost interactive active range finder. *Machine Vision and Applications*, 14(3), 139–144.
<https://doi.org/10.1007/s00138-003-0129-y>
- Tao, M. W., Hadap, S., Malik, J., & Ramamoorthi, R. (2013). Depth from combining defocus and correspondence using light-field cameras. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2, 673–680.
<https://doi.org/10.1109/ICCV.2013.89>
- Tao, M. W., Wang, T., Malik, J., & Ramamoorthi, R. (y.y.). *Depth Estimation for Glossy Surfaces with Light-Field Cameras*. 1–14.
- Theodosios, P., Wilson, L., & Cheng, S. (2014). EE368 Final Project: Road Sign

- Detection and Distance Estimation in Autonomous Car Application.
Stacks.Stanford.Edu.
https://stacks.stanford.edu/file/druid:np318ty6250/Chen_Theodosis_Wilson_Stereo_Vision_in_Autonomous_Car_Application.pdf
- Tong, X., Shum, H.-Y., Kang, S. B., Li, Y., & Lin, S. (2007). *Diffuse-Specular Separation and Depth Recovery from Image Sequences*. 210–224.
https://doi.org/10.1007/3-540-47977-5_14
- Tsung-Shiang, H. (2015). An Improvement Stereo Vision Images Processing for Object Distance Measurement. *International Journal of Automation and Smart Technology*, 5(2), 85–90. <https://doi.org/10.5875/ausmt.v5i2.460>
- Ülkir, O., Ertuğrul, I., & Akkuş, N. (2021). Characterization of electrothermal micro-actuator using image processing algorithm. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(2), 1159–1170.
<https://doi.org/10.17341/gazimmfd.683386>
- Ummenhofer, B., Zhou, H., Uhrig, J., Mayer, N., Ilg, E., Dosovitskiy, A., & Brox, T. (2017). DeMoN: Depth and motion network for learning monocular stereo. *Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017, 2017-Janua*, 5622–5631.
<https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.596>
- Uslu, O., & Ozkan, E. (2016). *IP CCTV Sistemlerde pixel (PPM) hesaplaması ve doğru çözünürlük tespiti*.
- Vedula, S., Baker, S., Rander, P., Collins, R., & Kanade, T. (2005). Three-dimensional scene flow. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(3), 475–480. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2005.63>
- Vyas, A., Yu, S., & Paik, J. (2018). Fundamentals of digital image processing. *İçinde Signals and Communication Technology*. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7272-7_1
- Watanabe, M. (2010). *Rational Filters for Passive Depth from Defocus MASAHIRO*. *February*, 1–5. <https://doi.org/10.1023/A>
- Wedel, A., Franke, U., Klappstein, J., Brox, T., & Cremers, D. (2006). Realtime depth

- estimation and obstacle detection from monocular video. *Pattern Recognition*, 475–484. https://doi.org/10.1007/11861898_48
- Yamaguti, N., & Oe, S. (y.y.). *A Method of Distance Measurement by Using Monocular Camera*. 1255–1260.
- Yanik, H., Turan, B., Yüksekokulu, M. M., Ü, T. G., Fakülte, M., & Mühendisliği, B. (2021). Mesafe Ölçümünde Image -Metre : Görüntü İşleme ile Mesafe Tespit Yöntemlerinde Eksik Ne ? *4 th International Conference on Data Science and Applications (ICONDATA'21), June 4-6, 2021, TURKEY*, 2, 480–486.
- Zeglazi, O., Rziza, M., Amine, A., & Demonceaux, C. (2018). Efficient dense disparity map reconstruction using sparse measurements. *VISIGRAPP 2018 - Proceedings of the 13th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*, 5.
- Zhang, G. Z. G., Jia, J. J. J., Wong, T.-T. W. T.-T., & Bao, H. B. H. (2008). Recovering consistent video depth maps via bundle optimization. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (2008)*, 20(Supplement 4), 1–8. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2008.4587496>
- Zhong, Y., Dai, Y., & Li, H. (2017). *Self-Supervised Learning for Stereo Matching with Self-Improving Ability*. <http://arxiv.org/abs/1709.00930>

