



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



İTKİ VEKTÖR KONTROL SİSTEMLERİNDE
LÜLE KONUMUNUN GÖRÜNTÜ İŞLEME
YÖNTEMLERİYLE DOĞRULANMASI

Ahmet Furkan YALDIZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak - 2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ahmet Furkan YALDIZ tarafından hazırlanan “İtke Vektör Kontrol Sistemlerinde Lüle Konumunun Görüntü İşleme Yöntemleriyle Doğrulanması” adlı tez çalışması 11/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Salih GÜNEŞ

.....

Danışman

Doç. Dr. Murat CEYLAN

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Saim ERVURAL

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ahmet Furkan YALDIZ

Tarih: 01.02.2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İTKİ VEKTÖR KONTROL SİSTEMLERİNDE LÜLE KONUMUNUN GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMLERİYLE DOĞRULANMASI

Ahmet Furkan YALDIZ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Murat CEYLAN

2023, 93 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Salih GÜNEŞ
Doç. Dr. Murat CEYLAN
Dr. Öğr. Üyesi Saim ERVURAL

İtki vektör kontrol (İVK) sistemi, araçların itki yönünü değiştiren bir kontrol sistemidir. Füze yönlendirmesindeki geleneksel metotlar, aerodinamik yüzeyleri kullandıkları için atmosfer dışı uygulamalarda kullanılamazlar ve bu yüzden İVK sistemlerine ihtiyaç duyulur. İVK sistemleri genellikle iki lineer eyleyici ile lüle hareketini sağlar. Eyleyici sensörleri ile lülenin kaç derece hareket ettiği bulunur. Ancak bu hareketi ölçebilmek için bir referans noktasına ihtiyaç vardır. Bu referans noktasının bulunması, pahalı mekanik parçalar ve sensörler gerektirmektedir. Ayrıca ilk konum belirlendikten sonra lüle pozisyon sensörlerinin doğrulanması gerekmektedir. Tez çalışmasında, söz konusu ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak bir sistem önerilmiştir. Bu sistemde, stereo görüşe sahip Zed kamera ile derinlik tahmini yapılarak lülenin mutlak açısı ölçülür. Derinlik tahmini için kamera kalibrasyonunun yanı sıra görüntü düzleştirme ve basit üçgenleme yöntemleri kullanılmıştır. Hassas derinlik ölçümü için Aruco işaretleyicileri tercih edilmiştir. İVK sistemi ölçümünde mesafenin artmasıyla azalan çözünürlük, süper çözünürlük yöntemleri ile artırılmıştır. Artan çözünürlükteki oluşan bozulmalar ise adaptif eşik değeri ile düzeltilerek hassas bir şekilde derinlik hesabı yapılmıştır. Test sonuçlarına göre 700 mm'ye kadar olan mesafelerden alınan ölçümlerdeki derinlik hatalarının 1 mm'nin altında, standart sapma değerlerinin ise 0.1 mm altında olduğu görülmüştür. İVK sistemindeki düzlemler hassas derinlik ölçümleri yapılarak, en küçük kareler yöntemi ile elde edilmiştir. Düzlemler arasındaki açı, trigonometrik formüller yardımıyla hesaplanmıştır. Bulunan lüle açısı, eyleyici eksenlerine (sapma ve yunuslama) ayrılmıştır ve bu açılar eyleyici sensörlerinden alınan veriler ile karşılaştırıldığında maksimum hatanın 0.1642° olduğu bulunmuştur. Tez çalışması sonucunda gerçekleştirilen ve benzerlerine göre oldukça düşük bir maliyete sahip olan bu uygulamanın doğrulama testlerinde kullanılması ve bulunan referans noktasına göre mutlak lüle konumu belirlenmesi-halinde işlem zamanının ve iş gücünün azaltılabileceği öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Adaptif Eşik Değeri, Basit Üçgenleme Yöntemi, Derinlik Tahmini, İtki Vektör Kontrol Sistemi, Süper Çözünürlük.

ABSTRACT

MS THESIS

VERIFICATION OF THE NOZZLE POSITION IN THRUST VECTOR CONTROL SYSTEMS WITH IMAGE PROCESSING METHODS

Ahmet Furkan YALDIZ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical and Electronics Engineering
Advisor: Assoc. Prof. Dr. Murat CEYLAN**

2023, 93 Pages

**Jury
Prof. Dr. Salih GÜNEŞ
Assoc. Prof. Dr. Murat CEYLAN
Asst. Prof. Dr. Saim ERVURAL**

The thrust vector control (TCV) system is a control system that changes the thrust direction of vehicles. Conventional methods of missile guidance cannot be used in non-atmospheric applications because they use aerodynamic surfaces, thus TCV systems are needed. TCV systems generally provide nozzle movement with two linear actuators. With the actuator sensors, it is found how many degrees the nozzle moves. However, a reference point is needed to measure this movement. Finding this reference point requires expensive mechanical parts and sensors. In addition, after the initial position is determined, the nozzle position sensors must be verified. In the thesis study, a system has been proposed considering these needs. In this system, the absolute angle of the nozzle is measured by estimating the depth with a Zed camera with stereo vision. For depth estimation, image rectifying and simple triangulation methods were used as well as camera calibration. Aruco markers are preferred for precise depth measurement. The resolution, which decreases with increasing distance in TCV system measurement, is increased by super resolution methods. The distortions in increasing resolution were corrected with the adaptive threshold value, and a precise depth calculation was made. According to the test results, it was observed that the depth errors in the measurements taken from distances up to 700 mm were below 1 mm and the standard deviation values were below 0.1 mm. The planes in the TCV system were obtained by using the least squares method by making precise depth measurements. The angle between the planes was calculated with the help of trigonometric formulas. The nozzle angle found was divided into the actuator axes (yaw and pitch) and when these angles were compared with the data from the actuator sensors, the maximum error was found to be 0.1642° . It is envisaged that this application, which was realized as a result of the thesis study and has a very low cost compared to its counterparts, is used in verification tests and the operation time and labor force can be reduced if the absolute nozzle position is determined according to the reference point found.

Keywords: Adaptive Threshold, Aruco Marker, Depth Estimation, Simple Triangulation Method, Super Resolution, Thrust Vector Control System, Zed Stereo Camera.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmalarında en çok emeği geçen, çok değerli yardım ve yönlendirmelerini eksik etmeyen, danışmanım Sayın Doç. Dr. Murat Ceylan başta olmak üzere yetişmemde emeği geçen Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Öğretim Elemanlarına katkılarından dolayı şükranlarımı sunarım.

Tez çalışması için kameraları ve test ortamını sağlayan Roketsan'a, test düzeneklerin hazırlanması ve test sonuçlarının değerlendirilmesi aşamalarında katkı sunan değerli iş arkadaşlarım Burak Ünsal ve Ali Alperen Boşnak'a teşekkür ederim. Ayrıca bilgisini paylaşmayı eksik etmeyen yöneticilerim Dr. Semih Tanıker ve Dr. Özgür Hastürk'e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, hayatımın her adımında desteklerini hep hissettiğim ve daima ileriye hedeflememi sağlayan kıymetli aileme, beni cesaretlendiren ve ilham veren arkadaşlarıma en içten duygularıyla teşekkürü bir borç bilirim.

Ahmet Furkan YALDIZ
KONYA - 2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. İVK Açı Ölçümü	4
2.2. Stereo Derinlik Tahmini	5
2.3. İşaretleyiciler	6
2.4. Süper Çözünürlük	7
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	10
3.1. Tez Çalışmasında Kullanılan Materyaller	10
3.2. Derinlik Ölçüm Yöntemleri	11
3.2.1. Diğer Mesafe Ölçüm Yöntemleri	11
3.2.1.1. Yapısal Işık Projektörü	11
3.2.1.2. LIDAR Sensör	12
3.2.1.3. Uçuş Süresi Kamerası	12
3.2.1.4. Ultrasonik Sensör	12
3.2.1.5. Radar Sensör	13
3.2.2. Stereo Kamera	13
3.3. Tez Çalışmasında Kullanılan Yöntem	14
3.3.1. Kamera İleri Dönüşüm Modeli	15
3.3.2. Kamera Kalibrasyonu	19
3.3.2.1. Yapılan Kamera Kalibrasyonu İşlemi	21
3.3.3. Basit Üçgenleme Yöntemi	27
3.3.3.1. Görüntünün Doğrultulması	30
3.3.3.2. Derinlik Hesabı	33
3.3.3.3. Farkların Hesaplanması	33
3.3.4. Kamera Tercihi	37
3.3.5. Aruco İşaretleyicisi Konfigürasyon (7×7 ve 4×4) Karşılaştırması	42
3.3.6. Derinlik Sonuçlarındaki Hassasiyetin Artırılması	46
3.3.6.1. İşaretleyicilerin Farklı Noktalarını Kullanarak Hassasiyetin Artırılması	46
3.3.6.2. Gürültülerin Azaltılması İçin İkili Görüntünün Kullanılması	47
3.3.6.3. Süper Çözünürlüklü Görüntüleme	51
3.3.7. Açık Hesabı	53
3.3.8. Test Sonrası Veri İşleme	56
3.3.9. Kullanıcı Arayüzü	57
3.3.10. Tez Çalışmasındaki Algoritmanın Akış Diyagramı	59

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	62
4.1. Süper Çözünürlük ve Adaptif Eşik Değeri Yöntemlerinin Etkisi.....	62
4.2. Farklı Derinliklerdeki İşaretçileri İçeren Testler.....	66
4.3. 15° Eğimli 3B Lüle Modeli Test Düzenegi.....	70
4.4. İVK Sistemi ile Test.....	74
4.4.1. Test Düzeneginin Hazırlanması.....	74
4.4.2. Komut Setleri.....	77
4.4.3. Yapılan Testler.....	78
4.5. Benzer Çalışmalar ile Karşılaştırma.....	83
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	85
5.1. Sonuçlar.....	85
5.2. Öneriler	87
5.2.1. İlerideki Çalışmalar.....	87
KAYNAKLAR	88

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

c	: Işık hızı
f	: Frekans
f	: Odak uzaklığı
F	: Kuvvet
M	: Moment
M_{ext}	: Kamera dışsal matris
M_{int}	: Kamera içsel matris
P	: Projeksiyon matrisi
r	: Ağırlık merkezi ve gimbal arası mesafe
λ	: Dalga boyu

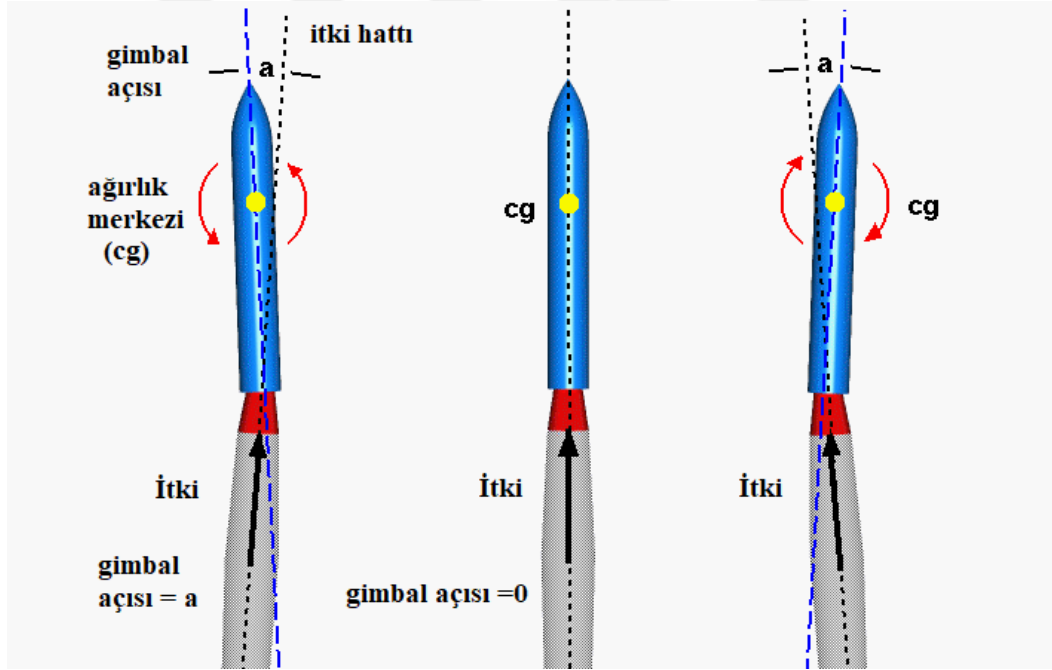
Kısaltmalar

AED	: Adaptif Eşik Değeri
Cg	: Center of gravity (Ağırlık merkezi)
CRC	: Cyclic Redundancy Check (Döngüsel Artıklık Kontrolü)
D	: Dimension (Boyut)
EM	: Elektromanyetik
ESA	: Evrişimsel Sinir Ağları
DLPSÇSA	: Derin Laplasyen Piramidi Süper Çözünürlük Sinir Ağları (Deep Laplacian Pyramid Networks Super Resolution)
FPS	: Frame Per Seconds (Saniyedeki Kare Sayısı)
HSÇESA	: Hızlı Süper Çözünürlük Evrişimsel Sinir Ağı (Fast Super Resolution Convolutional Neural Network)
İVK	: İtke Vektör Kontrolü
LIDAR	: Light Detection and Ranging (Işıkla Algılama ve Menzil Tayini)
OBRID	: One-Dimensional Brightness Distribution Sensor (Tek Boyutlu Parlaklık Dağılım Sensörü)
SÇ	: Süper Çözünürlük
SÇESA	: Süper Çözünürlük Evrişimsel Sinir Ağı
SDK	: Software Development Kit (Yazılım Geliştirme Kiti)
SLAM	: Simultaneous Localization and Mapping (Eş Zamanlı Konumlama ve Haritalama)
ToF	: Time of Flight (Uçuş Süresi)
VAPESA	: Verimli Alt Piksel Evrişimsel Sinir Ağı (Efficient Sub-pixel Convolutional Neural Network)

1. GİRİŞ

1900'lerin başlarında motorlu, tek kanatlı ve aerodinamik kontrol yüzeylerine sahip olan ilk uçağı yapan Louis Bleriot'la beraber aerodinamik kontrol sistemlerinin ilk adımı atılmıştır (Swopes, 2019). Uçaklarla beraber gelişen aerodinamik kontrol sistemlerinden sonra hava araçlarındaki kontrol sistemlerindeki değişimleri ilk olarak roketlerde kullanılan itki vektör kontrol sistemi (İVK) takip etmiştir. İVK'ler ilk olarak sıvı yakıtlı roket motorlarının babası kabul edilen Robert H. Goddard tarafından egzoz kanatları ve gimballi roket motorları ile kullanılmıştır (Hunley, 1995).

İVK, pek çok havacılık uygulamasında çok önemli bir uygulama olarak kabul görmüştür. İVK, aerodinamik kontrol tahrik sistemlerindeki gibi hava araçlarındaki vektör yönünü değiştirmesinin yanı sıra uzay gibi havasız ortamlarda da çalışabilen uygulamalardır. Ayrıca kontrol tahrik sistemlerine kıyasla nesneye doğrudan dönme momenti uyguladığından ani dönme ihtiyacı içeren sistemler için de (örneğin hava savunma sistemleri, avcı uçakları gibi) bir zorunluluktur.



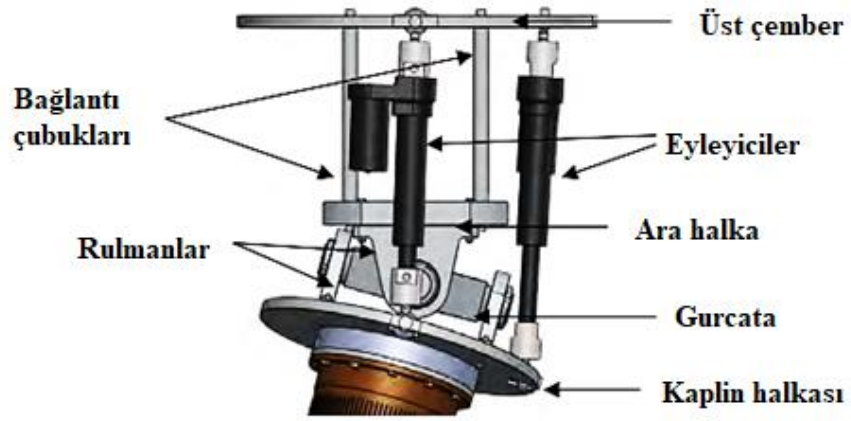
Şekil 1.1 - İtki Vektörünün Değiştirilmesi Temsili Görseli (Gimbaled Thrust, 2022)

Eşitlik (1.1)'e göre, ağırlık merkezi (center of gravity, cg) ile gimbal arasındaki mesafe r ve itki F ile tanımlanırsa, roketi a açısı kadar döndürmek için M momenti uygulamak gerekir. Şekil 1.1'de gösterildiği gibi İVK'daki a açısının roketin

dönme açısına aynı şekilde etki etmektedir. Bu da İVK sistemlerini aerodinamik tahrik sistemlerine göre avantajlı hale getirmektedir.

$$M = F \sin(a) r \quad (1.1)$$

İtke vektör kontrolü uygulamaları, uçaklar ve roketler için farklı tiplerde yapılabilmektedir (Carnevale ve Resta, 2007). Roketler için itke vektör kontrolü çoğunlukla, sıvı yakıtlı roketlerde gimballi bir yapıyla sağlanırken katı yakıtlı roketlerde esnek eklemli bir yapı ile sağlanmaktadır (Caye ve Descamps, 1994).



Şekil 1.2 – Gimbal Sistem Tasarımı (Melo ve ark., 2013)

Şekil 1.2’de gösterilen gimbal tasarımında görüldüğü üzere iki rulman tarafından serbestlik derecesi sağlanmaktadır. Şekil 1.3’te gösterilen esnek eklemli katı yakıtlı roket motorunda ise rokete esnek eklem serbestlik derecesi sağlamaktadır.



Şekil 1.3 – Esnek Eklemli Katı Yakıtlı Roket Motoru (Vega Rocket Nozzle of the Zefiro 23, 2015)

Her iki tipteki İVK sistemini döndürmek için de ikişer adet eyleyiciye ihtiyaç vardır (Carnevale ve Resta, 2007). Bu eyleyiciler, lineer olarak uzayıp kısılarak

gimbale veya esnek ekleme hareket kabiliyeti sağlarlar. Eyleyicilerin konumu için hall sensör, enkoder ya da potansiyometre gibi pozisyon sensörlerine sahip olmaları gerekmektedir.

Eyleyicilerin yaptığı hareketin lüledeki pozisyon karşılığını tespit etmek için mutlak pozisyon sensörleri kullanılmaktadır ve doğrulama testleriyle bu sensörlerin doğrulanması gerekmektedir. Doğrulama faaliyetlerinde derinlik mikrometreleri ya da açı ölçerler kullanılmaktadır. Derinlik mikrometreleri kullanılırken roketin gövde ve lülesinin arasına bir aparat geçirilip lülenin bu aparata olan gerçek uzaklığı bulunur. Bulunan uzaklık verisinden lüle açısı hesaplanır. Açı ölçer kullanımında yüksek hassasiyette üretilmiş düz çubuklar lüle üzerine fiziksel olarak sabitlenerek açılar ölçülür. Fakat açı ölçerin yanlış sıfırlanması ve aksenel yerleştirmedeki sapmalar hatalı ölçümlerle sonuçlanmaktadır. Hatalı ölçümlerin yanı sıra, gerçek zamanlı olmayan bu uygulamalar çok fazla iş gücü ve zaman kaybına sebep olmaktadır.

Yapılan araştırmalarda, derinlik algısını temassız olarak elde edebilen sensörlü uygulamalarda yapısal ışık projektörü, LIDAR sensörü, uçuş süresi kamerası, ultrasonik sensör, radar sensörü ve stereo görüntüleme sensörlerinin kullanıldığı görülmüştür. Uygun maliyetli, gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabilen ve hassas derinlik algısını elde edebilecek sensörler incelenmiştir. Amaca yönelik en uygun yöntemin stereo kameralar ile derinlik ölçümü olduğu görülmüştür. Bu tez çalışmasında Zed kamera ve Intel RealSense D435 kameraları tercih edilmiştir.

Bundan sonraki bölümde stereo derinlik tahmini, işaretleyiciler ve süper çözünürlük konularında yapılan önemli literatür çalışmalarına yer verilmiştir. Bölüm 3'te tez çalışmasında kullanılan materyaller, derinlik ölçüm yöntemleri, ölçüm öncesi hazırlık ve sonrasında yapılan mesafe ve açı hesaplama işlemleri detaylı olarak açıklanmıştır. Ölçüm uygulaması için geliştirilen bir kullanıcı arayüzü ile algoritma akış diyagramı sunulmuştur. Bölüm 4'te süper çözünürlük ve adaptif eşik değeri yöntemlerinin etkisi, farklı derinliklerde yapılan testler ile bu çalışmada gerçekleştirilen 15° eğimli 3B lüle modeli test düzeneği ve gerçek bir İVK sistemi ile yapılan testlerin sonuçlarına yer verilmiştir. Bölüm 5'te bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ve bu konuda çalışma yapacak araştırmacılara öneriler sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde stereo kameralar ile derinlik tahmini, işaretçiler ve görüntü iyileştirme yöntemleri hakkında yapılan araştırmalar yer almaktadır.

2.1. İVK Açı Ölçümü

Guo ve ark. (2013), stereo görüntüleme teknikleriyle 4 kamera kullanarak 3 ila 8 arası işaretleyici ve iki farklı kamera arası açıklığı kullanarak (3 ve 4 metre) dönme açısı bulma çalışmaları yapmışlardır. Yapılan testlerdeki en iyi sonuçlar 8 işaretleyici kullanarak 3 metre kamera açıklığı ile gerçekleştirilmiştir. ± 20 derece aralığındaki yapılan testlerde maksimum 0.19° hatalı sonuçlar elde edilmiştir.

İki aydınlatma kaynağı, bir kamera ve lüle düzlemine yerleştirilen işaretleyiciler kullanılarak yapılan testlerde lüle salınım açısı 0.2° hassasiyetle bulunmuştur. Ayrıca görüntülerdeki noktaların merkezinin kaba konumunu hızlı bir şekilde bulmak için kalman filtresi kullanılmıştır (Qu ve Yang, 2015).

Cui ve ark. (2019) CCD kameralar ile İVK görevi gören ışıklı bir ters sarkaç ile testlerini yapmışlardır. Geleneksel stereo görüntüleme teknikleri ile Sabit Kısıtlama Tabanlı Görme Ölçüm Yöntemini (SKTGÖY) karşılaştırmışlardır. Geleneksel yöntemler ile dönme açısı -0.2° ile 0.25° arasında bulunurken SKTGÖY ile -0.15 ve 0.2° arasında bulunmuştur. Ortalama mesafe hataları geleneksel yöntemler ile 0.236 mm bulunurken SKTGÖY ile 0.120 mm bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, geleneksel yöntemlere göre ölçme doğruluğunun ve stabilitesinin daha iyi olduğu sonuçlar elde edilmiştir.

Wen ve Tan (2021) esnek eklem dönme merkezi bulma çalışmalarında tek kamera ile 330 mm uzaklıktan testler yapmışlardır. Yaptıkları bu testlerde alınan test verilerini parabol uydurma (*parabola fitting*) ve eğri uydurma (*arc fitting*) yöntemlerini karşılaştırarak bu yöntemlerle optimize etmişlerdir. Dönme merkezini x ekseninde ± 1.5 mm arasında doğru tahmin edilirken z ekseninde ± 1.8 mm arasında doğru tahmin edilmiştir. Doğrulama testlerinde kullanılan diğer yer değiştirme sensörü ise x ekseninde ± 5 mm arasında doğru ölçüm yaparken z ekseninde ± 20 mm arasında doğru ölçüm yapmaktadır.

2.2. Stereo Derinlik Tahmini

Stereoskopik görüş, 19. yüzyılın başlarında Charles Wheatstone tarafından sunulan bir çalışma sonucunda ortaya çıkmıştır (Bowers, B., 2001). Wheatstone, canlıların iki göz sayesinde bir derinlik hissi algılayabildiklerini fark etmiştir. Bu kavram, insanların bir çift mercekle aracılığıyla iki görüntüyü görmelerine ve bir derinlik algılamalarına olanak sağlayan ilk stereoskopu icat eden Sir David Brewster tarafından geliştirilmiştir (Brewster, D., 2016).

19. yüzyılın sonlarında stereo görüş, bir stereoskop aracılığıyla görüntülenebilen görüntü çiftleri olan stereografik kartlar ile popüler hale gelmiştir. Bu kartlar bilimsel çalışma, eğitim ve eğlence gibi çeşitli amaçlar için kullanılmıştır.

Stereo görüş, bilgisayar görüşü, robotik ve sanal ve artırılmış gerçeklik dahil olmak üzere çeşitli alanlarda da kullanılmıştır. Bu alanlarda aynı sahnenin ofset görüntülerini yakalamak için iki veya daha fazla kameralı stereo görüş sistemleri kullanılmış ve bu görüntülerden daha sonra sahnenin 3B modeli oluşturulmuştur.

Yapılan çalışmalar, VR uygulamalarındaki stereoskopik görüntülerin gerçeklik algısını daha çok verdiği ve uygulamalarda insanların mono görüntülere göre daha az hata yaptıklarını göstermişlerdir (Livatino ve ark., 2009).

Stereo görüşün ticari kameralarda yaygınlaşmasıyla beraber, görüntü kalitesini etkileyen yüzey, doku, aydınlatma, mesafe ve edinim hızları gibi değişkenlerin incelendiği bir çalışmada, metaller, cam, parlak cisimler veya parlatılmış zeminler gibi yansıtıcı yüzeylerde yaşanan zorluklar belirtilmiş ve en iyi sonuçların, opak ve doku açısından zengin yüzeylerin görüntülenmesinde özellikle kayalar, açık toprak ve çimler gibi kesilmiş bitki örtüsü gibi doğal malzemelerde elde edildiği vurgulanmıştır. Bu çalışmada Zed stereo kamera kullanılmış, 5 ila 10 metreden daha uzak mesafelerde yüzeye bağlı olarak neredeyse hiçbir veri elde edilemediği ve çalışmanın daha kısa mesafelerde gerçekleştirildiği rapor edilmiştir. Aşırı değerler göz ardı edilerek elde edilen standart sapma değerleri belirli bir nesne için 11 mm bulurken, çevre için 36 mm bulunmuştur (Kirsten ve ark., 2018).

Rahul ve ark. (2018) kamera tabanlı nesne algılama, tanımlama ve mesafe tahmini uygulamasında Zed kamera ve NVIDIA Jetson TX1 donanımı kullanmışlardır. Nesneleri bir evrimsel sinir ağı (MobileNet-SSD) ile tespit etmişlerdir. Tespit edilen nesnelerin önce fark haritasını çıkartmışlar, arından epipolar

geometri kullanarak mesafeyi bulmuşlardır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre 5 m altındaki mesafelerde yapılan testlerde ortalama hata değerini %2.614 bulmuşlardır.

Park ve ark. (2018) bir LIDAR sensörü ve Zed stereo kamera ile 3 boyutlu harita çıkarma çalışması yapmışlar, çalışmalarında bir robotun tamamen otonom olabilmesi için başlangıç konumunu bilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Başlangıç noktasını tam olarak bilmek için LIDAR sensöründen alınan 2 boyutlu bilgilerin yeterli olmadığını ve stereo kameranın gerekliliğini ifade etmişlerdir. Park ve ark. çalışmalarında Zed stereo kamera ile epipolar geometri kullanarak derinlik bilgisini oluşturarak kamera başlangıç noktalarını belirlemişlerdir. Yaklaşık 60 m²'lik bir alanda gerçekleştirdikleri testlerde ortalama hatayı 690.9 mm ve standart sapma değerini 815.1 mm bulmuşlardır.

Kinect kamera ve diğer ticari kameralara göre hafifliği ve fiyatı ile öne çıkan Intel RealSense d435 stereo kamerası ile testlerin yapıldığı bir çalışmada, bacaklı robotlar için derinlik ölçen kameralar karşılaştırılmıştır. SLAM uygulamaları konusunda yapılan testlerde d435 kamerasının derinlik sapmalarının deneysel ve fonksiyonel olarak karşılaştırmaları yapılmıştır. Yapılan testler ile gürültü modellenmiş ve SLAM uygulamaları için kullanılabilir bir hale getirilmiştir (Ahn ve ark., 2019).

Tadić ve ark. (2021) çalışmalarında stereo derinlik sensörünün kullanımının, robotik uygulamalar için önemli bir faktör olduğuna değinmişlerdir. Resim için tasarlanmayan bir duvar için Zed stereo kamerası ile yüzey çıkarma algoritması, basit görüntü işleme ve morfolojik işlemler (aşındırma, genişletme vb. işlemleri) kullanarak duvar tespiti gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneylerde geliştirilen algoritmanın, belirli derinlik ölçüm koşulları altında duvarı başarıyla algıladığını göstermişlerdir. Ayrıca kamera çözünürlüğü ve kalitesinin uygulama hassasiyetini artırdığını bildirmişlerdir.

2.3. İşaretleyiciler

Dijital görüntü işleme 1960'larda Bell Laboratuvarı gibi birkaç araştırma merkezinde uydu görüntüleme, tıbbi görüntüleme ve karakter tanıma gibi alanlardaki çalışmalarla başlamıştır (Rosenfeld, A., 1969). Bu çalışmaların başlarında doğal olarak bulunan kenarlar ve renkler ilk kez işaretçiler olarak kullanılmıştır. Daha sonra Denso Wave şirketi tarafından 1994'te yayınlanan QR kod (*Quick Response*), ilk yapay işaretleyici olmuştur. İşaretleyiciler yaygınlaşarak ticaret alanlarında ve bilgisayarlı

görü sistemlerinde kullanılmıştır. Bilgisayarlı görü sistemlerinde kullanılan farklı algoritmalara sahip işaretleyiciler ile yapılan bazı çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

Yüksek hassasiyetli LentiMark işaretçileri kullanan bir çalışmada, taşınabilir 6-DOF (altı serbestlik derecesi) hareket izleme sistemi duyurulmuştur. Çalışmada tek bir kamera ve 6-DOF ile birden fazla işaretleyici izlenerek hareketler takip edilebilmiştir. Sıradan bir hareket takip sistemi ile hareket izleyicisinin ölçüm doğruluğu karşılaştırılmıştır. Poz tahmini derinlik hataları yaklaşık 5 mm, oryantasyondaki hataları ise yaklaşık 2° olarak bulunduğu rapor edilmiştir (Tanaka ve ark., 2015).

Wang ve ark. (2020), çalışmalarında köşe noktalarındaki kararsızlık nedeniyle oluşan gürültüyü ortadan kaldırmak ve mesafe ölçümünün doğruluğunu artırmak için, Aruco işaretleyicilerin dört köşesine diyagonal olacak şekilde dairesel bölgeler eklemiştir. Bu dairelerin merkezi ve köşe noktaları en küçük kareler yöntemi ile düz bir çizgiye yerleştirilmiş ve Aruco işaretçilerinin köşe noktaları bununla değiştirilmiştir. Hata %1'den ve standart sapma 3 mm'den az olacak şekilde ölçüm doğruluğunu geliştirdiklerini elde ettikleri deney sonuçlarıyla göstermişlerdir.

Jurado-Rodríguez ve ark. (2021) çalışmalarında düşük işlem gücüne sahip cihazlarda bile güvenli sonuçlar veren QR kodları, Aruco ve Apriltag gibi işaretçileri incelemiş ve yeni bir işaretçi önermişlerdir. Bir işaretçi tanımlarken işlem hızı, kolay ayırt edilme ve hata oranının düşük olması gibi özelliklerinden bahsetmişlerdir. Kübik bir tasarım yapmışlar, bu tasarımda CRC (*Cyclic Redundancy Check*) ve tanımlama bitleri kullanmışlardır. Ardından geleneksel işaretleyiciler olan Jumarker, Aruco, Apriltag, Vumark, Topotag ve Deeptag işaretleyicileri deneysel çalışmalarda kullanmışlar ve elde edilen sonuçlarını karşılaştırılarak performanslarını incelemişlerdir.

İşaretleyici konusunda yapılan literatür çalışmalarından Aruco işaretleyicilerinin hız ve hassasiyet olarak diğer işaretçilerden daha üstün performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

2.4. Süper Çözünürlük

Süper çözünürlük, düşük çözünürlüklü giriş görüntüsünü yüksek çözünürlüklü bir görüntü haline getirme işlemidir. Tez çalışmasında kullanılacak olan süper çözünürlük yöntemleri, uygulanabilirlik açısından kolaylığı nedeniyle Python

programlama dili Tensorflow kütüphanesindeki hazır modellere sahip yöntemlerdir. Bu süper çözünürlük modelleri hakkındaki bazı araştırmalar aşağıdaki gibidir.

Shi ve ark. (2016) çalışmalarında geleneksel süper çözünürlük yöntemlerini hızlandırmak için düşük çözünürlük alanında özellik haritalarının çıkarıldığı yeni bir evrimsel ağ mimarisini önermişlerdir. Buna ek olarak, düşük çözünürlüklü özellik haritalarından yüksek çözünürlüklü görüntü elde etmek için alt piksel evrişim katmanını sunmuşlardır. Böylece genel süper çözünürlük işleminin hesaplama karmaşıklığını azaltmışlar, süper çözünürlüklü evrimsel sinir ağları (SÇESA) ağ yapısı olan VAPESA'yı tanıtmışlardır.

Dong ve ark. (2016) çalışmalarında süper çözünürlük evrimsel sinir ağını (SÇESA) görüntü süper çözünürlüğünde bir derin model olarak başarılı bir şekilde uygulamış ve üstün performans elde etmişlerdir. Fakat yüksek hesaplama maliyeti, gerçek zamanlı performans gerektiren uygulamalara engel olan SÇESA'yı hızlandırmak amacıyla kum saati şeklindeki ESA yapısı önermişlerdir. SÇESA yapısı üç açıdan yeniden tasarlanmıştır. İlk olarak, ağın sonunda bir dekonvolüsyon katmanı eklenip düşük çözünürlüklü görüntüden interpolasyon olmadan yüksek çözünürlüklü görüntü eğitilmiştir. İkinci olarak eşleme katmanını genişletmeden önce giriş özelliği boyutu azaltılmıştır. Üçüncü olarak da daha küçük filtre boyutları ile daha çok eşleme katmanı kullanılmıştır. Böylece mevcut SÇESA yapısından 40 kat hızlı bir hızlı süper çözünürlük evrimsel sinir ağı (HSÇESA) tanıtmışlardır.

Bir çalışmada mevcut süper çözünürlük yöntemlerinin performansından daha iyi sonuçlar veren, gelişmiş bir derin süper çözünürlük ağını geliştirmişlerdir. Modelin en önemli performans iyileştirmesi, geleneksel artık ağlardaki gereksiz modüllerin kaldırılarak optimizasyon sağlanmasıdır. Ayrıca eğitim işlemlerini kararlı hale getirerek performansı daha da geliştirmişlerdir. Çalışmada önerilen yöntemlerin, DIV2k kıyaslama veri kümeleri üzerinde üstün performans gösterdiği ve "NTIRE2017 Super-Resolution Challenge" yarışmasını kazanarak üstünlüğünü kanıtladığı bildirilmiştir (Lim ve ark., 2017).

Lai ve ark. (2017) çalışmalarında daha hızlı ve daha doğru bir süper çözünürlüklü görüntüler için derin Laplasyen piramidi süper çözünürlüklü sinir ağını önermişlerdir. Önerilen ağın, yüksek çözünürlüklü görüntülerin alt bant artıklarını çoklu piramit seviyelerinde kademeli olarak yeniden yapılandırdığını ifade etmişlerdir. Ön işleme için bikübik interpolasyonu yerine giriş görüntülerinin özelliklerinin kullanılmasının düşük hesaplama gücü gereksinimi ile sonuçlanmıştır. Önerilen ağı,

L2 kayıp fonksiyonu kullanan diğer süper çözünürlük yöntemlerinin aksine Charbonnier kayıp fonksiyonları kullanarak eğitmişlerdir. Ayrıca öz-yinelemeli ağ katmanları kullanarak parametre sayısını büyük ölçüde azaltmışlar ve derin Laplasyen piramit süper çözünürlük sinir ağını (DLPSÇSA) tanıtmışlardır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan materyaller ve yöntemler anlatılmıştır. Derinlik ölçmede genel olarak hangi yöntemlerin kullanıldığına kısaca değinilmiş ve tez çalışmasında kullanılan yöntemler detaylı olarak anlatılmıştır.

3.1. Tez Çalışmasında Kullanılan Materyaller

İtke vektör kontrol sistemlerinde derinliği hassas ve hızlı bir şekilde bulmak için uygun sensör seçilmesi gerekmektedir. Kullanılan stereo kameralar Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. İki kamera arasındaki mesafenin yüksek olması uzaktaki nesnelerin ölçümündeki hassasiyeti artırmaktadır. Bu çizelgeye göre çözünürlük ve iki kamera arası açıklık mesafesinin yüksek olması sebebiyle Zed kamera tercih edilmiştir. Aktif IR sensörü ve stereo kameraya sahip olan RealSense D435 kamerası, Zed kamerayla karşılaştırma amacıyla ikincil kamera olarak kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Tercih Edilen Stereo Kameralar

Kamera	İki Kamera Arası Açıklık	Çözünürlük	FPS	Uzaklık	Lazer Sensör
Zed Stereo Kamera	120 mm	4416 × 1242	15	20m	Yok
Intel Real Sense D435	50 mm	1280 × 720	30	10m	Active IR Stereo

Zed stereo kameranın görüntü sensörü 2208×1242 piksel çözünürlüklü 2 adet kameradan oluşmaktadır. Kullanılan kamera, bu çözünürlük için 15 saniye çerçeve oranına (*frame per second*, FPS) sahiptir. İki kamera arası mesafe yaklaşık 120 mm’dir. USB bağlantısı ile bilgisayarlar için kolay bağlantı arayüzüne ve Zed Explorer isminde bir kullanıcı arayüzüne sahiptir.



Şekil 3.1 – Zed Stereo Kamera (Zed Stereo Kamera, 2022)

Karşılaştırma için kullanılan Intel Real Sense D435 stereo kameranın görüntü sensörü 1280×720 piksel olan tek renk bir kameraya ve 1920×1080 piksel bir RGB kameraya sahiptir. Kameralar haricinde bir adet aktif infrared (IR) projektöre sahiptir.

En yüksek çözünürlükte 30 FPS değerine sahiptir. İki kamera arası mesafe 50 mm'dir. USB bağlantısı ve Intel Real Sense Viewer arayüz programı ile rahat bir kullanıcıya sahiptir.



Şekil 3.2 – Intel Real Sense D435 Stereo Kamera (Intel RealSense D435, 2022)

Tez çalışmasındaki FPS değerleri, Intel i7-10750H işlemci kullanılarak alınmıştır. Yazılımda Python 3.6.8 dili kullanılmıştır.

3.2. Derinlik Ölçüm Yöntemleri

Derinlik algısı, nesnelere üç boyutta (uzunluk, genişlik ve derinlik dahil) görme ve bir nesnenin ne kadar uzakta olduğuna karar verme yeteneğidir. Derinliği ölçen sensörler, kameralardan farklı olarak foton, elektromanyetik dalga ya da ses dalgaları kullanılmaktadırlar. Bu dalgaların ya da fotonların gidiş-geliş süresinden yola çıkarak derinlik bilgisi verirler. Derinliği ölçen sensör çeşitlerinden bazıları, yapısal ışık projektörü sensörü, lazer sensörü, ultrasonik sensörü, radar sensörü ve stereo kameradır.

3.2.1. Diğer Mesafe Ölçüm Yöntemleri

Yapılan tez çalışmasında stereo görüntüleme yöntemi ile çalışan stereo kamera kullanılmıştır. Ölçüm yöntemlerine genel bir bakış yapmak için diğer mesafe ölçüm yöntemleri bu alanda özetlenmiştir.

3.2.1.1. Yapısal Işık Projektörü

Yapısal ışık projektörü, bir projeksiyon ve bir kameradan oluşmaktadır. Bir projeksiyonun belirlenen bir örüntü (*pattern*) ile aydınlatıldığı ortamlarda, örüntünün değişmesine göre derinliğin hesaplandığı bir stereo görüntü yöntemidir.

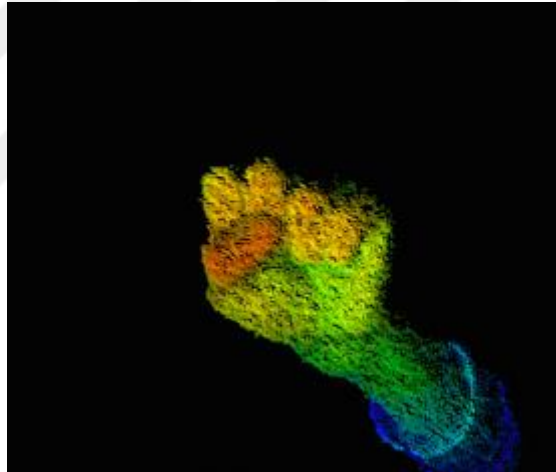
3.2.1.2. LIDAR Sensör

LIDAR sensörü, uçuş süresini ölçmek için hedefe lazer darbe dizisi gönderip darbe dizisini geri almaktadır. Geri dönen fotonun ne kadar mesafe kat ettiğinin hesaplanması için Eşitlik (3.1)'i kullanır.

$$Mesafe = \frac{Işık Hızı \times Uçuş Süresi}{2} \quad (3.1)$$

3.2.1.3. Uçuş Süresi Kamerası

Uçuş süresi kamerası uygulamaları, genellikle standart bir RGB kamera aracılığıyla, ışık algılamaya dayalı “derinlik haritaları” oluşturur.



Şekil 3.3 – Uçuş Süresi Kamerasından Alınan Görüntü, Ölçülen Mesafeye Göre Renklendirilmiştir (Anonymous, Pmdtechnologies - 3D Time-of-Flight Depth Sensing Solutions, 09.12.2022).

Uçuş süresi kamerası darbe zamanı sürelerinden veya genlik modülasyonlu bir dalganın faz kaymasından hesaplanır (Hansard ve ark., 2013).

3.2.1.4. Ultrasonik Sensör

Ultrasonik sensörler, bir nesneye olan mesafeyi belirlemek için Eşitlik (3.2)'deki bağıntı ile ses darbesinin gönderilmesi ve alınması arasındaki zaman farkını kullanır:

$$Mesafe = \frac{Ses\ Hızı \times Uçuş\ Süresi}{2} \quad (3.2)$$

Ultrasonik sensörler çoğunlukla duman, toz ve benzeri gibi optik sensörlerin kullanılmadığı ortamlar için tercih edilmektedir. Ayrıca mesafe, seviye, çap, varlık ve durum bilgisini ortama temas etmeden ölçebilirler.

3.2.1.5. Radar Sensör

Radar sensörler, ultrasonik ve LIDAR sensörlerin çalışma prensipleriyle çalışır. Radar anteninden çıkan elektromanyetik dalganın cisme çarpıp geri dönmesiyle aradaki mesafe ölçülür.

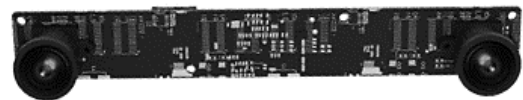
Radar sensörler ile frekansları, güçleri ve anten tiplerine göre spesifik pek çok uygulama alanında ölçümler yapılabilir. Frekans, yansıma türünü ve herhangi bir yansıma olup olmadığını belirler. Eşitlik (3.3)'te gösterildiği gibi " λ " dalga boyu, " c " ışık hızı ve " f " frekans olarak kullanılmıştır.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.3)$$

Radar uygulamalarına; meteoroloji, kara, hava, deniz trafiği, balıkçılık, yeraltı uygulamaları, askeri uygulamalar, sıvı seviyesi ölçümü, tarım uygulamalarındaki ölçümler örnek olarak verilebilir.

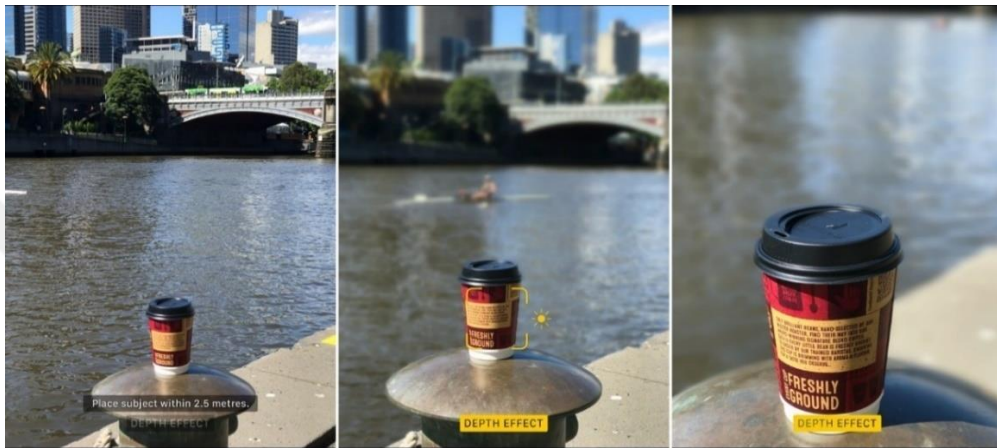
3.2.2. Stereo Kamera

Stereo kamera iki veya daha fazla kameradan oluşan sensörlere verilen isimdir. Bu çoklu görüntüler doğrultusunda optik ve optimizasyon kullanılarak derinlik hesaplanabilmektedir. Stereo görüşte genellikle dürbün (iki gözlü) görüş kullanılmaktadır. İnsanın iki gözü yakınsama ile bir nesneyi farklı açılardan görür. Beyin bu iki bilgi kümesini tek bir görüntü oluşturmak için karşılaştırır ve işler.



Şekil 3.4 – Dürbün Görüş Gösterimi

Stereo kameralar SLAM uygulamalarında (Ahn ve ark., 2019), derinlik bulma uygulamalarında (Kirsten ve ark., 2018), engel tespiti uygulamalarında (Tadić ve ark., 2021) ve VR teknolojilerinde (Livatino ve ark., 2009) kullanılmaktadır. Stereo kameralar, neredeyse bütün cep telefonlarında yer alacak kadar yaygınlaşmıştır. Bu kameralar ile Şekil 3.5'te gösterilen derinlik efekti içeren portre modları, cetvel uygulamaları popüler olmuştur ve VR teknolojiyi birleştiren uygulamalar geliştirilmiştir.



Şekil 3.5 – Cep Telefonlarından Elde Edilen Derinlik Görüntüsü

3.3. Tez Çalışmasında Kullanılan Yöntem

Pasif stereo görüntüleme yöntemi ile projeksiyon ya da ilave bir sensör olmadan yalnızca iki kameradan alınan görüntüler ile mesafe ölçümü yapılabilmektedir. Bu özelliği nedeni ile farklı ortamlarda, büyük ve küçük nesnelerin konumu, mesafesi ve büyüklüğü gibi bilgiler elde edilebilir. Ayrıca sensörlerin kamera olması ile spesifik bir konu için daha anlamlı ve kullanıcı dostu uygulamalar yapılabilmektedir.

Stereo kameralar ile derinlik ölçümü yapılırken iki ana ölçüm yöntemi vardır:

1. Temel kamera matrisleri bilinen kalibrasyonlu bir kamera ile derinlik ölçüm yöntemi,
2. Temel kamera matrisleri bilinmeyen kalibrasyonsuz bir kamera ile derinlik ölçüm yöntemidir.

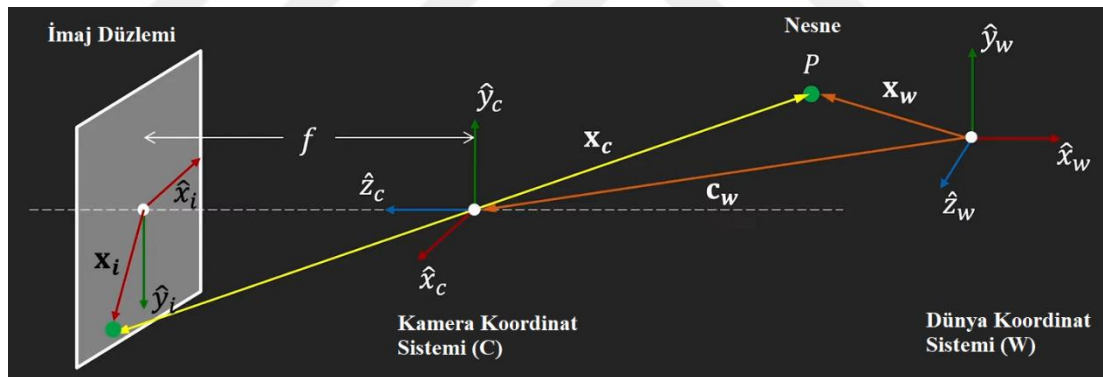
Tez konusu gereği hassas derinlik ölçümü yapılacağından temel kamera matrisleri bilinen derinlik ölçüm yöntemi olan basit üçgenleme yöntemi (*Simple*

Triangulation Method) kullanılmıştır. Bu nedenle stereo kameralar ile derinlik ölçümü yapılmadan önce temel kamera matrisleri bulunur. Kamera kalibrasyonundan önce kamera modeli oluşturulup dünya düzleminde kamera düzlemine geçiş yapılır.

3.3.1. Kamera İleri Dönüşüm Modeli

Görülen 3 boyutlu (3B) herhangi bir nesnenin 2 boyutlu (2B) kamera düzleminde nasıl görüldüğünü bulmak için *pinhole* kamera ileri dönüşüm modeli kullanılmaktadır. Dünya koordinat sistemindeki bir nesnenin imaj koordinat düzlemine geçebilmesi için önce kamera koordinat sistemine geçilir. Kamera koordinat sistemi, imaj düzlemine göre odak uzaklığında bulunan bir koordinat düzlemdir. Koordinat dönüşümü ile kamera koordinat sistemine geçildikten sonra 3B'den 2B'ye perspektif projeksiyonu ile imaj düzlemine geçilir.

Dünya koordinat sisteminden imaj düzlemine geçiş için kullanılan bu model, "ileri dönüşüm modeli" olarak adlandırılmaktadır. İleri dönüşüm modeli temel gösterimi Şekil 3.6'da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.6 - İleri Dönüşüm Modeli (Nayar, 2022)

Şekildeki P noktası, kamera ile görüntülenen nesneyi göstermektedir. P noktasının dünya koordinat sistemindeki konumu \mathbf{x}_w vektörü ile gösterilmektedir. Dünya koordinat sisteminin x eksenini \hat{x}_w , y eksenini \hat{y}_w ve z eksenini \hat{z}_w ile gösterilmektedir (Nayar, 2022).

Kamera koordinat sistemi, imaj düzleminin merkez noktasına dik olacak şekilde ve odak uzaklığında bulunan bir koordinat sistemidir. P noktasının kamera koordinat sistemindeki konumu ise \mathbf{x}_c vektörü ile gösterilir. Kamera koordinat sistemi x eksenini \hat{x}_c , y eksenini \hat{y}_c ve z eksenini \hat{z}_c ile gösterilmektedir.

Dünya koordinat sistemindeki \mathbf{x}_w vektörü Eşitlik (3.4) ile tanımlanır:

$$\mathbf{x}_w = \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

\mathbf{x}_w vektörünü kamera koordinat sistemine geçirirken 3B'den 3B'ye koordinat dönüşümü uygulanır. Kamera koordinat sistemindeki \mathbf{x}_c vektörü Eşitlik (3.5) ile tanımlanır:

$$\mathbf{x}_c = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

x_i ise imaj düzlemindeki koordinatı temsil eder. Kamera düzleminde 3B olan noktanın 2B koordinatları olan imaj düzlemine indirgenmesi için perspektif projeksiyon uygulanır. İmaj düzlemindeki \mathbf{x}_i vektörü kamera koordinat sistemine göre Eşitlik (3.6)'daki gibi yazılır. x_i imaj düzlemindeki x eksenini piksel değerini gösterirken y_i imaj düzlemindeki y eksenini piksel değerini göstermektedir.

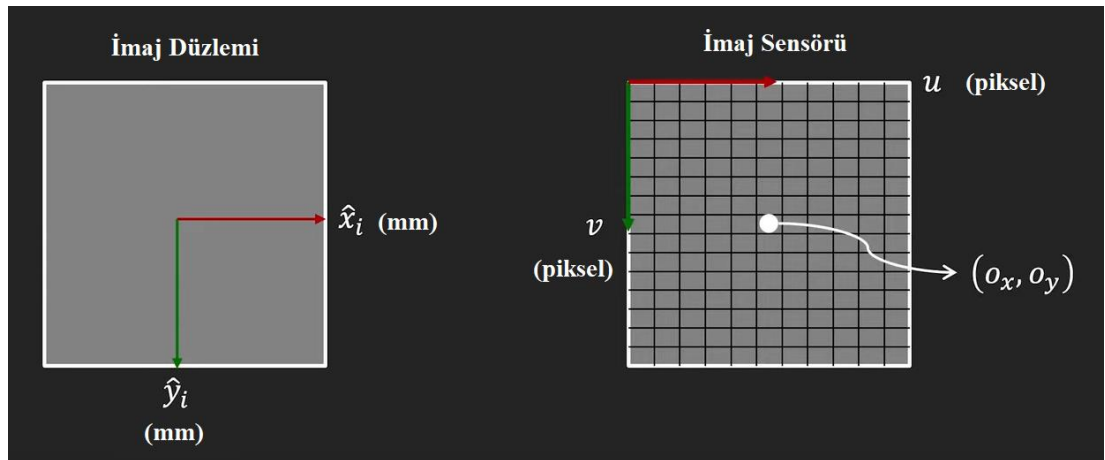
$$\mathbf{x}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Kamera koordinat sisteminden imaj düzlemine geçilirken f (kamera odak uzaklığı) kullanılarak Eşitlik (3.7)'deki gibi yeniden yazılır.

$$\frac{x_i}{f} = \frac{x_c}{z_c}, \quad \frac{y_i}{f} = \frac{y_c}{z_c} \quad (3.7)$$

Buna göre denklemde x_i ve y_i yalnız bırakılarak yeniden yazılırsa imaj düzlemine düşen noktanın koordinatları Eşitlik (3.8)'de gösterildiği gibi olur.

$$x_i = f \frac{x_c}{z_c}, \quad y_i = f \frac{y_c}{z_c} \quad (3.8)$$



Şekil 3.7 - İmaj Düzleminde İmaj Sensörüne Konumlandırma (Nayar, 2022)

Bilgisayar görü sisteminde imajdaki her bir noktaya “piksel” adı verilir. Bu noktalar bilgisayar görüntü sistemlerinde sol üst noktadan $[0,0]$ değerlerinden başlayarak oluşturulur. İmaj sensöründe Şekil 3.7’de gösterilen orta noktaya (o_x, o_y) ana nokta (*principal point*) adı verilir. Bu değerler kamera kalibrasyonu ile belirlenir. Dünya koordinat sisteminde görülen bir nesnenin yansıması imaj sensöründe x ekseninde “ u ” ve y ekseninde “ v ” piksel değerlerinde görülmektedir.

Eşitlik (3.8)’de gösterilen imaj düzlemindeki eşitlikler milimetre cinsinden değerlerdir. Bu değerler bilgisayar ortamında imaj sensöründeki piksel değerlerine karşılık gelmektedir. P noktasının imaj sensöründe karşılık gelen piksel değerleri Eşitlik (3.9)’da gösterildiği gibidir. Bu eşitliğe perspektif projeksiyon eşitliği denir.

$$u = f \frac{x_c}{z_c} + o_x, v = f \frac{y_c}{z_c} + o_y \quad (3.9)$$

2 boyutlu bir noktanın 3. boyuttaki homojen temsili $\tilde{\mathbf{u}}$, 3 boyutlu bir noktadır. Homojen koordinat sistemine geçmek için $\mathbf{u} = (u, v)$ ’nin 3B homojen gösterimi $\tilde{\mathbf{u}} = (\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w})$ ’dır. Üçüncü koordinat (\tilde{w}) hayali bir noktadır ve normalizasyon amaçlı ölçeklendirme için eklenir. Buna göre imaj sensöründeki u ve v ’nin homojen temsili Eşitlik (3.12)’de gösterildiği gibidir.

$$u = \frac{\tilde{u}}{\tilde{w}} \quad (3.10)$$

$$v = \frac{\tilde{v}}{\tilde{w}} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{u} \equiv \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \tilde{w}u \\ \tilde{w}v \\ \tilde{w} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ \tilde{w} \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{u}} \quad (3.12)$$

Kamera koordinat sistemine geçmek için \tilde{w} yerine kamera koordinat sisteminin z eksenindeki z_c değeri yazılırsa,

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ \tilde{w} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} z_c u \\ z_c v \\ z_c \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

elde edilir. Ayrıca u ve v yerine Eşitlik (3.9)’daki perspektif projeksiyon eşitlikleri yazılır. Bunun nedeni ise 3×4 ’lük bir matris kullanılarak hesaplamayı basitleştirmektir.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ \tilde{w} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} z_c u \\ z_c v \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x x_c + z_c o_x \\ f_y y_c + z_c o_y \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & o_x & 0 \\ 0 & f_y & o_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Eşitlik (3.14) ile verilen eşitlikteki çarpımın ilk matrisi, kameranın içsel parametrelerini içerir. Kamera koordinat sisteminde tanımlanan üç boyutlu noktanın homojen koordinatları (x_c, y_c, z_c) ile çarpılır. Matriste yer alan x eksenindeki odak uzaklığına f_x , y eksenindeki odak uzaklığına f_y , x eksenindeki odak uzaklığının imaj düzlemindeki karşılığını veren piksel değerine o_x , y eksenindeki odak uzaklığının imaj düzlemindeki karşılığını veren piksel değerine o_y parametreleri karşılık gelmektedir. Bu parametrelere içsel (*intrinsic*, \mathbf{M}_{int} matrisi ile gösterilir) parametreler denir ve Eşitlik (3.16)'da gösterildiği gibidir. Bu nedenle Eşitlik (3.14)'te oluşturulan matrisin 3×3 'lük kısmına “kalibrasyon matrisi” de denir ve Eşitlik (3.15)'teki gibi gösterilir.

$$\mathbf{K} \text{ (Kalibrasyon Matrisi)} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & o_x \\ 0 & f_y & o_y \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{M}_{int} = [\mathbf{K} | \mathbf{0}] = \begin{bmatrix} f_x & 0 & o_x & 0 \\ 0 & f_y & o_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Şekil 3.6'daki \mathbf{c}_w vektörü pozisyonu ve R matrisi ise döndürme matrisini verir.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\mathbf{R}_1 = [r_{11} \quad r_{12} \quad r_{13}] \rightarrow \hat{x}_c \text{'nin dünya koordinat sistemindeki yönü} \quad (3.18)$$

$$\mathbf{R}_2 = [r_{21} \quad r_{22} \quad r_{23}] \rightarrow \hat{y}_c \text{'nin dünya koordinat sistemindeki yönü} \quad (3.19)$$

$$\mathbf{R}_3 = [r_{31} \quad r_{32} \quad r_{33}] \rightarrow \hat{z}_c \text{'nin dünya koordinat sistemindeki yönü} \quad (3.20)$$

Eşitlik (3.17)'de gösterilen R döndürme matrisinin ilk satırı (Eşitlik (3.18)) \hat{x}_c 'nin dünya koordinat sistemindeki yönü, ikinci satırı (Eşitlik (3.19)) \hat{y}_c 'nin dünya koordinat sistemindeki yönü ve üçüncü satırı (Eşitlik (3.20)) ise \hat{z}_c 'nin dünya koordinat sistemindeki yönüne karşılık gelmektedir.

$$t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Eşitlik (3.21)'de gösterilen t matrisi, öteleme matrisine karşılık gelmektedir. Öteleme matrisi, bir görüntünün pozisyonunu değiştirmek için kullanılan bir matristir. Şekil 3.6'da kamera koordinat sisteminden P noktasına (dünya koordinat sistemindeki) geçiş yapılan vektöre \mathbf{x}_c vektörü denilmiştir. Bu durumda döndürme ve öteleme matrisi kullanılarak \mathbf{x}_c vektörünü yeniden yazıldığında Eşitlik (3.22)'deki eşitlik elde edilir.

$$\mathbf{x}_c = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Homojen koordinatlara geçilerek bu denklem yeniden yazılırsa,

$$\tilde{\mathbf{x}}_c = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Eşitlik (3.23)'teki matris elde edilir. Dönme ve öteleme matrislerinin oluşturduğu bu matrise “dışsal matris (*extrinsic*, \mathbf{M}_{ext} matrisi ile gösterilir)” denir.

$$\mathbf{M}_{ext} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & t \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Eşitlik (3.16)'daki içsel ve Eşitlik (3.24)'teki dışsal matrislerinin çarpımlarından oluşan matrise “projeksiyon matrisi” denir ve P ile gösterilir. Eşitlik (3.25)'te projeksiyon matrisi ve Şekil 3.6'daki P noktası arasındaki $\tilde{\mathbf{x}}_w$ vektörü çarpımı homojen gösterime karşılık gelmektedir.

$$\tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{M}_{int} \mathbf{M}_{ext} \tilde{\mathbf{x}}_w = P \tilde{\mathbf{x}}_w \quad (3.25)$$

3.3.2. Kamera Kalibrasyonu

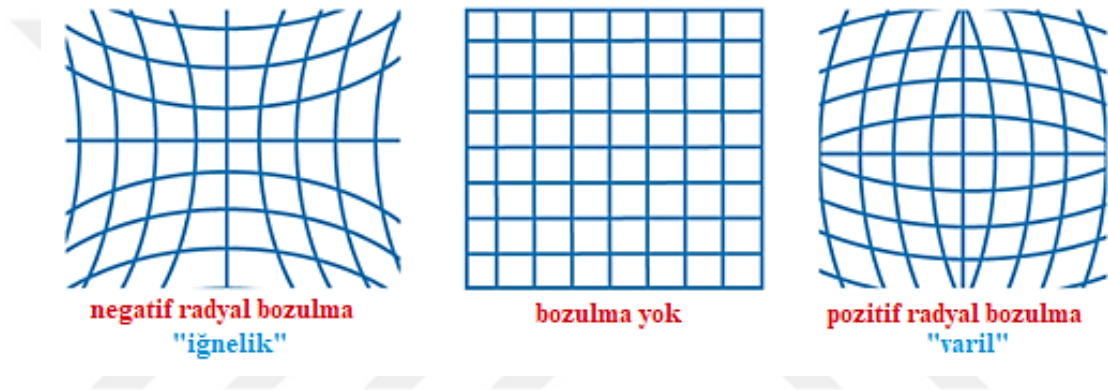
Stereo kameralarda derinlik kamera parametreleri yardımıyla bulunur. Kamera parametrelerini bulmak ve görüntülerdeki bozulmaların düzeltilmesi için kamera kalibrasyonu yapılır.

Kameralardaki görüntülerde iki tür bozulma gerçekleşmektedir. Bu bozulmalar teğetsel ve radyal bozulmalardır. Bu bozulmaları düzeltmek için kalibrasyon yapılması gerekmektedir. Kalibrasyon yapılabilmesi için önce bozulmaları gösteren bozulma

vektörü (*distortion vector*) bulunmalıdır. Bozulma vektörü, radyal ve teğetsel bozulma katsayılarını gösteren vektördür ve Eşitlik (3.26)'daki gibi gösterilir (Computer Vision Toolbox Documentation, 09.12.2022).

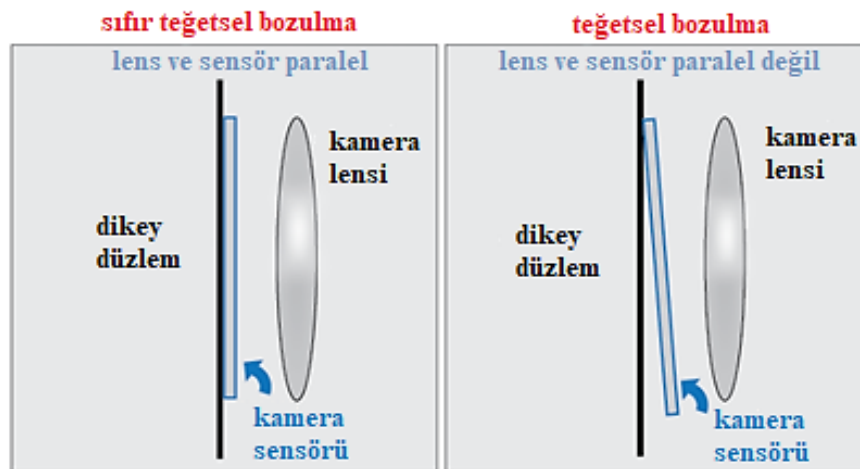
$$\text{bozulma vektörü} = [k_1, k_2, p_1, p_2, k_3] \quad (3.26)$$

Bozulma vektörünü oluşturan k_x katsayıları radyal bozulmaları gösterirken p_x katsayıları teğetsel bozulmaları göstermektedir. Radyal bozulma parametreleri negatif değer aldığımda Şekil 3.8'de gösterildiği gibi imajda dışarı doğru içnelik (*pincushion*) şeklinde bir bozulma meydana getirir. Pozitif değer aldığımda ise varil (*barrel*) şeklinde bir bozulma meydana geldiği görülür.



Şekil 3.8- Radyal Bozulma Görüntüsü (Computer Vision Toolbox Documentation - MathWorks Australia, 09.12.2022)

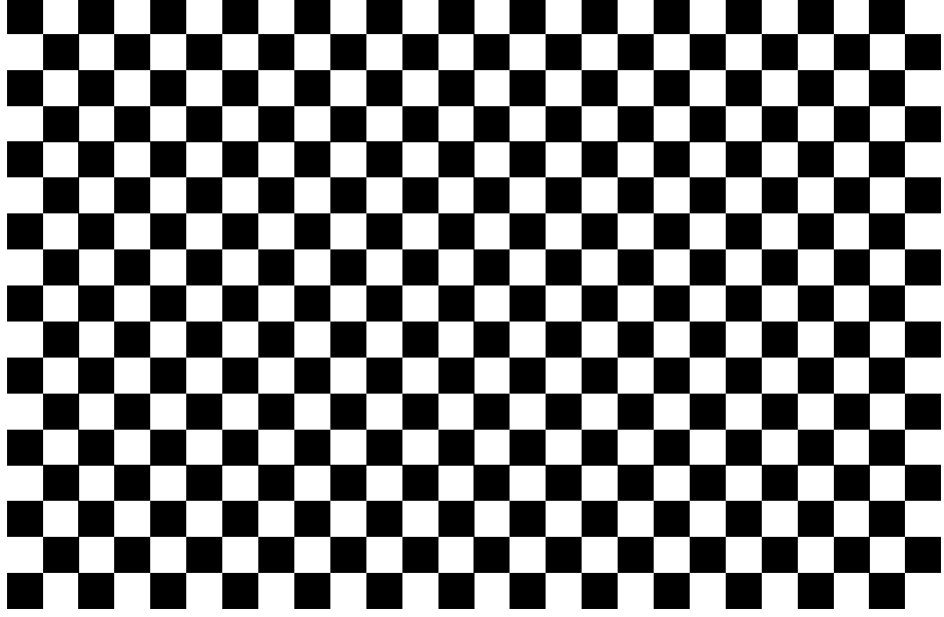
Teğetsel bozulma türü ise mercek ve görüntü düzleminin paralel olmadığı durumda gerçekleşir. Bu durum Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 –Teğetsel Bozulma Görüntüsü (Computer Vision Toolbox Documentation - MathWorks Australia, 09.12.2022)

3.3.2.1. Yapılan Kamera Kalibrasyonu İşlemi

Eşitlik (3.26)’da verilen bozulma vektörünü bulmak için Opencv Kalibrasyon araç kutusu ve Matlab Stereo Kalibrasyon araç kutusu kullanılmıştır. Kalibrasyon için Şekil 3.10’da gösterilen satranç tahtası kullanılmıştır. Bu satranç tahtası 17 satır, 26 kolondan oluşmuş ve kenar uzunlukları ise 15 milimetredir.



Şekil 3.10 – Kalibrasyon İçin Kullanılan Satranç Tahtası

Kamera kalibrasyonu yapılırken satranç tahtası kullanılması nedeni özellik eşleştirme ile köşe noktalarının kolay bir şekilde çıkartılmasıdır. Köşe noktalarının piksel değerleri bulunduktan sonra, piksellerin gerçekte hangi uzunluklara karşılık geleceği kenar uzunluklarının ölçüsünden bulunur. Eşitlik (3.27)’de gösterilen matris eşitliğinin kalın font ile gösterilen değerleri bilindiği için bilinmeyen matris hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}(i) \\ \mathbf{v}(i) \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_w(i) \\ \mathbf{y}_w(i) \\ \mathbf{z}_w(i) \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Eşitlik (3.27)’deki matrisi çözmek için lineer eşitlik genişletildiğinde,

$$\mathbf{u}(i) = \frac{p_{11}x_w(i)+p_{12}y_w(i)+p_{13}z_w(i)+p_{14}}{p_{31}x_w(i)+p_{32}y_w(i)+p_{33}z_w(i)+p_{34}} \quad (3.28)$$

$$\mathbf{v}(i) = \frac{p_{21}x_w(i)+p_{22}y_w(i)+p_{23}z_w(i)+p_{24}}{p_{31}x_w(i)+p_{32}y_w(i)+p_{33}z_w(i)+p_{34}} \quad (3.29)$$

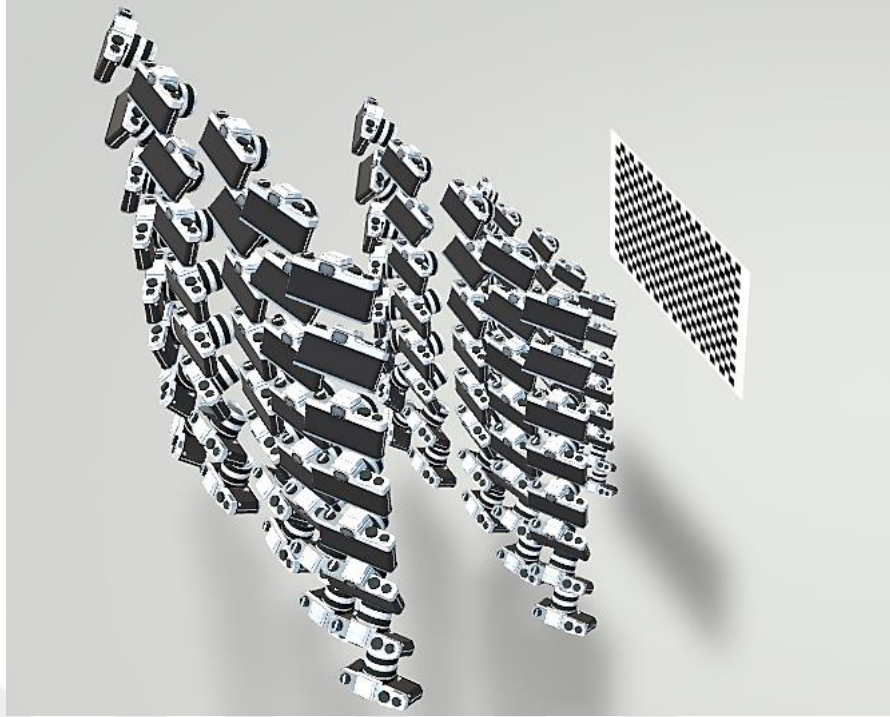
bulunur. Eşitlik (3.28) ve Eşitlik (3.29)'daki terimler yeniden düzenlenip çözümlerse projeksiyon matrisi P elde edilir. Eşitlik (3.16)'da gösterilen içsel ve Eşitlik (3.24)'teki dışsal matrislerin çarpımı projeksiyon matrisinin karşısına yazılırsa,

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{int}\mathbf{M}_{ext} \quad (3.30)$$

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & o_x & 0 \\ 0 & f_y & o_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

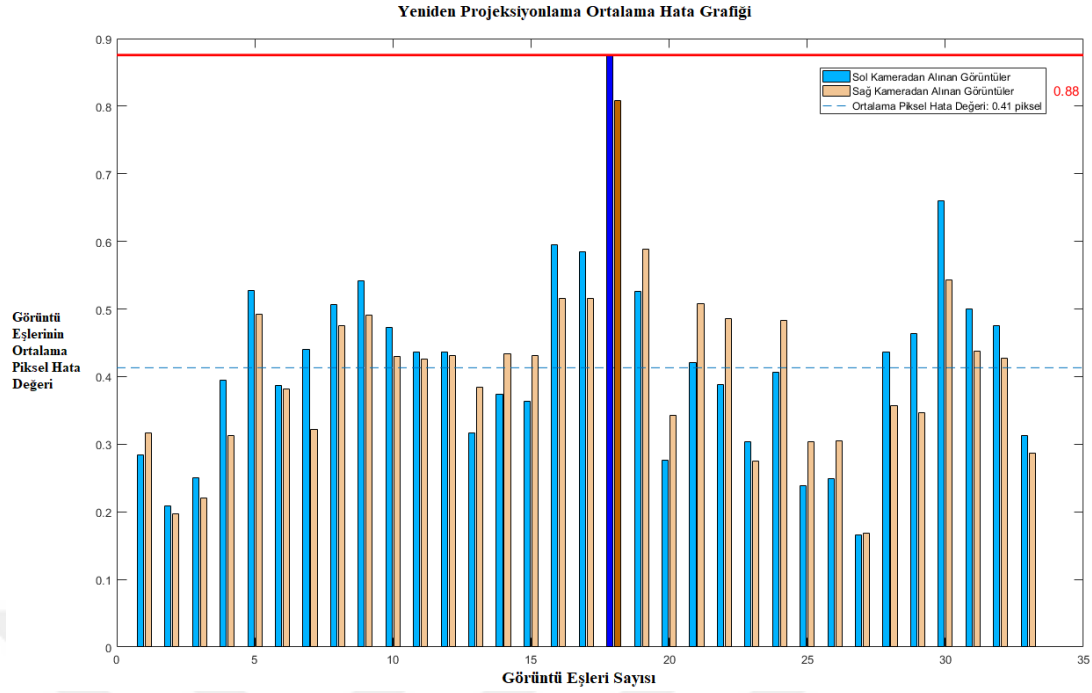
elde edilir. Eşitlik (3.31) kullanılarak, kamera kalibrasyon, döndürme ve öteleme matrisleri bulunur.

Kalibrasyon için ilk olarak Zed kamera, Zed Explorer uygulamasından varsayılan kalibrasyon değerlerine getirilmiştir. Matlab Stereo Kalibrasyon araç kutusundaki başlangıç kalibrasyon matrisi ve bozulma vektörü değerleri sadece bir kamera için yazılabilmektedir. Bunun nedeni araç kutusunda kameraların tamamen eş kabul edilmesidir. Araç kutusuna bu değer girilmesi için iki kamera için de başlangıç parametreleri eş olarak ayarlanmıştır. Daha sonra sol ve sağ kameradan aynı anda Şekil 3.11'de gösterildiği şekilde 60'ar adet görüntü alınmıştır. Alınan görüntüler satranç tahtası, ekranın en az %60'mı kapsayacak şekilde çekilmiştir (OpenCV: Camera Calibration dokümanı, 2022).



Şekil 3.11 – Farklı Uzaklıklarla Çekilen 60 Adet Görüntünün Temsili Görseli

Çekilen görüntülerdeki bulanık olanlar ve satranç tahtasının kamera sensörünün dışına çıktığı görüntüler ayıklanmıştır. Daha sonra bu görüntüler Şekil 3.12’de gösterilen Matlab Stereo Kalibrasyon araç kutusundaki yeniden projeksiyonlama hatasına göre 0.83 mm’den daha fazla hataya sahip görüntüler ayıklanmıştır. Yeniden projeksiyonlama hatası, ölçülen nokta ile olması gereken nokta konumu arasındaki görüntü mesafesine karşılık gelen geometrik hatadır. Yapılan ön işlemlerden sonra 33 çift görüntü kalmıştır. Bu görüntüler Matlab Stereo Kalibrasyon araç kutusu ile kalibre edildikten sonra kalibrasyon değerlerinin karşılaştırılması için Opencv Kalibrasyon araç kutusu ve Zed kamera kalibrasyon uygulaması ile tekrar kalibre edilmiştir. Elde edilen kalibrasyon parametreleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

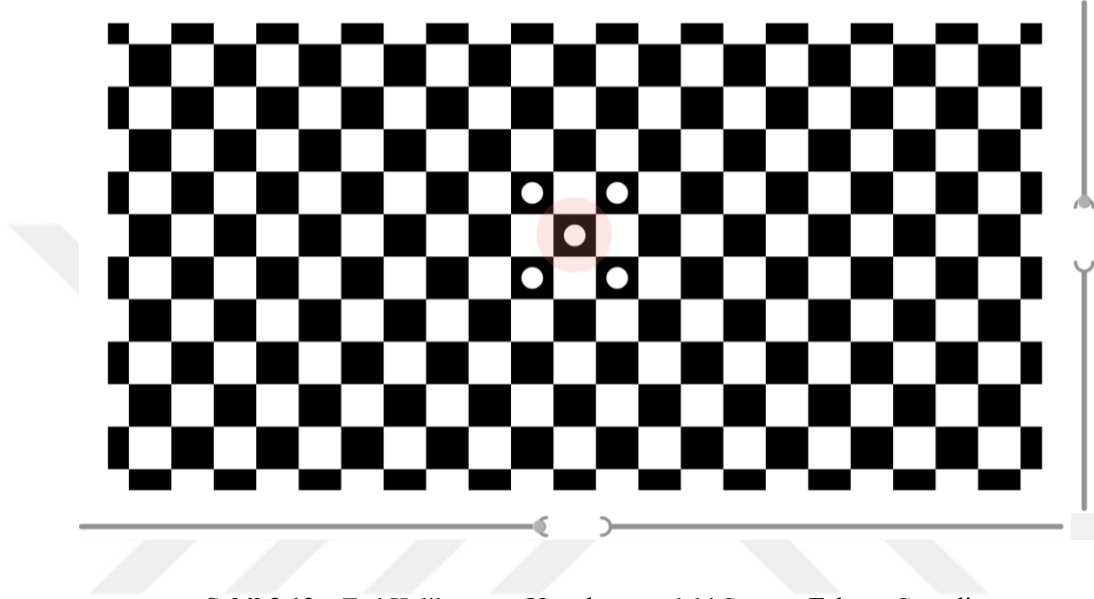


Çizelge 3.2. Kalibrasyon Parametreleri

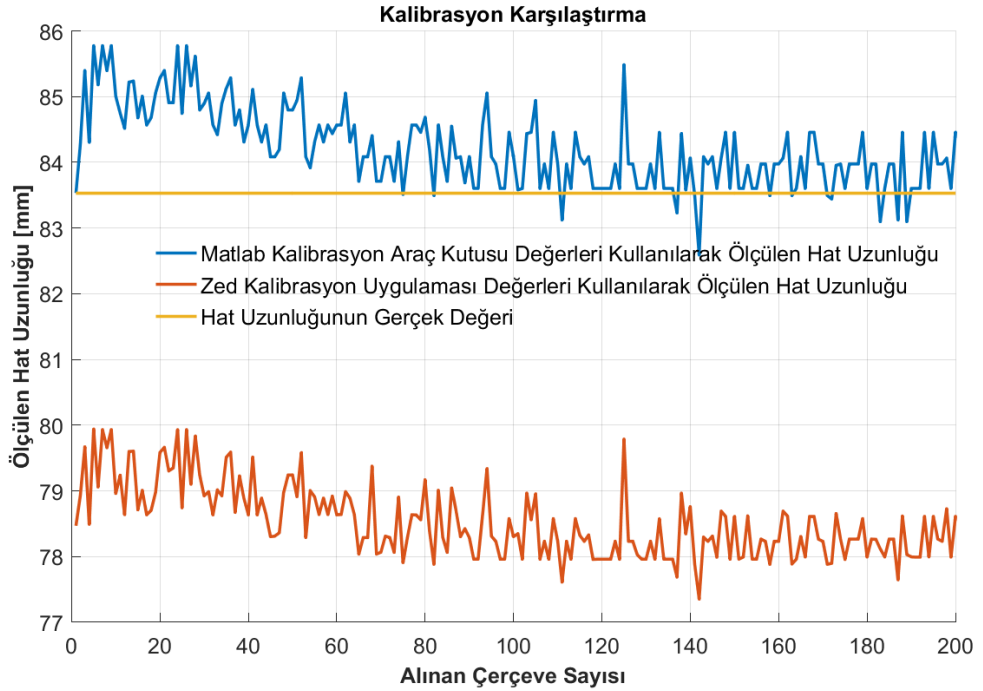
Kalibrasyon Parametreleri	Zed Kamera Başlangıç Kamera Parametreleri	Matlab Kalibrasyon Araç Kutusu Kalibrasyon Değerleri	Opencv Kalibrasyon Araç Kutusu Kalibrasyon Değerleri	Zed Kalibrasyon Uygulaması Kalibrasyon Değerleri	
Sol Kamera	f_x	1400.8	1397.128	1397.128	1403.68
	f_y	1400.8	1394.638	1394.638	1403.68
	c_x	1059.17	1063.356	1063.356	1068.46
	c_y	649.515	637.009	637.009	634.496
	k_1	0	-0.154	-0.154	-0.171
	k_2	0	-0.036	-0.036	0.026
	p_1	0	1.48e-04	1.48e-04	7.4e-4
	p_2	0	-3.672-04	-3.672-04	-3-03
	k_3	0	0.054	0.054	1.1-4
Sağ Kamera	f_x	1400.8	1396.998	1396.998	1402.5
	f_y	1400.8	1394.906	1394.906	1402.5
	c_x	1059.17	1077.575	1077.575	1074.99
	c_y	649.515	626.503	626.503	623.742
	k_1	0	-0.160	-0.160	-0.168
	k_2	0	0.007	0.007	0.021
	p_1	0	-5.03e-05	-5.03e-05	7.4-4
	p_2	0	-4.03e-04	-4.03e-04	-3.3-4
	k_3	0	0.025	0.025	2.11-4

Yapılan bu kalibrasyonlarda Matlab ve Opencv kalibrasyon araç kutuları aynı yöntemi kullandıkları için aynı sonuçları vermiştir. Bu kalibrasyon yöntemlerinin

denenmesindeki temel sebep ise farklı platform arayüzlerinde sonuçların değişip değişmeyeceğinin kontrol edilmesidir. Farklı bir yöntem kullanan Zed kalibrasyon uygulaması Şekil 3.13'te gösterilen satranç tahtasını kullanmaktadır. Ayrıca uygulama, kameranın içindeki ataletsel ölçüm birimlerinden aldığı açılara göre kameranın görüş açısını ortalayarak Zed Kamerayı kalibre etmiştir. Yapılan bu kalibrasyon sonuçları, Matlab kalibrasyon ve Opencv kalibrasyon araç kutularının verdiği değerlerden farklı sonuçlar vermiştir.



Şekil 3.13 – Zed Kalibrasyon Uygulamasındaki Satranç Tahtası Görseli



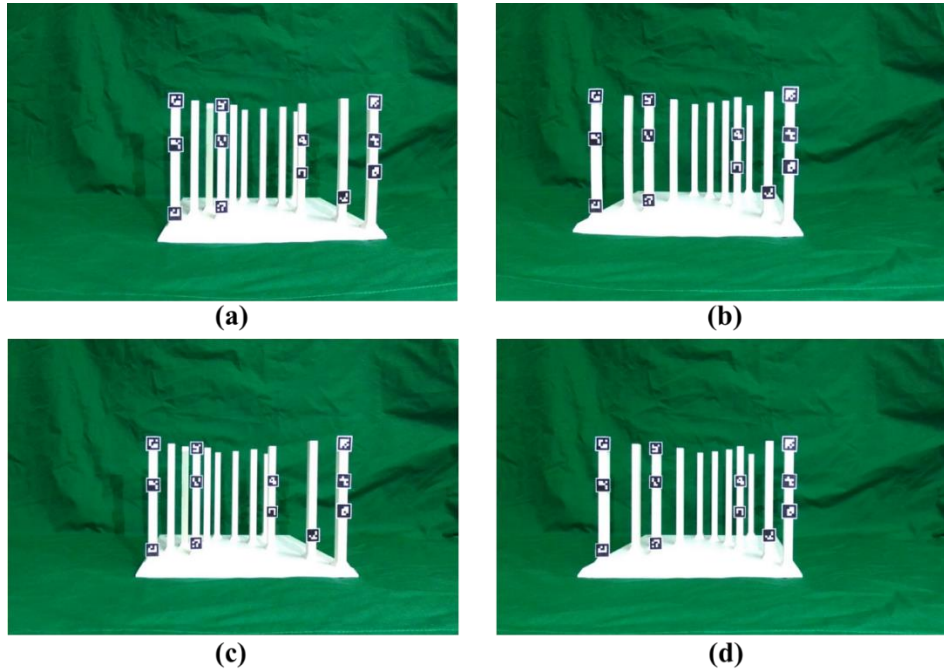
Şekil 3.14 – Matlab ve Zed Kamera Kalibrasyon Uygulaması Karşılaştırılması

Şekil 3.14'te elde edilen sonuçlara göre gerçek uzunluğu 83.529 mm olan bir hattın ölçümünde 50'şer kare alınan ve iki nokta arasının bilindiği bir testte Zed kalibrasyon uygulamasında noktalar arası uzunluk ortalama 78.52 mm bulunurken Matlab/Openvc kalibrasyon araç kutuları ile bu uzunluk 84.21 mm bulunmuştur. Zed kalibrasyon uygulaması ortalama %5.9 hata ile bulurken Matlab/Openvc kalibrasyon uygulamasındaki kalibrasyon parametreleri ile hesaplanan değerler %0.8 hata oranı ile bulmuştur.

Elde edilen bu sonuçlara göre Matlab/Openvc kalibrasyon uygulamasından elde edilen kamera kalibrasyon matrisinin ve bozulma vektörünün kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca Eşitlik (3.32)'de gösterilen döndürme ve öteleme vektörlerini içeren dışsal matris (M_{ext}) için kalibrasyondan elde edilen aşağıdaki değerler kullanılmıştır.

$$M_{ext} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & t \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.999971 & -0.00063 & 0.00752 & -1.1e + 02 \\ 0.000693 & 0.99996 & -0.0079 & -0.2327 \\ -0.00752 & 0.00799 & 0.99993 & 0.10760 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Şekil 3.15 a ve b'de gösterilen görüntüler sırasıyla sol ve sağ kameradan alınan kalibre edilmemiş görüntülerdir. Elde edilen bozulma vektörüyle (Çizelge 3.2'deki $(k_1, k_2, p_1, p_2, k_3)$ vektörü) kalibre edilen görüntüler ise Şekil 3.15 c ve d'de sırasıyla sol ve sağ kameradan alınan kalibre edilmiş görüntülerdir.



Şekil 3.15 – (a) Kalibre Edilmemiş Sol Kamera Görüntüsü, (b) Kalibre Edilmemiş Sağ Kamera Görüntüsü, (c) Kalibre Edilmiş Sol Kamera Görüntüsü, (d) Kalibre Edilmiş Sağ Kamera Görüntüsü.

3.3.3. Basit Üçgenleme Yöntemi

Çift kamera ile alınan 2B iki görüntüden üç boyut elde edilebilir. İki görüntüden derinliğe geçebilmek için Basit Üçgenleme Yöntemi (*Simple Triangulation Method*) ya da diğer ismi ile pasif 3B yeniden yapılandırılma yöntemi (*passive method of 3D reconstruction*) kullanılır. Bu yöntem basit haliyle Şekil 3.17’de verilmiştir. Bu yöntemi kullanabilmek için kalibre edilmiş iki kamera gereklidir (Parasuraman, 2014). Stereo görüntülerde fark haritaları sol ve sağ kameradaki x eksenini piksel değerlerinin farkıyla oluşmaktadır. Bu farkların tüm görüntüde bulunmasıyla fark haritası (*disparity map*) elde edilir (Scharstein ve Szeliski, 2002).

$$fark = (x - x') = \frac{Bf}{Z} \quad (3.33)$$

Eşitlik (3.33)’te gösterilen B (*baseline*) iki kamera arası mesafeye, f odak uzaklığına ve Z derinlik mesafesine karşılık gelmektedir.

Fark haritası hesaplanırken çeşitli yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemlerden en çok kullanılanları aşağıdaki gibidir (Hamzah ve Ibrahim, 2016):

1) Mutlak Farkların Toplamı,

$$MFT(k, l) = \sum_{(i,j) \in T} |E_l(i, j) - E_r(i + k, j + l)| \quad (3.34)$$

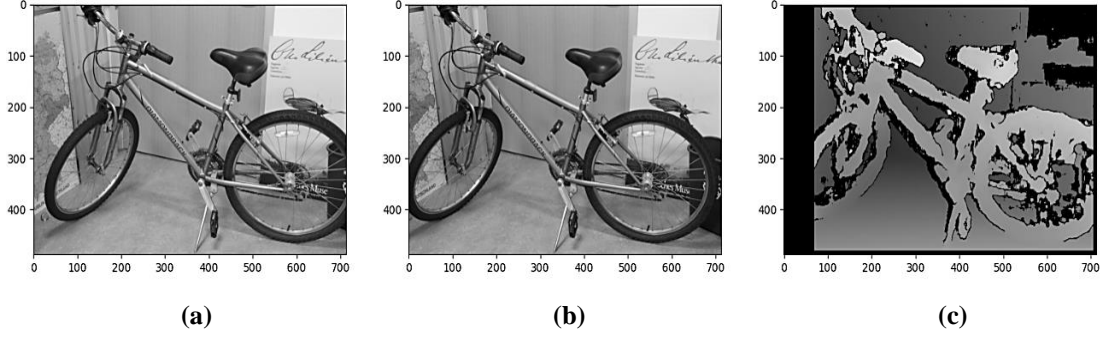
2) Farkların Karelerinin Toplamı

$$FKT(k, l) = \sum_{(i,j) \in T} |E_l(i, j) - E_r(i + k, j + l)|^2 \quad (3.35)$$

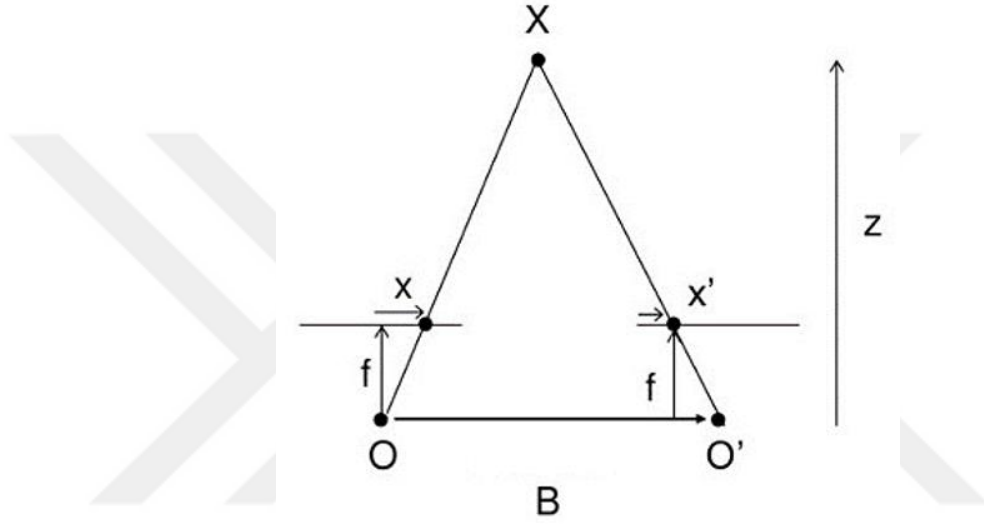
3) Normalize Edilmiş Çapraz Korelasyon

$$NEÇK(k, l) = \frac{\sum_{(i,j) \in T} E_l(i, j) E_r(i+k, j+l)}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in T} E_l(i, j)^2 \sum_{(i,j) \in T} E_r(i+k, j+l)^2}} \quad (3.36)$$

Fark haritasını hesaplamak için Opencv kütüphanesinin “StereoBM_create” fonksiyonu ve fark haritası hesaplaması için de “compute” fonksiyonu kullanılmıştır. Stereo görüntüler içinse Şekil 3.16’da gösterildiği gibi MiddleEval3 data setinden (Middlebury Stereo Datasets, 2022) fark haritasının daha kolay anlaşıldığı bisiklet görüntüsü tercih edilmiştir. Açık renkler yakındakileri gösterirken koyu renkler uzak mesafelere karşılık gelmektedir.

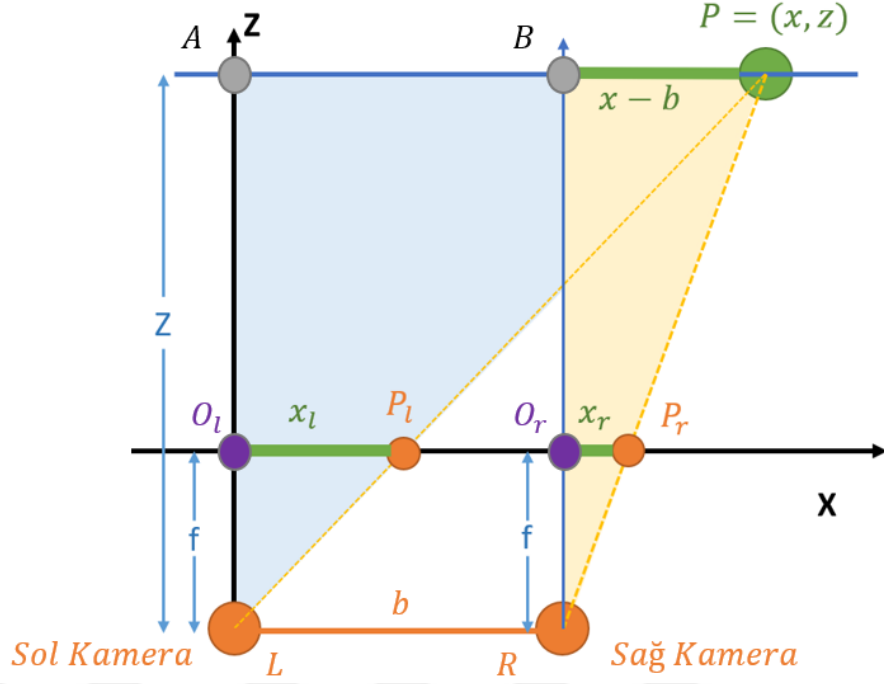


Şekil 3.16 – (a) Sol Kamera Görşeli, (b) Sağ Kamera Görşeli, (c) Fark Haritası Görşeli



Şekil 3.17 – Bilgisayarlı Görüde Üçgenleme (Raviya ve ark., 2014)

Şekil 3.17’de yer alan “ O ” sol kameradan alınan görüntüdeki X cismi konumunu, “ O' ” sağ kameradan alınan görüntüdeki X cismi konumunu piksel olarak vermektedir. Burada f odak uzaklığı, B (baseline) iki kamera arası mesafeyi, z cisim ile kamera arasındaki mesafeyi (derinlik) gösterirken x ve x' ise kamera koordinat eksenindeki X cisimine karşılık gelen değerlerdir. Üçgenleme yöntemini daha detaylı olarak Şekil 3.18’deki gibi gösterilebilir.



Şekil 3.18 – İki Kamera ile Üçgenleme Yöntemi

Üstteki şekildeki \overline{LAP} üçgeni ile $\overline{LO_lP_l}$ üçgeni arasındaki benzerlikten Eşitlik (3.37) elde edilir.

$$\frac{Z}{f} = \frac{x}{x_l} \quad (3.37)$$

\overline{RBP} üçgeni ile $\overline{RO_rP_r}$ üçgeni arasındaki benzerlikten ise Eşitlik (3.38) elde edilmektedir.

$$\frac{Z}{f} = \frac{x-b}{x_r} \quad (3.38)$$

Bu eşitlikler kullanılarak Z yalnız bırakıldığında ise derinlik, Eşitlik (3.39)'daki gibi elde edilmektedir.

$$Z = f \frac{b}{x_l - x_r} \quad (3.39)$$

Özet olarak derinlik, “f” odak uzaklığı ile iki kamera arası mesafe (*baseline*) çarpılması ve iki kameranın x piksel değerlerinin farkına (*disparty*) bölünerek hesaplanmaktadır.

Derinliği bulunmak istenilen cismin sol kamera imaj düzlemindeki karşılığı (u_l, v_l) 'ye sağ kamera imaj düzlemindeki karşılığı ise (u_r, v_r) 'ye karşılık gelmektedir. Eşitlik (3.14)'teki matris çarpımı aşağıda yeniden yazılıp düzenlenirse,

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ \tilde{w} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} z_c u \\ z_c v \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & o_x & 0 \\ 0 & f_y & o_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x x_c + z_c o_x \\ f_y y_c + z_c o_y \\ z_c \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x x_c + z_c o_x \\ f_y y_c + z_c o_y \\ z_c \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Eşitlik (3.40) ve Eşitlik (3.41) elde edilir. Eşitlik (3.41)'deki eşitlik çözümlerse aşağıdaki eşitliklere ulaşılabilir;

$$u_l = f_x \frac{x}{z} + o_x \quad (3.42)$$

$$v_l = f_y \frac{y}{z} + o_y \quad (3.43)$$

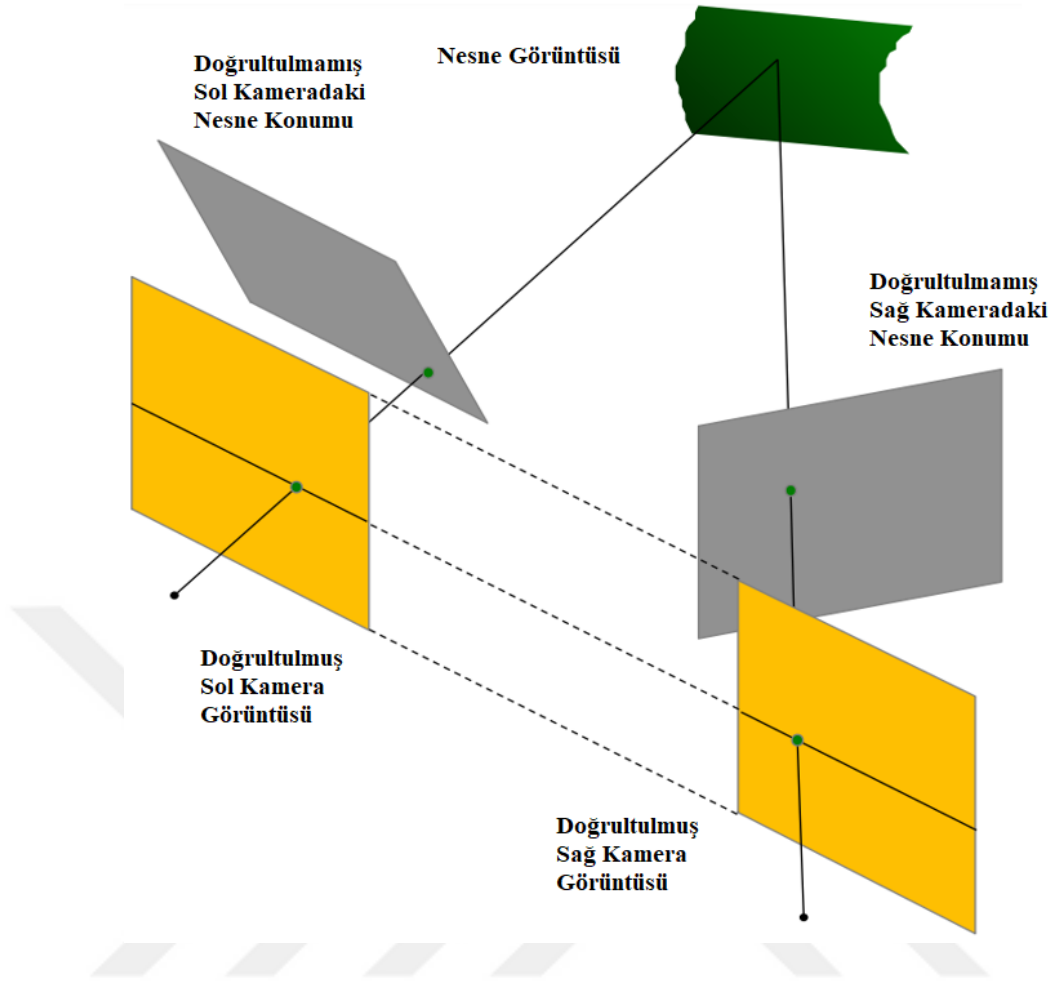
$$u_r = f_x \frac{(x-b)}{z} + o_x \quad (3.44)$$

$$u_l = f_y \frac{y}{z} + o_y \quad (3.45)$$

Kalibrasyon yapılan bir kamera için f_x , f_y , o_x , o_y ve b kamera kalibrasyonu yapılarak belirlenmiştir. Üstte verilen eşitlikleri x , y ve z için çözmeden önce kamera görüntülerinin doğrultulması gerekmektedir. Çünkü yukarıdaki eşitlikler u_l ve v_l 'nin eşit olduğu durumlar için geçerlidir. Bu durumun sağlanabilmesi için de sol ve sağ kameradan alınan görüntülerin y ekseninde aynı piksel değerine karşılık gelmesi gerekmektedir.

3.3.3.1. Görüntünün Doğrultulması

Derinlik denklemlerinin kullanılabilmesi için sol ve sağ kameradan alınan görüntülerdeki cismin y eksenindeki piksel değerlerinin aynı olması gerekmektedir. Böylece x eksenindeki değişimi kullanarak cismin gerçekte nerede olduğu bilinebilir. Doğrultma işlemi için Matlab Image Processing araç kutusunda yer alan “*rectifyStereoImages*” fonksiyonu kullanılarak test edilmiştir. Gerçek zamanlı test uygulamasının Python tabanlı olması nedeniyle Python Opencv kütüphanesinin “*cv2.stereoRectify*” fonksiyonu ile kullanılmıştır.



Şekil 3.19 – Görüntü Doğrultma Temsili Görseli (Robinson, J.,2021)

Şekil 3.19’da görüntü doğrultmanın temsili görseli verilmiştir. Görseldeki nesne görüntüsü sol ve sağ kamerada y eksenli piksel değerlerinde farklı konumlarda yer almaktadır. Bu da derinliği fark haritası ile bulamamaya sebep olmaktadır. Bu sebeple kalibrasyonda elde edilen dışsal matris kullanılarak kamera görüntülerinde döndürme ve öteleme işlemleri yapılarak görüntüler aynı doğrultuya getirilir. Epipol noktası, iki görüntünün birbirine göre yerleşimlerini tanımlar ve bu noktaların aynı anda görülebilmesi için gerekli olan eksenleri temsil etmektedir. Epipol vektörlerinin kesişmemesi yani epipol vektörlerinin sonsuzda olması görüntülerin doğrultulmuş olduğunu göstermektedir. Görüntü doğrultma algoritması basitçe dört adımda ifade edilebilir (Robinson, J., 2021):

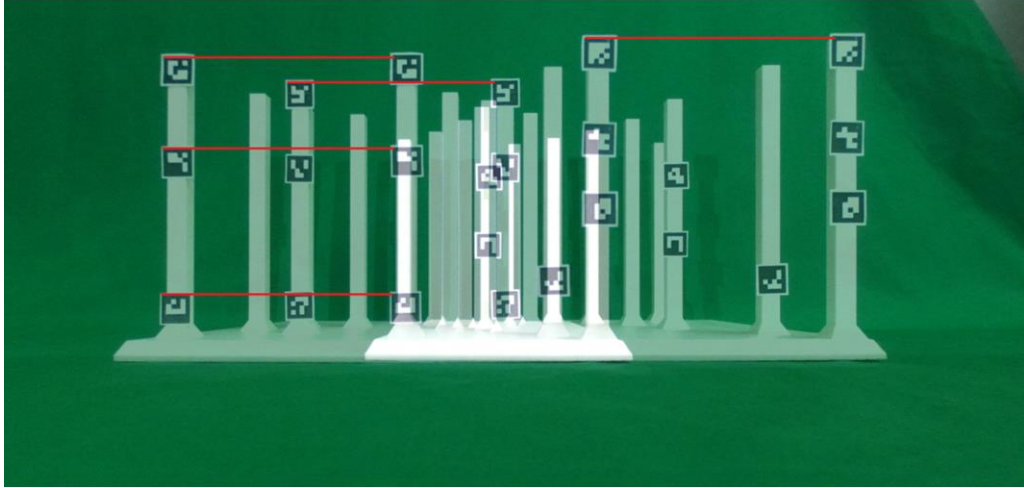
1. Kamera koordinat sistemi yönünü hizalamak için sağ kamera, döndürme matrisi ile döndürülür.
2. Epipol vektörleri sonsuzda olacak şekilde sol kamera döndürülür.
3. Epipol sonsuzda olacak şekilde sağ kamera döndürülür.

4. İki imaj da ölçeklendirilerek bitirilir.

Tez çalışmasında, doğrultma ve kalibrasyon yapılmadan önce Şekil 3.20 a’da gösterildiği gibi aynı işaretçinin sol üst köşesinin y eksenini piksel değeri ile sağ kameradan alınan aynı işaretçinin sol üst köşesi y eksenini piksel değerlerinin farklı olduğu görülmektedir. Doğrultma ve kalibrasyon yapıldıktan sonra Şekil 3.20 b’de gösterildiği gibi nesnelere aynı y eksenini piksel değerlerine sahip olmuştur. Bu da aynı epipol vektörlerinde olduğunu ve doğrultma işleminin başarıyla gerçekleştirildiğini göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.20 – (a) Doğrultma İşlemi Öncesi Sol ve Sağ Kameranın Görüntülerinin Birleştirildiği Görsel, (b) Doğrultma İşlemi Sonrası Sol ve Sağ Kameranın Görüntülerinin Birleştirildiği Görsel

3.3.3.2. Derinlik Hesabı

Doğrultma işleminden sonra v_l ve v_r değerleri eşit hale gelmiştir. Bu durumda Eşitlik (3.42), Eşitlik (3.43), Eşitlik (3.44) ve Eşitlik (3.45)'teki eşitlikler x, y ve z için çözümlerse,

$$x = b \frac{(u_l - o_x)}{(u_l - u_r)} \quad (3.46)$$

$$y = b \frac{f_x(v_l - o_y)}{f_y(u_l - u_r)} \quad (3.47)$$

$$z = b \frac{f_x}{(u_l - u_r)} \quad (3.48)$$

eşitlikleri elde edilir. Bu eşitlikler kullanılarak derinliği ölçülmek istenilen bir cismin sol kameraya göre x, y ve z eksenindeki mesafeleri elde edilmektedir.

3.3.3.3. Farkların Hesaplanması

Derinlik hesabının yapılabilmesi için öncelikle sol ve sağ görüntülerdeki uzaklığı bilinmek istenen nesnelerin görüntüdeki tam konumları bilinmelidir. Nesnelerin bulunması için çeşitli yöntemlere başvurulabilir. Bunlardan en çok kullanılanları,

1. Şablon Eşleştirme
2. Özellik Eşleştirme
3. Renk Eşleştirme yöntemleridir.

3.3.3.3.1. Şablon Eşleştirme

Şablon eşleştirme, bir görüntünün önceden tanımlanmış bir şablon görüntüsüyle eşleşen küçük parçaları bulmak için kullanılan bir yöntemdir. Temel olarak Eşitlik (3.36)'da gösterilen normalize edilmiş çapraz korelasyon tekniği kullanılır.

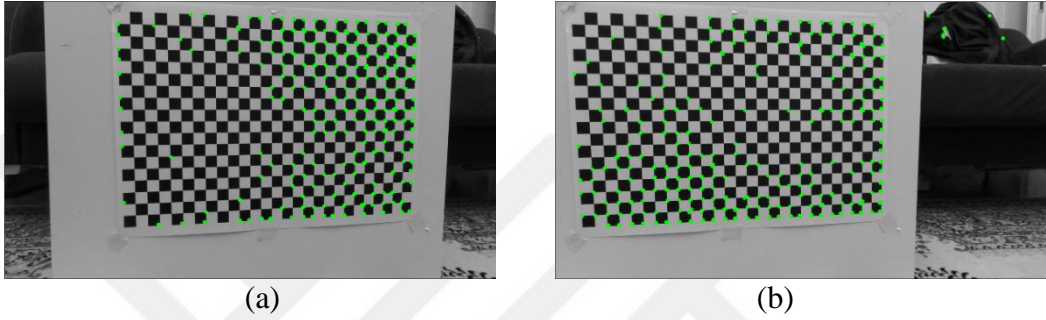
Şablon eşleştirme yöntemleri; rotasyon farklılıklarında, aydınlatmaların farklı olduğu yerlerde ve farklı ölçekteki görüntülerde başarısız bir yöntemdir. Bu nedenle kullanılacak uygulamada tercih edilmemiştir.

3.3.3.3.2. Özellik Eşleştirme

Rublee ve arkadaşları tarafından 2011 yılında yayımlanmış olan ORB (Oriented Fast and Rotated Brief), açık kaynaklı olması nedeniyle tercih edilmiştir. Performansı ve eşleştirme verimliliğini arttırmak için değişikliklere sahip İkili Gürbüz Bağımsız

Temel Özellikler (*Binary Robust Independent Elementary Features-BRIEF*) tanımlayıcısına ve Hızlandırılmış Segment Testi Özellikleri (*Features from Accelerated Segment Test-FAST*) köşe algılama algoritmasına dayanmaktadır.

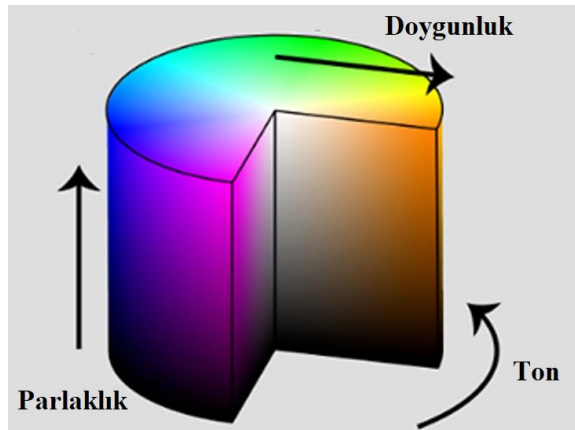
Hızlı bir yöntem olduğu için gerçek zamanlı algoritmalar için iyi bir seçimdir. Fakat yapılan testte Şekil 3.21’de yeşil noktalar ile gösterildiği gibi yüksek çözünürlüklü ve detaylı stereo görüntülerde iki görüntü için de aynı kenarları bulamamıştır. Bu sebeple fark haritasında hatalar oluşmaktadır. Tez çalışmasındaki denemelerde hassas konum elde etmede başarısız bir yöntem olmuştur.



Şekil 3.21 – Yöntem ile Elde edilen (a) Sol Kamera ve (b) Sağ Kamera Görüntüleri

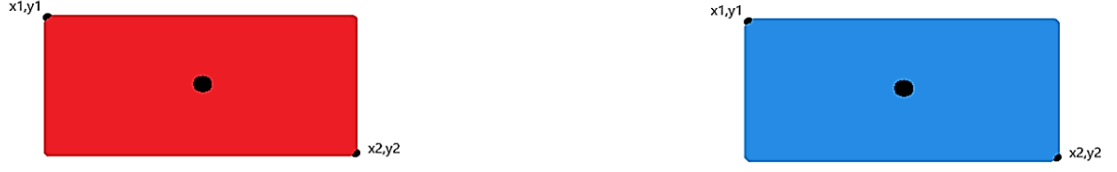
3.3.3.3. Renk Eşleştirme

Gerçek zamanlı uygulamalar için az işlem gücü harcayan yöntemler tercih edilmektedir. RGB renk uzayı kırmızı, yeşil ve mavi rengin karışımı ile diğer renkleri elde eden bir uzaydır. HSV renk uzayı ise buna karşılık Şekil 3.22’de gösterilen ton (*hue*), doygunluk (*saturation*) ve parlaklık (*value*) değerleri ile tanımlanmaktadır. Bu nedenle görüntü işlemede belirli bir renkteki bir nesneyi tanımlamak için HSV renk uzayı kullanmak daha elverişlidir.



Şekil 3.22 – HSV Renk Uzayı Gösterimi

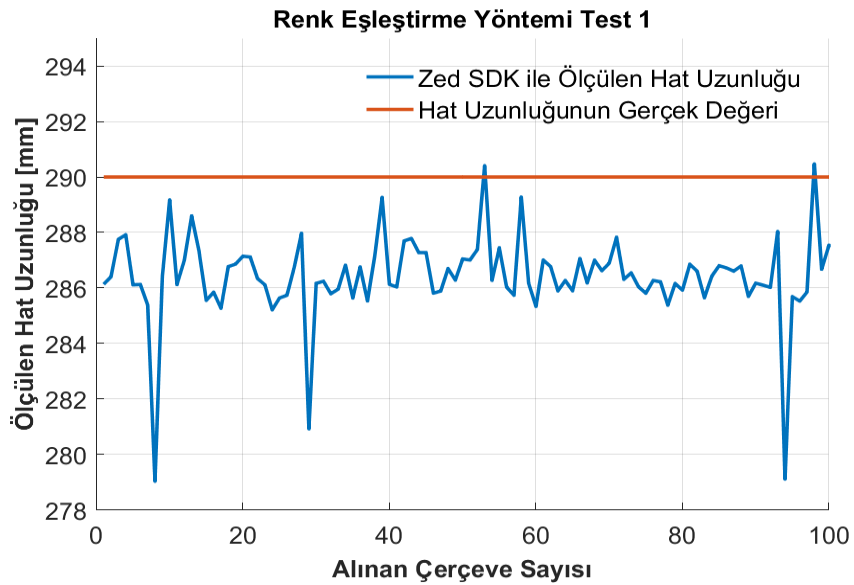
HSV renk uzayı kullanılarak kırmızı renk için H:[10, 25], S:[90, 245], V:[20, 235] aralığı ve mavi renk için H:[75, 130], S:[90, 245], V:[20, 235] tercih edilmiştir.



Şekil 3.23 – Renk Eşleştirme Yöntemi Testi İçin Oluşturulan Düzenek

Şekil 3.23'te gösterildiği gibi 100 × 50 mm çerçeve uzunluklarına sahip 2 adet dikdörtgen ile bir düzenek oluşturulmuştur. Kırmızı ve mavi dikdörtgenler arasındaki mesafe 290 mm'dir. Zed Stereo Kamera ile 1 metre uzaklıktan ölçüm alınmıştır. Dikdörtgenlerin çevresi renk uzayında belirlenen aralıklarla maskelenip Opencv kütüphanesinin konturları bulma komutuyla (cv2.findContours) kenar pikselleri bulunmuştur. Daha sonra orta noktanın x eksenini için $(x_2 - x_1)/2$ denklemi ve y eksenini için $(y_2 - y_1)/2$ denklemi ile x ve y piksel değerleri bulunur. Zed kamera SDK'si piksel değerleri bilinen noktaların konumunu milimetre cinsinden veren bir kullanıcı fonksiyonudur. Bulunan piksel değerleri kullanılarak Zed kamera SDK'si ile derinlikler kaydedilmiştir. Daha sonra kırmızı ve mavi renk uzaylarının arasındaki mesafe Eşitlik (3.49) ile bulunmuştur. Yapılan testteki ölçüm sonuçları Şekil 3.24'te gösterildiği gibidir.

$$\text{iki nokta arasındaki uzaklık} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (3.49)$$

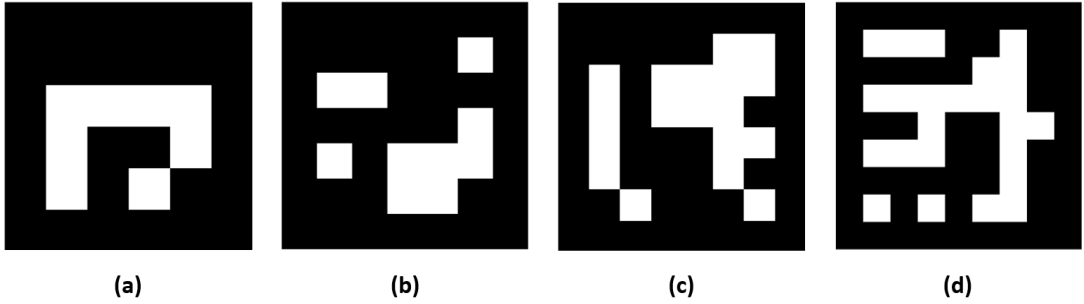


Şekil 3.24 – Kurulan Düzeneğe Göre Zed SDK'si ile Alınan Ölçüm Uzaklıkları

Yapılan testte sapmaların çok olduğu gözlemlenmiştir. Hassas mesafe ölçümü için sapmaların en aza indirilmesi gerekmektedir. Bu durumda farklı yöntem arayışlarına gidilmiştir. Yapılan literatür araştırmasına göre Rodriguez ve ark. (2021) yaptığı çalışmada, Aruco ve Apriltag gibi işaretçileri karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırmalara göre hız ve hassaslıkta önde gelen Aruco işaretleyicisi yöntemine geçilmiştir.

3.3.3.3.4. Aruco İşaretleyicisi

Muñoz ve Garrido (2014) tarafından geliştirilen işaretçi, robot algoritmaları, poz tahmini ve SLAM uygulamalarında kullanılmaktadır. Aruco işaretleyicileri Opencv Aruco Marker kütüphanesi sayesinde kullanım kolaylığına sahiptir. Siyah beyaz piksellerden oluşması hızlı tespit edilmesini kolaylaştırmıştır. İkili kodlamadan oluşması, hata algılama ve düzeltme tekniklerinin uygulanmasına izin vermektedir.



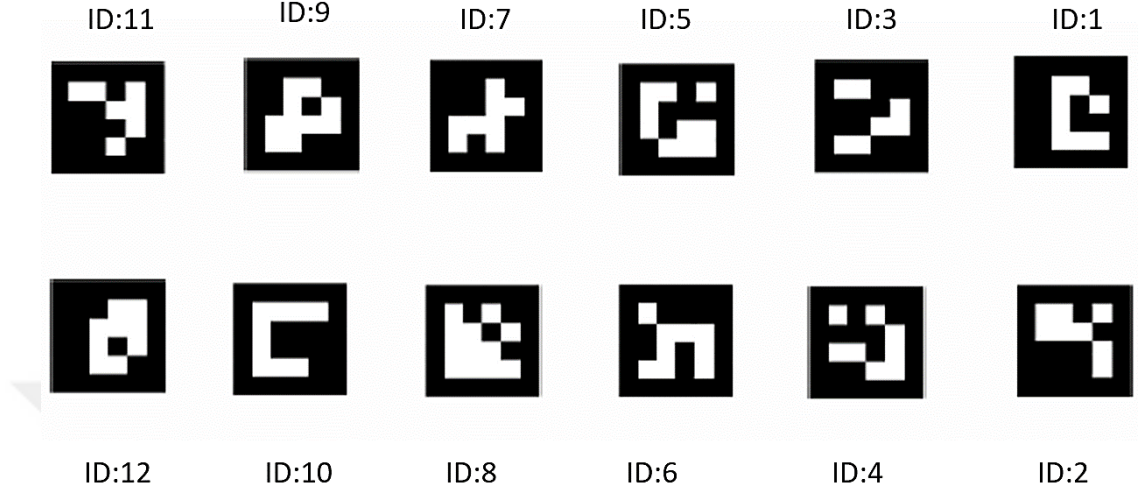
Şekil 3.25 – Farklı Bit Değerlerindeki Aruco İşaretleyicileri, (a) 4×4 Bit Değerine Sahip, (b) 5×5 Bit Değerine Sahip, (c) 6×6 Bit Değerine Sahip, (d) 7×7 Bit Değerine Sahip

Şekil 3.25'te gösterildiği gibi 4×4 16 bittten 7×7 49 bite kadar farklı karmaşıklıklarda 4 farklı konfigürasyonda bulunmaktadır. Testlerde kullanılmak üzere işaretçilerde Şekil 3.26'daki 4×4 konfigürasyonu olan kenar uzunluğu 10 mm Aruco işaretçileri tercih edilmiştir.

Aruco işaretleyicileri yüksek saniye kare oranına sahip ve kenar bulmada en başarılı işaretleyiciler arasındadır. Bu iki kriter işaretçi seçimindeki temel yaklaşımı oluşturmuştur. Opencv kütüphanesinin öğretici dokümanına (OpenCV: Detection of ArUco Markers, 2022) göre işaretçilerin tespiti iki ana adımdan oluşur.

1. İşaretçi adımlarının tespiti: Bu adımda kare şekilleri analiz edilir, çok büyük ve çok küçük kareler elimine edilir. Kalan kareler aday kareler olarak isimlendirilir.

2. Aday tespitinden sonra aday olan karelerin, kullanılan konfigürasyona (4×4, 5×5, 6×6, 7×7) göre işaretçi bitleri kontrol edilir ve numarası belirlenir.

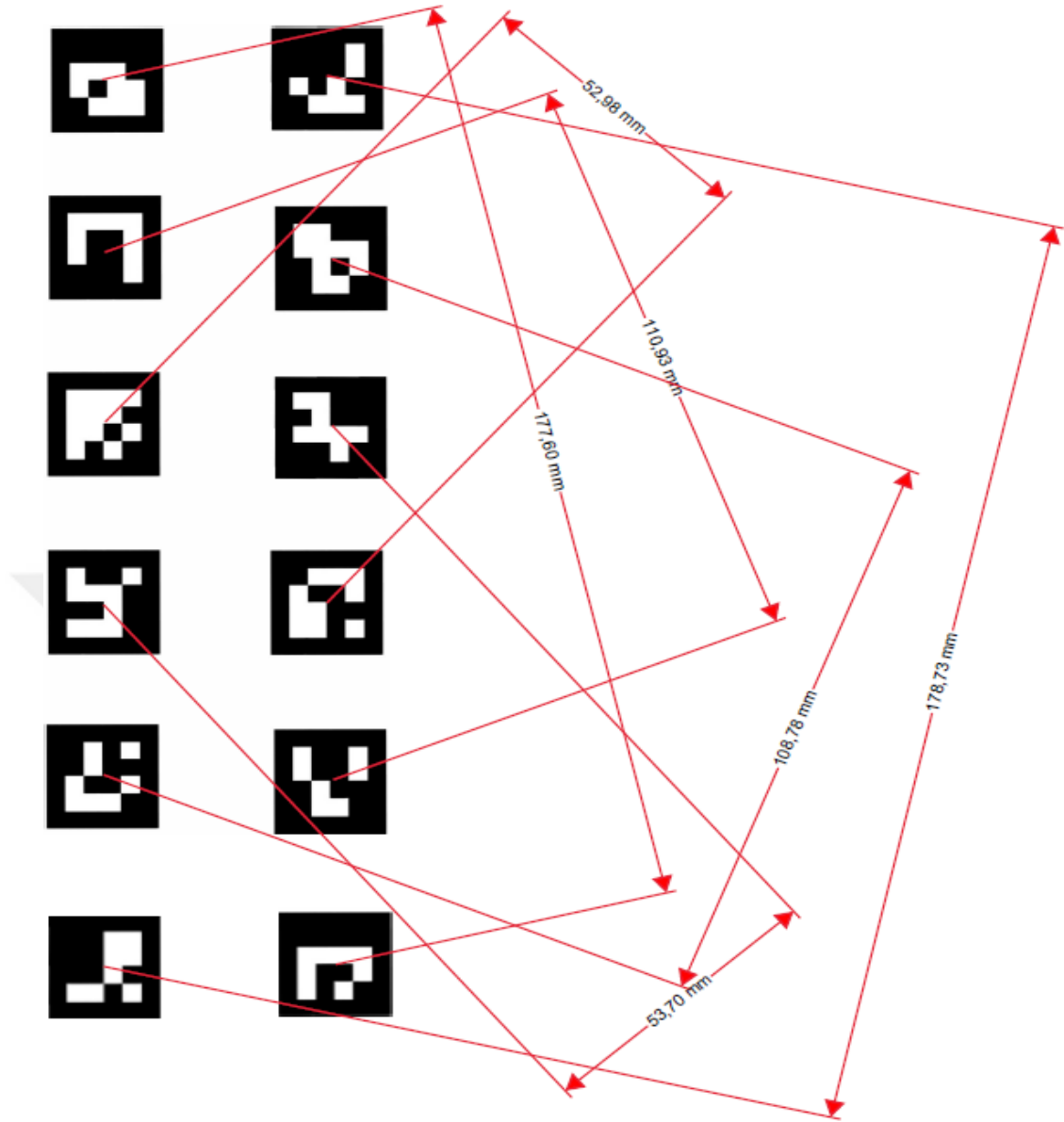


Şekil 3.26 – 4×4 Konfigürasyonundaki Kullanılan Aruco İşaretleyicileri

3.3.4. Kamera Tercih

Endüstriyel kameralarla yüksek hassasiyetli derinlik ölçümü yapabilmek için Şekil 3.27’de gösterilen test düzeneği kullanılarak hem Zed kamera hem de Intel RealSense ile çeşitli testler gerçekleştirilmiştir. Bu test düzeneğinde işaretleyiciler arasında oluşan hat mesafeleri Çizelge 3.3’te gösterilmiştir.

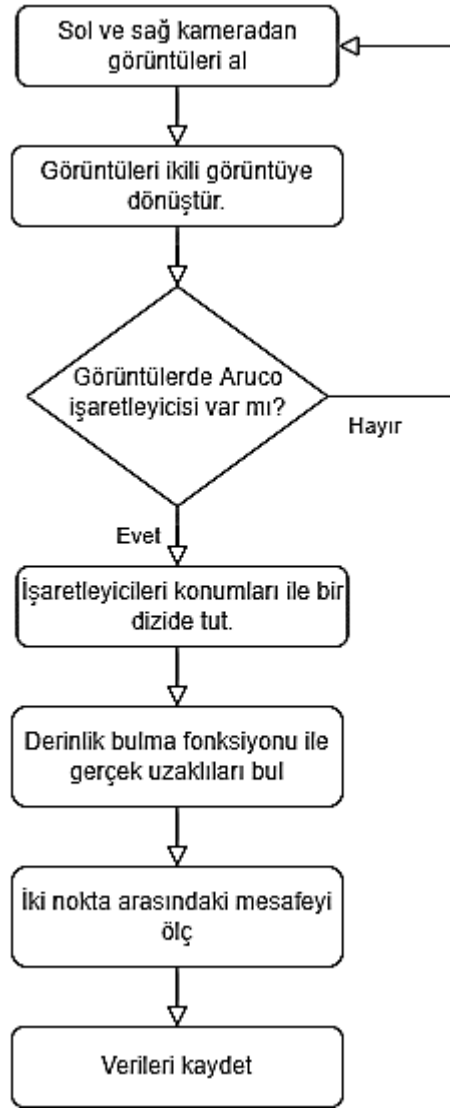
Şekil 3.28’de gösterilen algoritmayla Şekil 3.29’daki ortamda hangi kameranın performansının daha yüksek olduğu test edilmiştir. Bu tez çalışmasında Intel RealSense ve Zed kameraları test edilerek en uygun olanı belirlenmiştir. Yapılan testlerde beyaz arka plan kullanılmış ve kalibrasyon için kameraların kendi kalibrasyon uygulamaları (Intel RealSense Calibration Tool 2.11.1.0 ve Zed Calibration App) tercih edilmiştir.



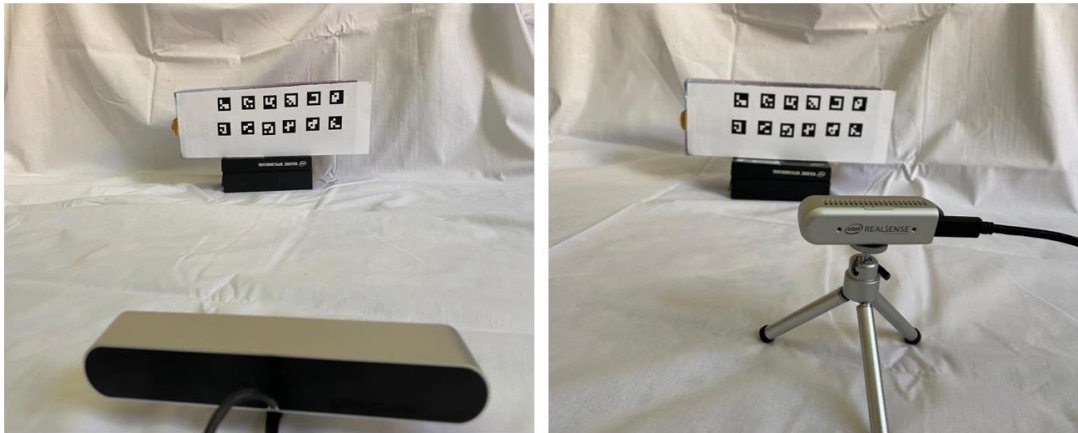
Şekil 3.27 – Aruco 4x4 İşaretleyicileri Test Düzeneği ve Mesafeleri

Çizelge 3.3. Test Düzeneğindeki Hat İsimleri ve Mesafeleri

Oluşturulan Hat İsimleri	Mesafe (mm)
Hat 1 (İşaretleyici 1 ve 12)	177.6
Hat 2 (İşaretleyici 2 ve 11)	178.73
Hat 3 (İşaretleyici 3 ve 10)	110.93
Hat 4 (İşaretleyici 4 ve 9)	110.78
Hat 5 (İşaretleyici 5 ve 8)	52.98
Hat 6 (İşaretleyici 6 ve 7)	53.70



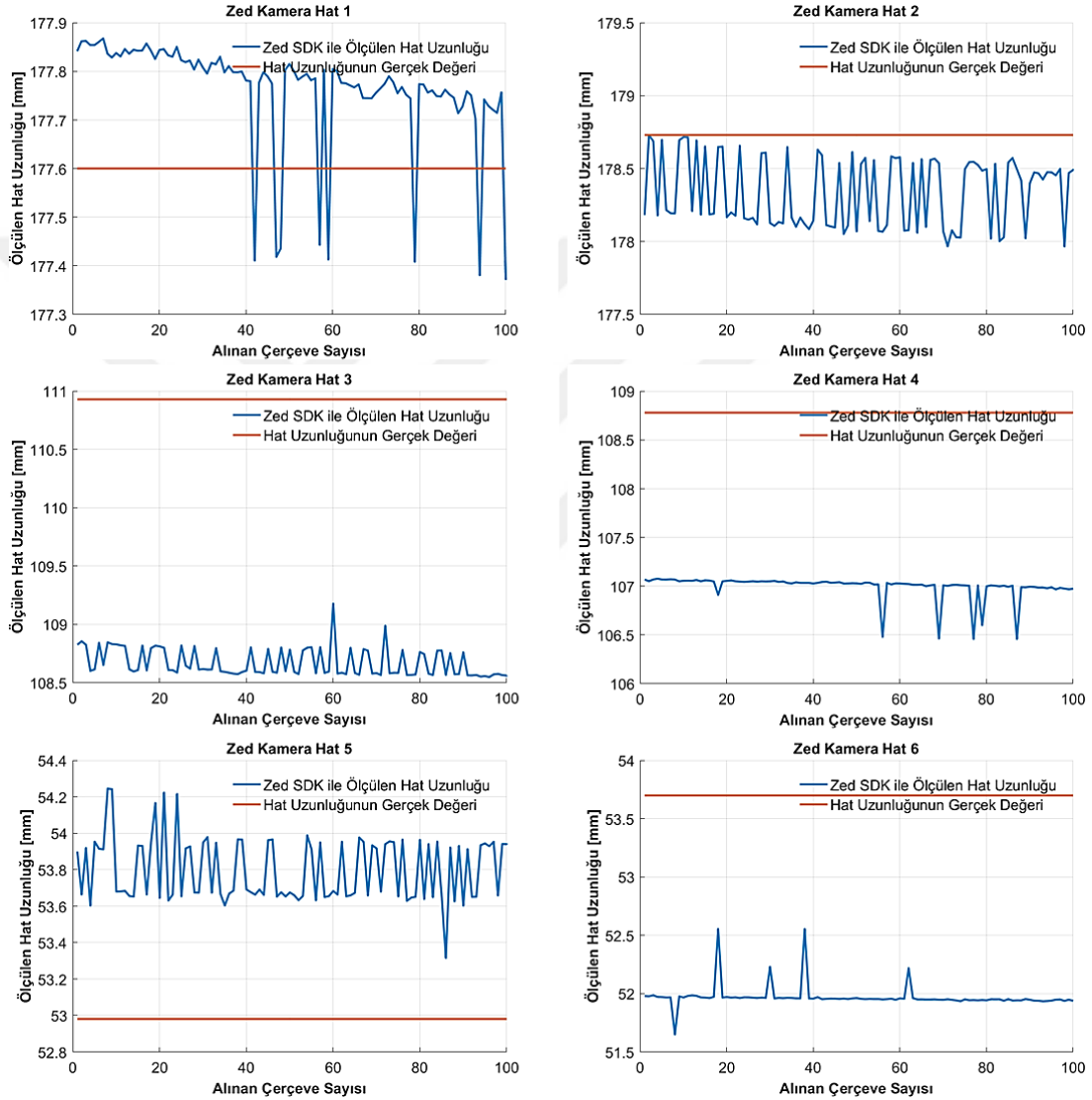
Şekil 3.28 – Zed ve Real Sense Kamera ile Yapılan Testin Algoritma Akış Diyagramı



Şekil 3.29 – Zed Kamera ve Intel RealSense ile Beyaz Arka Plan Kullanılarak Yapılan Test Görsel

Zed Kamera Kalibrasyon Uygulaması ile Çizelge 3.2’deki “Zed Kalibrasyon Uygulaması” değerleri kullanılarak kalibre edilmiştir. İki kameradan alınan görüntüler

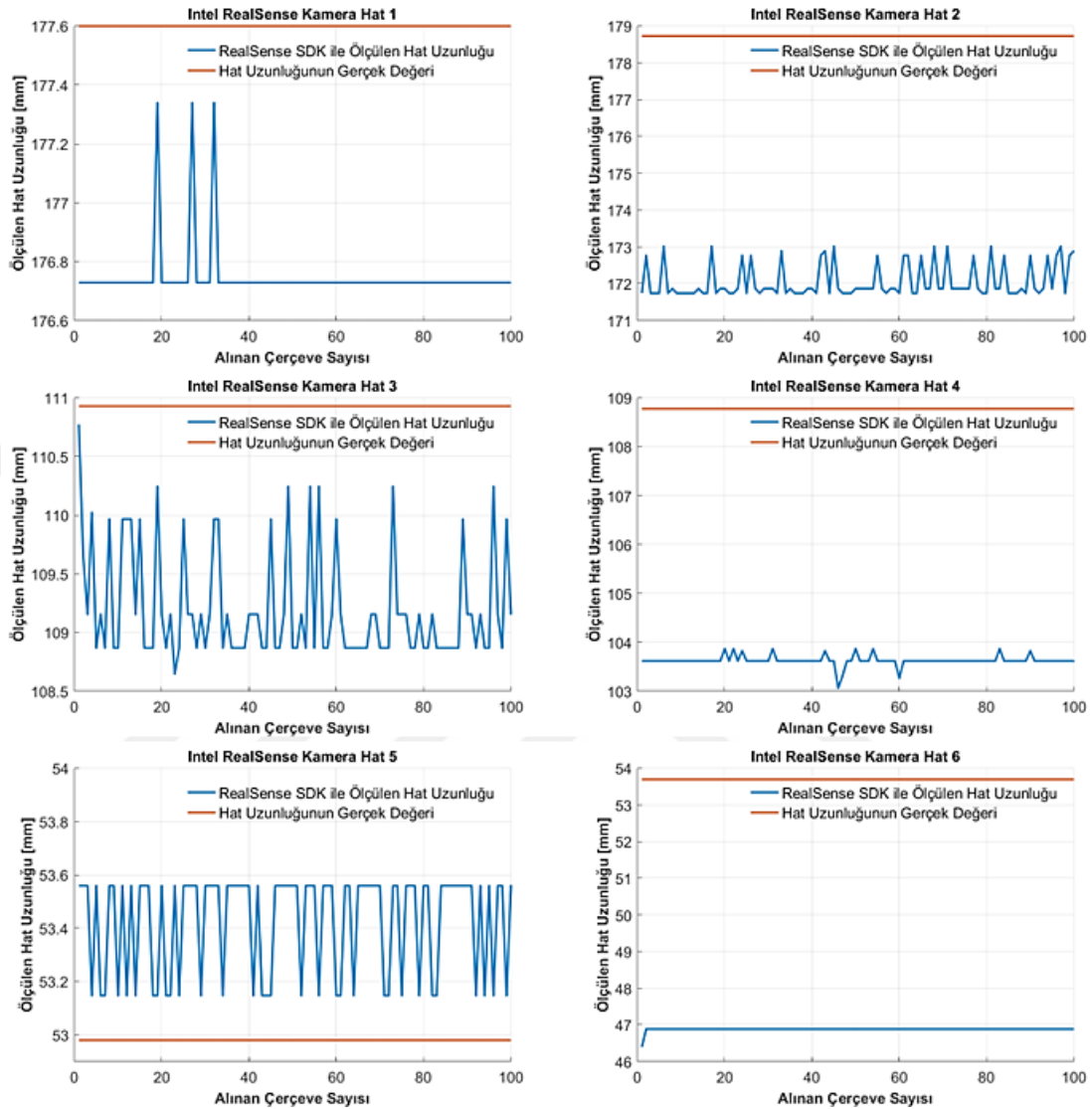
ikili (*binary*) görüntüye dönüştürülmüş ve Aruco tespit algoritması iki kamera için de çalıştırılmıştır. İki kameradan alınan işaretçi numaraları ve işaretleyicinin kenar değerleri bir dizide tutulmuştur. Bulunan bu piksel değerleri Zed SDK'sine verilmiş ve dünya koordinat sistemindeki x, y, z mesafe değerleri alınmıştır. Alınan bu mesafe değerleri ile Şekil 3.27'de gösterilen mesafeler, Eşitlik (3.49)'daki uzaklık formülü ile hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Şekil 3.30'da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.30 – Beyaz Arka Planlı Test Düzenegi ile Zed Kamera Kullanılarak Alınan Değerler

Intel RealSense stereo kamera ile en yüksek çözünürlük seçeneği olan 1280×720 piksel çözünürlüğünde çalışılmıştır. Stereo görüntü sadece tek renk olarak kullanılabildiği için lazer iletici açıkken ekranda lazer noktaları gözükmemektedir. Bu da işaretleyicilerin bulunamamasına sebep olmaktadır. Bu problemi önlemek için ilk

olarak lazer iletici kapalı halde Aruco işaretleyici konumları bulunur daha sonra lazer iletici açılarak Intel RealSense SDK'sinin ölçtüğü konum verileri kaydedilmiştir.



Şekil 3.31 – Beyaz Arka Planlı Test Düzenegi ile RealSense Kamera Kullanılarak Alınan Değerler

Yapılan testler Şekil 3.30 ve Şekil 3.31'de gösterilmiştir. RealSense stereo kameranın düşük çözünürlüğü ve Aruco işaretleyicilerin 10×10 mm boyutunda olması nedeni ile testler maksimum 250 mm uzaklıktan gerçekleştirilmiştir. Daha uzaktan yapılan testlerde işaretleyiciler çözülemediği için sonuç alınamamıştır. Düşük çözünürlük nedeni ile milim altı hassasiyete ulaşamayacağı görülmüş ve testlere Zed Stereo kamera ile devam edilmiştir.

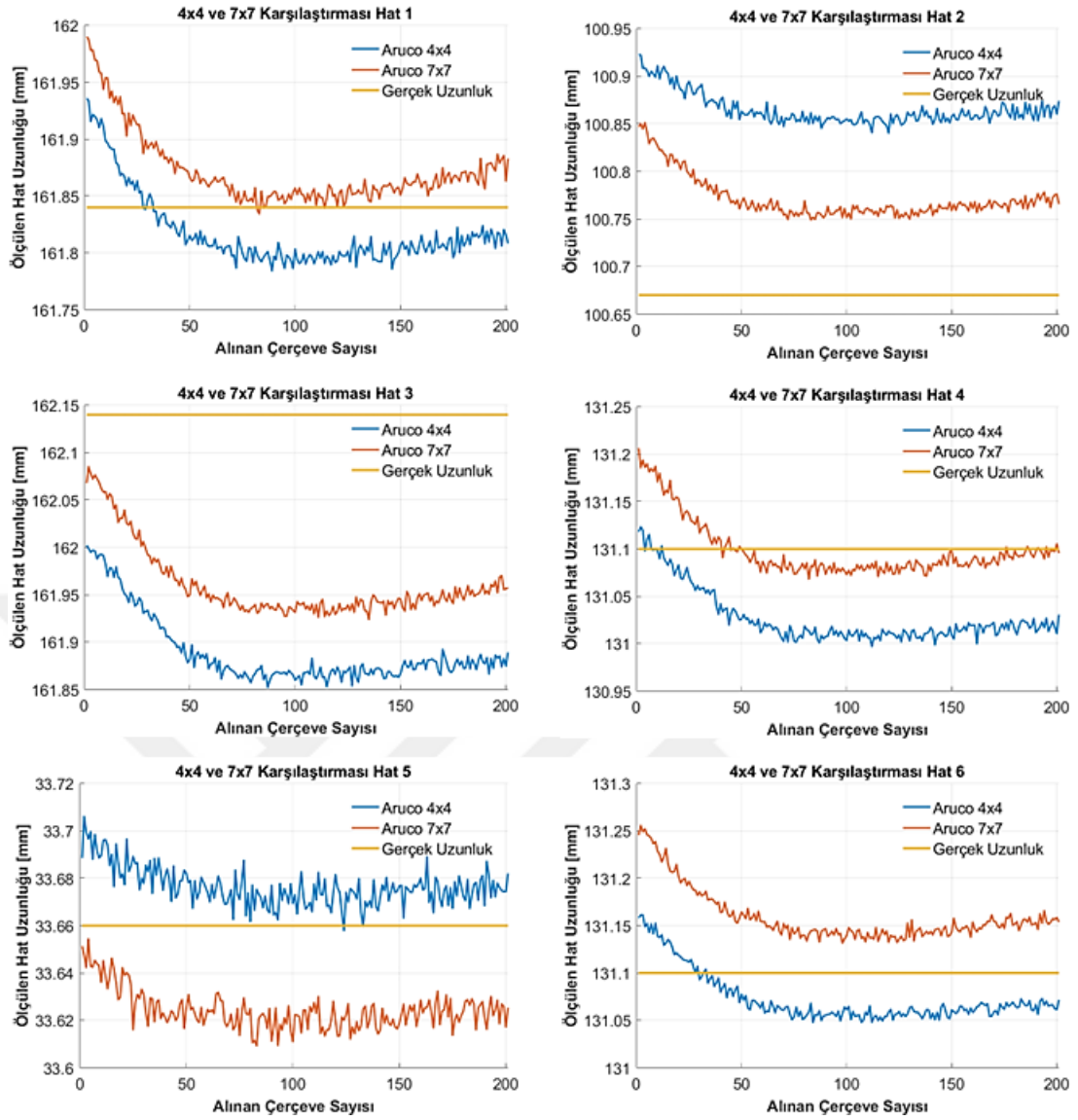
3.3.5. Aruco İşaretleyicisi Konfigürasyon (7×7 ve 4×4) Karşılaştırması

Aruco işaretleyicisi Şekil 3.25'te gösterilen 4 farklı bit değerine (4×4 16 bit, 5×5 25 bit, 6×6 36 bit ve 7×7 49 bit) sahiptir. Bu bit değerlerinden maksimum olanı (7×7 49 bit) ve minimum olanı (4×4 16 bit) karşılaştırılarak en uygun olanı seçilmiştir.

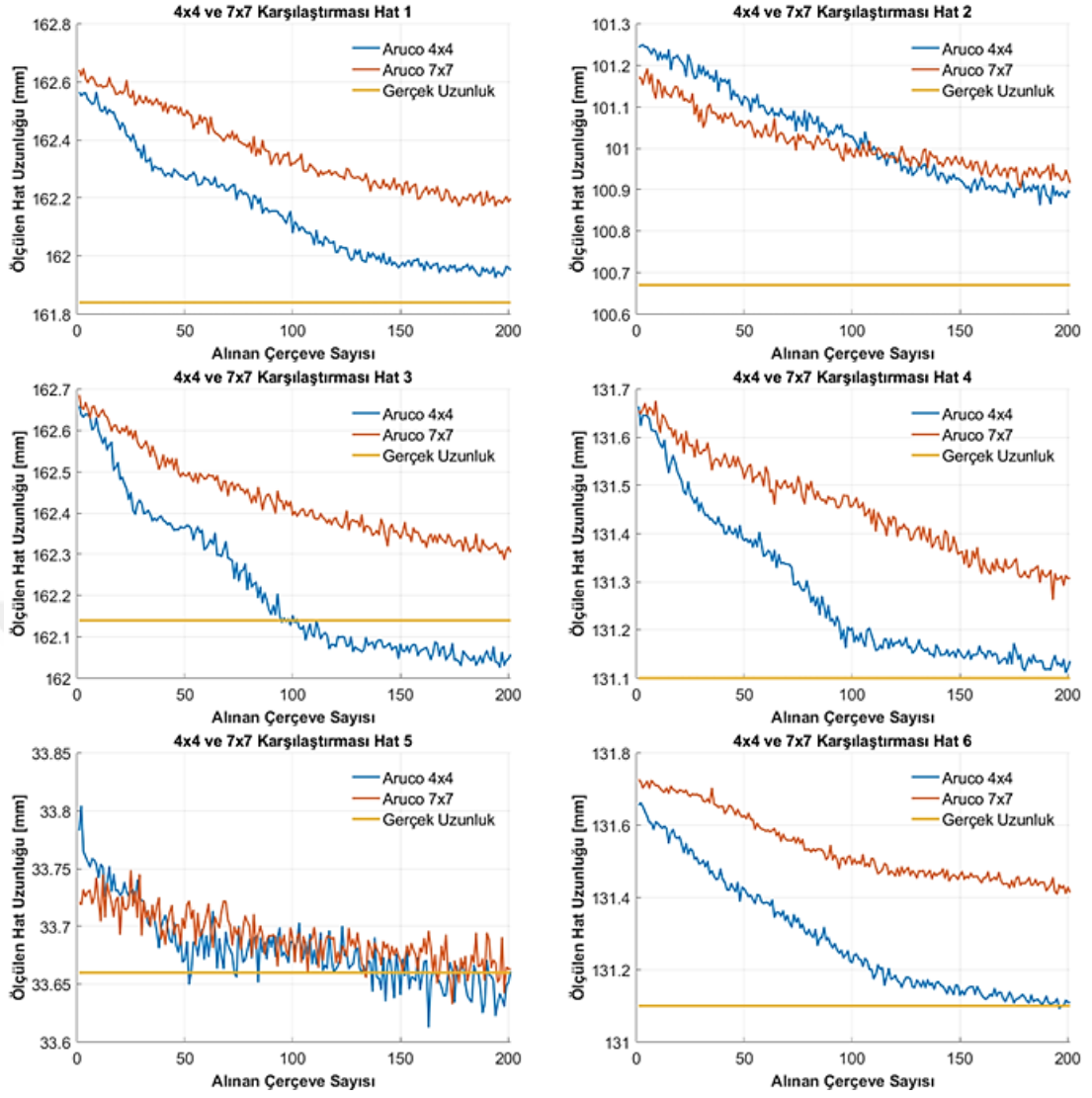
900 mm, 600 mm ve 300 mm uzaklıktan 4×4 konfigürasyonunda Aruco işaretleyicisi ve 7×7 konfigürasyonundaki Aruco işaretleyicisi karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan testler 12'şer işaretleyici içeren ve birbiri arasındaki uzaklıkları bilinen bir test ortamında yapılmıştır. Her bir test 200'er çerçeve alınarak yapılmıştır. Ölçülen mesafe hataları ve sapma değerleri karşılaştırılmıştır. Testlere ait sonuçların karşılaştırması Çizelge 3.4'te gösterildiği gibidir.

Çizelge 3.4. Aruco İşaretleyicisinin 4×4 ve 7×7 Konfigürasyonu Karşılaştırma Sonuçları

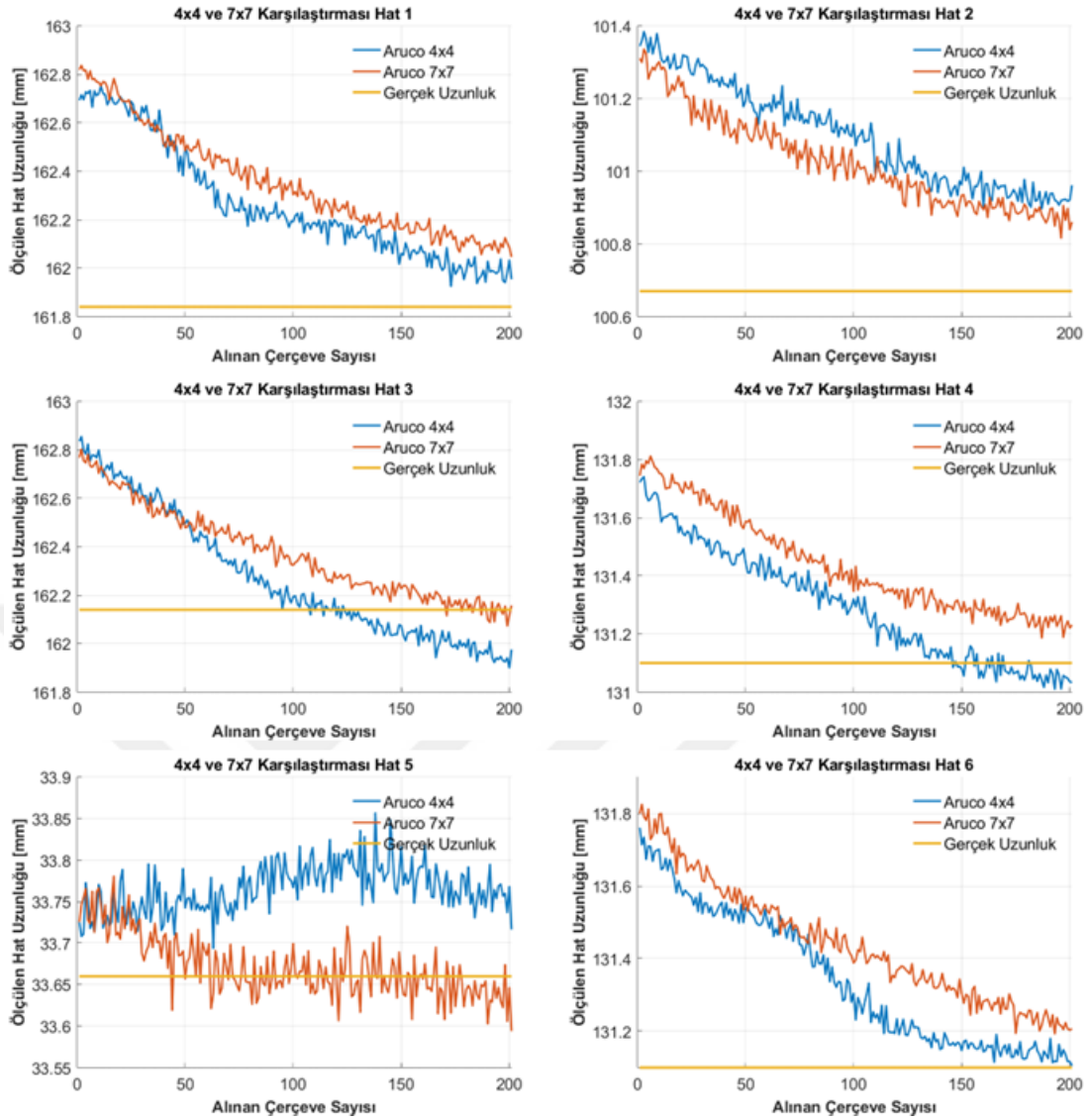
Hat	300 mm Mesafe		600 mm Mesafe		900 mm Mesafe		
	Aruco 4×4	Aruco 7×7	Aruco 4×4	Aruco 7×7	Aruco 4×4	Aruco 7×7	
Mesafe Hatası (mm)	1	0.022	0.032	0.308	0.519	0.537	0.985
	2	0.194	0.101	0.361	0.343	0.515	0.640
	3	0.250	0.179	0.078	0.295	0.277	0.641
	4	0.072	0.001	0.174	0.354	0.299	0.696
	5	0.016	0.035	0.021	0.030	0.100	0.097
	6	0.026	0.059	0.186	0.437	0.362	0.716
Standart Sapma (mm)	1	0.031	0.031	0.185	0.138	0.086	0.223
	2	0.016	0.022	0.114	0.067	0.046	0.146
	3	0.036	0.037	0.177	0.102	0.070	0.227
	4	0.028	0.029	0.152	0.103	0.087	0.182
	5	0.007	0.008	0.032	0.021	0.025	0.054
	6	0.026	0.027	0.163	0.095	0.071	0.179



Şekil 3.32 – 300 mm Uzaktan Yapılan Testteki İşaretleyici Performans Karşılaştırması



Şekil 3.33 – 600 mm Uzaklıktan Yapılan Testteki İşaretleyici Performans Karşılaştırması



Şekil 3.34 – 900 mm Uzaklıktan Yapılan Testteki İşaretleyici Performans Karşılaştırması

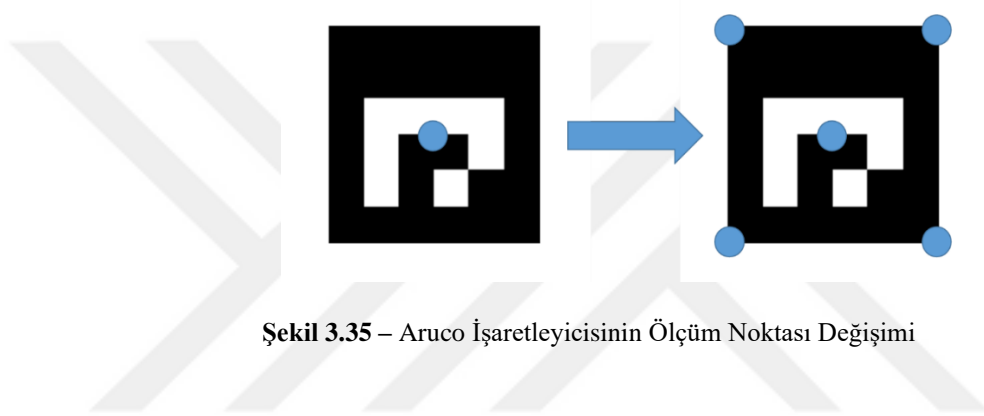
Yapılan testlerin sonuç grafikleri Şekil 3.32, Şekil 3.33 ve Şekil 3.34'teki gibidir. Testlerdeki ortalama saniyedeki kare sayısı 16 bit işaretleyici konfigürasyonunda saniyede 4.096 çerçeve görülmesine karşılık 49 bitlik işaretleyici ile yapılan testte saniyede 4.053 çerçeve görülmüştür. Bu veriler incelendiğinde yakın mesafelerde neredeyse aynı performans gösteren işaretleyicilerin uzak mesafelerde hata paylarının arttığı gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni, çözünürlüğün azaldığı durumlarda daha yüksek çözünürlüğe sahip 7x7 işaretleyicilerin çözümlemedeki hatalarının artmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan tez çalışmasında 4x4 konfigürasyonundaki Aruco işaretleyicileri kullanılmıştır.

3.3.6. Derinlik Sonuçlarındaki Hassasiyetin Artırılması

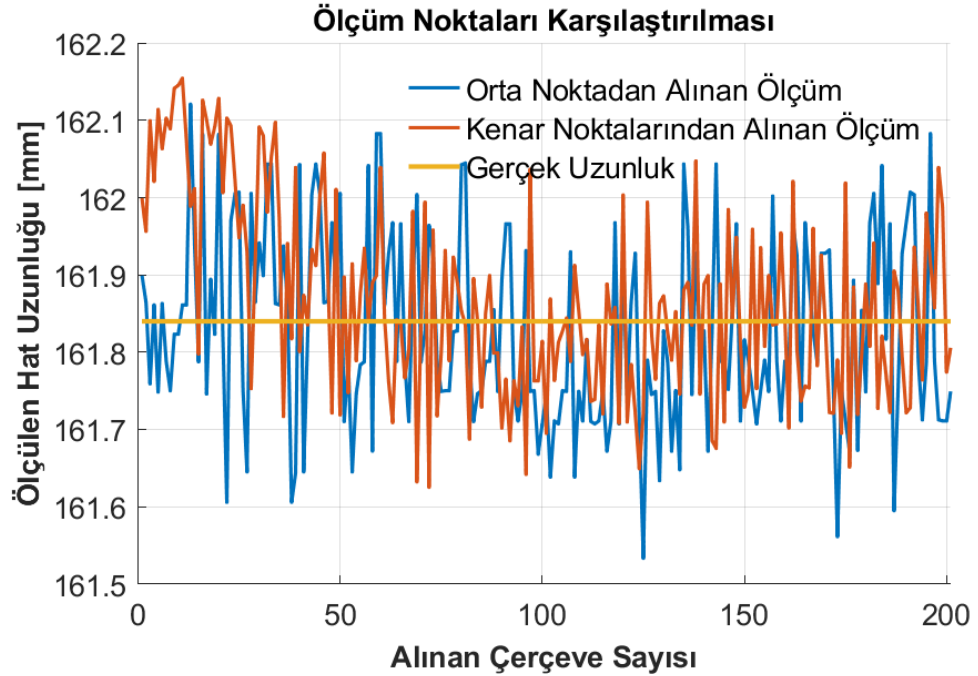
Yapılan testlerde Aruco işaretleyicisi ile hassasiyetin yüksek seviyede arttığı gözlemlenmiştir. Fakat yüksek hassasiyetli bir derinlik ölçümü için bu hassasiyetin daha da artırılmasına ihtiyaç duyulmuştur.

3.3.6.1. İşaretleyicilerin Farklı Noktalarını Kullanarak Hassasiyetin Artırılması

Ölçümlerdeki sapmaları azaltmak için önceden Aruco işaretleyicisinin tam orta noktasından alınan ölçümler, Şekil 3.35'te gösterildiği gibi köşe noktalarından ve orta noktasından alınan ölçümlerin ortalaması ile değiştirilmiştir.



Şekil 3.35 – Aruco İşaretleyicisinin Ölçüm Noktası Değişimi



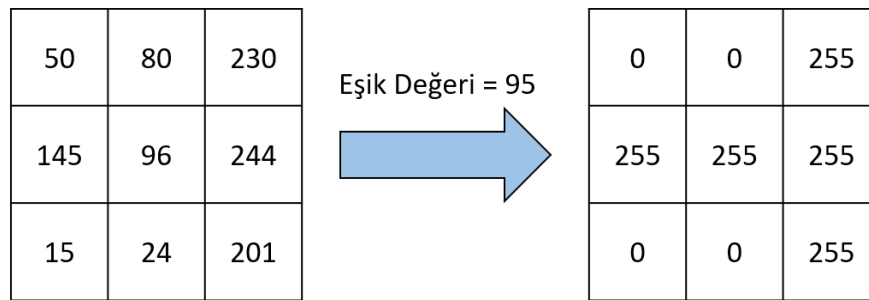
Şekil 3.36 – 300 mm Uzaklıktan Yapılan Testte Farklı Noktalardan Alınan Verilerin Karşılaştırılması Grafiği

300 mm uzaklıktan yapılan testte sadece orta nokta ile alınan mesafe ile köşe noktaları ve orta nokta piksel değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanan uzaklık karşılaştırması Şekil 3.36'da gösterildiği gibidir. Yapılan bu testte işaretleyicinin sadece orta noktasından alınan ölçümlerin standart sapma değeri 0.1236 mm iken 5 noktanın ortalama piksel değerleri ile yapılan testin standart sapma değeri 0.0783 mm olduğu görülmüştür. Böylece bu yöntemin sapmaları azalttığı belirlenmiştir.

3.3.6.2. Gürültülerin Azaltılması İçin İkili Görüntünün Kullanılması

İşaretleyicilerin konumunun belirlenebilmesinde köşe noktaları kullanılmıştır. Fakat görüntü alınan mesafeye ve ışıklandırmaya göre çözünürlük kaybı yaşandığı görülmüştür. Çözünürlüğün azalması köşe noktalarının bulanık olarak görülmesine yol açmış ve sapmaların artmasına sebep olmuştur. Bulanık görüntülerin düzleştirilmesi için eşik değeri uygulamaları olan küresel eşik değeri (Gonzalez, 2007), adaptif eşik değeri (Gonzalez, 2007) ve Otsu binarizasyonu (Otsu, 1979) yöntemleri karşılaştırılmıştır.

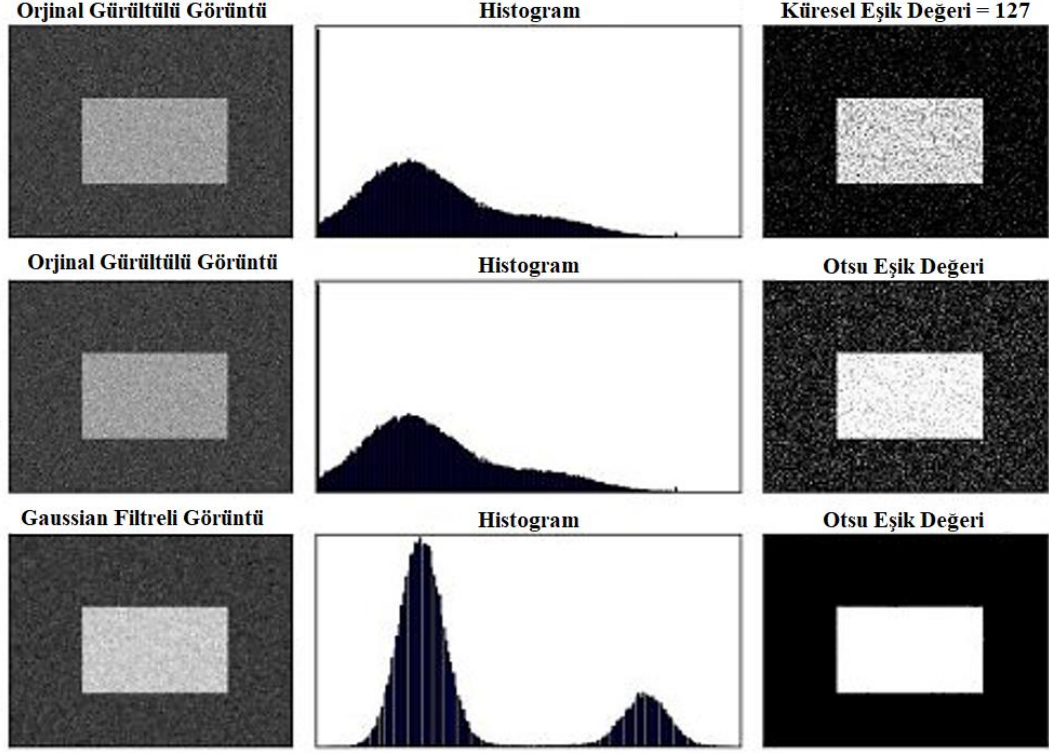
Küresel eşik değeri, gri görüntüyü belirlenen bir eşik değerine göre ikili görüntüye dönüştürmek için kullanılan bir eşik değeri yöntemidir. 3×3 bir kernele uygulanan küresel eşik değeri yöntemi Şekil 3.37'de gösterildiği gibidir ve tüm görüntüye aynı eşik değeri uygulanmaktadır.



Şekil 3.37 – Küresel Eşik Değeri Örnek Gösterimi

Otsu binarizasyon metodu ağırlıklı sınıf içi varyansı en aza indiren bir eşik değeri bulmaktadır (Otsu, 1979). Görüntünün histogramındaki yerel maksimum noktalarının arasındaki değeri eşik değeri olarak almaktadır. Şekil 3.38'de gösterilen görüntüde gürültülü bir görüntüye uygulanan küresel eşik değeri, Otsu eşik değeri ve Gaussian filtresi uygulanmış bir görüntüdeki Otsu eşik değeri metodu gösterilmiştir. Otsu eşik değerini histogram grafiğindeki sınıf içi varyansın en düşük olduğu yere göre

elde ettiği için görüntüye Gaussian filtre uygulanmıştır. Gaussian filtrelili görüntü Şekil 3.38'deki histogram grafiğinde görüldüğü gibi ayrıştırılmış olarak gözükmemektedir ve sınıf içi varyansın en düşük olduğu yer anlaşılabilir. Sınıf içi varyansın en düşük olduğu yer, uygun bir eşik değeri sağlamıştır.



Şekil 3.38 – Otsu'nun yöntemi (OpenCV Thresholding, 2022)

Küresel eşik değeri yöntemleri uygulanması kolay bir yöntem olmasına rağmen tüm görsele aynı eşik değeri uygulandığı için görüntünün tümünde etkili olmamaktadır. Yapılan tez çalışmasında geniş bir alanda ölçüm yapıldığı için yerel eşik değeri uygulaması olan adaptif eşik değeri kullanılmıştır.

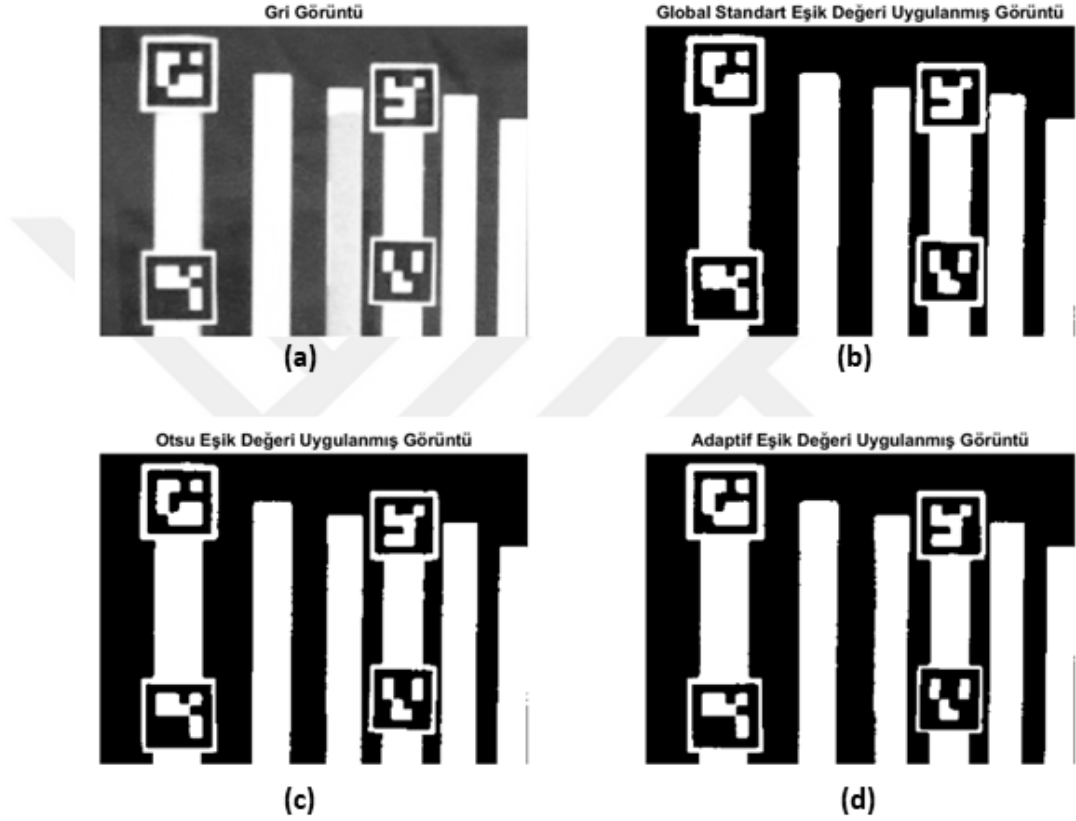
Adaptif eşik değeri, bir görüntünün farklı bölümlerine göre değişen eşik değerlerini kullanarak daha iyi sonuçlar elde etmek için kullanılmaktadır. Adaptif eşik değerlerini bulmak için Eşitlik (3.50)'de gösterilen ortalama formülü ya da Eşitlik (3.51)'deki Gaussian ağırlıklı toplam formüllerini kullanılmaktadır. Gaussian ağırlıklı toplamı, bir görüntüde bölümlerinin ağırlıklandırılarak bir araya getirilmesi sırasında kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, her bir görüntü bölümüne Gaussian dağılımına göre ağırlık atanır. Görüntü işlemede görüntülerin belirli bölümlerinin

ağırlıklandırılarak bir araya getirilmesi sırasında kullanılır ve bu sayede daha keskin ve net bir görüntü elde edilmektedir.

$$Ortalama = \frac{\sum_{k=1}^n imaj(k)}{n} \quad (3.50)$$

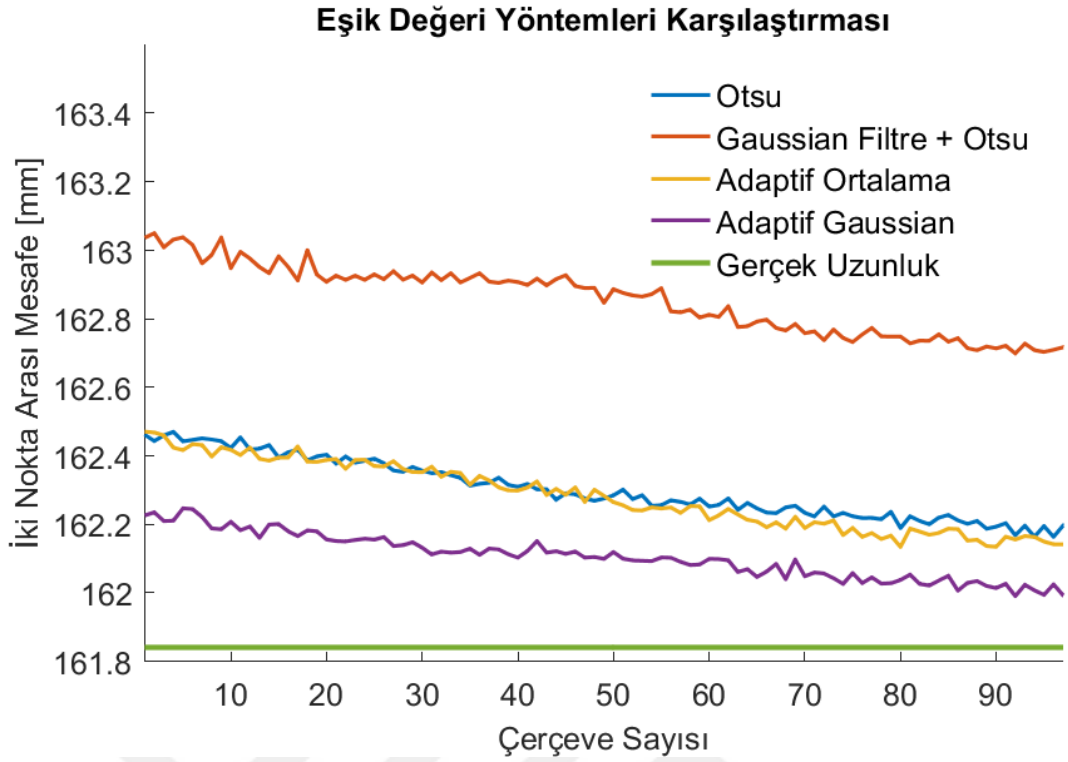
$$Gaussian Ağırlıklı Toplam = \sum w(x, y) \times imaj(x, y) \quad (3.51)$$

$$w(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (3.52)$$



Şekil 3.39 – (a) Orijinal Görüntüye Uygulanmış Gri Görüntü, Gri Görüntüye Uygulanmış Eşik Değeri Yöntemleri; (b) Küresel Eşik Değeri Uygulanmış Görüntü (Eşik Değeri = 127), (c) Otsu Eşik Değeri Uygulanmış Görüntü, (d) Adaptif Eşik Değeri Uygulanmış Görüntü

Şekil 3.39’da gösterilen görüntüde adaptif eşik değeri uygulanan görüntüdeki işaretleyicilerin kenarları diğer yöntemlere göre daha keskin ve net bir şekilde görülmektedir. Fakat bu şekildeki Otsu ve adaptif eşik değeri yöntemleri ortalama (Eşitlik (3.50)) alınarak uygulanmıştır. Gaussian filtresi uygulanmış Otsu binarizasyonu yöntemi ve Gaussian ağırlıklı toplam formülü (Eşitlik (3.51)) kullanan adaptif eşik değerlerinin karşılaştırıldığı test sonuçları Çizelge 3.5’te gösterilmiştir. Test verileri ise Şekil 3.40’ta gösterildiği gibidir.



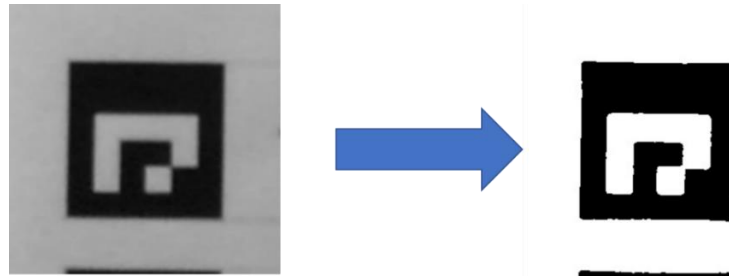
Şekil 3.40 – Eşik Değeri Yöntemlerinin Test Sonuçları

Çizelge 3.5. Eşik Değeri Yöntemlerinin Karşılaştırması Sonuçları

	Otsu Binarizasyonu	Gaussian Filtre Uygulanmış Otsu Binarizasyonu	Adaptif Eşik Değeri Ortalama	Adaptif Eşik Değeri Gaussian Ağırlıklı Toplam
Uzunluk Hata [mm]	0.341	0.416	0.291	0.163
Uzunluk Standart Sapma Değeri [mm]	0.071	0.084	0.075	0.048

Elde edilen sonuçlara göre tez uygulamasında kullanılan adaptif eşik değeri yönteminin Otsu yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Eşitlik (3.51)'deki formülü kullanan Gaussian ağırlıklı toplam adaptif eşik değeri yöntemi, Eşitlik (3.50)'deki formülü kullanan adaptif eşik değeri yöntemine göre ortalama %55.8 daha iyi sonuç vermiştir.

Gaussian ağırlıklı toplam adaptif eşik değeri yöntemi uygulanmış işaretleyici görüntüsü Şekil 3.41'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.41 – Gaussian Ağırlıklı Ortalama Adaptif Eşik Değeri Yöntemi Uygulanmış İşaretleyici Görüntüsü

3.3.6.3. Süper Çözünürlüklü Görüntüleme

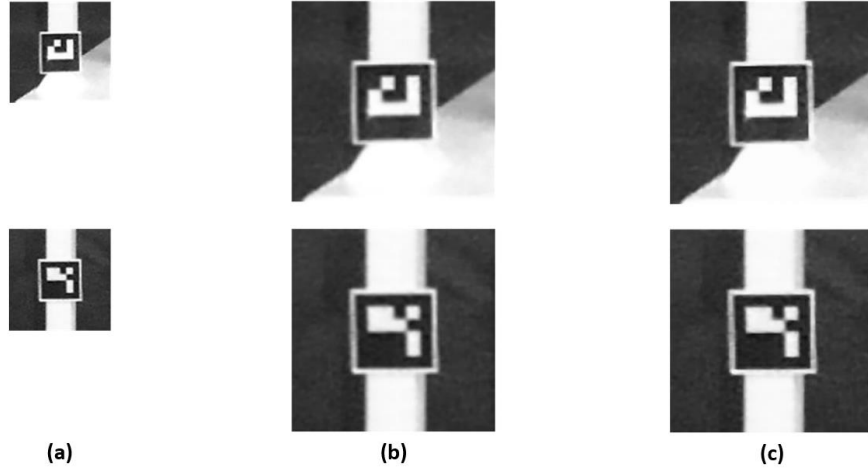
Hassas derinlik ölçümünde çözünürlük oldukça önemlidir. Özellikle uzaktan alınan ölçümlerde çözünürlüğün azalması yanlış sonuçların artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle derin öğrenme tabanlı süper çözünürlüklü görüntüleme yöntemleri kullanılmıştır. Süper çözünürlük yöntemi çözünürlüğü artırarak görüntüleri 2, 3, 4 ve 8 kat yakınlıştırmayı başaran derin öğrenme tabanlı yöntemlere verilen genel isimdir.

Bölüm 2.4’te bahsedilen Tensorflow alt yapısıyla kurulan 3 adet derin öğrenme modeli (VAPESA (Shi ve ark., 2016), HSÇESA (Dong ve ark., 2016), DLPSÇSA (Lai ve ark., 2017)) klasik yeniden boyutlandırmayla (bikübik interpolasyon (Keys, 1981)) karşılaştırılacaktır. Bikübik interpolasyonu, yalnızca 4 pikseli (2×2) hesaba katan çift doğrusal interpolasyon aksine, 16 pikseli (4×4) dikkate alır. Çoğunlukla görüntülerin yeniden boyutlandırmasında kullanılmaktadır.

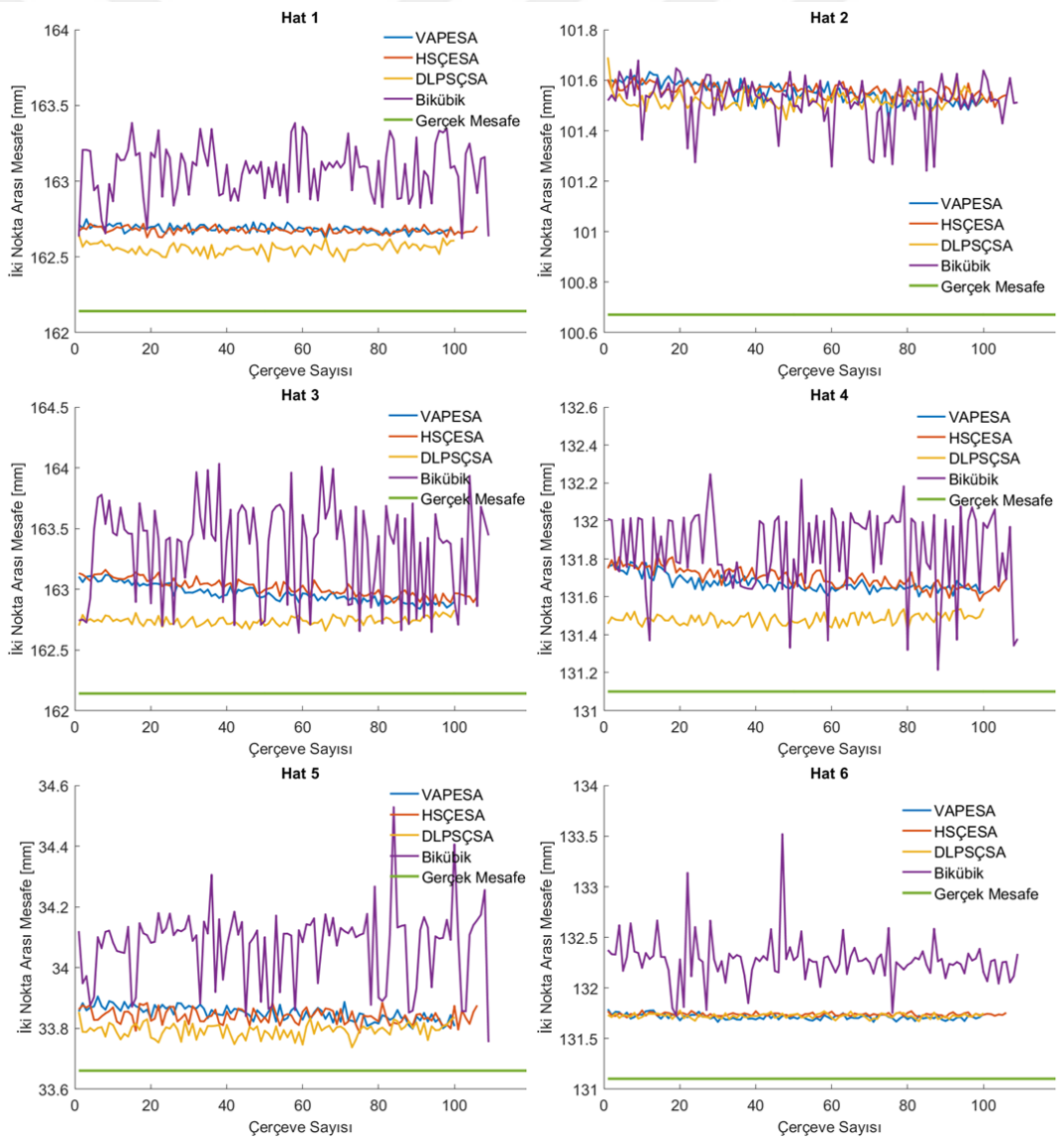
SSIM, benzerlik indeksi ölçüsüdür ve referans resme göre benzerlik oranını gösteren bir karşılaştırma metodudur. Süper çözünürlük yöntemlerinin 400 mm ve 1000 mm uzaklıktan SSIM oranları karşılaştırılması Çizelge 3.6’da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre düşük saniyedeki çerçeve oranı vermesine rağmen daha yüksek benzerlik oranına sahip DLPSÇSA süper çözünürlük metodu kullanılmıştır.

Çizelge 3.6. SSIM Karşılaştırması ve Saniyedeki Çerçeve Sayısı

	Testlerdeki Uzaklık	Bikübik İnterpolasyon	VAPESA	HSÇESA	DLPSÇSA
SSIM	400 mm	0.983	0.985	0.985	0.985
	1000 mm	0.986	0.988	0.988	0.989
Saniyedeki Çerçeve Sayısı	400 mm ve 1000 mm Ortalama	6.165	4.476	4.0038	1.491



Şekil 3.42 – (a) Orijinal Görüntü, 2 Kat Yakınlaştırma Uygulanan İşaretçiler; (b) Biküçük İnterpolasyon, (c) DLPSÇSA Süper Çözünürlük Metodu



Şekil 3.43 – Süper Çözünürlük Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Biküçük interpolasyon ve DLPSÇSA süper çözünürlük metotları ile iki kat yakınlaştırma uygulanmış işaretçiler Şekil 3.42’de gösterildiği gibidir. Şekilde görüldüğü üzere görüntülerin süper çözünürlük yöntemi ile daha keskin kenarlara sahip olduğu ve daha net olduğu görülmüştür.

Kullanılan yöntemlerin 1000 mm uzaktan yapılan ölçüm sonuçlarında mesafe hataları ve standart sapma değerlerini içeren test sonuçları Çizelge 3.7’deki gibidir. Bu bilgilere göre DLPSÇSA metodu en yavaş metot olmasına rağmen toplam mesafe hatalarında en yakın sonucu veren VAPESA’ya göre %23.66 daha iyi sonuç vermiştir. Standart sapma değerine göre ise ortalama %32.2 daha iyi sonuç vermiştir. Elde edilen test sonuçlarına göre DLPSÇSA süper çözünürlük metodu kullanılmıştır.

Çizelge 3.7. Süper Çözünürlük Karşılaştırma Sonuçları

	Hat Numarası	VAPESA	HSÇESA	DLPSÇSA	Biküçük İnterpolasyon
Mesafe Hata (mm)	1	0.544	0.535	0.415	0.930
	2	0.882	0.890	0.850	0.847
	3	0.827	0.873	0.600	1.201
	4	0.572	0.599	0.382	0.752
	5	0.189	0.179	0.133	0.416
	6	0.611	0.636	0.621	1.180
Standart Sapma (mm)	1	0.023	0.020	0.033	0.173
	2	0.040	0.024	0.031	0.095
	3	0.071	0.069	0.033	0.385
	4	0.041	0.051	0.027	0.206
	5	0.022	0.023	0.022	0.118
	6	0.026	0.015	0.022	0.234

3.3.7. Açı Hesabı

Tez çalışmasında roketin gövde ve lülesi arasındaki açığı bulmak için iki düzlem arasındaki açı formülü kullanılmıştır. Bir düzlem elde edilmesi için en az üç noktaya ihtiyaç vardır. Fakat ölçüm kaynaklı hataları azaltabilmek için her bir düzlem için (lüle düzlemi ve gövde düzlemi) altı adet nokta kullanılmıştır.

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (3.53)$$

Düzlem denklemi Eşitlik (3.53)’te gösterildiği gibidir. Bu düzlem denklemini altı noktadan elde edebilmek için En Küçük Kareler Yöntemi (Goldberger ve ark., 1964) kullanılmıştır. Bu altışar noktanın x, y ve z uzaklık verileri dizilerde tutulur. Bu

dizilerdeki noktalar x ve y uzaklıkları A dizisinde $(x, y, 1)$ olarak, z uzaklıkları da (z) olarak B dizisinde tutulur. Daha sonra A ve B dizileri matrislere dönüştürülür. Elde edilen matrisler Eşitlik (3.54) ve Eşitlik (3.55)'te gösterildiği gibidir.

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \\ x_5 & y_5 & 1 \\ x_6 & y_6 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

$$B = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \\ z_6 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

Eşitlikler elde edildikten sonra Eşitlik (3.56)'da yer alan En Küçük Kareler Yöntemi uygulanır ve Eşitlik (3.53)'te yer alan (a, b, d) kat sayıları bulunur.

$$\text{En Küçük Kareler Yöntemi} = (A^T A)^{-1} A^T B = \begin{bmatrix} a \\ b \\ d \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Eşitlik (3.56)'dan elde edilen kat sayılar Eşitlik (3.53)'te yer alan düzlem denklemine konulduğunda Eşitlik (3.57) elde edilmiştir. Yeniden düzenlenirse Eşitlik (3.58) elde edilmiştir.

$$z = ax + by + d \quad (3.57)$$

$$ax + by - z + d = 0 \quad (3.58)$$

Eşitlik (3.58)'de elde edilen denklemde x, y ve z katsayıları Eşitlik (3.59) ve Eşitlik (3.60)'ta gösterildiği gibi lüle ve gövde düzlemlerini vermektedir.

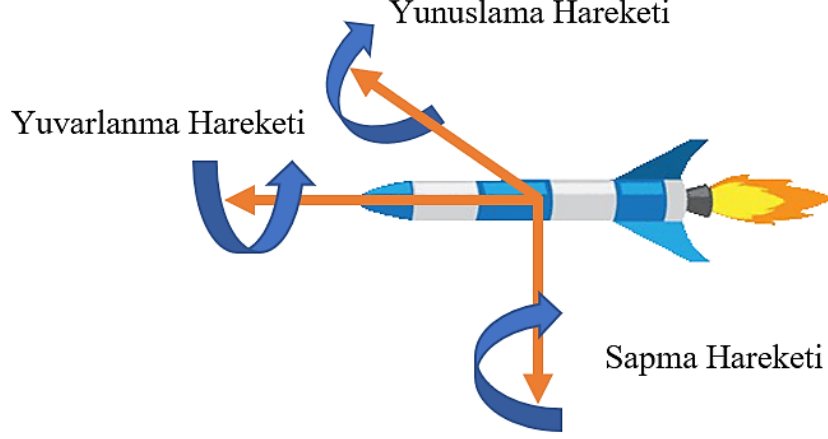
$$D_l (\text{lüle düzlemi}) = [a, b, -1] \quad (3.59)$$

$$D_g (\text{gövde düzlemi}) = [a, b, -1] \quad (3.60)$$

Düzlem denklemleri bilinen iki düzlem arasındaki açı, düzlemler arasındaki açı formülü ile Eşitlik (3.61)'deki gibi bulunur.

$$\text{Düzlemler Arasındaki Açı Formülü} = \cos^{-1} \theta = \frac{|\langle \vec{D}_l, \vec{D}_g \rangle|}{\|\vec{D}_l\| \|\vec{D}_g\|} \quad (3.61)$$

Yuvarlanma, yunuslama ve sapma eksenleri havacılık ve robotikte kullanılan hareket eksenlerini tanımlamaya yarar. Bu eksenlerin roketeye nasıl hareket vereceği Şekil 3.44'te gösterildiği gibidir.



Şekil 3.44 – Yuvarlanma, Yunuslama ve Sapma Eksenleri

Bulunan açıyı yunuslama (*pitch*) ve sapma (*yaw*) açlarına ayırmak için x ve y eksenleri,

$$x_{eksen} = [1,0,0] \quad (3.62)$$

$$y_{eksen} = [0,1,0] \quad (3.63)$$

eşitlikleri şeklinde gösterilir. Bu düzlemler kullanılarak lüle ve gövde düzlemlerinin yunuslama ve sapma açıları aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanabilir.

$$\text{Lüle Yunuslama Açısı} = \arccos\left(\frac{|D_l * x_{eksen}|}{\sqrt{|D_l^2| * \sqrt{|x_{eksen}^2|}}}\right) * \frac{180}{\pi} \quad (3.64)$$

$$\text{Lüle Sapma Açısı} = \arccos\left(\frac{|D_l * y_{eksen}|}{\sqrt{|D_l^2| * \sqrt{|y_{eksen}^2|}}}\right) * \frac{180}{\pi} \quad (3.65)$$

$$\text{Gövde Yunuslama Açısı} = \arccos\left(\frac{|D_g * x_{eksen}|}{\sqrt{|D_g^2| * \sqrt{|x_{eksen}^2|}}}\right) * \frac{180}{\pi} \quad (3.66)$$

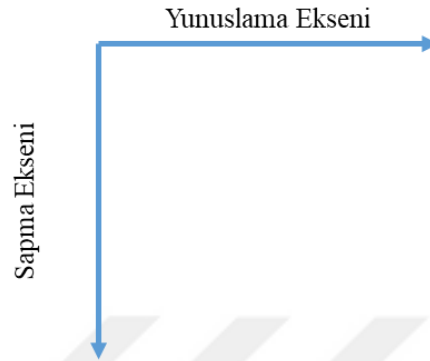
$$\text{Gövde Sapma Açısı} = \arccos\left(\frac{|D_g * y_{eksen}|}{\sqrt{|D_g^2| * \sqrt{|y_{eksen}^2|}}}\right) * \frac{180}{\pi} \quad (3.67)$$

Lüle açısının gövde düzlemine göre açıları ise,

$$\text{Yunuslama Açısı} = \text{Lüle Yunuslama Açısı} - \text{Gövde Yunuslama Açısı} \quad (3.68)$$

$$\text{Sapma Açısı} = \text{Gövde Sapma Açısı} - \text{Lüle Sapma Açısı} \quad (3.69)$$

olarak bulunur. Kamera eksen takımına göre bulunan lüle açıları Şekil 3.45'te gösterilmiştir.

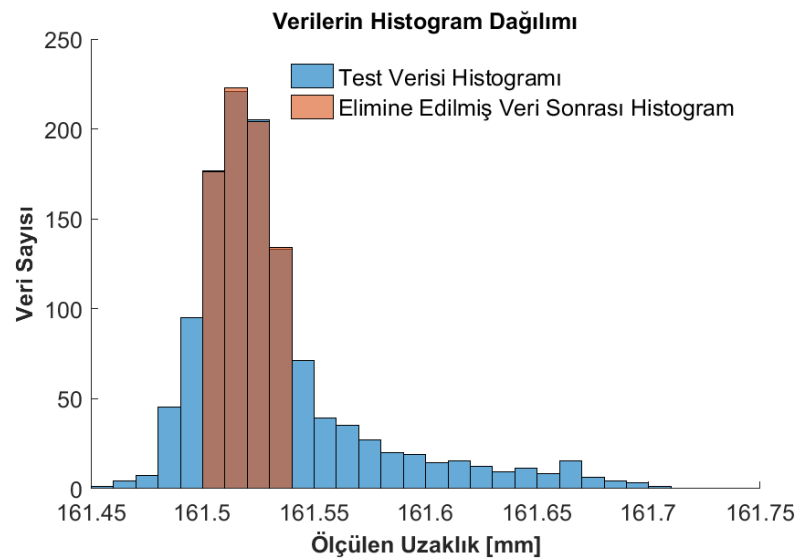


Şekil 3.45 – Kamera Eksen Takımına Göre Yunuslama ve Sapma Eksenleri

3.3.8. Test Sonrası Veri İşleme

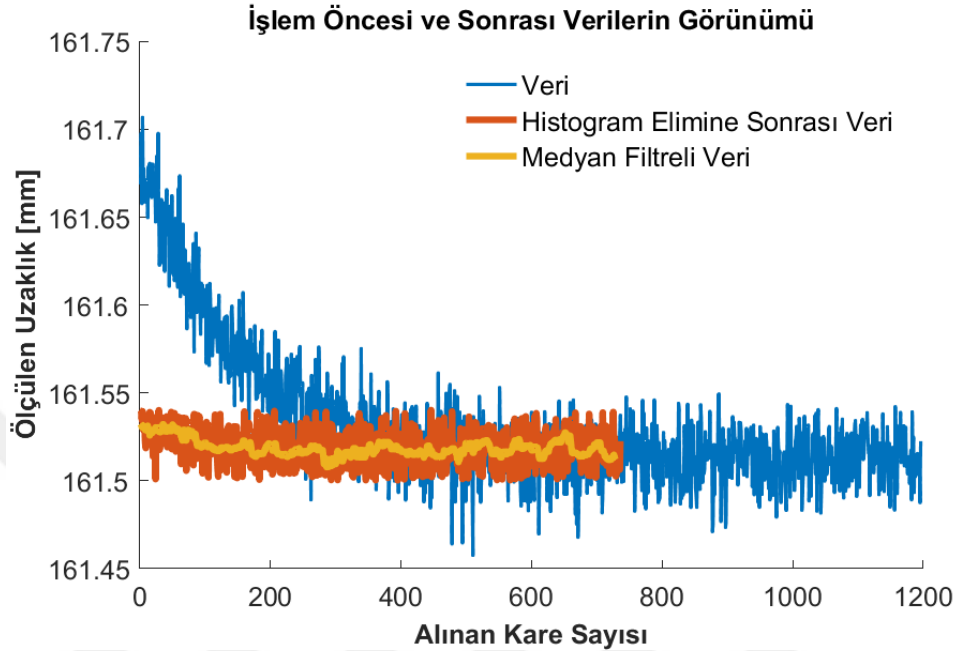
Yapılan testler sonrası toplanan mesafe ve açı verilerinde, histogramı düşük olan veriler çıkarılmıştır ve medyan filtre kullanılarak gürültüler en aza indirilmiştir.

Şekil 3.46'da gösterilen histogramı hesaplanan ölçüm sonuçlarına göre maksimum verinin yarısından daha az gelen tüm veriler gürültü kabul edilmiştir. Histograma göre bu veriler elimine edilerek yeni histogram hesaplanmıştır.



Şekil 3.46 – Test Verisi Histogramı ve Elimine Edilmiş Verilerden Sonraki Histogram Grafiği

Test verilerinin ortalama mesafesi 161.532 mm, standart sapması 0.040 mm olarak ölçülmüştür. Histogram verilerine göre veri sayısı yarıdan az olan uzaklıklar elimine edildikten sonra yeni ortalama değer 161.518 mm, standart sapma ise 0.010 mm olmuştur. Histogram grafiği Şekil 3.46’da gösterilmiştir.

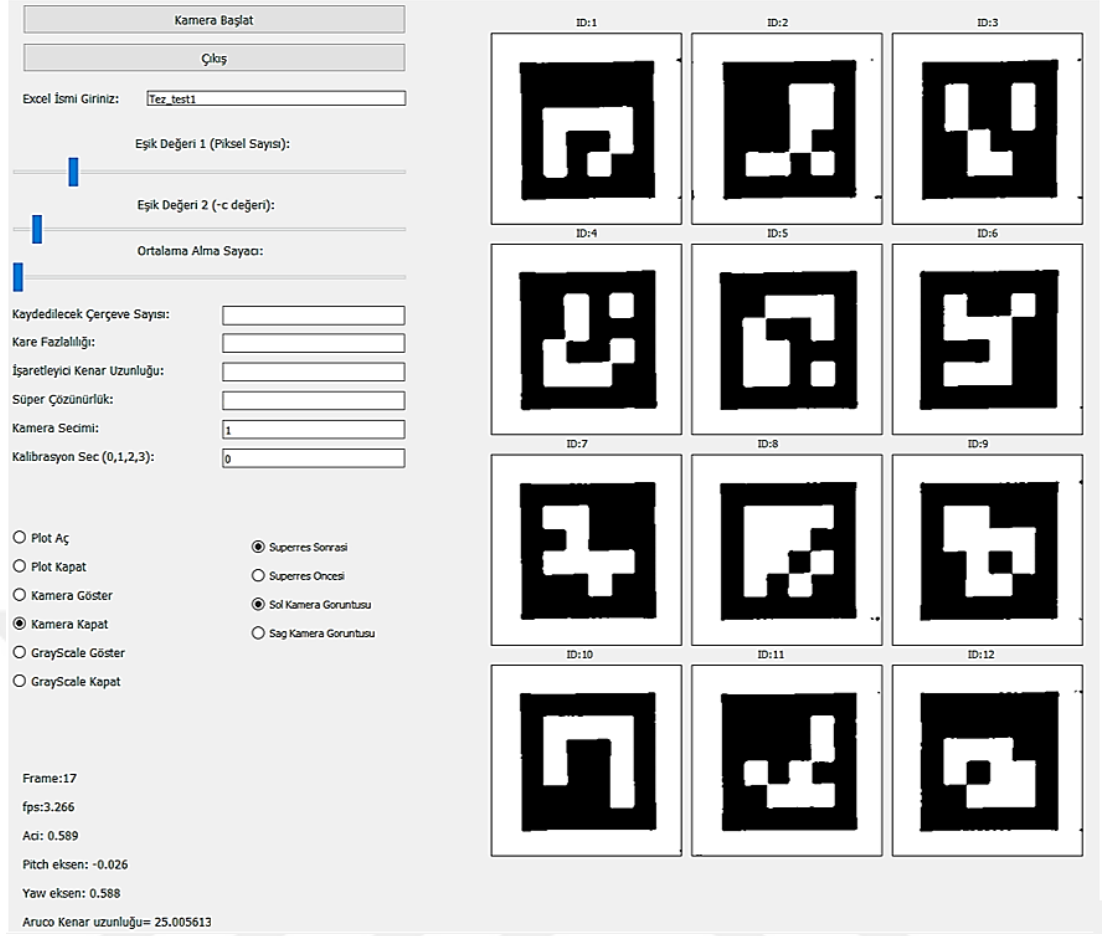


Şekil 3.47 – Test Verisi, Histogram Elimine Sonrası Veri ve Histogram Elimine Sonrası Veriye Medyan Filtre Uygulanan Verileri İçeren Grafik

Bu verilere daha sonra medyan filtresi uygulanarak uç değerler elimine edilir. Medyan filtresi, filtrelenmek istenilen bir veri dizisindeki verileri küçükten büyüğe sıralar ve verilerin ortanca değerini alır. Ortanca değerinin alınması, veri dizisini uç değerlerinden arındırır ve sapmaları azaltır. Söz konusu üç veri türü için alınan kare sayısı ile ölçülen uzaklık değeri sonuçları Şekil 3.47’de gösterilmiştir. Medyan filtresi uygulanmış test verisinin ortalama mesafe değeri 161.518 mm olurken standart sapma değeri 0.004 mm’ye inmiştir.

3.3.9. Kullanıcı Arayüzü

Tez çalışmasında uygulama için tasarlanan kullanıcı arayüzü, testlerin kolay bir şekilde yapılmasını ve işletleyicilerin görünümündeki adaptif eşik değerinin gerçek zamanlı olarak ayarlanabilmesini sağlamıştır. Bu arayüz Python programlama dilinde Pyqt5 kütüphanesi ile yazılmıştır. Kullanıcı arayüzünün görünümü Şekil 3.48’deki gibidir.



Şekil 3.48 – Geliştirilen Kullanıcı Arayüzü Görünümü

Kullanıcı arayüzü, 12 adet işaretçinin ikili (*binary*) görüntüsünü göstermektedir. Ortamdaki ışığa göre işaretleyicilere uygulanacak eşik değeri değişiklik göstermektedir. Bu sebeple gerçek zamanlı olarak en uygun eşik değeri ayarlanabilmektedir. “Eşik Değeri 1” ile Gaussian kernel büyüklüğünü ve “Eşik Değeri 2” ile de bulunan eşik değerinden kaç değer eksiltmek gerektiği ayarlanabilmektedir. Arayüz, kaydedilecek çerçeve sayısını aldıktan sonra kaydedilmek istenen “Excel” dosyası ismi ile kaydedilmektedir.

Aruco Kenar uzunluğu değeri işaretleyicinin kaç metre olduğu bilgisini işaretleyici bulma algoritmasına vermektedir.

Süper çözünürlük metin kutusu hangi süper çözünürlük yönteminin kullanılacağını belirlemek için kullanılmaktadır. Yapılan tez çalışması VAPESA, HŞÇESA, DLPSÇSA süper çözünürlük yöntemlerini içermektedir.

Kare fazlalık değeri süper çözünürlük algoritmasına işaretleyici harici ne kadar piksel fazlalığın ekleneceğini belirler. Bu değer, işaretleyicinin süper çözünürlük uygulandıktan sonra çerçeve sınırlarının dışına çıkıp hata vermesini önlemek için

eklenmiştir. Uzaklığa göre farklı değerler daha iyi sonuçlar verdiği için değiştirilebilir bir değer yapılmıştır. Örneğin 300 mm uzaktan yapılan testlerde işaretleyici kenarlarına 25'er piksel eklenmiştir, 1000 mm uzaktan yapılan testlerde ise 5'er piksel eklenmiştir.

Görüntülerin 3 boyutlu hali "plot aç" radyo butonu ile gösterilebileceği gibi kameranın normal görünümünü "Kamera Göster" butonu ve algoritmaya giren gri görüntüyü ise "GrayScale Göster" butonu göstermektedir.

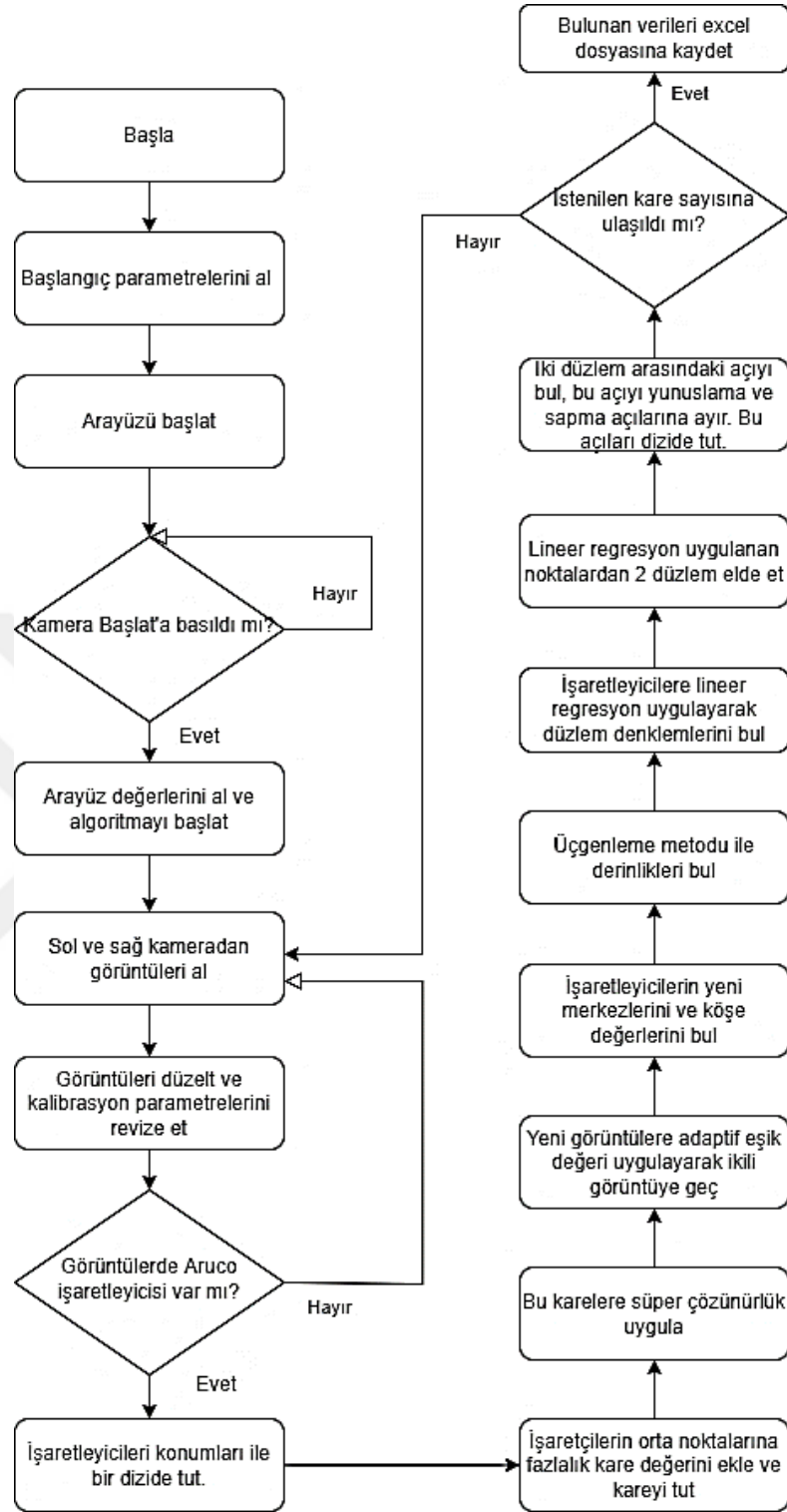
Arayüzde gerçek zamanlı olarak saniyedeki çerçeve bilgisi (FPS), lüle açısı, yunuslama ve sapma açıları gösterilmektedir. Bunlara ilaveten işaretçilerin ortalama kenar uzunluğunu ve bir numaralı işaretleyici kenar uzunluğunu vermektedir.

Arayüzden uygulamayı başlatmak için arayüzdeki bilgiler girildikten sonra kamera başlat düğmesine basılır. Kaydedilmek istenilen çerçeve sayısı kadar ölçüm alındıktan sonra veriler bir "Excel" dosyasına kaydedilip algorithmadan çıkarılır.

Kaydedilen Excel dosyası milimetre cinsinden 6 hattın kenar uzunluklarını, 12 işaretleyicinin kameranın x, y ve z eksenine göre hesaplanan uzaklığını, 12 işaretleyicinin piksel olarak sol ve sağ kameradan alınan piksel değerlerini içermektedir. Bunların haricinde algorithmada kullanılan eşik değerlerini, ölçülen genel açığı, yunuslama ve sapma açılarını da içermektedir.

3.3.10. Tez Çalışmasındaki Algoritmanın Akış Diyagramı

Tez çalışmasında kullanılan algoritmanın akış diyagramı Şekil 3.49'da gösterilmiş ve ardından algoritmanın özet açıklamasına yer verilmiştir.



Şekil 3.49 – Algoritma Akış Diyagramı

Tez çalışmasında derinlik ölçümü için geliştirilen ve açıklaması Bölüm 3.3.9’da verilen arayüz kullanılmaktadır. Arayüz açıldıktan sonra algoritma “kamera başlat” butonunun basılıp basılmadığını kontrol eder. Butona basıldıktan sonra başlangıç değerlerini arayüzden alır ve bu değerler ile Zed kamerayı 4416×1242 piksel

çözünürlüğünde başlatır. Başlatılan ana görüntü sol ve sağ kameranın birleşiminden oluştuğu için bu görüntüyü ikiye bölerek sol ve sağ kamera görüntüleri 2208×1242 piksel çözünürlüğünde elde edilir. Sol ve sağ kamera görüntüleri ilk başta kalibrasyonsuz ve doğrultulmamış görüntülerden oluşur. Bu nedenle belirlenen kalibrasyon değerlerine göre kalibre edilip düzeltilen kamera görüntüleri yeni çözünürlük bilgilerine göre kalibrasyon parametrelerini yeniden düzenler. Ayrıca yeni çözünürlüklere göre doğrusal interpolasyon ile kare yeniden ölçeklendirilir.

Görüntü ön işleme bittikten sonra sol ve sağ kamera görüntülerinde Aruco işaretleyicisi arama algoritması çalışır ve bulunan işaretleyiciler bir dizide tutulur. İşaretleyicilerin kimlik numaraları ve köşe noktalarının tutulduğu bu diziler, işaretleyici kimlik numaralarına göre birden on ikiye kadar sıralanır. Her iki kameradan görülen işaretleyici sayısı 12 olduktan sonra süper çözünürlük için her bir işaretleyiciye arayüzdeki kare fazlalık değeri eklenerek süper çözünürlüklü işaretleyici görüntüleri elde edilir. Bu görüntüler arayüzdeki eşik değerlerine göre adaptif eşik değeri algoritmasına sokularak ikili görüntülere dönüştürülür. İkili görüntülerde tekrar işaretleyici aranır ve işaretleyicilerin daha hassas bir şekilde ölçülen orta noktası elde edilir. Süper çözünürlük ile 2 kat yakınlaştırılan işaretleyici görselleri, piksel sayılarının ikiye bölünmesi ile orijinal halini alır.

Sol ve sağ kameradaki işaretleyicilerin orta noktaları bulunduktan sonra derinlik bulma algoritması çalışır. Bölüm 3.3.3'te anlatılan Basit Üçgenleme Yöntemini kullanan bu algoritma ile bütün işaretleyicilerinin kamera eksenine göre x, y ve z uzaklıkları bulunur. Bulunan bu üç boyutlu noktalar ile en küçük kareler yöntemi kullanılarak iki düzlem elde edilir. Bu iki düzlemde genel açı, yunuslama açısı ve sapma açısı elde edilir. Bu veriler bir dizide tutulur ve kaydedilmek istenilen çerçeve sayısına gelindiğinde veriler bir "Excel" dosyasına kaydedilir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

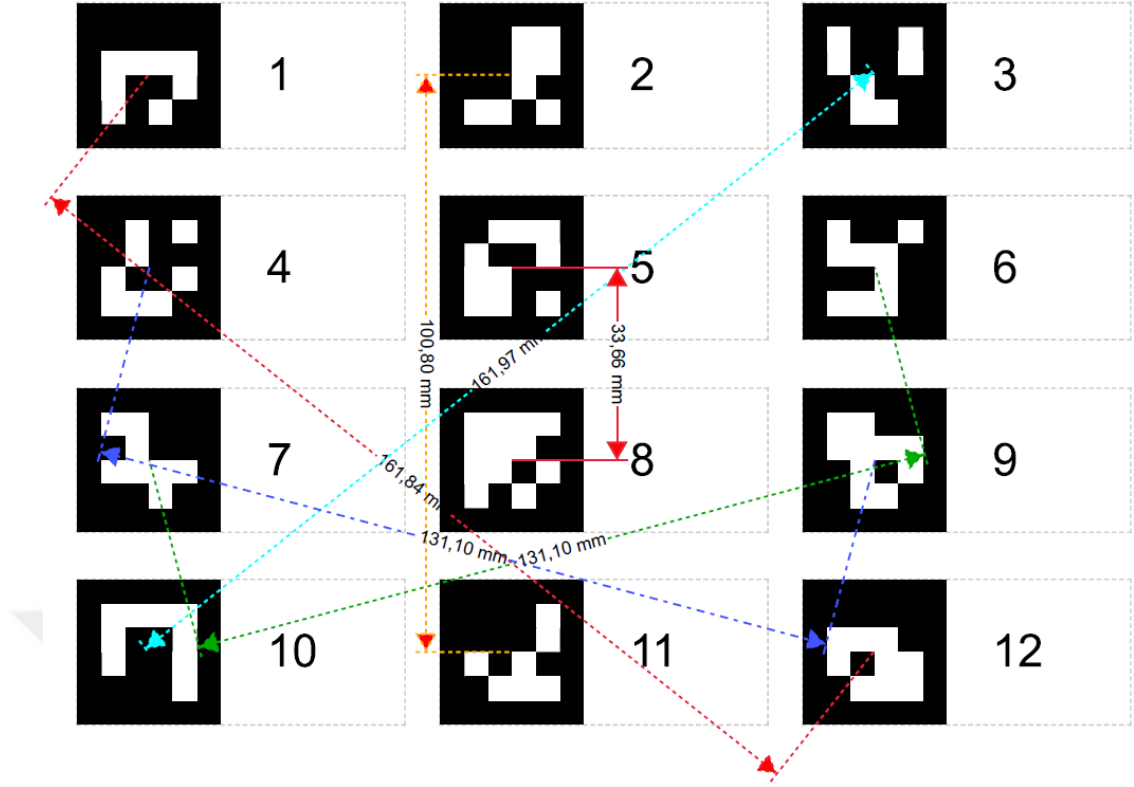
Bu bölümde, önceki bölümde belirtilen materyal ve yöntemler kullanılarak farklı test düzeneklerinde yapılan ölçüm sonuçları verilmiştir. Alınan bu ölçüm verileri incelenmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

4.1. Süper Çözünürlük ve Adaptif Eşik Değeri Yöntemlerinin Etkisi

Kullanılan yöntemlerden süper çözünürlük ve adaptif eşik değeri yöntemlerinin ölçüm sonuçlarına ne kadar etkisi olduğunu gözlemlemek için 1000 mm mesafeden 1000 çerçeve görüntü alınmıştır. Şekil 4.1’de test düzeneği gösterilmiştir. Yapılan testte hatların gerçek mesafeleri Şekil 4.2’de gösterildiği gibidir. Test düzeneğindeki işaretleyiciler, işaretleyici oluşturma uygulamasından oluşturulmuştur (Kalachev O., 2017).



Şekil 4.1 – Kullanılan Test Düzeneği



Şekil 4.2 – Test Düzenindeki Hatların Gerçek Mesafeleri (Kalachev, 2017)

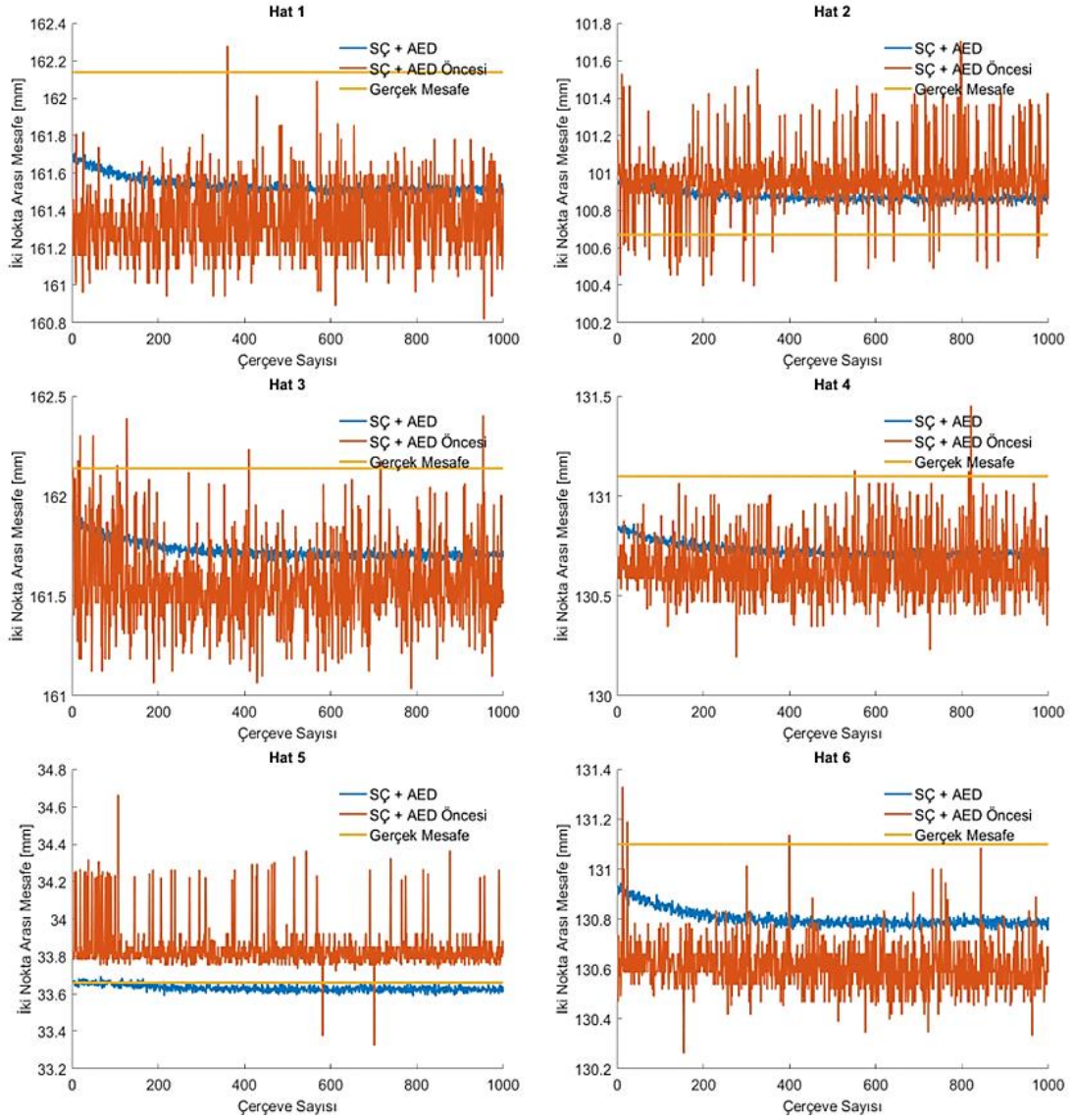
Yapılan testten elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de gösterildiği gibidir. Ölçüm sonuçlarındaki süper çözünürlük ve adaptif eşik değeri yöntemleri kullanılan sonuçlarda mesafe hataları oranında beşinci hatta 5.8 kat hata oranı dahilken %212 oranında bir iyileştirme sağlanmıştır. Bu hat çıkarıldığında ise ortalama %39.3 oranında bir iyileştirme sağlanmıştır. Ayrıca standart sapma değerleri oranında ise ortalama %418 bir iyileştirme sağlanırken, beşinci hat çıkarıldığında ise %373 oranında bir iyileştirme sağlanmıştır.

Çizelge 4.1. Yapılan Testin Mesafe Hata Oranı ve Standart Sapma Oranı Karşılaştırması

Gerçek Hat Mesafesi (mm)	Yöntemler Kullanılmadan Ölçülen Hat Mesafesi Ortalaması (mm)	SÇ + AED Kullanılarak Ölçülen Hat Mesafesi Ortalaması (mm)	Mesafe Hata Oranı (SÇ + AED Olmadan / SÇ + AED)	Standart Sapma Oranı (SÇ + AED Olmadan / SÇ + AED)
161.84	161.359	161.532	1.285	4.329
100.8	100.965	100.876	1.434	4.899
161.97	161.560	161.725	1.399	3.485
131.1	130.651	130.728	1.206	3.123
33.66	33.837	33.629	5.805	6.449
131.1	130.608	130.800	1.642	2.832

*SÇ (Süper Çözünürlük), AED (Adaptif Eşik Değeri)

Yapılan testteki verilerin grafikleri Şekil 4.3'te gösterildiği gibidir.



Şekil 4.3 – 1000 mm Mesafeden Ölçülen 6 Hattın Ölçüm Sonuçları Grafiği, (SÇ (Süper Çözünürlük), AED (Adaptif Eşik Değeri))

Şekil 4.1'de gösterilen test düzeneğinde işaretçiler aynı derinliklerde konumlandırılmıştır. Aynı derinliklerde bulunan işaretçiler farklı mesafelerden ölçülüp karşılaştırılmıştır. Yapılan bu testte 350 mm, 500 mm ve 700 mm mesafelerden testler yapılmıştır. Ölçüm sonuçları Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te listelenmiştir.

Çizelge 4.2. 350 mm Mesafeden Yapılan Test Sonuçları

Gerçek Hat Mesafesi (mm)	Ölçülen Hat Mesafesi Ortalaması (mm)	Mutlak Hata (mm)	Standart Sapma (mm)
161.84	161.541	0.298	0.024
100.8	100.898	0.098	0.017
161.97	161.760	0.209	0.025
131.1	130.738	0.361	0.021
33.66	33.643	0.016	0.008
131.1	130.804	0.296	0.033

Çizelge 4.3. 500 mm Mesafeden Yapılan Test Sonuçları

Gerçek Hat Mesafesi (mm)	Ölçülen Hat Mesafesi Ortalaması (mm)	Mutlak Hata (mm)	Standart Sapma (mm)
161.84	161.548	0.291	0.030
100.8	100.885	0.085	0.020
161.97	161.752	0.217	0.031
131.1	130.757	0.342	0.025
33.66	33.635	0.024	0.011
131.1	130.813	0.287	0.025

Çizelge 4.4. 700 mm Mesafeden Yapılan Test Sonuçları

Gerçek Hat Mesafesi (mm)	Ölçülen Hat Mesafesi Ortalaması (mm)	Mutlak Hata (mm)	Standart Sapma (mm)
161.84	161.587	0.252	0.034
100.8	100.897	0.097	0.025
161.97	161.777	0.192	0.030
131.1	130.733	0.366	0.029
33.66	33.637	0.022	0.017
131.1	130.828	0.271	0.033

Yapılan testlerin sonuçları karşılaştırıldığında 700 mm'ye kadar ortalama mutlak hata değişmemesine rağmen standart sapma artmıştır. Yapılan testlerin sonucunda işaretleyici çözünürlüklerinin değişimini bulmak için işaretleyicilerin kaç pikselden oluştuğu incelenmiştir. Kullanılan işaretleyiciler 25×25 mm kenar

uzunluklarına sahiptir. Mesafelere göre işaretleyicilerin çözünürlüğü Çizelge 4.5'teki gibidir.

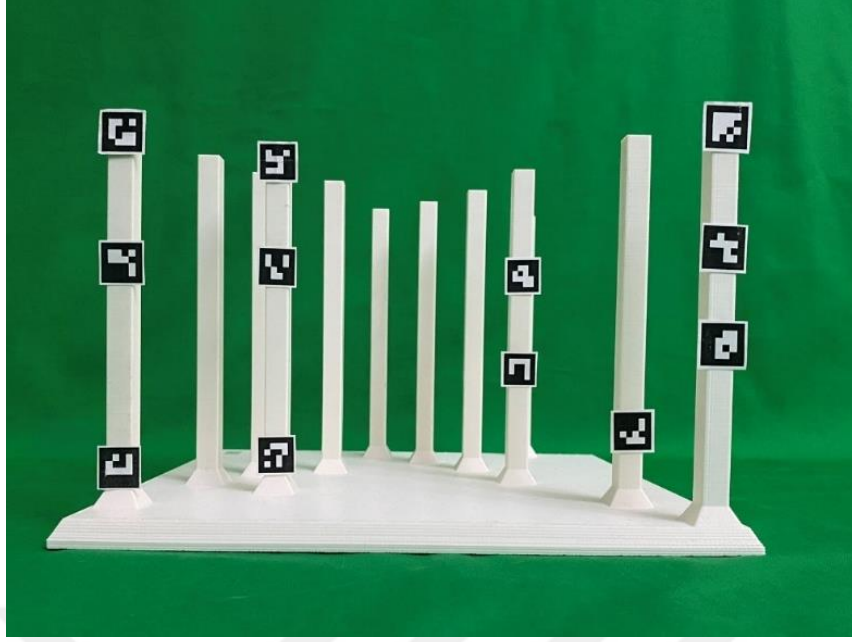
Çizelge 4.5. Mesafelere Göre İşaretleyici Çözünürlükleri ve Çözünürlük Oranları

Test Mesafesi [mm]	İşaretleyici X Kenarı [piksel]	İşaretleyici Y Kenarı [piksel]	İşaretleyici Alanı [piksel]	Çözünürlük Oranı
700	101	99	9999	0.267
500	141	136	19176	0.512
350	196	191	37436	1

Yapılan test sonucunda görüldüğü üzere 350 mm mesafeden ölçülen bir işaretleyicinin piksel alanı 1 kabul edilirse, 500 mm mesafeden yapılan testte işaretleyici alanı 0.5122 değerine ve 700 mm mesafeden yapılan testte ise işaretleyici alanı 0.267 değerine düştüğü görülmüştür. Bu veri çözünürlük oranı ile standart sapma arasındaki ters orantıyı vermiştir. Yani çözünürlük artırıldığında sapmaların azaldığını göstermektedir.

4.2. Farklı Derinliklerdeki İşaretçileri İçeren Testler

Derinlik bulma çalışmalarında aynı derinliklerdeki işaretçiler ile yapılan test çalışmalarında yeterli hassasiyet ve ölçüm doğruluğuna ulaşılmıştır. Fakat farklı derinliklerde nasıl sonuçlar vereceğini incelemek için 3B yazıcıdan yeni bir test düzeneği üretilmiştir. 3B test düzeneğinin sol ön kısmı orijin noktası kabul edildiğinde işaretçilerin yerleşimleri Çizelge 4.6'da listelendiği gibidir. Bu işaretçilerin 1. ile 12., 2. ile 11., 3. ile 10., 4. ile 9., 5. ile 8. ve 6. ile 7 işaretçilerin mesafeleri Çizelge 4.6'daki gibidir. İşaretleyici konumlarına göre oluşan hat mesafeleri Eşitlik (3.49)'deki formül ile hesaplanmış ve Çizelge 4.7'deki gibidir. Bu gerçek mesafe değerleri ile 350 mm, 500 mm ve 700 mm'den yapılan ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.4 – Farklı Derinliklere Sahip Test Düzeneği



Şekil 4.5 – Farklı Derinliklere Sahip Test Düzeneği ve Zed Kamera

Çizelge 4.6. 3 Boyutlu Yazıcıdan Basılan Farklı Derinliklere Sahip Test Düzeneginde Aruco İşaretçilerinin Yerleşimleri

Aruco İşaretleyici Numaraları	X Ekseni Konumu (mm)	Y Ekseni Konumu (mm)	Z Ekseni Konumu (mm)
1	14.5	35	15
2	15	35	93
3	67	75	96.5
4	70	75	16
5	15	35	142
6	67.5	76	143
7	234.5	13	99.5
8	235	13	141.5
9	179	116	100.5
10	179	116	55.5
11	216	55	32
12	235.5	13	67

*Test düzeneginin sol ön tarafı orijin olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.7. İşaretçilerin Arasındaki Mesafeler

Hat Numarası	Hat Mesafeleri (mm)
1	227.500
2	211.589
3	125.562
4	144.472
5	222.092
6	183.363

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de gösterilen test düzeneginde yapılan testlerde 350 mm, 500 mm ve 700 mm mesafeden 1000’er çerçeve veri alınmıştır. Bu verilerin standart sapma ve ortalama değerleri kaydedilmiştir. Testlerin sonuçları sırasıyla Çizelge 4.8, Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10’da listelenmiştir.

Çizelge 4.8. 350 mm Mesafeden Ölçülen Test Verileri

Gerçek Hat Mesafeleri (mm)	Ölçülen Hat Mesafesi Ortalaması (mm)	Mutlak Hata (mm)	Standart Sapma (mm)
227.500	226.618	0.882	0.043
211.589	211.024	0.564	0.040
125.562	125.050	0.512	0.033
144.472	144.890	0.418	0.029
222.092	221.924	0.168	0.024
183.363	182.527	0.835	0.029

Çizelge 4.9. 500 mm Mesafeden Ölçülen Test Verileri

Gerçek Hat Mesafeleri (mm)	Ölçülen Hat Mesafesi Ortalaması (mm)	Mutlak Hata (mm)	Standart Sapma (mm)
227.500	226.660	0.839	0.056
211.589	211.024	0.565	0.052
125.562	125.210	0.352	0.035
144.472	144.957	0.485	0.061
222.092	221.950	0.142	0.068
183.363	182.460	0.902	0.056

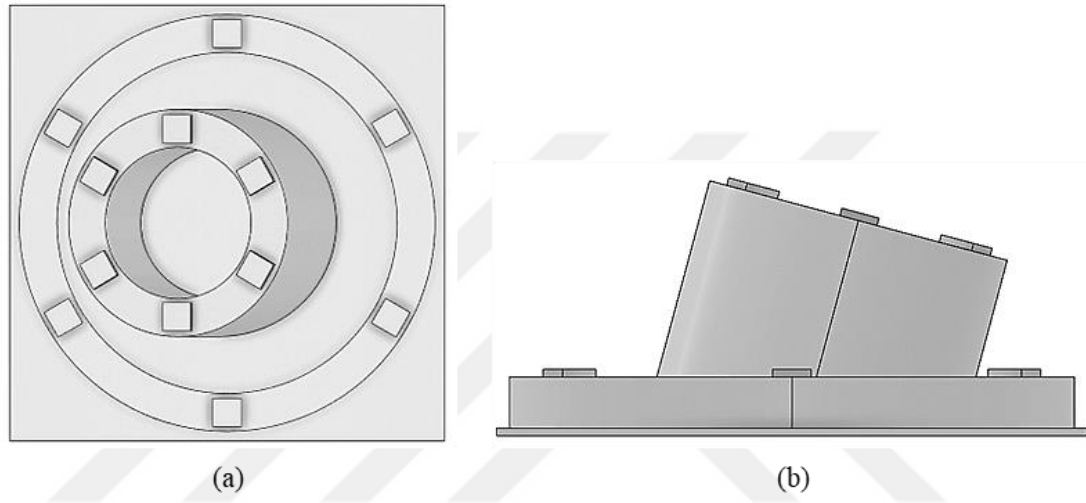
Çizelge 4.10. 700 mm Mesafeden Ölçülen Test Verileri

Gerçek Hat Mesafeleri (mm)	Ölçülen Hat Mesafesi Ortalaması (mm)	Mutlak Hata (mm)	Standart Sapma (mm)
227.500	226.585	0.915	0.071
211.589	210.946	0.643	0.105
125.562	125.226	0.336	0.090
144.472	145.088	0.615	0.053
222.092	221.921	0.171	0.095
183.363	182.276	1.086	0.106

Farklı mesafelerden yapılan testlerde elde edilen sonuçlara göre 700 mm ve daha yakın mesafelerde yapılan testlerde mesafe hataları 1 mm altında ve standart sapma değerlerinin ise 0.1 mm altında olduğu görülmüştür.

4.3. 15° Eğimli 3B Lüle Modeli Test Düzeneği

Gerçek sistem testine en yakın testi gerçekleştirebilmek için 15° eğimli bir lüle modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan model bir 3B yazıcıyla PLA malzemeden basılmıştır. 3B gövde – lüle düzeneği, 230×230 milimetrelilik bir plaka olarak üretilmiştir. Ölçüm sonuçlarının karşılaştırılmasındaki hassasiyetin artırılması için işaretleyici yerlerinin düzlemlerdeki yerleri belirlenmiştir. Lüle test düzeneği modelinin üstten ve yandan görünüşü Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6 – 3 Boyutlu Yazıcı ile Basılan Lülenin (a) Üstten ve (b) Yandan Görünüşü

Çizelge 4.11. 3 Boyutlu Yazıcıdan Üretilen Test Düzeneğindeki İşaretleyici Konumları

	İşaretleyici Numarası	X Ekseni (mm)	Y Ekseni (mm)	Z Ekseni (mm)
Lüle Düzlemindeki İşaretleyiciler	1	49.50	-26.66	99.49
	2	24.75	14.75	110.59
	3	-24.75	14.75	110.59
	4	-49.50	-26.66	99.49
	5	-24.75	-68.07	88.40
	6	24.75	-68.07	88.40
Gövde Düzlemindeki İşaretleyiciler	7	100.00	0.00	38.53
	8	50.00	86.60	38.53
	9	-50.00	86.60	38.53
	10	-100.00	0.00	38.53
	11	-50.00	-86.60	38.53
	12	50.00	-86.60	38.53

Çizelge 4.11'deki verilerin 1. ve 7., 2. ve 8., 3. ve 9., 4. ve 10., 5. ve 11. işaretleyiciler ile 6. ve 12. işaretleyiciler arasındaki mesafe Eşitlik (3.49)'de verilen formül ile hesaplanarak Çizelge 4.12'deki gerçek mesafe verisini oluşturmuştur. Lüle test düzeneği ile 350 mm, 500 mm ve 750 mm mesafeden ölçülen hat mesafeleri, mesafe hataları ve standart sapma verileri Çizelge 4.12'deki gibidir.

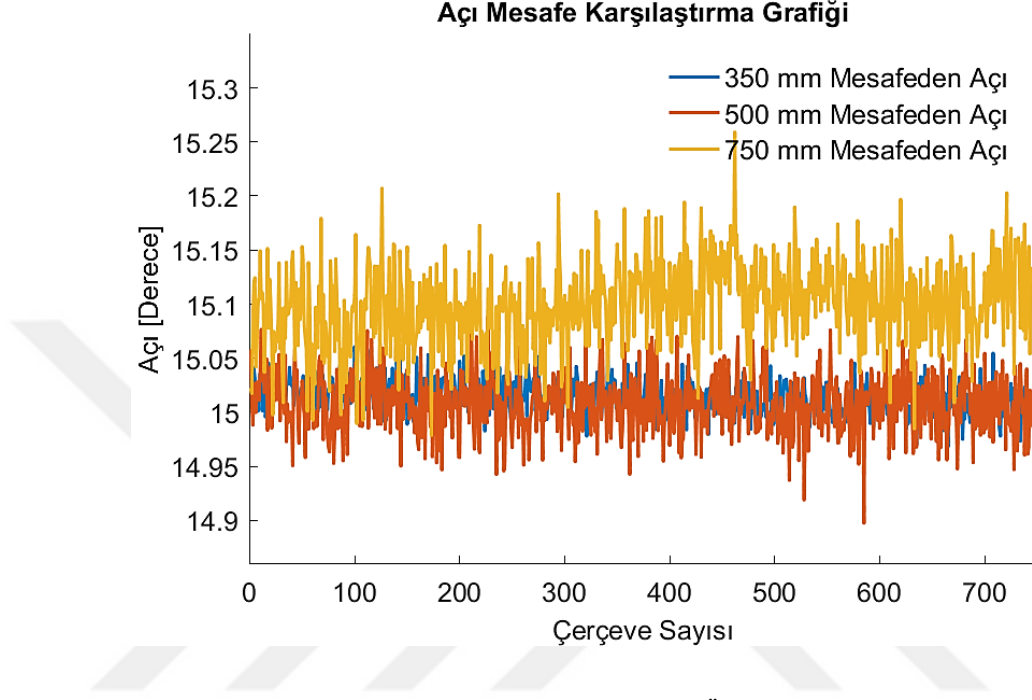


Şekil 4.7 – Lüle Test Düzeneği ve Zed Kamera

Çizelge 4.12. 350 mm, 500 mm ve 750 mm Mesafeden Yapılan Lüle Testinin Sonuçları

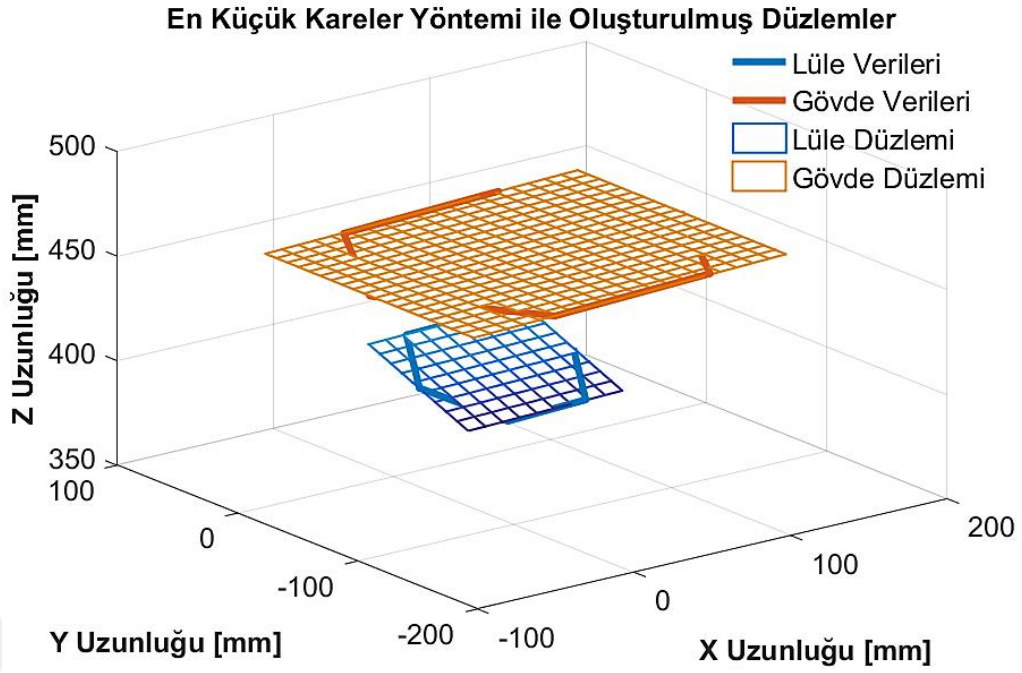
Hat Numarası	Gerçek Mesafe (mm)	350 mm Mesafeden Ölçülen		500 mm Mesafeden Ölçülen		750 mm Mesafeden Ölçülen	
		Mesafe Ortalaması (mm)	Standart Sapma (mm)	Mesafe Ortalaması (mm)	Standart Sapma (mm)	Mesafe Ortalaması (mm)	Standart Sapma (mm)
1	83.529	83.130	0.060	83.013	0.096	83.138	0.119
2	104.845	104.186	0.050	104.221	0.064	104.212	0.065
3	104.845	104.421	0.045	104.103	0.075	103.954	0.152
4	83.529	82.851	0.039	82.818	0.101	82.562	0.139
5	58.888	58.464	0.034	58.242	0.067	57.905	0.101
6	58.888	58.619	0.043	58.574	0.060	58.505	0.061

Yapılan testten elde edilen açı karşılaştırması grafiği Şekil 4.8’de gösterildiği gibidir. 350 mm, 500 mm ve 750 mm mesafeden alınan açıların ortalaması sırasıyla 15.011° , 15.007° ve 15.099° ’dir. Standart sapmaları ise sırasıyla 0.015° , 0.027° ve 0.038° bulunmuştur.

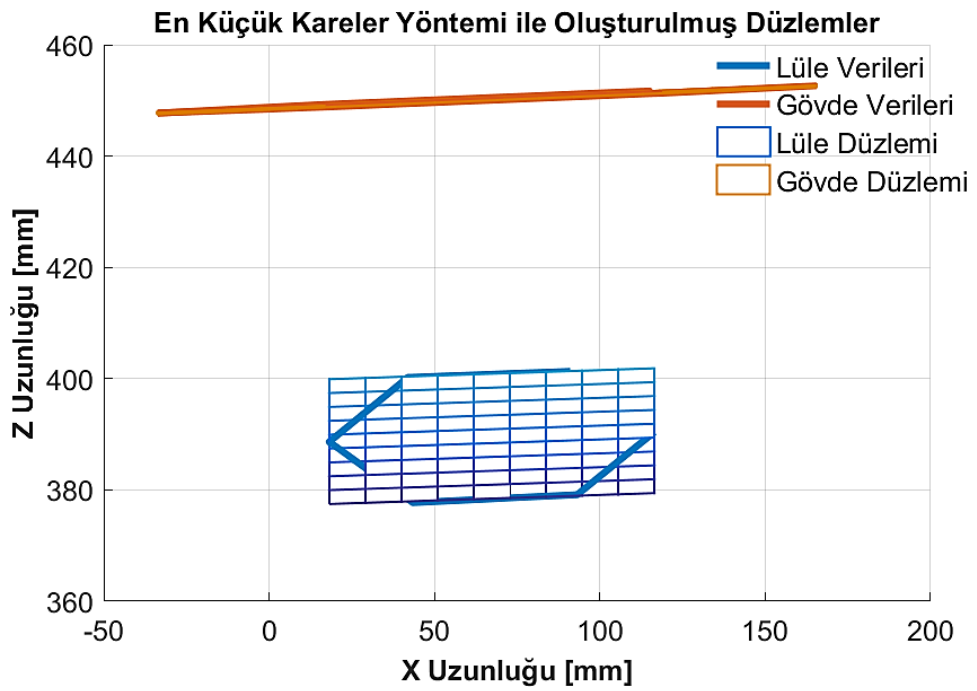


Şekil 4.8 – Farklı Mesafelerdeki Açı Ölçümü Grafiği

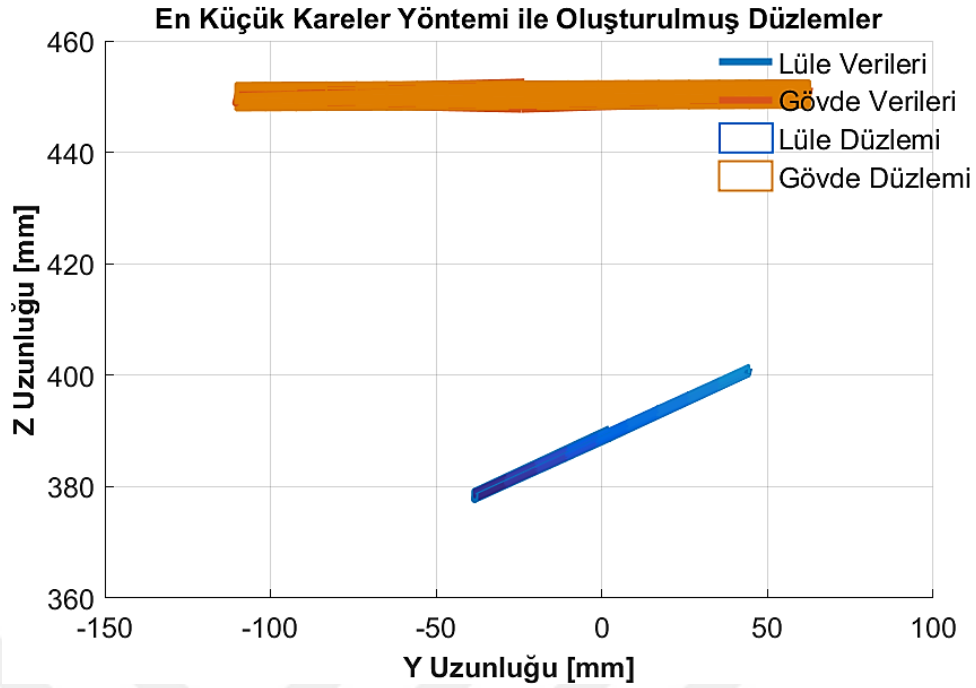
15° ’lik gövde – lüle test düzeneğindeki en küçük kareler yöntemi ile oluşturulmuş düzlemler Şekil 4.9’da, düzlemlerin X-Z eksenlerindeki görünümü Şekil 4.10’da ve Y-Z eksenlerindeki görünümü Şekil 4.11’de verilmiştir. Hatlar arasındaki mesafelere bakıldığında mesafe hatası 1 mm’den azdır. Ölçülen 3 mesafedeki genel lüle açısı ortalama 15.039° olarak bulunmuştur. Gerçek değere göre ortalama açı hatası 0.039° değerinde olup ihmal edilecek seviyededir.



Şekil 4.9 – 15°'lik Gövde – Lüle Test Düzenindeki En Küçük Kareler Yöntemi ile Oluşturulmuş Düzlemlerin 3B Görünümü



Şekil 4.10 – Düzlemlerin X-Z Eksenleri Görünümü



Şekil 4.11 – Düzlemlerin Y-Z Eksenleri Görünümü

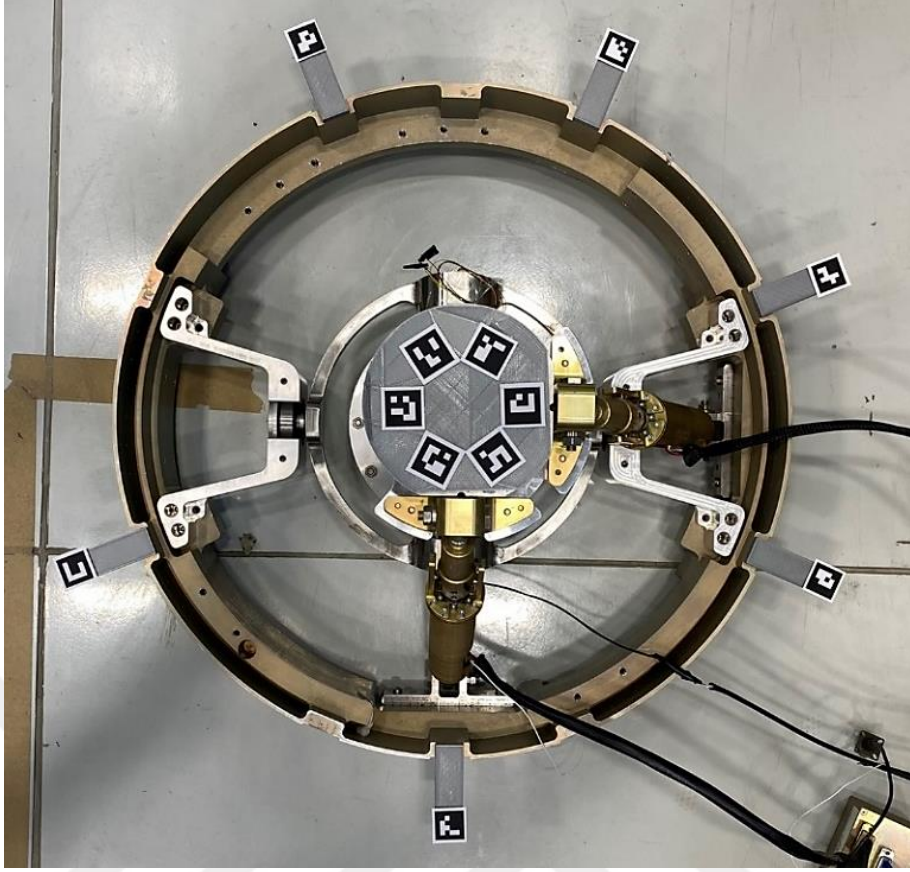
4.4. İVK Sistemi ile Test

3B sütunlar ve lüle modeli test düzenekleriyle yapılan ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesiyle son halini almış uygulamanın, gerçek bir sistem üzerindeki testleri bu kısımda yer almaktadır.

4.4.1. Test Düzenekinin Hazırlanması

Testlerde, 25×25 mm ölçülerinde 16 bitlik 12 adet Aruco işaretleyicisi kullanılmıştır. Bu işaretçilerin lüle ve gövde düzlemine paralel olması için 3B yazıcıdan işaretçilerin yerlerinin bulunduğu yerlere uygun aparatlar üretilmiştir. Bu aparatlar hem lüle ve gövde düzlemine paralellik sağlamış hem de gövdenin dışına doğru çıkıntılık yaparak gövde düzlemini genişletmiştir. Bu genişleme, yüksek açılardaki lülenin kameranın işaretçileri görememesinin önüne geçmiştir.

Şekil 4.12, işaretçilerin İVK test sistemine yerleştirilmesini ve gimballi bir İVK sistemini göstermektedir. Numaralandırılma sırasına göre ilk 6 adet işaretleyici lüle üzerindeki yuvarlak PLA malzemeye, diğer 6 adet işaretleyici de gövdeye ekleme yapılan aparatların üzerine yapıştırılmıştır.



Şekil 4.12 – İşaretçilerin Test Sistemine Yerleşimi ve İVK Sisteminin Üstten Görünümü

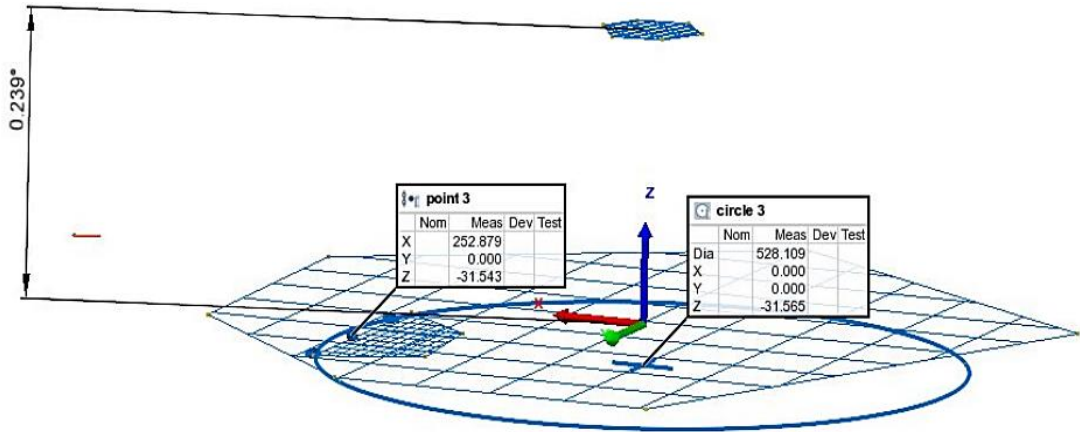


Şekil 4.13 – Test Düzenegi Gösterimi

Test düzeneği kurulumundan sonra ilk olarak lülenin konumu Şekil 4.14’te gösterilen Leica Absolute Laser Tracker AT960 ile ölçülmüştür. Fiyatı yaklaşık 200 bin avro olan sistemin hata payı yaklaşık $5 \mu\text{m}$ ’dir. Leica mutlak izleme sensörü ile lüle ve düzlemlerin tam konumu bulunarak eksen açıları tespit edilmiştir. Test sistemindeki enkoderler, mutlak enkoder olmadığı için bu değerler lülenin verilerine fazlalık değer olarak eklenmiştir. Daha sonra hazırlanan komut setleri, lüleyi hareket ettiren elektromekanik eyleyicilere referans konum verisi olarak verilerek lülenin hareketi sağlanmıştır. Lülenin hareketi Zed kamera ile ölçülüp sonuçlar elektromekanik eyleyicilerin enkoder verileri ile kıyaslanmıştır. Leica mutlak izleme sensörü ile ölçülen başlangıç açıları Şekil 4.15’te verildiği gibidir. Leica mutlak izleme sensörü ile ölçülen başlangıç açıları ve Zed kamera ile ölçülen başlangıç açıları karşılaştırılması Çizelge 4.13’te gösterildiği gibidir.



Şekil 4.14 – Leica Absolute Laser Tracker AT960 görseli



Şekil 4.15 – Leica Ölçüm Uygulamasından Alınan Lüle Açısı Ölçüm Görseli

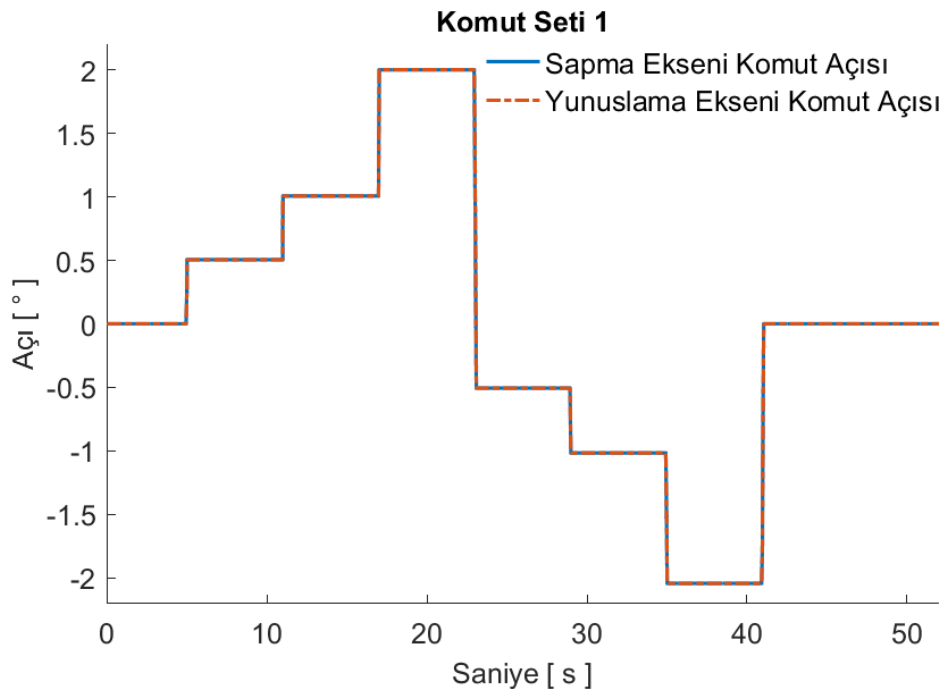
Çizelge 4.13. Leica Mutlak İzleme Sensörü ve Zed Kamera Başlangıç Lüle Açılarının Karşılaştırılması

	Leica Başlangıç Açıları	Zed Kamera ile Ölçülen Başlangıç Açıları	Leica ile Zed Kamera Açılı Farkları
Açı	0.239	0.228	0.010
Y / Z Açılı	-0.069	-0.125	0.056
Z / X Açılı	0.229	0.191	0.035

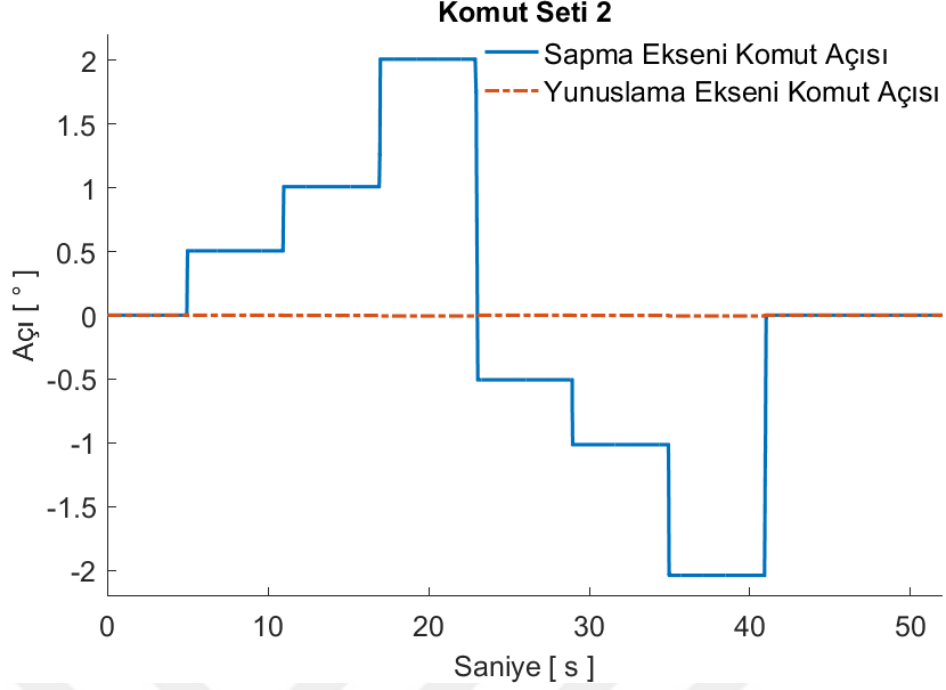
Sıvı yakıtlı itki vektör kontrol sisteminin doğrulama testlerinde kullanılacak uygulamanın performansı, İVK sisteminin iki adet komut seti ile test edilmiştir.

4.4.2. Komut Setleri

İVK sisteminin mutlak açılarının doğrulama testlerinde kullanılacak komut setleri açı/zaman grafiği olarak Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de gösterilmiştir. İVK sistemindeki birinci eyleyici sapma eksenindeki hareketi, ikinci eyleyici ise yunuslama eksenindeki hareketi gerçekleştirmektedir.



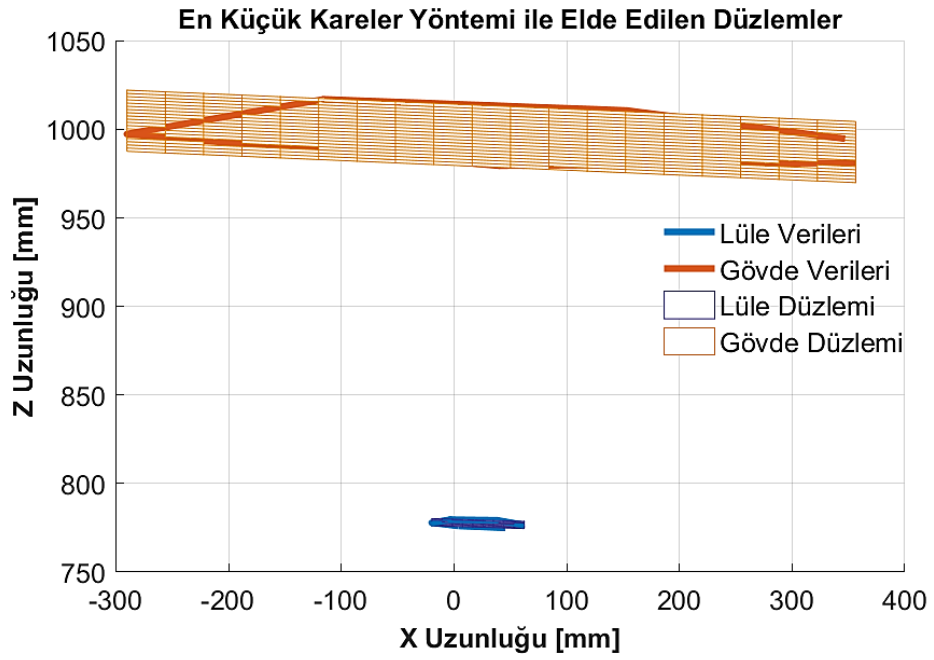
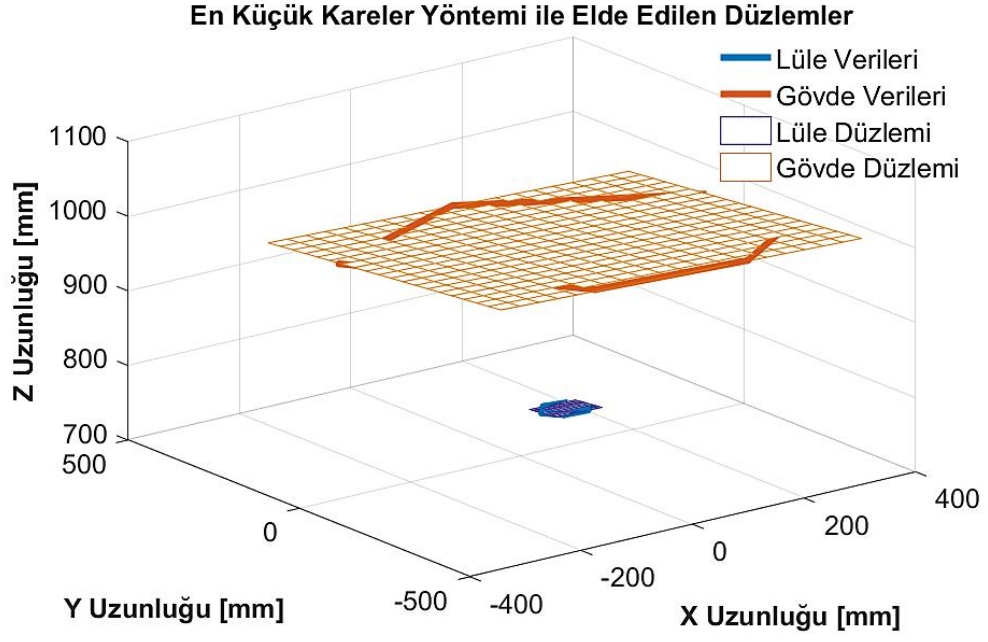
Şekil 4.16 – Komut Seti 1

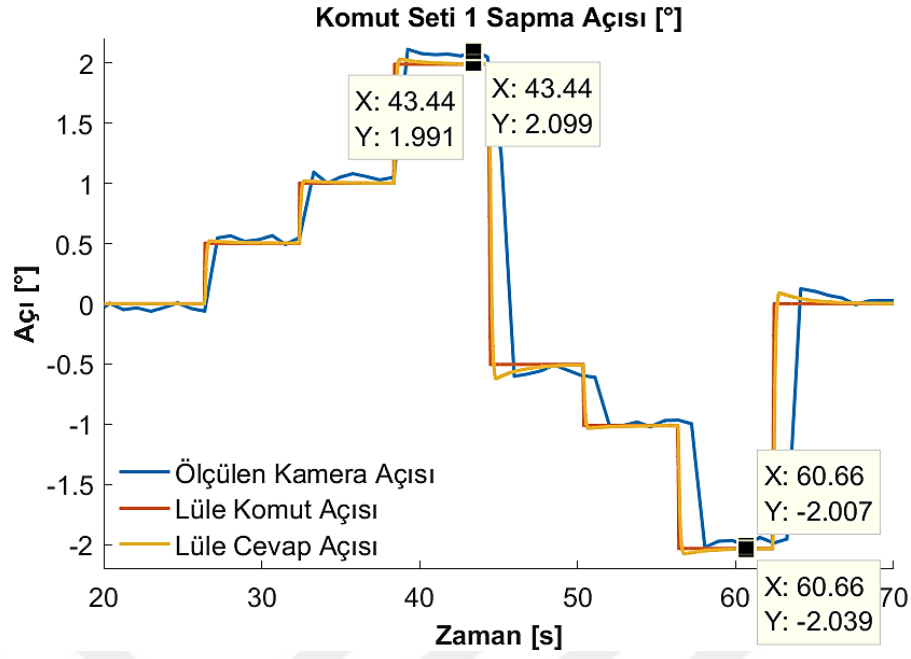


Şekil 4.17 – Komut Seti 2

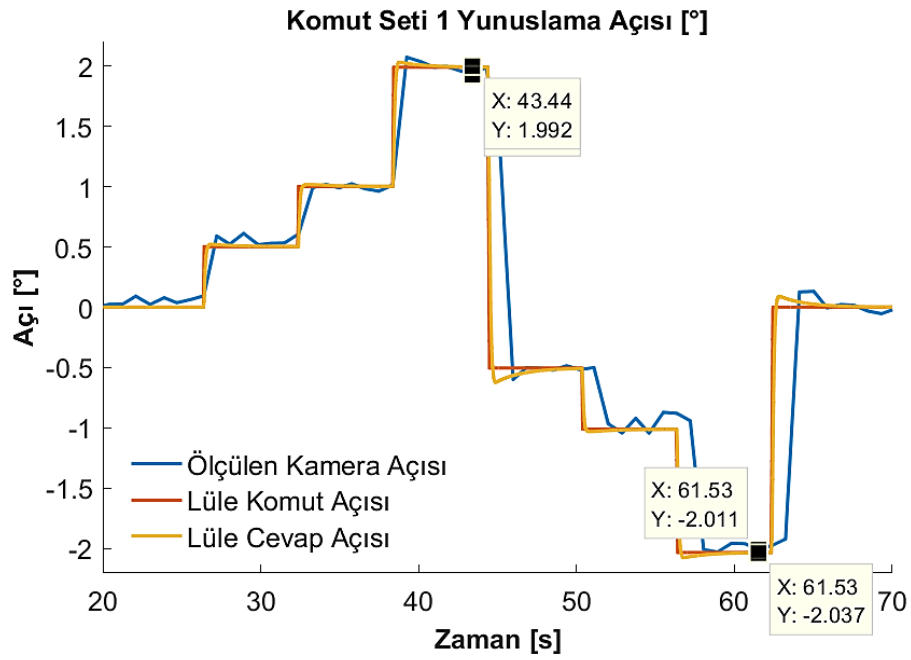
4.4.3. Yapılan Testler

Ölçüm düzeneğinin kurulumu yapıldıktan sonra İVK sisteminin hareketi için iki adet bilgisayara, iki adet güç kaynağına (motor ve sürücü kartlarının işlemcisi için) ve iki adet motor sürücü kartına ihtiyaç vardır. Düzenek kurulduktan sonra ana bilgisayar (*host computer*) ile komutlar hedef bilgisayara (*target computer*) gönderilir. Bu komutlar ise hedef bilgisayardan UART yardımı ile motor sürücü kartına gönderilerek eyleyicilerin hareketi sağlanır. Komut setleri uygulanarak tepki olarak alınan veriler kaydedilir. Kaydedilen veriler Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te gösterildiği gibidir. Ölçülen düzeneğin başlangıç konumlarının görünümü de Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da gösterilmiştir.

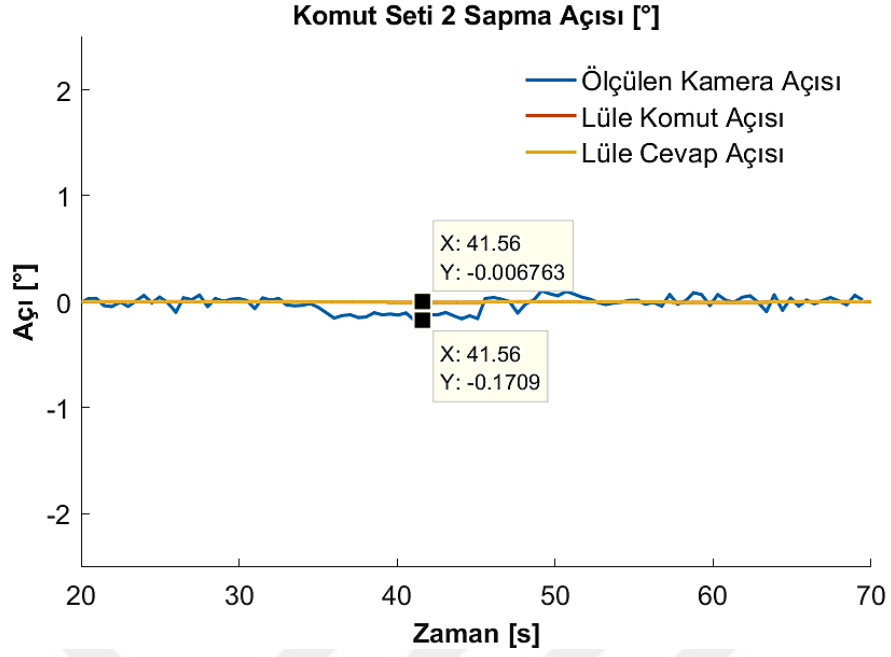




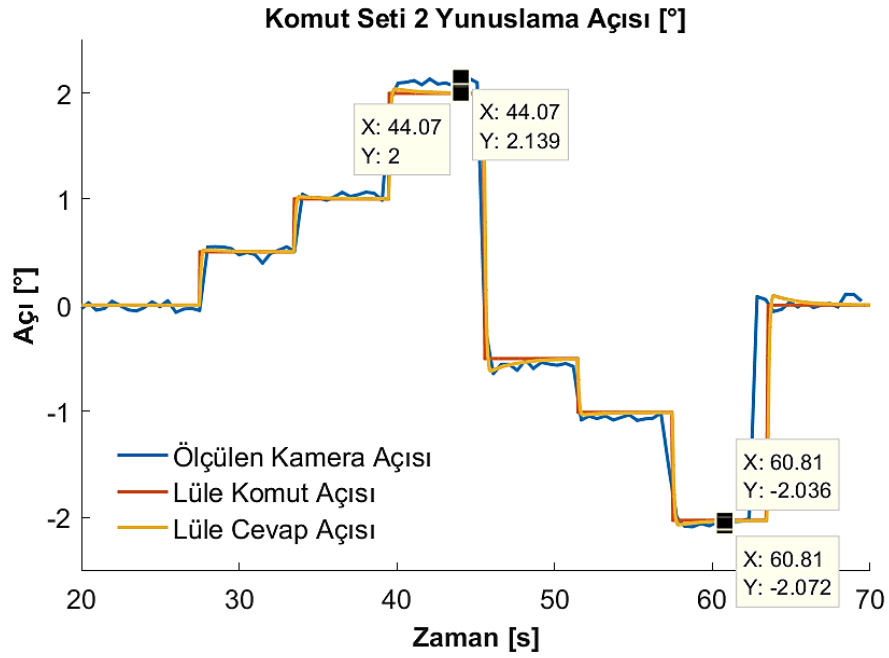
Şekil 4.20 – Komut Seti-1 Sapma Ekseninde Ölçülen ve Motor Enkoderinden Alınan Açı Verileri



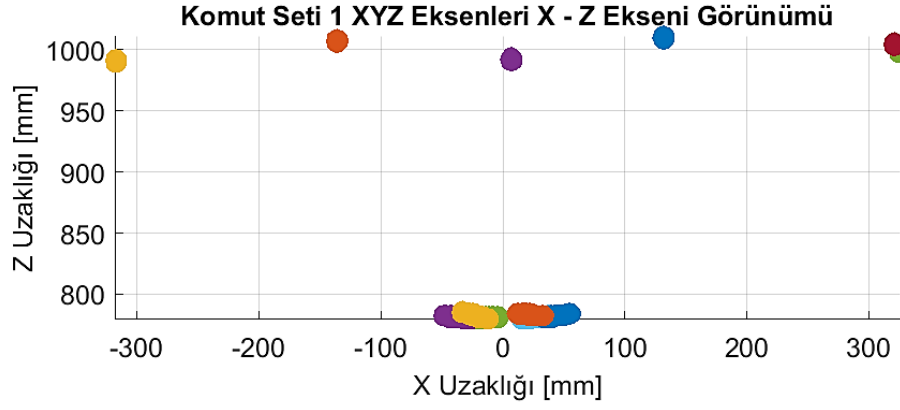
Şekil 4.21 – Komut Seti-1 Yunuslama Ekseninde Ölçülen ve Motor Enkoderinden Alınan Açı Verileri



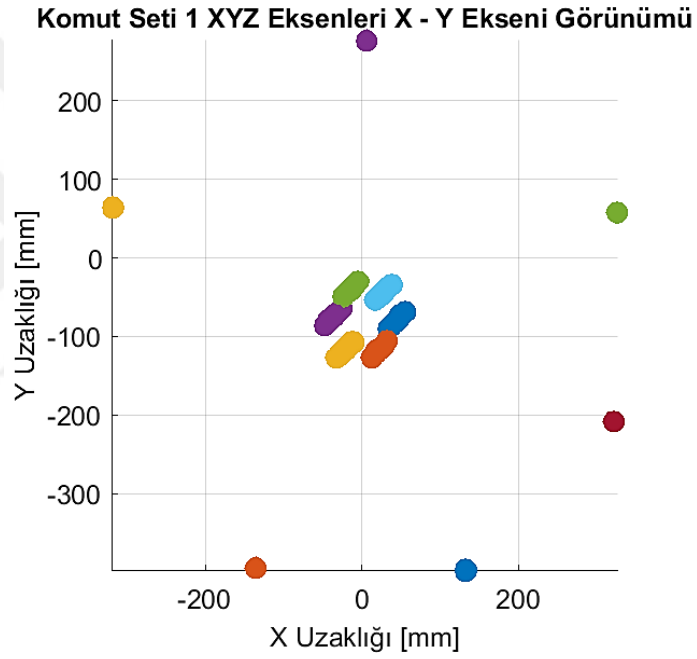
Şekil 4.22 – Komut Seti-2 Sapma Ekseninde Ölçülen ve Motor Enkoderinden Alınan Açı Verileri



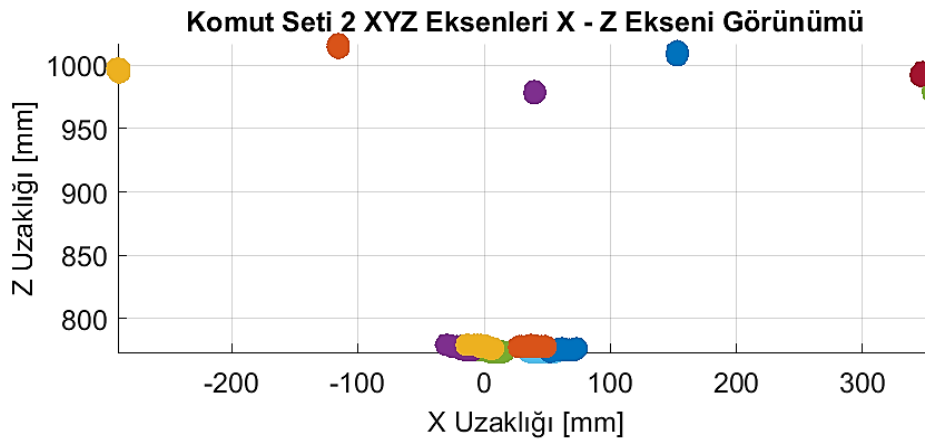
Şekil 4.23 – Komut Seti-2 Yunuslama Ekseninde Ölçülen ve Motor Enkoderinden Alınan Açı Verileri



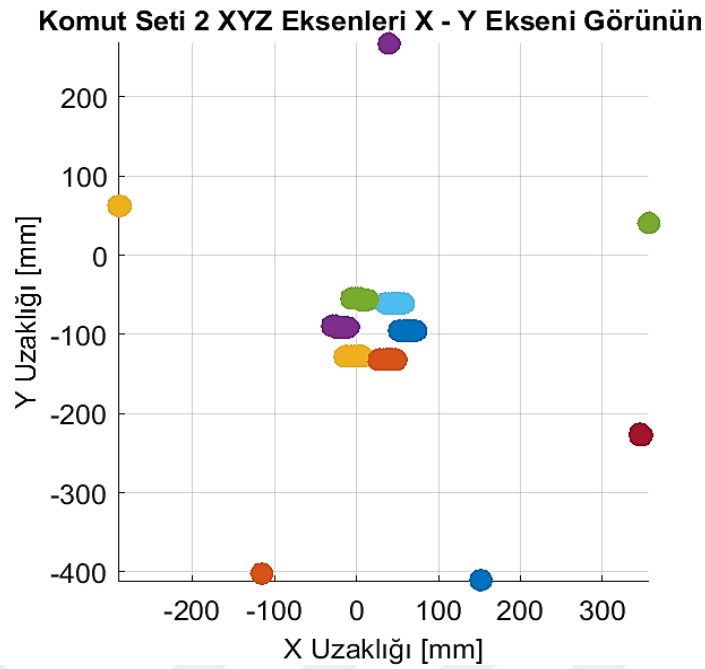
Şekil 4.24 – Komut Seti-1 Uygulanan Düzeneğin Ölçüm Sonuçları [X – Z Eksenini] Gösterimi



Şekil 4.25 – Komut Seti-1 Uygulanan Düzeneğin Ölçüm Sonuçları [X – Y Eksenini] Gösterimi



Şekil 4.26 – Komut Seti-2 Uygulanan Düzeneğin Ölçüm Sonuçları [X – Z Eksenini] Gösterimi



Şekil 4.27 – Komut Seti-2 Uygulanan Düzeneğin Ölçüm Sonuçları [X – Y Eksenini] Gösterimi

Yukarıdaki şekillerde (Şekil 4.24'ten Şekil 4.27'ye) eyleyiciye Komut Seti-1 ve Komut Seti-2 uygulanan İVK sistemlerinin hareketinin X, Y ve Z eksenlerindeki görünümüdür. Eyleyicilerin enkoder verileri ile kamerada ölçülen açı değerleri karşılaştırılmıştır. Komut Seti-1 uygulanan itki vektör kontrol sisteminde sapma eksenindeki maksimum hata 0.078° iken, yunuslama eksenindeki maksimum hata 0.108° bulunmuştur. Komut Seti-2 uygulanan itki vektör kontrol sisteminde ise sapma eksenindeki maksimum hata 0.164° iken, yunuslama eksenindeki maksimum hata 0.143° bulunmuştur. Elde edilen sonuçların tatminkâr olduğu görülmüştür.

4.5. Benzer Çalışmalar ile Karşılaştırma

Testlerden elde edilen sonuçlar, literatürdeki benzer çalışmalar ile Çizelge 4.14'te gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır. Literatürdeki çalışmalar aynı sistemler altında test edilmemiştir fakat yapılan çalışmaya en yakın çalışmalar oldukları için karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan beş çalışmada İVK sistemi yerine ters sarkaç benzeri bir yapı kullanan Cui ve ark. (2019) çalışmaları kamera arası mesafesi yaklaşık 2000 mm ve 2 CCD sensör tipli kamera ile yaptıkları testte en iyi sonuçları bulmuşlardır. Fakat bu sonuçları gerçek bir İVK sistemi ile değil temsili bir sistem ile yapmışlardır.

Aynı yöntem ve test ortamları olmasa da diğer üç çalışmaya göre derece ve mesafe hatalarındaki en iyi sonuçların elde edildiği görülmüştür.

Çizelge 4.14. Yapılan Çalışma ile Literatürdeki Çalışmaların Karşılaştırılması

	Maks. Açı Hatası (derece)	Maks. Mesafe Hatası (mm)	Kamera Sayısı	Kamera Tipi	Kamera Arası Açıklık (mm)
Guo ve ark. (2013)	0.18	-	4	CCD	3000
Qu ve Yang (2015).	0.2	-	1	CCD	-
Cui ve ark. (2019)	0.068	0.120	2	CCD	2000
Wen ve Tan (2021)	-	2.34	1	CCD	-
Yapılan Çalışma	0.168	1.21	2	CMOS	120

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

İVK sistemlerinin yunuslama ve sapma açılarının bulunmasında kullanılan sensörlerin doğrulama ihtiyacı ve başlangıç konumlarının bilinmemesi konusundaki zorluklara çözüm arayışı, bu tez konusu seçimine yönlendirmiştir.

Derinlik ölçüm sensörleri araştırılmış ve farklı prensiplerle çalışan birçok sensör tipinin olduğu belirlenmiştir. Bunlar arasından spesifik bir amaca yönelik daha iyi çalışmalar yapılabilme elverişliliği, makul maaliyeti ve kolay satın alınabilirliği gibi öne çıkan nedenlerle stereo kameralarla derinlik ölçüm yöntemi tercih edilmiştir.

Stereo kameralar incelendiğinde çözünürlük ve SDK olarak fiyat, performans oranının en iyi olduğu Zed kamera ve Intel RealSense D435 kameraları tercih edilmiştir. Fakat Intel RealSense kameranın çözünürlüğünün yetersiz olması sebebiyle çalışmalara Zed kamera ile devam edilmiştir.

Zed kameraya, kamera kalibrasyonu uygulanmış ve kameranın içsel, dışsal matrisleri ve bozulma vektörü bulunmuştur. Kamera kalibrasyonunun doğru bir şekilde yapılması en çok zorlanılan aşama olmuştur. Çünkü kamera kalibrasyonu için gereken görüntülerin uygun olması ve farklı kalibrasyon düzeneğinin farklı açılardan görüntüleri içermesi gerekmektedir. Aksi halde kalibrasyon matrisleri hatalı çıkmakta ve derinlik algılamada hatalara sebep olmaktadır. Kalibrasyon için 60 görüntü çekilmiş, fakat bu görüntüler arasından en uygun 33 adedi seçilmiştir. Düzgün bir kalibrasyon yapıldıktan sonra görüntülere bozulma vektörü uygulanarak görüntülerdeki balık gözü görünümü düzleştirilmiştir.

Hassas bir derinlik sonucu elde edilebilmesi için derinliği ölçülen nesnenin tam konumunun bilinmesi gerekmektedir. Konum tespitine yönelik araştırmalar eşleştirme yöntemlerine götürmüş ve bunlardan bazıları denenmiştir. Bu eşleştirme yöntemleri arasında en hassas sonucu Aruco işaretleyicileri sağlamıştır.

Stereo kameralarla derinlik ölçümü yapılırken en önemli hususun çözünürlük ve düzgün kalibrasyon olduğu belirlenmiştir. Literatürdeki çözünürlük artırımı yöntemleri araştırılmış ve sinir ağları yapılarını kullanan süper çözünürlük yöntemleri olduğu görülmüştür. Süper çözünürlük yöntemlerinden VAPESA, HSÇESA, DLPSÇSA yöntemleri ve bir interpolasyon yöntemi olan bikübik interpolasyonu denenmiştir. Bu yöntemler arasından en iyi sonuç verenin DLPSÇSA olduğu

görülmüştür. Yapılan hesaplamanın daha hızlı çalışması için görüntünün tümüne değil sadece işaretleyicilerin bulunduğu yerel alanlara süper çözünürlük uygulanmıştır. Işıklandırmadan gelen çevresel gürültüleri ve çözünürlük artışından gelen gürültüleri düzeltmek için Gaussian ağırlıklı toplam formülünü kullanan adaptif eşik değeri yöntemi kullanılmıştır. Böylece işaretleyicilerin kenarları ve orta noktası yüksek hassasiyetle bulunabilmektedir.

Dünya koordinat sisteminde, cisimlerin kameraya göre konumu belirlendikten sonra, test düzenekleri ile yapılan testlerde 700 mm'den daha yakın ölçümlerde milimetre altı hassasiyet elde edilmiştir. Elde edilen bu derinlik hassasiyetinde 3B yazıcıda basılan ve gerçek eğim açısı 15° olan lüle modeli ile testler yapılmıştır. Lüle modelinde 15×15 mm'lik işaretleyiciler kullanılmış ve stereo kamera ile çeşitli mesafelerden testler yapılmıştır. 350 mm, 500 mm ve 750 mm mesafeden yapılan testlerde elde edilen ortalama eğim açısı 15.039° bulunmuştur. Böylece 15° eğim açısı ölçümünde hata değeri 0.05° 'nin altında olduğu görülmüştür.

Doğrulama testlerinin yapılacağı gerçek İVK sistemi, nispeten büyük boyutlu bir sistem olması nedeniyle, testler ortalama 1200 mm uzaklıktan gerçekleştirilmiş ve işaretleyiciler 25×25 mm'lik boyutta seçilmiştir. Yapılan testlerde başlangıç konumları Leica mutlak izleme sensörü ile ölçülmüş ve önerilen uygulama yöntemiyle yapılan ölçümlerdeki sonuçlar Çizelge 4.13'te karşılaştırılmıştır. Elde edilen maksimum ortalama hatanın 0.1° 'nin altında olduğu görülmüştür. Bu ölçümlerden sonra İVK sistemi üzerinde bulunan eyleyiciler ile yapılan testlerde en yüksek hata 0.1642° olarak bulunmuştur.

Aynı derinliklerdeki işaretçileri içeren test düzenekleri, farklı derinliklerdeki sütun bloklarındaki işaretleyicileri içeren test düzeneği, model lüle test düzeneği ve İVK sistemi test düzenekleri ile ölçümler yapılmıştır. Stereo kamera ile elde edilen sonuçlardan, başlangıç açıları bilinmeyen İVK eyleyicilerinin başlangıç açılarının belirlenmesinde, doğrulama faaliyetlerinde ve çeşitli işlerdeki konum doğrulama faaliyetlerinde kullanmak için etkili ve hızlı bir performans sergilediği görülmüştür.

Ayrıca önerilen uygulamanın kullanıcı dostu arayüzünün herkes tarafından kullanılabilirliği, farklı sektörlerde seri üretim ve test faaliyetlerinde tercih edilme potansiyeli taşımaktadır.

5.2. Öneriler

Yapılan araştırma ve denemelerden, stereoskopik görüntülerdeki hassas derinlik ölçümleri için gerekli en önemli şeyin çözünürlük ve ölçülecek nesnenin tam konumunun belirlenmesi olduğu görülmüştür. Bu hususlar göz önüne alınarak sonraki çalışmalarda daha yüksek çözünürlüklü kameralar tercih edilebilir ve konumun tam olarak bulunması için yeni işaretçi çözümleri önerilebilir. Yapılan çalışmalardaki ölçüm sonuçları ve tecrübelerin ilerideki çalışmalara ışık tutması beklenmektedir.

5.2.1. İlerideki Çalışmalar

Chen ve arkadaşları yapmış oldukları yeni (2022) bir çalışma sonrasında süper çözünürlük uygulamaları arasında süper çözünürlük veri tabanlarına uygulanan en hızlı ve en yüksek çözünürlüklü yöntemi elde etmişlerdir. Bu yeni yöntemin yapılan çalışmaya eklenmesi ile daha hızlı ve daha yüksek hassasiyet seviyesine ulaşılacağı öngörülmektedir.

Süper çözünürlük yöntemlerinde hazır eğitilmiş modellerle bu sonuca ulaşılmıştır. Bu modeller yerine sadece işaretçiler ile eğitilen modeller ile daha yüksek çözünürlük artışı hedeflenerek hassasiyetin artırılması öngörülmektedir.

Katı yakıtlı roket motorlu İVK sistemlerinde kullanılan esnek eklemler sisteminin en büyük probleminin dönme noktası belirsizliği olduğu bilinmektedir. Bu tez çalışması, bu amaca yönelik olarak kullanılabilir ve dönme noktası bulunması konusundaki çalışmalara referans olabilir. Söz konusu çalışmalar için öncelikle gimballi yani dönme noktası bilinen uygulamalar ile testler yapılabilir ve sistem doğrulamasında kullanılabilir. Elde edilen sonuçlar ışığında esnek eklemler yapıda da testler gerçekleştirilerek sorunun çözüme kavuşması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Ahn, M. S., Chae, H., Noh, D., Nam, H., Hong, D., (2019), Analysis and Noise Modeling of the Intel RealSense D435 for Mobile Robots. *2019 16th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*.
<https://doi.org/10.1109/urai.2019.8768489>
- Anonymous, 2022, An Explainer on Structured Light vs LiDAR for 3D Depth. Crowd Supply [online]. Web adresi: <https://www.crowdsupply.com/onion/tau-lidar-camera/updates/an-explainer-on-structured-light-vs-lidar-for-3d-depth> [Ziyaret Tarihi: 14 Ekim 2022]
- Anonymous, 2022, Computer Vision Toolbox Documentation – MathWorks Australia [online]. Web adresi: <https://au.mathworks.com/help/vision/ref/> [Ziyaret Tarihi: 13 Ekim 2022]
- Anonymous, 2022, DENSO WAVE [online], Web adresi: <https://www.qrcode.com/en/> [Ziyaret Tarihi: 7 Temmuz 2022]
- Anonymous, 2022, Electric Cars, Solar & Clean Energy [online]. Tesla. Web adresi: <https://www.tesla.com/> [Ziyaret Tarihi: 7 Temmuz 2022]
- Anonymous, 2022, Gimbaled Thrust [online], Nasa, Web adresi: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/gimbaled.html> [Ziyaret Tarihi: 12 Ekim 2022]
- Anonymous, 2022, Intel RealSense d435 [online], Intelrealsense.com, Web adresi: <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435/> [Ziyaret Tarihi: 8 Aralık 2022]
- Anonymous, 2022, OpenCV: Camera Calibration [online], Web adresi: https://docs.opencv.org/4.x/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html [Ziyaret Tarihi: 9 Ekim 2022]
- Anonymous, 2022, OpenCV: Detection of ArUco Markers [online], Web adresi: https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html [Ziyaret Tarihi: 9 Ekim 2022]
- Anonymous, 2022, OpenCV: Opencv Thresholding [online], Web adresi: https://docs.opencv.org/4.x/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html [Ziyaret Tarihi: 9 Ekim 2022]

- Anonymous, 2022, Pmdtechnologies – 3D Time-of-Flight depth sensing solutions [online]. Pmdtechnologies Ag, Web adresi: <https://pmdtec.com/en/> [Ziyaret Tarihi: 8 Ekim 2022]
- Anonymous, 2022, Radar based Level Measurement with Distance Measurement [online]. Web adresi: <https://www.innosent.de/en/sector/level-measurement/> [Ziyaret Tarihi: 8 Ekim 2022]
- Anonymous, 2022, Zed Stereo Kamera [online], Openzeka.com, Web adresi: <https://openzeka.com/urun/zed-stereo-camera/> [Ziyaret Tarihi: 9 Ekim 2022]
- Bowers, B., (2001), Sir Charles Wheatstone FRS, 1802-1875 (History and Management of Technology) (2nd ed.). The Institution of Engineering and Technology.
- Brewster, D., (2016), The Stereoscope; Its History, Theory, and Construction, With Its Application to the Fine and Useful Arts and to Education. Wentworth Press.
- Carnevale, C., Resta, P., (2007), Vega Electromechanical Thrust Vector Control Development. 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. <https://doi.org/10.2514/6.2007-5812>
- Caye, P., Descamps, D., (1994), Ariane 5 thrust vector control system development status. 30th Joint Propulsion Conference and Exhibit. <https://doi.org/10.2514/6.1994-3069>
- Chen, X., Wang, X., Zhou, J., Dong, C., (2022), Activating More Pixels in Image Super-Resolution Transformer. arXiv preprint arXiv:2205.04437.
- Cui, J., Feng, D., Min, C., Tian, Q., (2019). Novel method of rocket nozzle motion parameters non-contact consistency measurement based on stereo vision. *Optik*, 195, 163049. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163049>
- Dong, C., (2016), Accelerating the Super-Resolution Convolutional Neural Network. ArXiv.Org. <https://arxiv.org/abs/1608.00367>
- Fosse, P., (2018), Deep Dive Into Tesla's Autopilot & Self-Driving Architecture vs Lidar-Based Systems [online]. CleanTechnica. Web adresi: <https://cleantechnica.com/2018/11/04/deep-dive-into-teslas-autopilot-self-driving-architecture-vs-lidar-based-systems/> [Ziyaret Tarihi: 8 Ekim 2022]
- Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F., Marín-Jiménez, M., (2014), Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*, 47(6), 2280–2292. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005>

- Geng, J., (2011), Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*, 3(2), 128. <https://doi.org/10.1364/aop.3.000128>
- Goldberger, A. S., Shenhart, W. A., Wilks, S. S., (1964), *Econometric Theory*. Wiley.
- Gonzalez, R.C., (2007), *Digital Image Processing*, Pearson.
- Guo, Y., Chen, G., Ye, D., Yu, X., Yuan, F., (2013), 2-DOF Angle Measurement of Rocket Nozzle with Multivision. *Advances in Mechanical Engineering*, 5, 942580. <https://doi.org/10.1155/2013/942580>
- Hamzah, R. A., Ibrahim, H., (2016), Literature Survey on Stereo Vision Disparity Map Algorithms. *Journal of Sensors*, 2016, 1–23. <https://doi.org/10.1155/2016/8742920>
- Hansard, M., Lee, S., Choi, O., Horaud, R., (2013), *Time-of-Flight Cameras*. Springer Briefs in Computer Science. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4658-2>
- Horaud, R., Hansard, M., Evangelidis, G., M enier, C., (2016), An overview of depth cameras and range scanners based on time-of-flight technologies. *Machine Vision and Applications*, 27(7), 1005–1020. <https://doi.org/10.1007/s00138-016-0784-4>
- Hunley, J. D., (1995), *The Enigma of Robert H. Goddard*. *Technology and Culture*, 36(2), 327. <https://doi.org/10.2307/3106375>
- Jurado-Rodriguez, D., Munoz-Salinas, R., Garrido-Jurado, S., Medina-Carnicer, R., (2021), Design, Detection, and Tracking of Customized Fiducial Markers. *IEEE Access*, 9, 140066–140078. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3118049>
- Kalachev O., (2017), GitHub – okalachev/arucogen: Online ArUco markers generator [online], GitHub, Web adresi: <https://github.com/okalachev/arucogen> [Ziyaret Tarihi: 18 Mayıs 2022]
- Keys, R., (1981), Cubic convolution interpolation for digital image processing. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 29(6), 1153–1160. <https://doi.org/10.1109/tassp.1981.1163711>
- Kirsten, E., Inocencio, L. C., Veronez, M. R., Da Silveira, L. G., Bordin, F., Marson, F. P., (2018), 3D Data Acquisition Using Stereo Camera. *IGARSS 2018 – 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. <https://doi.org/10.1109/igarss.2018.8519568>
- Lai, W., (2017), Deep Laplacian Pyramid Networks for Fast and Accurate Super-Resolution. *ArXiv.Org*, <https://arxiv.org/abs/1704.03915>

- Lim, B., (2017), Enhanced Deep Residual Networks for Single Image Super-Resolution. ArXiv.Org, <https://arxiv.org/abs/1707.02921>
- Livatino, S., Muscato, G., Privitera, F., (2009), Stereo Viewing and Virtual Reality Technologies in Mobile Robot Teleguide. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(6), 1343–1355. <https://doi.org/10.1109/tro.2009.2028765>
- Middlebury Stereo Datasets, (2022), [Online Dataset]. <https://vision.middlebury.edu/stereo/data/> [Ziyaret Tarihi: 6 Ağustos 2022]
- Nakashima, S., Aramaki, S., Tanaka, K., Mu, S., Ichikawa, T., (2015), Depth measurement method with applying stereo vision to one-dimensional brightness distribution sensors. 2015 International Conference on Informatics, Electronics Vision (ICIEV). <https://doi.org/10.1109/iciev.2015.7333994>
- Nayar, S. K., (2022), Columbia University, Monograph FPCV-1-3, First Principles of Computer Vision. Web adresi: <https://fpcv.cs.columbia.edu/> [Ziyaret Tarihi: 12 Ağustos 2022]
- Otsu, N., (1979), A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62–66. <https://doi.org/10.1109/tsmc.1979.4310076>
- Parasuraman, (2014), Mobility Enhancement for Elderly [Master Thesis]. Indian Institute of Technology Delhi. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1410.5600>
- Park, J., Kim, J. Y., Kim, B., Kim, S., (2018), Global Map Generation using LiDAR and Stereo Camera for Initial Positioning of Mobile Robot. 2018 International Conference on Information and Communication Technology Robotics (ICT-ROBOT). <https://doi.org/10.1109/ict-robot.2018.8549897>
- Qu, Y., Yang, H., (2015), High-speed measurement of nozzle swing angle of rocket engine based on monocular vision. Ninth International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation. <https://doi.org/10.1117/12.2181836>
- Rahul, Nair, B. B., (2018, September), Camera-Based Object Detection, Identification and Distance Estimation. 2018 2nd International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE). <https://doi.org/10.1109/icmete.2018.00052>
- Raviya, K. S., Kothari, A. M., Vyas, D. V., (2014), Depth and Disparity Extraction Structure for Multi View Images-Video Frame-A Review. *European Journal of Academic Essays*, 1(10), 29-35.

- Robinson, J., (2021), How Computers See Depth: Recent Advances in Deep Learning-Based Methods, Web adresi: <https://towardsdatascience.com/how-computers-see-depth-deep-learning-based-methods-368581b244ed> [Ziyaret Tarihi: 6 Eylül 2022]
- Rosenfeld, A., (1969), Picture Processing by Computer. *ACM Computing Surveys*, 1(3), 147–176. <https://doi.org/10.1145/356551.356554>
- Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., Bradski, G., (2011), ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. 2011 International Conference on Computer Vision. <https://doi.org/10.1109/iccv.2011.6126544>
- Scharstein, D., Szeliski, R., (2002), A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms. *International Journal of Computer Vision*, 47(1/3), 7–42. <https://doi.org/10.1023/a:1014573219977>
- Shi, W., (2016), Real-Time Single Image and Video Super-Resolution Using an., ArXiv.Org, <https://arxiv.org/abs/1609.05158v2>
- Singh, M., (2021), Making a Pseudo LiDAR with Cameras and Deep Learning. Medium, Web adresi: <https://medium.com/swlh/making-a-pseudo-lidar-with-cameras-and-deep-learning-e8f03f939c5f> [Ziyaret Tarihi: 9 Eylül 2022]
- Swopes, B (2019). Louis Charles Joseph Bleriot. Thisdayinaviation. Web adresi: <https://www.thisdayinaviation.com/tag/louis-charles-joseph-bleriot/> [Ziyaret Tarihi: 6 Kasım 2022]
- Tadic, V., Odry, A., Burkus, E., Kecskes, I., Kiraly, Z., Vizvari, Z., Toth, A., Odry, P., (2021), Application of the ZED Depth Sensor for Painting Robot Vision System Development. *IEEE Access*, 9, 117845–117859. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3105720>
- Tanaka, H., Ogata, K., Matsumoto, Y., (2017), Solving pose ambiguity of planar visual marker by wavelike two-tone patterns. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). <https://doi.org/10.1109/iros.2017.8202209>
- Tanaka, H., Sumi, Y., Matsumoto, Y., (2015), A portable 6-DOF motion tracker using high-accuracy AR markers, 2015 14th IAPR Int. Conference on Machine Vision Applications (MVA). <https://doi.org/10.1109/mva.2015.7153255>
- Vega Rocket Nozzle of the Zefiro 23, (2015), Paris Air Show, Paris.

- Wang, Y., Zheng, Z., Su, Z., Yang, G., Wang, Z., Luo, Y., (2020), An Improved ArUco Marker for Monocular Vision Ranging. 2020 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). <https://doi.org/10.1109/ccdc49329.2020.9164176>
- Wen, Y. B., Tan, J. P., (2021), Research on Intelligent Identification of Pivoting Center and Smooth Processing of Test Data for Flying Flexible Joint. *Frontiers in Neurorobotics*, 15. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2021.666285>
- Zhang, Z., (2000), A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 1330–1334. <https://doi.org/10.1109/34.888718>

