

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVA ARAÇLARINDA HASSAS HEDEFLEME AMACIYLA
GİMBAL SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

Muhammet Furkan LEVENT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aviyonik Mühendisliği Anabilim Dalı

Aviyonik Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Vasfi Emre ÖMÜRLÜ

Şubat, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVA ARAÇLARINDA HASSAS HEDEFLEME AMACIYLA
GİMBAL SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

Muhammet Furkan LEVENT tarafından hazırlanan tez çalışması 24.02.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Aviyonik Mühendisliği Anabilim Dalı, Aviyonik Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Vasfi Emre ÖMÜRLÜ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Vasfi Emre ÖMÜRLÜ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Ayhan YAVAŞOĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin AKTAN, Üye
Bartın Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Vasfi Emre ÖMÜRLÜ danışmanlığında tarafımca hazırlanan Hava Araçlarında Hassas Hedefleme Amacıyla Gimbal Sistemi Geliştirilmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Muhammet Furkan LEVENT

İmza



Anneme

TEŐEKKÜR

Bugüne kadar kendilerinden ilim tahsil ettiğim, başta çok değerli danışmanım Prof. Dr. Vasfi Emre ÖMÜRLÜ ve tüm hocalarıma,
Desteklerini daima hissettiren dostlarıma,
Tüm çalıŐmalarımnda hep yanımda olan sevgili anneme ve ablama,
Yođun geçen bu sürece sabırla ve anlayıŐla bana destek olan sevgili eŐime,
TeŐekkür ederim.

Muhammet Furkan LEVENT

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	4
2 GİMBAL SİSTEMİ	5
2.1 Sistem Mimarisi	5
2.2 Sistem Tasarımı	6
2.3 Dinamik Sistem Modeli	12
3 DONANIM VE YAZILIM	19
3.1 Motor Sürüşü	19
3.2 Ataletsel Ölçüm Ünitesi	26
3.3 Görüntü İşleme	30
3.4 Veri İletişimi	35
3.5 Kontrolcü Yapısı	39
4 TESTLER	41
4.1 Enkoder Doğrulama Testi	41
4.2 Görüntü İşleme Testleri	42
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	55
5.1 Sonuç	55
KAYNAKÇA	57
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	59

SİMGE LİSTESİ

$\bar{\omega}$	Açısal hız vektörleri
I	Akım
J	Atalet matrisi
D	Yunuslama eksenini atalet matrisindeki köşegen harici terimler
d	Sapma eksenini atalet matrisindeki köşegen harici terimler
L_{KB}	B eksen takımından K eksen takımına transformasyon matrisi
r	Bozulmuş noktanın merkeze olan uzaklığı
p	Dönme eksenini açısal hızı
$\dot{\phi}$	Dönme eksenini açısal hızı
\dot{p}	Dönme eksenini açısal ivme
ϕ	Dönme eksenini euler açısı
v	Eksenler arasında oluşan açı
L	Eksen takımının transformasyon matrisi
α	Enkoderden ölçülen açı
P	Güç
Ph	Hata kovaryans matrisi
H	Homografi matrisi
g	Yer çekimi ivmesi
ϕ_G	İvme sensöründen hesaplanan dönme açısı
θ_G	İvme sensöründen hesaplanan yunuslama açısı
$\dot{\alpha}$	Jiroskoptan okunan açısal hız değeri
Q_b	Jiroskopun gürültü sapma değeri
$R_{ölçüm}$	Jiroskopun ölçüm gürültüsünü sabiti
Q	Jiroskopun sapma değeri
Q_a	Jiroskopun sensör gürültüsü
L_{AK}	K eksen takımından A eksen takımına olan transformasyon
$\hat{\alpha}$	Kalman filtresinde tahmin edilen açı değeri
x	Kadraj üzerindeki X eksenini koordinatı
y	Kadraj üzerindeki Y eksenini koordinatı
K	Kalman kazancı
I	Kayan ortalama filtresi indisi
N	Kayan ortalama filtresi pencere sayısı

M	Manyetik alan
ψ_M	Manyetik kuzey açısı
k	Radyal bozulma sabitleri
θ_R	Rotor Açısı
r	Sapma eksenini açısal hızı
$\dot{\psi}$	Sapma eksenini açısal hızı
\dot{r}	Sapma eksenini açısal ivmesi
ψ	Sapma eksenini euler açısı
p	Teğetsel bozulma sabitleri
T	Tork
V	Motor besleme gerilimi
q	Yunuslama eksenini açısal hızı
$\dot{\theta}$	Yunuslama eksenini açısal hızı
\dot{q}	Yunuslama eksenini açısal ivmesi
θ	Yunuslama eksenini euler açısı

KISALTMA LİSTESİ

3B	3 Boyutlu
ack	Acknowledge
BRIEF	Binary Robust Independent Elementary Features
BRISK	Binary Robust invariant scalable keypoints
BLDC	Brushless Direct Current-Fırçasız Doğru Akım
CAN	Controller Area Network
CANH	Controller Area Network High
CANL	Controller Area Network Low
CRC	Cyclical Redundancy Check
DLC	Data Length Code
DoG	Difference-of-Gaussians
EOF	End Of The Frame
Flann	Fast Library for Approximate Nearest Neighbors
FOC	Field Oriented Control-Alan Yönlendirmeli Kontrol
IDE	Identifier Extension
IMU	Inertial Measurement Unit
I ² C	Inter-Integrated Circuit
KKS	Küresel Konumlama Sistemi
KNN	K-Nearest Neighbors - K-En Yakın Komşular
LoG	Laplacian-of-Gaussian
MEMS	Mikro Elektro-Mekanik Sistemler
MISO	Master Input Slave Output
MOSI	Master Output Slave Input
RTR	Remote Transmission Request
RX	Receive X
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform-Ölçekle Değişmez Özellik Dönüşümü
SOF	Start Of Frame
SURF	Speeded-Up Robust Features-Hızlandırılmış Sağlam Özellikler
SPI	Serial Peripheral Interface
SPMSM	Surface Permanent Magnet Synchronous Motor - Yüzey Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor
ORB	Oriented FAST and Rotated BRIEF
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter

PID	Proportional–Integral–Derivative - Oransal-İntegral-Türevsel
PLA	Polylactic Acid
PWM	Pulse Width Modulation
SCK	Serial Clock
SDA	Serial Data
SCL	Serial Clock
SS	Slave Select
TX	Transmit X



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Sistem mimarisi	6
Şekil 2.2 Tasarlanan gimbal yapısı [1]	7
Şekil 2.3 Gimbalın 3B görseli	9
Şekil 2.4 Gimbal tasarımının şeffaf görseli	10
Şekil 2.5 Dış gimbal yunuslama ekseninin kütle özellikleri	11
Şekil 2.6 Üretilen gimbal.....	11
Şekil 2.7 Eksen Takımları [4].....	12
Şekil 2.8 Gimbalın dinamik modeli.....	16
Şekil 2.9 Dış gimbal model bloğu	17
Şekil 2.10 İç gimbalın oturma grafiği.....	18
Şekil 3.1 Alan kontrolü ile motor sürüşü için blok diyagramı [6].....	21
Şekil 3.2 Clark-Park faz dönüşümü [6]	21
Şekil 3.3 Motor sürücü ünitesi baskı devre tasarımı	23
Şekil 3.4 Motor sürücü ünitesi devre şeması.....	24
Şekil 3.5 MEMS manyetik mutlak enkoder [26].....	25
Şekil 3.6 Ataletsel ölçüm ünitesi	26
Şekil 3.7 Kalman filtresi algoritmasının işlem akışı.....	29
Şekil 3.8 Gimbalın genel algoritma yapısı	31
Şekil 3.9 A) Namlu tipi radyal bozulma B) Bozulmamış görüntü C) İğnelik tipi radyal bozulma [13]	32
Şekil 3.10 A) Teğetsel bozulmaya sebep olan sensör lens pozisyonu B) Teğetsel bozulma sonucunda oluşan görüntü [14]	32
Şekil 3.11 CAN sinyal yapısı [30].....	36
Şekil 3.12 CAN haberleşme çerçevesi [22].....	36
Şekil 3.13 UART hat yapısı [25]	37
Şekil 3.14 UART mesaj paketi [25]	38
Şekil 3.15 Manyetik enkoder için gösterilen spı hattı yapısı [26]	38
Şekil 3.16 I2C hat yapısı [31]	39
Şekil 3.17 Matlab Simulinkte hazırlanan modelin kontrolcü blokları.....	40
Şekil 4.1 Manyetik enkoder doğrulama testi düzeneği.....	41
Şekil 4.2 Enkoder doğrulama testi çıktısı	42

Şekil 4.3 SURF algoritması ile düşük ışık ortamında çıkarılan özellik noktaları	43
Şekil 4.4 ORB algoritması ile çıkarılan özellik noktaları.....	44
Şekil 4.5 Takip hatası ölçüm testi ortamı	45
Şekil 4.6 Takip hatası ölçüm testinden ilk sekiz kare.....	46
Şekil 4.7 Takip hatası ölçüm testinden ikinci sekiz kare.....	47
Şekil 4.8 Takip hatası ölçüm testinden son sekiz kare	48
Şekil 4.9 Kadraj takip testinden 1. ve 2. kareler	50
Şekil 4.10 Kadraj takip testinden 3. ve 4. kareler.....	51
Şekil 4.11 Kadraj takip testinden 5. ve 6. kareler	52
Şekil 4.12 Kadraj takip testinden 7. ve 8. kareler.....	53
Şekil 4.13 Kadraj takip testinden 9. ve 10. kareler.....	54



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Gimbalin Fiziksel Özellikleri.....	10
Tablo 3.1 Kablo boyuna göre veri hızı.....	37



Hava Araçlarında Hassas Hedefleme Amacıyla Gimbal Sistemi Geliştirilmesi

Muhammet Furkan LEVENT

Aviyonik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Vasfi Emre ÖMÜRLÜ

Hızla gelişen insansız araç teknolojileriyle beraber, bütünleşmiş görüntüleme sistemleri de gelişmektedir. Özellikle insansız hava araçları ile yapılan görüntüleme uygulamalarında hava aracının hareketlerinin kamera üzerindeki etkisini gidermek için gimbal mekanizmaları kullanılmaktadır. Sistem merkezinde kamera olan iç içe geçmiş hareketli eksen takımlarından oluşmaktadır. Kameranın hedef yönelim açıları sensörler yardımı ile hesaplanır. Ardından aktüatörlere komut olarak uygulanır. Böylece gimbalin görsel hedef takibi sağlanır. Literatürdeki çalışmalar genel olarak küresel konumlama sistemi ve ataletsel ölçüm ünitesi verisi kullanarak kameranın belirlenen koordinata kilitlenmesi sağlanmaktadır. Bu yöntem sistem için küresel konumlama sinyaline bağımlılık oluşturmaktadır. Bunun yanında küresel konumlama verisinin doğruluğu düşüktür ve sürekli olarak güncel harita verisine ihtiyaç duyulmaktadır. Buradan yola çıkarak, bu tezde, küresel konumlama verisi kullanmadan görüntü işleme ve ataletsel ölçüm ünitesi verileri ile hedef takibi yapan gimbal sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem çift kademeli gimbal mekanizmasına sahiptir. Bu yönü ile dış gimbalin kaba yönelimi, iç gimbalin ise hassas yönelimi sağlaması hedeflenmektedir. Sistem, küresel konumlama verisinden elde edilen düzlemsel hareket verisini görüntü işleme yöntemi ile

kendisi üretmektedir. Bu yönü ile dışarıdan yardımcı sinyale ihtiyaç duymadan kendi kendine ve daha doğru şekilde çalışması amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kamera stabilizasyonu, fırçasız motor, hedefleme, gimbal, görüntü işleme



Development of a Gimbal System for Precision Targeting in for an Aircraft

Muhammet Furkan LEVENT

Department of Avionic Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Prof. Vasfi Emre ÖMÜRLÜ, Ph.D.

Along with rapidly developing unmanned vehicle technologies, integrated imaging systems are also emerging. Especially in imaging applications with unmanned aerial vehicles, gimbal mechanisms are used to eliminate the effect of aircraft movements on the camera. The system consists of nested moving axes with a camera in the center. The target orientation angles of the camera are calculated with the help of sensors. It is then applied to the actuators as commands. And thus, the gimbal's visual target tracking is achieved. The studies in the literature generally use the global positioning system and inertial measurement unit data to ensure that the camera is locked to the determined coordinate. This method creates a dependency on the global positioning signal for the system. In addition, the accuracy of global positioning data is low. And constantly updated map data is needed. Based on this, in this thesis, a gimbal system that tracks targets with image processing and inertial measurement unit data without using global positioning data has been developed. The developed system has a double-stage gimbal mechanism. With this aspect, it is aimed to provide the coarse orientation by the outer gimbal and the precise orientation by the inner gimbal. The system generates the planar motion data obtained in the global positioning data by itself with the image processing

method. With this aspect, it is aimed that the CAT will work on its own and more accurately without the need for an external auxiliary signal.

Keywords: Camera stabilization, brushless dc motor targeting, gimbal, image processing



1.1 Literatür Özeti

Günümüzde, başta “savunma” olmak üzere birçok alanda insansız hava araçları sıklıkla kullanılmaktadır. Bu araçların üstlendiği görevlerin başında gözetleme gelmektedir. Gözetleme sırasında platform hareketlerinin kamera üzerindeki etkisini sönmlemek ve kamerayı sürekli hedeflenen noktayı görecek şekilde tutmak için gimbal mekanizmaları kullanılmaktadır. Asgari görüntü kontrolü için sapma ve yunuslama açılarında düzeltme yapmak yeterlidir.

Gimbal sistemlerinde hız ve hassasiyeti aynı anda artırmak için kontrol edilen ekseninde iki aşamalı (kaba-ince) eyleyici kullanılmaktadır [1-2]. Hedef nokta takibi için en yaygın kullanılan yöntemde KKS ve kameraya bağlı jiroskop kullanılır. Gimbalin ve hedef noktanın konumu ile hava aracının yunuslama, dönme ve sapma açıları kullanılarak kameranın hedef nokta için yönelim açıları bulunur [3].

Tasarlanan sistemin üretim öncesi hareket denklemleri [4] kullanılarak dinamik modeli oluşturulması performansı doğrulamak için önemlidir. Kullanılan eyleyicilerin hızı ve hassasiyeti sistemin doğruluğunu artırır.

Eyleyici olarak, sürtünme etkisinin az oluşundan dolayı yüksek hızda hassas konum kontrolü yapılmasını sağlayan BLDC motorların tercih edilmesi uygundur. BLDC motorlarında tork harmonikleri olmadan pozisyon kontrolü yapmak için FOC yöntemi kullanılmaktadır [5]. FOC yöntemi sayesinde sistem harekete başladığı anda yüksek torka sahip olduğu halde sinüs sürüşe göre daha az akım çeker, verim artar [6]. Ayrıca [6]’da alan yönlendirmeli kontrol yapısını ve alan yönlendirmeli kontrol için faz akımları üzerinde yapılan Clark, Park dönüşümlerini gösterilmektedir. [7]’de gimbal motorunun sahip olması gereken sabit manyetik akı, düşük tork dalgalanması ve düşük titreşim oranı gibi özelliklerden bahsedilmiştir. Ve gimballerde sıklıkla kullanılan SPMSM tasarımını ile bu tasarımdan yola çıkılarak geliştirilen tork motorunun karşılaştırılması yapılmıştır.

[8]’de temelden başlayarak Kalman filtresi tanıtılmıştır. Aynı şekilde kullanılan sensörlerdeki ölçüm bozuntularının da giderilmesi gerekmektedir. MEMS sensörlerin

verilerini birleştirmek için kalman filtresi kullanılırken, ölçüm ve sensör gürültülerinin tespiti için [9]'da deneysel bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde sensör bir enkodere bağlanır ve enkoder açısı ve kalman filtresinden gelen açı üst üste çizdirilir. Grafikler üst üste otuncaya kadar sensör ve ölçüm gürültüleri değiştirilir. [10]'da benzer bir platform üzerinde farklı bir sensör birleştirme algoritması anlatılmıştır. Bu algoritma ivme ölçeri temel sensör olarak aldığından ölçüm kesinliğini arttırmayı hedeflemektedir. Kompastan gelen veri üzerindeki eğim hatası için [11]'de verilen açı verisi kullanarak kompasın eğim hatasını belirleyen denklem kullanılır.

KKS verisi yerine kullanılacak görüntü işleme verisinin kullanımı için; kameradan alınan görüntünün doğruluğunun artırılması ve kamera kalibrasyonu işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Kamera sensörü ve lensin birbirlerine göre konumlanmasından ve lensin şeklinden dolayı görüntüde optik bozulmalar oluşmaktadır. Bu bozulmalar görüntü üzerinde giderilmeden işlem yapmak hatalı veri elde edilmesine sebep olmaktadır. [12], [13], [14] ve [15] kaynaklarında optik matematiksel modeli ve nasıl telafi edileceğinden bahsedilmiştir. Kalibre edilmiş görüntüde özellik noktaları çıkarımı için farklı algoritmalar incelenmiştir. [16]'da doğruluğu yüksek bir özellik çıkarım algoritması olan SIFT tanıtılmıştır. [17]'de SIFT'e göre daha hızlı çalışan SURF özellik çıkarım algoritması tanıtılmıştır. [18]'deki ORB yönteminde, literatürde daha yaygın olan SIFT ve SURF algoritmalarına göre ışık hassasiyeti daha düşüktür. Bu yönü ile dış mekân uygulamalarında kullanıma daha uygundur. [19]'da SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB ve BRISK özellik çıkarım algoritmaları karşılaştırılmıştır. Elde edilen özellik noktalarından kadrajın hareket verisini elde etmek için önceki görüntünün özellik noktaları ile eşleştirilmesi gerekmektedir. Bu aşamada gerçek zamanlı olarak iyi sonuç verecek yöntemlerden biri de KNN algoritmasıdır [20]. Eşleştirilen özellik noktalarından kadrajın hareket verisini elde etmek için homografi matrisinin hesaplanması gerekmektedir [21].

Gimbal üzerindeki ünitelerin birbiri arasındaki veri iletimini sağlamak için iletişim hatları kurulması gerekmektedir. [22]'de üniteler arasında elektriksel seviye eşitlemesini gerektirmeden veri aktarımını sağlayan CAN protokolü tanıtılmaktadır. Can yapısı, bu yönü ile ayrı gerilim seviyesinde çalıştırılan cihazlar arasında haberleşme yapmak için uygundur. [23]'de tanıtılan I²C veri yolu ve [24]'de bahsedilen SPI veri yolu cihaz içerisinde ortak toprağı kullanan işlemci ve sensörler arasında kullanılmak için uygundur. İkisi de senkron iletişim yapısına sahiptir. SPI aynı anda çift yönlü haberleşmeye izin

verirken I²C’de bir anda tek işlemci ile konuşabilmektedir. [25]’ de asenkron veri yolu olan UART tanıtılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezde hava araçlarında kullanılabilen, hassas hedefleme kabiliyetine sahip bir gimbal tasarlanıp, prototip imal edilmesi amaçlanmıştır. Söz konusu hassas hedeflemeli gimbal sistemlerine savunma sanayi, güvenlik, sinema ve benzeri havadan görüntülemenin kullanıldığı alanlarda ihtiyaç duyulmaktadır. Hedeflemeli gimbal geliştirilmesi konusu birçok mühendislik disiplini içerisinde barındırmaktadır. Tasarım, imalat, matematiksel modelleme, gömülü yazılım, nesne tabanlı yazılım, görüntü işleme, elektronik devre tasarımı, elektrik makineleri kontrolü ve benzeri mühendislik çalışmaları ile sistem geliştirilerek prototip imalatı gerçekleştirilecektir.

Bölüm 2’de üretilecek gimbal sisteminin mimarisi verilmiştir. Kullanılacak ekipmanlar ve veri yolları ve sistemin eksen takımı tasarımı bu aşamada yapılmıştır. Daha sonra Solidworks programı ile gimbal parçalarının üç boyutlu tasarımı yapılmıştır. Yine aynı programda sistemin montaj dosyası oluşturulmuştur. Devamında sistemin mekanik imalatı ile ilgili bilgi verilip sistemin matematiksel modeline geçilmiştir. Matlab Simulink programında iç içe iki eksenli iç-dış gimbal çiftinin dinamik modeli hazırlanmıştır.

Bölüm 3’te sistem, elektronik donanım ve yazılım yönü ile ele alınmıştır. İlk olarak eksenlerin hareket etmesini sağlayan fırçasız motorların sürüş yönteminden bahsedilmiştir. Ve tasarlanıp üretilen motor sürücü ünitesi baskı devresi gösterilmiştir. Ardından sistemin açısal hareketlerini ölçmek için kullanılacak ataletsel ölçüm ünitesi ve üzerindeki sensörler tanıtılmıştır. Ataletsel ölçüm ünitesi üzerindeki sensörlerden alınan verilerin hatalarını gidermek gerekmektedir. Bu noktada Kalman filtresi kullanılarak elde edilen açısal hız ve açı verileri birlikte işlenerek eksen açılarının elde edilmiştir. Gimbalin kadraj kontrolü için kameradan alınan görüntünün işlenerek hareket verisine dönüştürülmesi gerekmektedir. Görüntü işleme başlığı altında araştırılan ve seçilen özellik çıkarım algoritmaları, özellik noktalarının eşleştirilmesi ve hareket matrisinin elde edilmesi konuları anlatılmıştır. Ardından sistemde kullanılan ünitelerin aralarında haberleşmesi için kullanılan CAN, I²C, SPI ve UART veri yollarından bahsedilmiştir. Son olarak sistemin genel algoritma şeması verilerek kullanılan kontrolcü yapısı tanıtılmıştır.

Bölüm 4'te sistem geliştirilirken yapılan testler ve sonuçları verilmiştir. İlk olarak eksenlerin dönme açılarını ölçmek için kullanılan manyetik MEMS enkoderlerin doğruluğu daha yüksek olan optik enkoder ile doğrulama testi verilmiştir. Daha sonra görüntü işleme yazılımı içerisinde özellik çıkarımı için kullanılacak algoritmanın seçimi üzerine test yapılmıştır. Gimbal sistemi değişken ışık altında çalışacağından algoritmalar bu yönleri ile ele alınmıştır.

Bölüm 5'te ise tezin sonucu ve yapılan çalışmadan sonra neler geliştirilebileceği üzerine değerlendirmeler yapılmıştır.

1.3 Hipotez

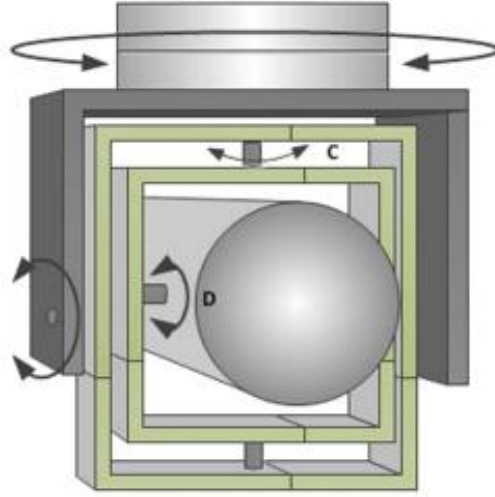
Literatürdeki hedeflemeli gimbal sistemlerinin çoğunda kadraj takibi için KKS verisi kullanılmaktadır. Bu tezde bunun yerine görüntü işleme verisinin kullanılması önerilmektedir. KKS verisinin kullanımında sistemin doğru çalışabilmesi için içerisinde gömülen harita verisinin güncelliği önemlidir. Bunun yanında sistem çalışabilmek için KKS sinyaline ihtiyaç duymaktadır. Görüntü işleme yöntemi ile elde edilecek olan verinin, KKS üzerinden elde edilen veriye göre doğruluğu çok daha yüksektir. Aynı zamanda sistemin dışarıdan herhangi bir referans sinyaline ihtiyacı kalmamaktadır. Görüntü işleme ile kadraj takibini sağlamak için değişken ışık koşulları altında çalışabilen ve hızlı hesaplama yapabilen bir algoritma geliştirilmiş ve tasarlanan gimbal prototiplenmiştir.

2. Bölümde sistem mimarisi tasarımı ve gimbal tasarımı yapılmıştır. Sonrasında tasarlanan gimbalin dinamik modeli hazırlanmıştır. 3. Bölümde fırçasız motor sürüş yöntemleri incelenmiş ve motor sürücü ünitesi geliştirilmiştir. Devamında ataletsel ölçüm ünitesi ve görüntü işleme bilgisayarında çalıştırılacak algoritmaları açıklanmıştır. Sistem mimarisinde kullanılan haberleşme protokolleri tanıtılmış. Bölümün sonunda gimbalin kontrolcü yapış anlatılmıştır. 4. Bölümde geliştirilen gimbalin bazı fonksiyonları için uygulanan testler verilmiştir. 5. Bölümde ise çalışma sonuçlandırılmıştır.

2.1 Sistem Mimarisi

Tasarlanan sistemin temel özelliği hedef takibi için görüntü işleme verisini kullanmasıdır. Sistem mimarisi Şekil 2.1’de verilmiştir. Mimari üzerinde, sistemin elektronik üniteleri ve bu ünitelerin birbirleri ile hangi veri yolunu kullanarak haberleşeceği gösterilmiştir. Kameradan gelen görüntü ethernet üzerinden görüntü işleme bilgisayarına aktarılmaktadır. Görüntü işleme bilgisayarı içerisinde ardışık görüntü kareleri arasındaki hareket miktarı hesaplanır. Hesaplanan veri UART üzerinden gimbal kontrol ünitesine aktarılır. Ataletsel ölçüm ünitesinden ölçülen jiroskop, ivme ölçer ve manyetik pusula verileri de gimbal kontrol ünitesine aktarılır. Gimbal kontrol ünitesi ve motor sürücü üniteleri arasında CAN Bus hattı bulunmaktadır. Bu hattan gimbal kontrol bilgisayarından sürücülere açı komutu ve sürücülerden gimbal kontrol bilgisayarına enkoder açısı aktarılır. Motorlara bağlı enkoderlerin ölçtüğü eksen açıları, SPI protokolü ile motor sürücü ünitesi tarafından okunur.

sayede daha hassas hedefleme yapabilmektedir. Aynı zamanda, iki gimbalin bir arada hareket etmesi sistemin tepki hızını artırır. Şekil 2.2’de tasarlanan iki aşamalı gimbal yapısı gösterilmiştir. Görselde iç ve dış gimballere ait dönme eksenleri oklarla gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Tasarlanan gimbal yapısı [1]

Sistemin kavramsal tasarımı sonrasında detaylı tasarımı yapmak için proje için ayrılan bütçeye de uygun olacak şekilde ekipman seçimi yapılmıştır. Kararlaştırılması gereken ekipmanlar sırasıyla kamera ve lens, motor ve enkoder, ataletsel ölçüm ünitesi, motor sürücüsü entegrasyonu ve işlemcisi, gimbal kontrol işlemcisi ve görüntü işleme bilgisayarıdır. Bu sıralama bazı ekipmanların diğer ekipmanın özelliklerine bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Görüntü işleme bilgisayarı, tasarlanan sistem için fazla büyük olduğundan sisteme haricen bağlanmasına karar verilmiştir. Diğerleri içerisinde tasarımı ilgilendiren ekipmanlar kamera, lens ve motorlardır. Bu bileşenlerin seçim kriterleri anlatılmıştır.

Kamera Seçimi:

Sistem tasarımında ilk olarak hedef menzil seçimi yapılmıştır. Bu aşamada sistemin yenilikçi yönü, hedefleme yapısı olduğundan diğer özellikler geliştirmeyi kolaylaştıracak seviyede tutulmuştur. Bu aşamada hedef menzil maksimum 200 metre olacak şekilde belirlenmiştir. Bunun yanında görüntü işleme ile kontrol yapmak için yüksek hızlı veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Seçilen kameranın saniyedeki deklanşör özelliği, kare sayısı, çözünürlüğü ve renk derinliği özellikleri sistem doğruluğunu bozmadan geri besleme hızını üst seviyede tutacak şekilde seçilmelidir. Bu çalışmada saniyede 120 kare hızına

sahip, 640x480 piksel çözünürlüğünde, siyah-beyaz 8 bit renk derinliğinde, global deklanşöre sahip dijital kamera kullanılmıştır. Kameradan alınan görüntü anlık olarak görüntü işleme bilgisayarında işleneceğinden kameranın çözünürlüğü ve renk derinliği buna uygun olarak düşük tutulmuştur. Bu kamera, sistemde sensör olarak kullanılacağından gözetleme amacıyla daha yüksek çözünürlüklü bir kamera daha takılabilir. Sistemde sürekli olarak hareket olacağından görüntüde kayma olmaması için bütün pikselleri aynı anda yenileyen global deklanşör tercih edilmiştir. Bu isterler göz önünde bulundurularak endüstriyel kamera kullanılmasına karar verilmiştir. Kameranın ağırlığı 90 gr'dır.

Lens olarak 35 mm sabit odak uzaklığına sahip endüstriyel kamera lensi kullanılmıştır. Bu lensin tercih edilmesinde temel sebep optik bozulmanın çok düşük olmasıdır. 1/2" çerçeve boyutuna sahip kamera sensörü için bozulma oranı %0.009'dur. [Computar M3520-MPW2] lensin ağırlığı 59 gr'dır.

Motor Seçimi:

İç gimbalde aerodinamik etkiler olmayacağından dış gimbalde nispeten düşük torklu ve hızlı fırçasız doğru akım motoru kullanılmıştır. Dış gimbalde ise etki edecek aerodinamik kuvvetler kaynaklı oluşabilecek dengesizliklere karşı dayanabilmesi için daha yüksek torklu motor tercih edilmiştir.

Dış gimbal motorları 278 gr ve iç gimbal motoru ise 172 gr'dır.

Enkoder Seçimi:

Gimbalin eksenlerinin dönüşünü ölçmek için eklemlere enkoder bağlamak gerekmektedir. Burada kullanılacak yüksek hassasiyete sahip ve ebat olarak küçük olan mutlak optik enkoderler pahalı olduğundan, hem maliyeti düşük hem de daha hafif ve küçük olan MEMS mutlak enkoder kullanılmasına karar verilmiştir.

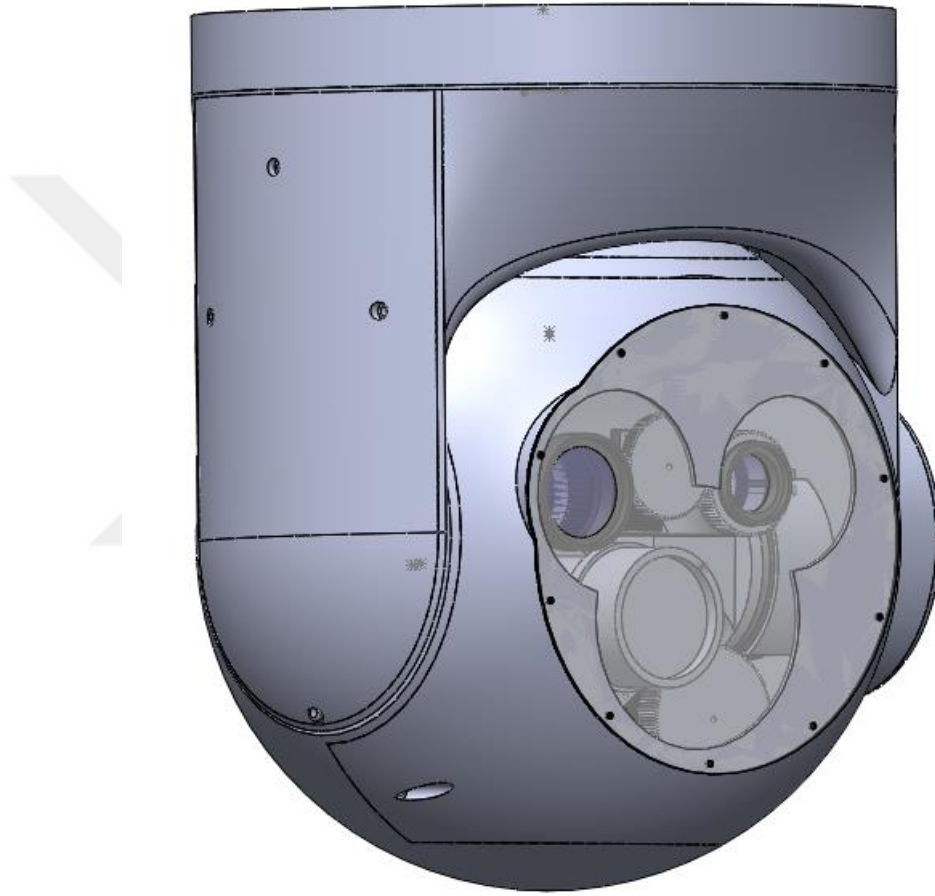
2.2.1 3 Boyutlu Çizim ve Boyutlandırma

Sistemin 3 boyutlu çizimleri Solidworks programı ile yapılmıştır. Sistemde kullanılmasına karar verilen motor, rulman, kamera ve benzeri hazır parçaların çizimleri hazırlanmıştır. Sistemin ağırlık merkezi ve atalet analizleri de Solidworks programı üzerinden yapılacağından parçaların ağırlıkları ve ağırlık merkezleri ayarlanmıştır. Daha sonra özel olarak üretilecek eklem ve gövde parçaları çizilmiştir. Eklemlerin, montaj sonrasında binen yük ile esnememesi için ön gerilimli tasarım yapılmıştır. Montaj

dosyaları önce her eksen için ayrı ayrı hazırlanmıştır. En son bütün eksenlerin montaj dosyaları tek bir montaj dosyasında birleştirilmiştir.

Dış gimbalde sapma eksenini 360 derece, yunuslama eksenini de 110 derece hareket yapabilmektedir. İç gimbalde ise sapma eksenini ve yunuslama eksenleri 10 derece hareket yapabilmektedir.

Gimbalin Solidwork programında hazırlanan 3B çizimi Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3 Gimbalin 3B görseli

Şekil 2.4’de Solidworks programında hazırlanan 3B gimbal tasarımının şeffaf görseli verilmiştir. Bu görselde tasarlanan gimbalin iç parçalarının görülebilmesi için dış gövde elemanları şeffaflaştırılmıştır.



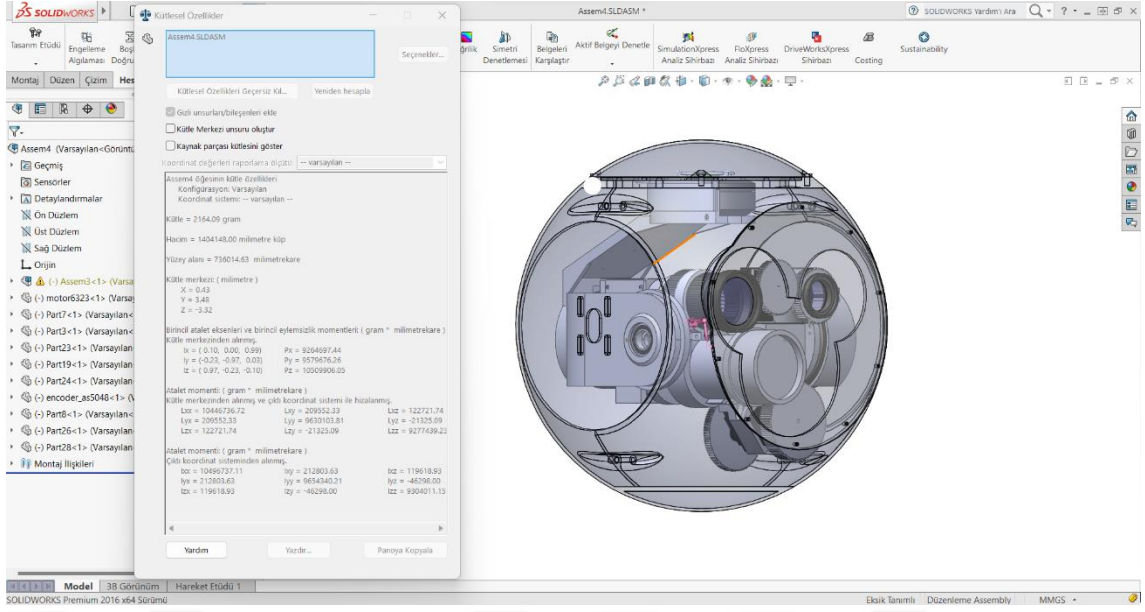
Şekil 2.4 Gimbal tasarımının şeffaf görseli

Tasarıma, hedef takibi için kullanılacak kamera dışında gözetleme amacıyla farklı açıklıklara sahip iki kamera daha eklenmiştir. Gimbalin fiziksel özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 Gimbalin Fiziksel Özellikleri

Yükseklik	314 mm
Çap	240 mm
En	251 mm
Ağırlık	2616 gr

Matematiksel modelde her eksen için ihtiyaç duyulan atalet matrisi Solidworks programından kolayca çıkarılabilmektedir. Şekil 2.5’de dış gimbalin yunuslama eksenini için atalet matrisinin çıkarımı gösterilmiştir. Solidworks programında kütle özellikler sayfasından ilgili çizimin atalet matrisi çıkarılabilmektedir.



Şekil 2.5 Dış gimbal yunuslama ekseninin kütle özellikleri

2.2.2 İmalat

İmalat aşamasında üç boyutlu yazıcı ve bilgisayarlı dikey işleme tezgahı kullanılarak, PLA plastiği ile gövde; cam elyaf levhalarla da esnemeyi önleyecek destek parçaları üretilmiştir. Şekil 2.6'da tez kapsamında üretilen gimbalin görseli verilmiştir.

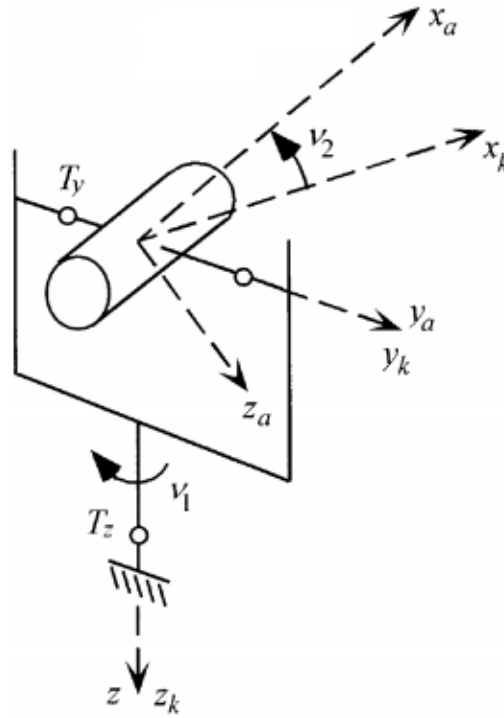


Şekil 2.6 Üretilen gimbal

2.3 Dinamik Sistem Modeli

Sistemin davranışını zamana bağlı olarak bilgisayar ortamında analiz etmek için dinamik modelleme yöntemi kullanılmaktadır. Matlab Simulink'te oluşturulan matematiksel modelleme ile, kullanılacak kontrolcülerin yapıları ve katsayıları gerçek sisteme geçilmeden önce, bilgisayar ortamında çok düşük maliyetlerle denenebilmektedir.

Gimbal sisteminin rijit gövde olduğu ve bozucu etkilerin olabildiğince göz ardı edilerek [4]'te elde edilen 2 eksenli gimbalin hareket denklemleri kullanılarak, 4 eksenli bir model oluşturulmuştur. Şekil 2.7'de dış gimbal setinin 2 eksenli sapma ve yunuslama hareketini yapabilen grafiği gösterilmiştir. Sistemde B indisi ile gösterilen gövde eksen takımı (Şekil 2.7'de ki sapma eksen takımı olan K eksen takımı ile çakışmaktadır). Gimbalin sapma hareketinin yapıldığı K eksen takımı, gimbalin yunuslama hareketinin yapıldığı A eksen takımları bulunmaktadır.



Şekil 2.7 Eksen Takımları [4]

Dönme hareketi merkezinin, her 3 eksen takımının da merkezi olan orijinde olduğu kabul edilmiştir. Burada 2 adet açısal hareket vardır:

Gövde eksen takımı B ile sapma eksen takımı K arasında v_1 açısı

Sapma eksen takımı K ile yunuslama eksen takımı A arasında v_2 açısı

Eksenler arasındaki rotasyonlar Eşitlik (2.1) ve (2.2)'deki transformasyon matrisleri ile ifade edilmektedir.

$$L_{KB} = \begin{bmatrix} \cos v_1 & \sin v_1 & 0 \\ -\sin v_1 & \cos v_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$L_{AK} = \begin{bmatrix} \cos v_2 & 0 & -\sin v_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin v_2 & 0 & \cos v_2 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Burada L_{KB} ; B eksen takımından K eksen takımına transformasyon matrisi, L_{AK} da; K eksen takımından A eksen takımına olan transformasyon matrisidir.

Gövde eksen takımlarının açısal hızları; sırasıyla dönme, yunuslama ve sapma hareketinin hızları olarak p , q ve r , K eksen takımının açısal hızları; p_k , q_k ve r_k , A eksen takımının açısal hızları p_a , q_a ve r_a 'dır.

$$\omega_B = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}; \quad \omega_k = \begin{bmatrix} p_k \\ q_k \\ r_k \end{bmatrix}; \quad \omega_a = \begin{bmatrix} p_a \\ q_a \\ r_a \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Uçuş dinamiğinde iki eksen takımının birbiriyle oryantasyonu Euler açıları ile verilebilmektedir. Euler açılarının tanımında sırasıyla z, y ve x eksenlerinde sapma, yunuslama ve dönme hareketleri gerçekleştirilerek eksenler arasındaki dönüşler sağlanmaktadır.

Herhangi iki F ve G eksen takımının açısal hız vektörleri arasındaki ilişki Eşitlik (2.4)'de verilmektedir:

$$\bar{\omega}^G - \bar{\omega}^F = \begin{bmatrix} \dot{\phi} - \dot{\psi} \sin \theta \\ \dot{\theta} \cos \phi + \dot{\psi} \cos \theta \sin \phi \\ \dot{\psi} \cos \theta \cos \phi - \dot{\theta} \sin \phi \end{bmatrix}_G \quad (2.4)$$

Burada $\bar{\omega}^G$ ve $\bar{\omega}^F$, G ve F eksen takımlarının açısal hız vektörleridir. F eksen takımı ψ , θ , ve ϕ Euler açıları ile K eksen takımına dönüşmektedir. Bu çalışmada, dış gimbalde gövde eksen takımı B ile, sapma gimbal eksen takımı K arasında sadece z eksenine göre bir adet v_1 açısal dönüşümü vardır. F eksen takımı yerinde gövde eksen takımı olan B, G eksen takımı yerine de K sapma eksen takımı alındığında ve $\theta = \phi = 0$ ve $\psi = v_1$

olduğu için eksenler arasındaki açısal hız vektörü ilişkisi Eşitlik (2.5)'deki gibi olmaktadır.

$$\begin{bmatrix} p_k \\ q_k \\ r_k \end{bmatrix} - L_{KB} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{v}_1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

L_{KB} transformasyon matrisi, yerine konulduğunda, sonuç olarak B ve K eksen takımları açısal hızları arasındaki ilişki şu şekilde olmaktadır:

$$p_k = p \cos v_1 + q \sin v_1 \quad (2.6)$$

$$q_k = -p \sin v_1 + q \cos v_1 \quad (2.7)$$

$$r_k = r + \dot{v}_1 \quad (2.8)$$

Aynı şekilde sapma gimbal eksen takımı K ve yunuslama gimbal eksen takımı A arasında $\psi = \phi = 0$ ve $\theta = v_2$ ilişkileri kullanıldığında iki eksen takımının açısal hızları arasındaki ilişki de elde edilmiş olur.

$$p_a = p_k \cos v_2 - r_k \sin v_2 \quad (2.9)$$

$$q_a = q_k + \dot{v}_2 \quad (2.10)$$

$$r_a = p_k \sin v_2 + r_k \cos v_2 \quad (2.11)$$

Dinamik modeli elde etmek için gimbalin eksen takımlarının atalet matrisleri kullanılmaktadır. Yunuslama ve sapma eksenlerindeki atalet matrisleri Eşitlik (2.12) ve (2.13)'deki gibi verilmektedir.

$$\text{Yunuslama eksenlerindeki: } J_A = \begin{bmatrix} J_{a_x} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{xy} & J_{a_y} & D_{yz} \\ D_{xz} & D_{yz} & J_{a_z} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\text{Sapma eksenlerindeki: } J_K = \begin{bmatrix} J_{k_x} & d_{xy} & d_{xz} \\ d_{xy} & J_{k_y} & d_{yz} \\ d_{xz} & d_{yz} & J_{k_z} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Gimballerin rijit yapıda olduğu, dönüş hareketinin merkezinin ağırlık merkezi ile aynı olduğu ve kütleli dengersizliğin olmadığı kabul edildiğinden her iki atalet matrisinde de

D ve d 'li köşegen harici atalet terimleri 0 olarak kabul edilmiştir. Tasarlanan gerçek gimbalde elde edilen atalet matrisindeki köşegen harici elemanlar sıfırdan farklıdır. Fakat asıl köşegen matrisi elemanlarına göre 50 ve üzeri katlarda daha düşük değerlerde oldukları için 0 olarak kabul edilmişlerdir. Ayrıca köşegen harici terimler hesaba katıldığında matematiksel model çor zorlaşmaktadır. Literatürdeki kaynaklarda da bu değer ihmal edilmektedir [4].

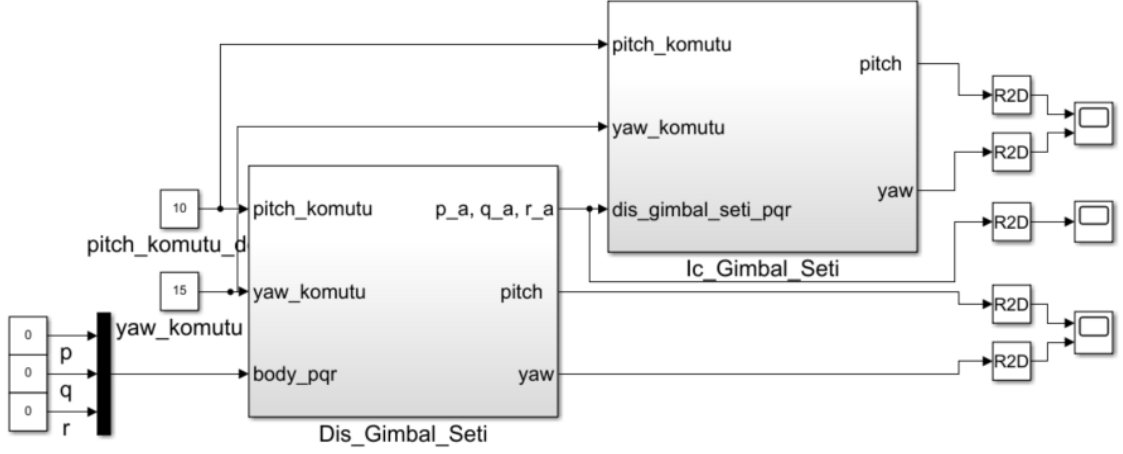
Dış gimbal setinde gimbalin iki eksenli sapma ve yunuslama hareketleri iki ayrı motorun oluşturduğu tork neticesinde sağlanmaktadır. Bu durumda sapma hareketini sağlayan z eksenine göre olan tork T_z , yunuslama hareketini sağlayan y eksenine göre olan tork T_y olarak gösterilmektedir.

Dinamik modelin tamamlanması için tork ve açısal ivme arasındaki ilişki kullanılmaktadır. Bu durumda y ve z eksenindeki tork-açısal ivme bağıntıları Eşitlik (2.14) ve (2.15)'deki gibi olmaktadır:

$$T_y = J_{ay}\dot{q}_a \quad (2.14)$$

$$T_z = J_{az}\dot{r}_k \quad (2.15)$$

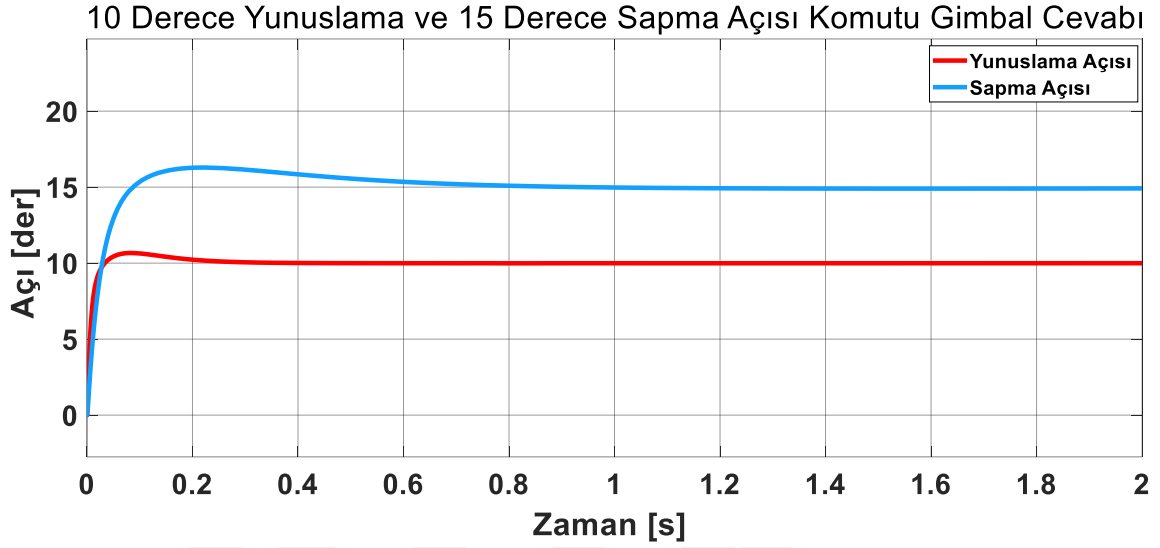
Tork denklemleri, yukarıda verilen transformasyon matrisleri, Euler açıları ve eksen takımlarının açısal hızlarının birbirleri ile ilişkileri kullanılarak Simulink'te matematiksel modelleme gerçekleştirilmiştir. Dış eksen takımı seti ile iç eksen takımı seti birbiriyle bağlantılı çalıştığından iç eksen takımının matematiksel modelindeki gövde eksen takımı, dış eksen takımının yunuslama gimbal eksen takımı olmaktadır. Bu durumda dış gimbalin açısal hız çıktıları iç gimbalin açısal hız girdisi olarak kullanılarak matematiksel modelleme 4 eksene genişletilmiştir. Şekil 2.8'te her biri 2 eksenden oluşan gimbal setlerinin Simulink modeli gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Gimbalin dinamik modeli

Modelde, tüm gimbal sistemi hava aracına bağlı olduğundan, hava aracının açısal hız değişimleri direkt girdi olarak alınmaktadır. 2 eksenli gimbal sisteminin hareket denklemleri kullanılarak rotasyon matrisleri yardımıyla dış ve iç eksenler birbirine bağlanıp, 4 eksende hareket edebilen bir model oluşturulmuştur. Şekil 2.9’da dış (iç ile farkı gövdenin hız değişim değerlerini kullanmasıdır.) gimbal eksen takımının motor modelleri, PID kontrolcülere ve rotasyon matris işlemlerinin yapıldığı bloklar verilmiştir.

Modelde dış gimbal setinin sapma ve yunuslama açıları PID kontrolcülerle kontrol edilmektedir. Gimbalin genel kontrolcü yapısı başlık 3.5'de tanıtılmıştır. Örnek bir simülasyon çıktısı olarak 15 derece sapma ve 10 derece yunuslama açısı komutu verildiğinde modelin cevabı Şekil 2.10'deki gibi olmaktadır.



Şekil 2.10 İç gimbalin oturma grafiği

3.1 Motor Sürüşü

Bu kısımda gimbal motorları ve sürüş yöntemlerinden bahsedilmiştir.

Gimbal sistemlerinde kullanılacak motorlarda birçok çeşit mevcuttur. Üst seviye uygulamalarda hassasiyeti artırmak için piezoelektrik ve “voice coil” motorların kullanıldığı görülmektedir. Genel sivil görüntüleme gimballerinde BLDC motorların kullanıldığı görülmektedir. BLDC motorlar, maliyet, temin edilebilirlik ve hassasiyet bakımından tasarlanan sistem için en uygun eyleyicidir.

Piezoelektrik motorlar: piezoelektrik seramiklere uygulanan farklı elektrik alanlar ile malzemenin genişleme ve daralma tepkilerinin dairesel veya lineer harekete aktarılması ile çalışır. Çalışma yapısından kaynaklı olarak çok hassas hareket kontrolü yapılabilmektedir.

Voice Coil motorlar: iki mıknatıs kutbunun manyetik alan çizgileri üzerinde paralel bir bobinden oluşmaktadır. Bobin üzerinden akım geçirerek oluşturulan manyetik alan kontrol edilerek konum kontrolü sağlanır. Yaygın olarak, sabit disklerdeki okuyucu başlığın konumlandırılmasında kullanılmaktadır.

BLDC motorlarda ise yıldız, delta olmak üzere iki farklı faz bağlantı yapısı ve oluklu, oluksuz olmak üzere iki farklı sarım yapısı bulunmaktadır. Yıldız ve delta faz bağlantı yapıları arasındaki temel fark delta faz bağlantısında güç denklemindeki katsayı 3 iken yıldız bağlantısının güç denklemindeki katsayısının $\sqrt{3}$ olmasıdır. Bu fark dolayısıyla yıldız faz bağlantısına sahip motorlar daha yavaştır. Bunun yanında birçok karakteristik farklılık meydana gelir. Denklem 3.1 ve 3.2’de yıldız ve delta faz bağlantıları için güç formülleri verilmiştir.

$$\text{Yıldız faz bağlantısı:} \quad P = \sqrt{3} V I \quad (3.1)$$

$$\text{Delta faz bağlantısı:} \quad P = 3 V I \quad (3.2)$$

Sarım yapısı olarak oluksuz sarım yapısında oluklu sarım yapısına göre daha az tork dalgalanmaları oluşur. Buda konum kontrolü uygulamalarında daha hassas hareket imkânı vermektedir.

Gimbal sisteminde maliyet ve temin edilebilirliğinin kolay olması nedeniyle delta faz bağlantısına sahip ve oluklu fırçasız doğru akım motorları kullanılmıştır.

3.1.1 Sinüzodial ve Trapez Sürüş Yöntemleri

Tek kutuplu 3 fazlı fırçasız motorlarda fazların kombinasyonları ile bir tur için 6 adım oluşur. Eğer kutup sayısı 1'den büyük ise 1 turdaki adım sayısı kutup sayısının 6 katı kadar olur. Bu altı fazın ardışık tetiklenmesi ile sürüş yöntemine altı adım komütasyon veya trapez sürüş yöntemi denmektedir. Bu yöntemde bir sonraki komütasyon adımına geçmek için bulunulan konumun bilinmesi gerekmektedir. Anlık konumu faz akımlarından, hall sensörlerinden veya enkoderden okumak mümkündür. Hall sensörü veya enkoder kullanmadan faz akımı ölçümü ile yapılan sürüşe sensörsüz sürüş adı verilmektedir. Altı adım komütasyonunda faz gerilimleri trapezoidal olarak oluşmaktadır. Bu gerilim dalgaları sinusoidal dalgaya evrilerek sürüş iyileştirilebilir.

Trapez sürüşün diğer ismi altı adım komütasyonudur. Bu yöntemde motor 6 farklı faz komütasyonu ile hareketlendirilir. Faz gerilimlerinin değişim şeklinden dolayı akım grafiği tepecik tepeciktir. Buda tork atlamalarına sebep olur. Aynı zamanda sürücü devresinin daha fazla ısınmasına sebep olur. Motor her adımda $(\frac{360}{\text{kutup sayısı} * 6})$ derece kadar yol alır. Bu sebeple trapez sürüş yönteminde konum çözünürlüğü düşüktür ve redüktörsüz sistemlerde konum kontrolü uygulamaları için uygun değildir.

Sinüzodial yöntem de ise faz akımı sinüs sinyali şeklindedir. Faz geçişleri trapez sürüş yöntemine göre daha yumuşaktır. Dolayısıyla dönüş sırasındaki tork atlamaları azdır. Aynı anda 3 fazda da gerilim vardır. Oluşturulan faz sinyalinin hassasiyetine göre rotor istenilen açı değerine konumlandırılabilir.

Trapez sürüşte geri besleme olarak 3 adet hall effect sensörü yeterli iken sinüzodial sürüşte enkodere ihtiyaç duyulmaktadır. Gimbal sistemi hassas konumlandırmaya ihtiyaç duyduğundan sinüzodial sürüş yöntemi kullanılmıştır.

3.1.2 Alan Kontrolü

Alan kontrolü sinüzodial sürüş modunda rotor tork vektörünün rotor manyetik alan vektörüne sürekli olarak dik olacak şekilde oluşturulmasıdır. Bu koşulu sağlamak için PI

En soldaki grafik faz akımlarını vermektedir. Ortadaki grafik clark dönüşümü sonrasındaki dik açılı referans eksen takımına indirgenmiş akım verisini göstermektedir. Soldaki grafik ise park dönüşümü ile elde edilen döner referans eksen takımından elde edilen akım verisini göstermektedir.

Clark dönüşümünün formülasyonu şöyledir:

$$I_{\alpha} = I_a \quad (3.3)$$

$$I_{\beta} = (I_a + 2I_b)/\sqrt{3} \quad (3.4)$$

Alan kontrolü sırasında faz akımlarının 120 derecelik faz farkıyla oluşması sebebiyle toplamalarının sıfır olduğu unutulmamalıdır.

$$0 = I_a + I_b + I_c \quad (3.5)$$

Park dönüşümünün formülasyonu şöyledir:

$$I_d = I_{\alpha} \cos \theta_R + I_{\beta} \sin \theta_R \quad (3.6)$$

$$I_q = I_{\beta} \cos \theta_R + I_{\alpha} \sin \theta_R \quad (3.7)$$

Park dönüşümü sırasında enkoder verisine ihtiyaç duyulmaktadır. θ_R açısı rotor açısıdır. Park dönüşümü sonrasında elde edilen I_d, I_q değerlerine PI kontrolcü uygulanarak, I_d (manyetik alan) bileşeni sıfıra eşitlenir. Bu şekilde maksimum tork elde edilir. PI kontrolcüler sonunda V_d, V_q değerleri elde edilir. Ardından ters park sonucunda V_{α}, V_{β} gerilimleri elde edilir ardından ters Clark dönüşümü uygulanarak V_a, V_b, V_c faz gerilimleri elde edilir.

Ters park dönüşümünün formülasyonu şöyledir:

$$V_{\alpha} = V_d \cos \theta_R - V_q \sin \theta_R \quad (3.8)$$

$$V_{\beta} = V_q \cos \theta_R + V_d \sin \theta_R \quad (3.9)$$

Ters Clark dönüşümünün formülasyonu şöyledir:

$$V_a = V_{\alpha} \quad (3.10)$$

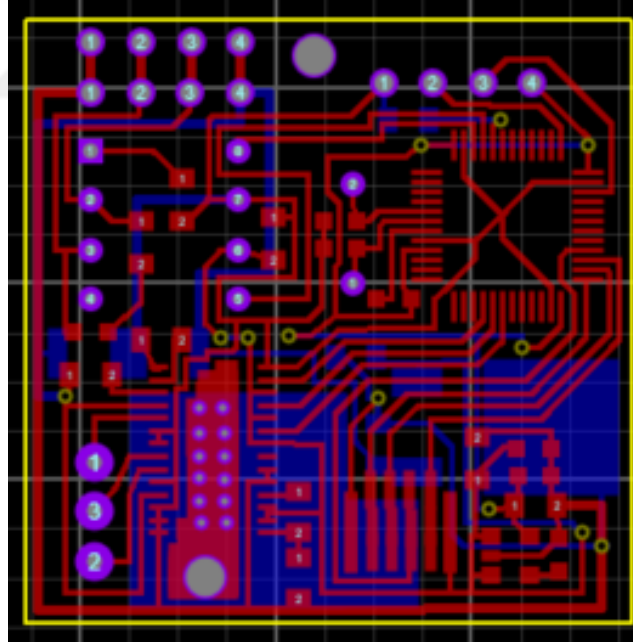
$$V_b = (-V_a + \sqrt{3}V_\beta)/2 \quad (3.11)$$

$$V_c = (-V_a - \sqrt{3}V_\beta)/2 \quad (3.12)$$

Sonuç olarak alan kontrolü sayesinde, motor, maksimum torkla ve minimum tork dalgalanması ile sürülebilmektedir. Gimbal sisteminde kontrol hassasiyetini arttırmak amacıyla motor sürücü ünitesi algoritmasına alan kontrolü de eklenmiştir.

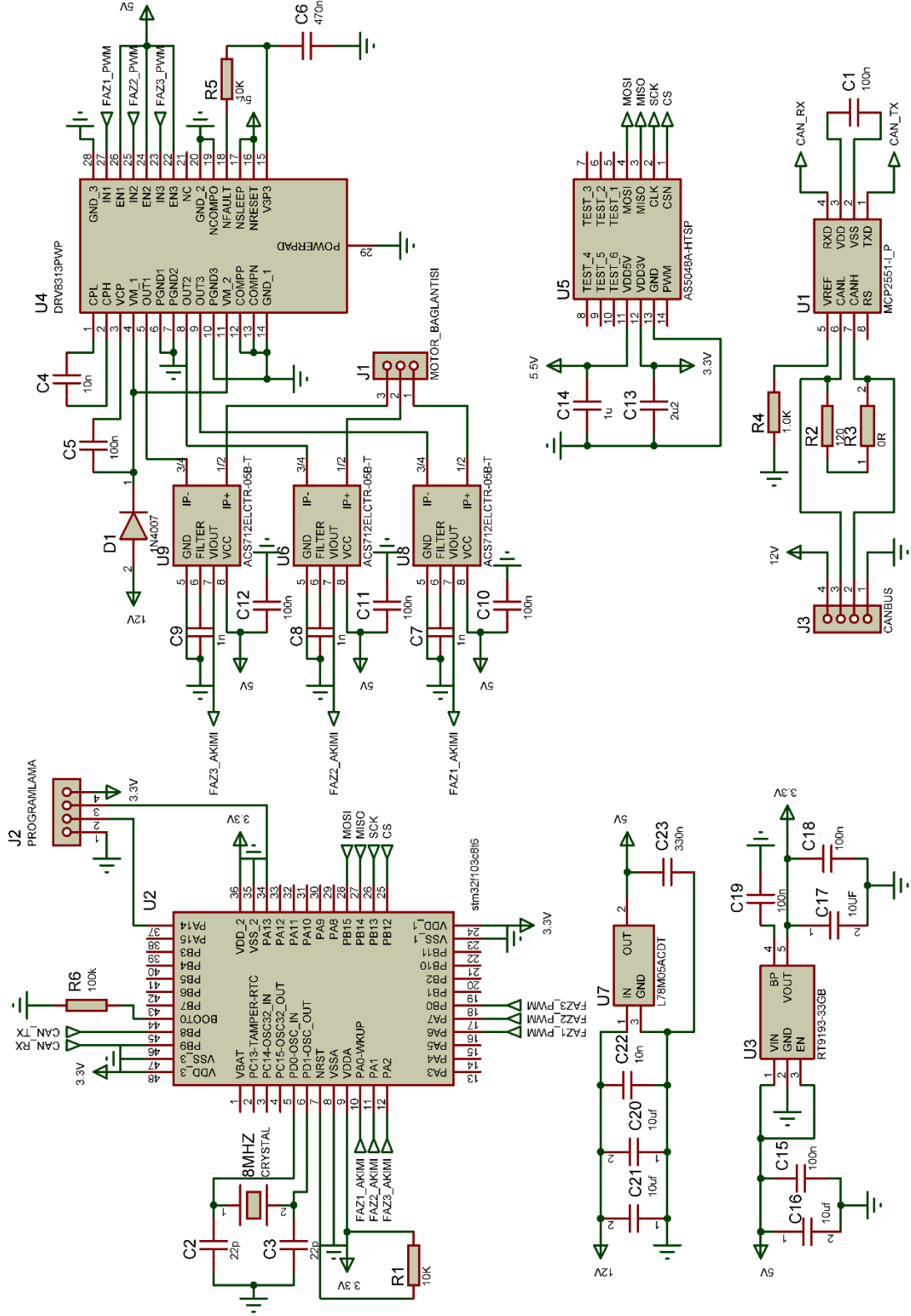
3.1.3 Motor Sürücü Ünitesi

Gimbal içerisinde donanımın yerleştirileceği alan kısıtlı olduğundan, istenen sürüş yöntemlerinin de daha kolay uygulanabileceği özel motor sürücü ünitesi tasarlanmıştır. Devre şeması ve baskı devre tasarımı için Proteus programı kullanılmıştır. Şekil 3.3'te motor sürücü ünitesine ait baskı devre tasarımı gösterilmiştir. Gimbal içerisinde alan kısıtlı olduğundan baskı devre olabildiğince küçük tutulmaya çalışılmıştır. Tasarlanan baskı devre 35 mm X 35 mm büyüklüğündedir.



Şekil 3.3 Motor sürücü ünitesi baskı devre tasarımı

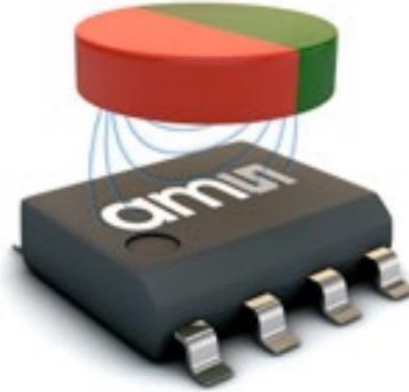
Şekil 3.4'de motor sürücü ünitesinin devre şeması verilmiştir. Şema üzerinde kullanılan komponentlerin isimleri altlarına yazılmıştır. Sürücü alan kontrolünde kullanılmak üzere tasarlandığından motora giden üç fazın da akımlarını ölçme kabiliyetine sahiptir.



Şekil 3.4 Motor sürücü ünitesi devre şeması

3.1.3.1 Manyetik Mutlak Enkoder

Fırçasız doğru akım motorlarında sinüs sürüş ve alan kontrolü algoritmaları için rotor açısına ihtiyaç duyulduğundan bahsedilmiştir. Bunun yanında eksen açılarını sınırlamak, kontrolcü geri beslemesi olarak kullanmak için yine enkoder verisine ihtiyaç duyulmaktadır. Gimbal üzerindeki alan kısıtlamasından dolayı MEMS manyetik mutlak enkoder tercih edilmiştir. Kullanılacak enkoderlerin istendiğinde tek bir kontrolcü kart ile kullanılabilmesi için SPI haberleşmeli sensörler tercih edilmiştir. Seçilen enkoder sıfırlama ve sınırlama kalibrasyonları güç kapatılıp açıldığında da kaybolmamasını sağlamaktadır. Manyetik enkoder, motor milinin arkasına yerleştirilen mıknatısın kutupları arasındaki çizginin açısını ölçmektedir. Kullanılan enkoder Şekil 3.5'te verilmiştir. Şekilde kırmızı ve eşil renkleri ile kutupları temsil edilen mıknatısın manyetik alan çizgilerinin MEMS enkoder üzerinden geçtiği görülmektedir. Enkoder bu çizgiler ile açı ölçümü yapmaktadır.



Şekil 3.5 MEMS manyetik mutlak enkoder [26]

Kullanılan mıknatıs dikey kutuplu olmalıdır. Enkoder 360 derece ölçüm aralığında 14 bitlik çözünürlüğe sahiptir. Enkoderin çözünürlüğü denklem 3.13'de hesaplanmıştır.

$$\frac{360}{2^{14}} \cong 0,022^{\circ} \quad (3.13)$$

Enkoder ve motor sürücü ünitesi arasında haberleşme için SPI haberleşme protokolü kullanılmaktadır. Motor sürücü ünitesinden açı ölçümlerinde gürültü olduğu görülmüştür. Enkoder sensörü saniyede 12.000 ölçüm verebilmektedir [26]. Sensör örnekleme hızı motor kontrolünün yapıldığı yazılım bloğunun çevrim hızından çok daha yüksek

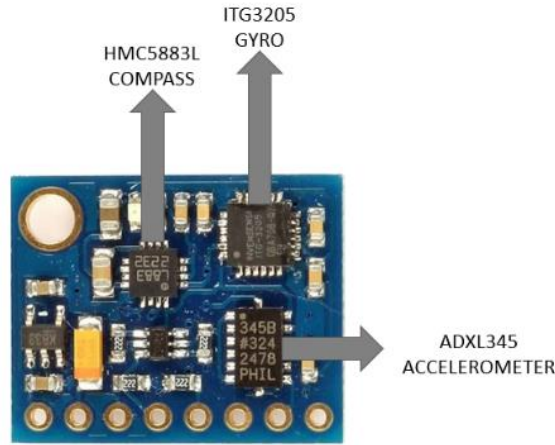
olduğundan enkoderden gelen açı verisine kayan ortalama filtresi uygulanmıştır. α , i ve n ifadeleri sırasıyla açı değeri, ölçüm indisi ve kayan ortalama pencere sayısı olmak üzere kayan ortalama formülü şöyledir;

$$\alpha = \frac{\sum_{k=i}^{i-n} \alpha_k}{n} \quad (3.14)$$

Kullanılan MEMS enkoder çıktıları, optik enkoder kullanılarak doğrulanmıştır. Yapılan testin detayları 4. bölümde verilmektedir.

3.2 Ataletsel Ölçüm Ünitesi

Sistemde MEMS ataletsel ölçüm ünitesi kullanılmıştır. Ünite içerisinde ivme ölçer, jiroskop ve manyetik pusula bulunmaktadır. Her sensörün çalışma yapısından kaynaklı farklı ölçüm hataları vardır. Bu sebeple üçünden elde edilen veriler kalman filtresi ile birleştirilerek bir arada kullanılmıştır. Sistemde kullanılan ataletsel ölçüm ünitesi Şekil 3.6’te gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Ataletsel ölçüm ünitesi

3.2.1 İvme Sensörü

İvme ölçer sensörü X, Y ve Z eksenleri üzerinde sensöre etki eden ivmeyi ölçmektedir. Yere paralel ve hareketsiz dururken sadece Z eksenini üzerinden 1 g büyüklüğünde ivme ölçecektir. Bu durumda X ve Y eksenlerinde 0 g ölçülmektedir. Sensör eğim aldığı anda Z ekseninde olması gereken 1 g büyüklüğündeki yer çekimi ivmesinin bir kısmını yunuslama ve dönme açılarına göre X ve Y eksenlerine geçmektedir. Yer çekimi ivmesinin X, Y ve

Z eksenlerindeki izdüşümleri ile sensörün yunuslama ve dönme açılarını ölçmek mümkündür. Açı hesaplamak için formülasyon şöyledir:

g_x , g_y ve g_z değerleri sırasıyla X, Y ve Z eksenlerinden okunan ivme değerleridir.

θ_g , ϕ_g değerleri X ve Y eksenlerinin hesaplanan açı değerleridir.

$$\theta_g = \text{atan} \left(\frac{g_x}{\sqrt{g_y^2 + g_z^2}} \right) \quad (3.15)$$

$$\phi_g = \text{atan} \left(\frac{g_y}{\sqrt{g_x^2 + g_z^2}} \right) \quad (3.16)$$

Fakat ivme ölçer ile sapma açısı ölçülemez. Bunun yanında sensör üzerindeki titreşimler ve platformun ivmeli hareketleri ölçümün bozulmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple ivme ölçerden elde edilen açı değeri tek başına kullanılamaz.

3.2.2 Jiroskop Sensörü

Jiroskop sensörü, X, Y ve Z eksenleri üzerindeki açısal hızı ölçmektedir. Ölçülen açısal hızın integrali alınarak açı değeri elde edilir. İntegral alınırken her ölçüm aralığında geçen süre boyunca açısal hız aynı kabul edildiğinden açı değerlerinde sürekli olarak integral hatası birikmektedir. Zaman geçtikçe gerçek açı değeri ile jiroskop açısı arasındaki fark artar. Bu sebeple jiroskop açısının tek başına kullanılması uygun değildir.

3.2.3 Pusula Sensörü

MEMS pusula sensörü dünyanın manyetik alanını ölçerek manyetik kuzeyin hesaplanmasını sağlar. Doğru ölçüm yapılabilmesi için sensörün her zaman yere paralel olması gerekmektedir. Bu şart platform üzerinde sağlanamayacağından sistemin eğim açıları kullanılarak pusula sensörünün X ve Y eksenlerindeki bileşenleri hesaplanıp toplanmaktadır. Daha sonra manyetik kuzey hesaplanır.

Formülasyon şöyledir:

$$M_{x2} = M_{x1} \cos \theta + M_{z1} \sin \theta \quad (3.17)$$

$$M_{y2} = M_{x1} \sin \phi \cos \theta + M_{y1} \cos \phi - M_{z1} \sin \phi \cos \theta \quad (3.18)$$

$$\psi_M = \begin{cases} \arctan\left(\frac{M_{y2}}{M_{x2}}\right), & M_{x2} > 0 \text{ ve } M_{y2} \geq 0 \\ 180^\circ + \arctan\left(\frac{M_{y2}}{M_{x2}}\right), & M_{x2} < 0 \\ 360^\circ + \arctan\left(\frac{M_{y2}}{M_{x2}}\right), & M_{x2} > 0 \text{ ve } M_{y2} \leq 0 \\ 90^\circ, & M_{x2} = 0 \text{ ve } M_{y2} \neq 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

M_{x1} , M_{y1} , M_{z1} olarak verilen ifadeler sensörün çıktılarıdır. M_{x2} , M_{y2} olarak verilen ifadeler eğim hatası giderildikten sonra elde edilen X ve Y eksenlerindeki manyetik alan bileşenleridir. ψ_M ise manyetik kuzey açısıdır.

Manyetik pusula yakınında demir içeren bir cisim var ise sensör verisinin kullanılmadan önce kalibre edilmesi gerekmektedir.

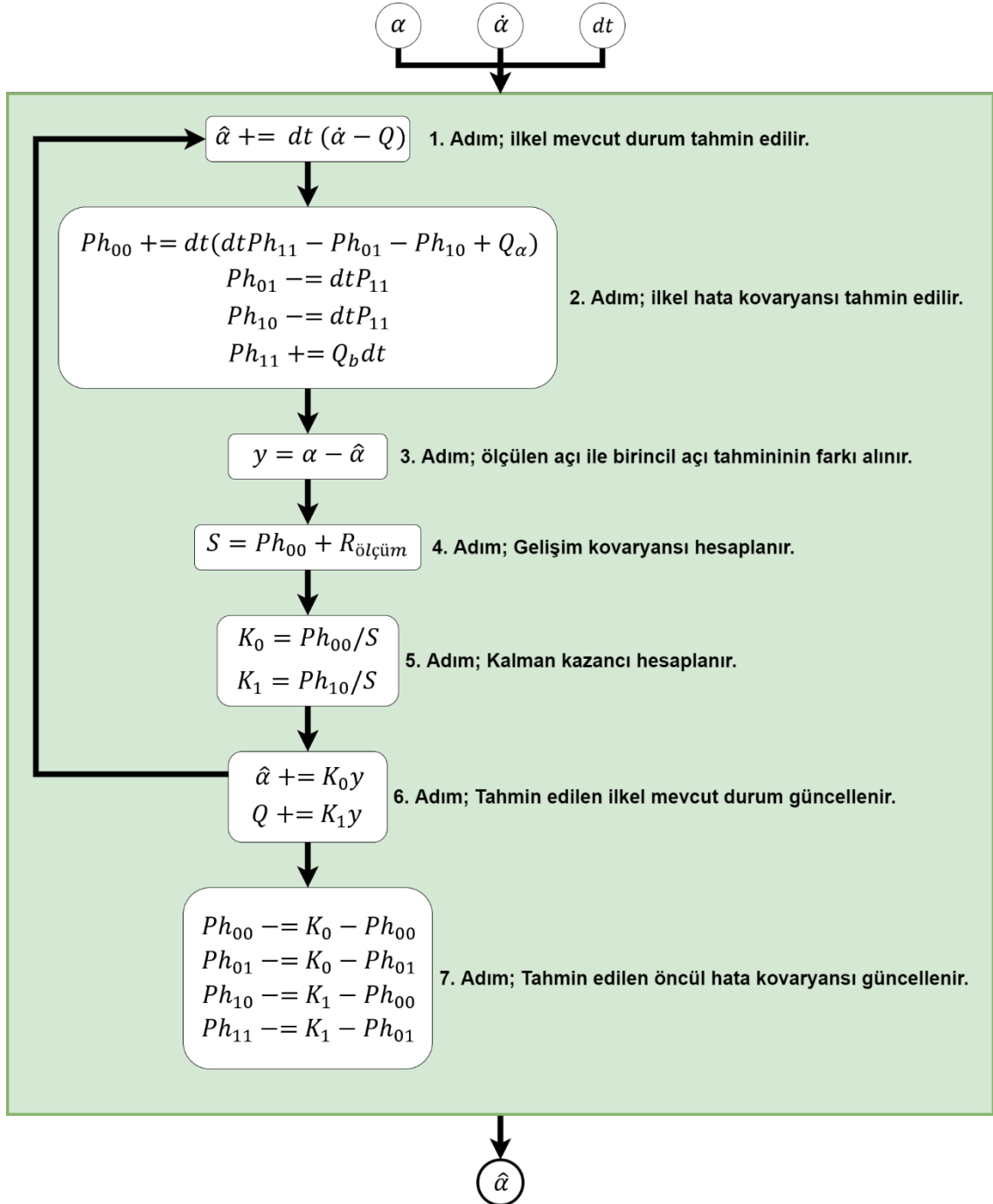
3.2.4 Kalman Filtresi

Ataletsel ölçüm ünitesi üzerindeki üç sensörün verisini kullanarak doğruluğu arttırılmış aksenal açıları elde etmek için kalman filtresi kullanılmıştır. Kalman filtresi basitçe optimal bir özyinelemeli veri işleme algoritmasıdır [27].

Rudolf Kalman tarafından geliştirilen bu yöntem, Apollo Uzay programı gibi önemli projelerde kullanılmış. Her ne kadar filtre olarak adlandırılrsa da aslında bir tahmin algoritmasıdır. Kullanıldığı sistemin hata ve gürültü modelleri ile sistemin önceki giriş çıkış bilgilerini kullanarak durumunu tahmin etmektedir. Yapılan durum tahmini ile ölçümden kaynaklanan hataların önüne geçilebilmektedir. Kalman filtresinin genel bir formülü yoktur. Kullanıldığı dinamik sistemin modeline göre algoritma oluşturulması gerekmektedir. Sensörlerden okunan verilerde bir miktar gürültü ve hata bulunmaktadır. Kalman filtresi modelden elde edilen parametreleri ve sistemin önceki girdi çıktılarını kullanarak bu gürültü ve ölçüm hatalarının sistem üzerindeki etkisini azaltmak için durum tahmini yapılmasını sağlar.

Kalman filtresi, bu uygulamada sensör füzyonu amacı ile kullanılmıştır. Yani sistemin durumunu ölçmek için birden çok sensör kullanılmaktadır. Kullanılan sensörlerin gürültü modeli ve sistemin önceki giriş çıkış verileri kullanılarak durum tahmini yapılmaktadır. Böylece sistemde açı ölçümü için kullanılan 3 farklı sensörden alınan verilerle sensör hata ve gürültülerinin giderildiği tek bir durum çıktısı elde edilmektedir.

Tez kapsamında kullanılan Kalman filtresi algoritmasının kod akışı Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Burada, $\hat{\alpha}$, tahmin edilen açı değeridir. $\dot{\alpha}$, jiroskoptan okunan açısal hız değeridir. α , ivme ölçer verisi ile elde edilen açı değeridir. dt , iki ölçüm arasında geçen süredir. Q , ifadesi jiroskopun sapma değeridir. $Ph_{00}, Ph_{01}, Ph_{10}$ ve Ph_{11} , hata kovaryans matrisinin elemanlarıdır. Q_a , jiroskopun sensör gürültüsü sabitidir. Q_b jiroskopun gürültü sapma değeridir. y , açı hatasını temsil eder. S , gelişim kovaryansını temsil eder. $R_{ölçüm}$, ölçüm gürültüsü sabitidir. K_0 ve K_1 , değerleri kalman kazançlarıdır.



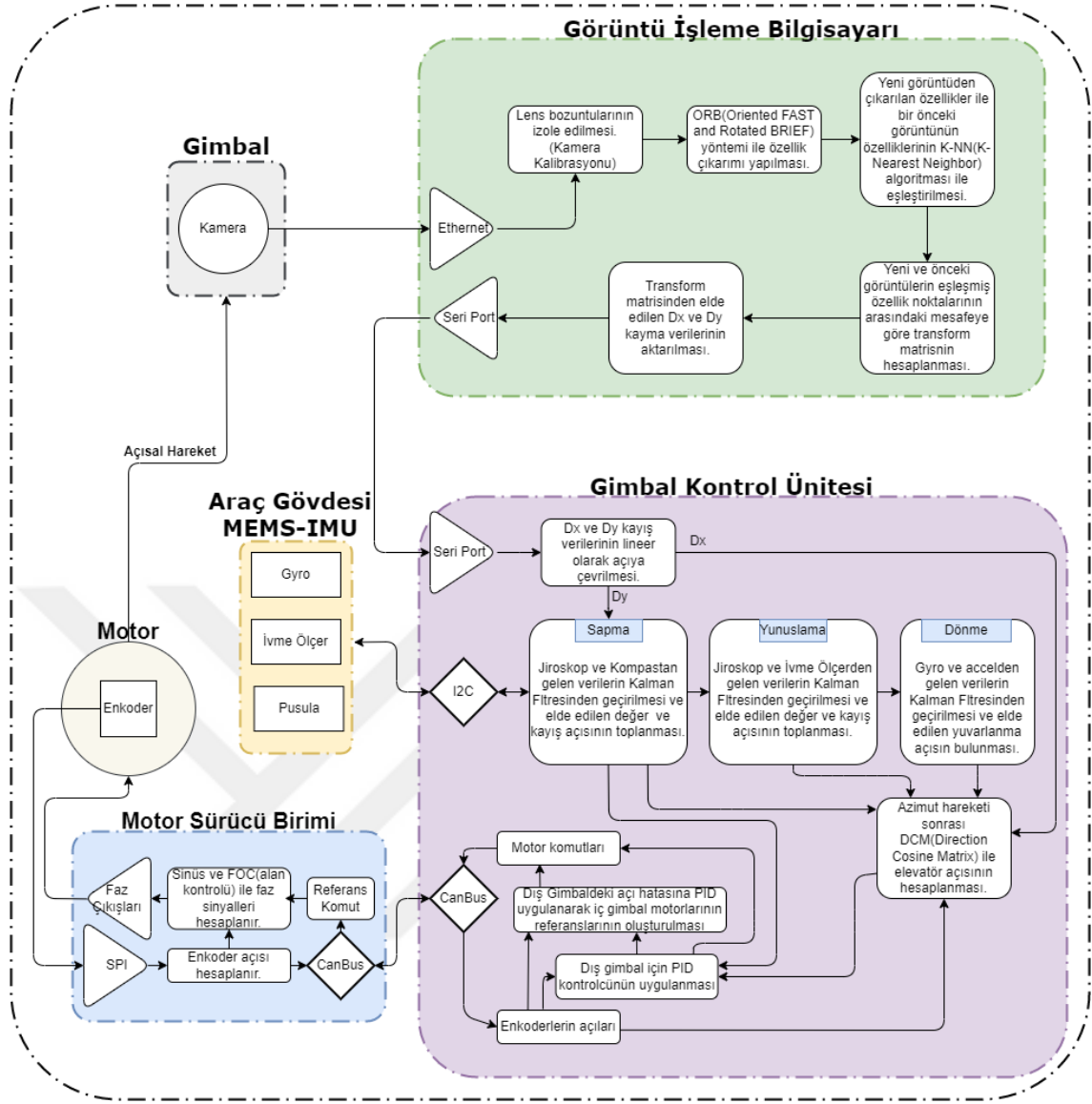
Şekil 3.7 Kalman filtresi algoritmasının işlem akışı

3.3 Görüntü İşleme

Sistemin görüntü işleme kısmında sırası ile şu işlemler uygulanır.

- Optik kalibrasyon,
- Özellik noktalarının çıkarımı,
- Bir önceki kare ile özellik noktalarının eşleştirilmesi,
- Hareket matrisinin hesaplanması,
- Hareketli özellik noktalarının elenmesi,
- Hareket matrisinin yenilenmesi,

Bütün bu işlemler Görüntü İşleme Bilgisayarı tarafından yapılmaktadır. Kullanılan kamera saniyede 120 kare hızına sahiptir. Görüntü işleme algoritmasının frekansı kameranın hızına göre ayarlanmıştır. Sistem periyodikliğinin emniyete alınması için 100 Hz ile sınırlandırılmıştır. Bu sayede içeride yapılan integral hesaplarının yenileme zamanı hatası sebebiyle yanlış sonuç üretmesinin önüne geçilmiştir. Şekil 3.8'deki "Görüntü İşleme Bilgisayarı" alanının içerisindeki kısımda görüntü işleme algoritmasının akış diyagramı verilmiştir.

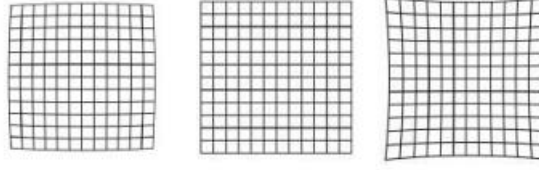


Şekil 3.8 Gimbalin genel algoritma yapısı

3.3.1 Optik Bozulmanın Giderilmesi

Optik bozulma, lensin şeklinden veya lens ve sensör arasındaki açısal hatalardan kaynaklı görüntüde oluşan hatalardır. Temelde iki farklı bozulma çeşidi vardır. Lensin şeklinden kaynaklanan radyal bozulma ve lens ile sensör arasındaki kaçıklıktan kaynaklanan teğetsel bozulmadır.

Radyal bozulma yapısı Şekil 3.9’de gösterilmiştir. Burada görselin, namlu veya iğnelik tipi radyal bozulmaya maruz kaldığında gerçek durumuna göre nasıl değişeceği gösterilmiştir.



Şekil 3.9 A) Namlu tipi radyal bozulma B) Bozulmamış görüntü C) İğnelik tipi radyal bozulma [13]

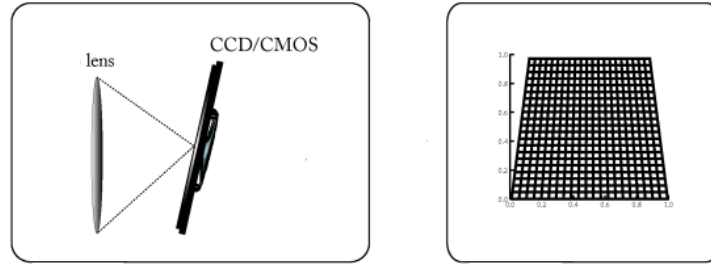
Radyal bozulmada karenin merkezinden kenarlara gittikçe noktalar olması gereken yerden kayarlar. Kamera hareket ettiğinde bu noktalar bozulma yörüngesinde hareket ettiğinden kayma verisi olması gerekenden farklı hesaplanır. Brown'un radyal bozulma modeli kullanılarak görüntü düzeltilebilmektedir. Brown'un formülasyonu şöyledir;

$$x_{düzeltilmiş} = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (3.20)$$

$$y_{düzeltilmiş} = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (3.21)$$

x ve y indisleri kadrāj üzerindeki koordinatları ifade etmektedir. r bozulmuş noktanın merkeze olan uzaklığıdır. k_1, k_2 ve k_3 radyal bozulma sabitleridir.

Teğetsel bozulma ise Şekil 3.10'de gösterilmiştir. Sol tarafta gösterilen durum sensör ve lensin birbirlerine göre konumlama hatasıdır. Sağ tarafta ise bozulma sonucu oluşacak görüntü gösterilmiştir.



Şekil 3.10 A) Teğetsel bozulmaya sebep olan sensör lens pozisyonu B) Teğetsel bozulma sonucunda oluşan görüntü [14]

Teğetsel bozulma da radyal bozulmada olduğu gibi kadrājın hareket verisinin yanlış hesaplanmasına sebep olur. Bu sebeple düzeltilmesi gerekmektedir. Conrady'nin teğetsel bozulma modeli kullanılarak bu bozulma düzeltilebilir. Formülasyonu ise şöyledir;

$$x_{düzeltmiş} = x + (2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)) \quad (3.22)$$

$$y_{düzeltmiş} = y + (p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy) \quad (3.23)$$

x ve y indisleri kadrage üzerindeki koordinatları ifade etmektedir. r bozulmuş noktanın merkeze olan uzaklığıdır. p_1 ve p_2 teğetsel bozulma sabitleridir.

3.3.2 Özellik Noktaların Çıkarımı

Özellik çıkarma algoritmalarının görüntü işleme uygulamaları için önemli bir yeri vardır. Uygun bir özellik çıkarma algoritmasından, değişen aydınlatma koşullarına, farklı dönüş açılarına, ölçeklerine, gürültülerine ve benzeri gerçek zamanlı görüntüleme senaryolarına karşı güçlü olması beklenir. Ancak yaygın kullanılan özellik çıkarma algoritmaları bahsi geçen durumlar için birbirlerine göre avantaj ve dezavantaj gösterebilmektedir. Bu çalışmada SIFT, SURF ve ORB algoritmaları ele alınmıştır.

SIFT, 2004 yılında D. Lowe tarafından geliştirilmiştir. [16] SIFT 2 parça olarak incelenebilir. Bunlar, anahtar nokta (keypoint) tespiti ve tanımlayıcı (descriptor) çıkartmadır. SIFT Laplacian-of-Gaussian'ın bir yaklaşımı olan Difference-of-Gaussians'ı (DoG) temel alır. Görüntü üzerinde çeşitli farklı ölçeklerde DoG kullanılarak yerel maksimumlar aranarak özellik noktaları tespit edilir. Tanımlayıcı yöntemi ise algılanan her özelliğin etrafında 16x16'lık bir komşuluk çıkarır ve bölgeyi alt bloklara bölerek 128 boyutlu bir özellik tanımlayıcısında birleştirilir. SIFT, görüntü döndürme, ölçek ve sınırlı afin varyasyonlarına karşı sağlam bir şekilde çıktı üretir. Ancak ana dezavantajı, yüksek hesaplama maliyetidir.

SURF, 2008 yılında H. Bay Et al. tarafından geliştirilmiştir.[17] SURF, LoG'ye yaklaşmak için DoG kullanmak yerine kutu Filtrelerini (box filter) kullanır. Bunun avantajı, kutu filtrelerin kolayca hesaplanabilmesi ve farklı ölçekler için hesaplamaların aynı anda yapılabilmesidir. Her özellik noktası için Haar-wavelet ile 64 boyutlu bir tanımlayıcı oluşturur. SURF özellikleri, döndürme ve ölçekleme için dayanıklıdır. Daha geniş açılı görsellerle çalışmak için 128 boyutlu bir özellik tanımlayıcısı değerine genişletilebilir.

ORB, 2011 yılında E. Rublee et al. tarafından geliştirilmiştir. [9] FAST ve BRIEF yöntemlerinin bir karışımıdır. Bir anahtar nokta (keypoint) adayının etrafından belirli yarıçaptaki pikselleri seçer. Aday pikselden daha koyu olan n (n sayısı kullanıcı

tarafından belirlenir.) tane piksel olup olmadığını kontrol eder. BRIEF ise özellik tanımlayıcısı çıkarmak için kullanılır.

Gerçek zamanlı özellik çıkarımı konusunda SURF ve ORB algoritmalarının öne çıktığı görülmüş ve ikisi üzerinde testler yapılmıştır. Yapılan testler 4.2.1 numaralı başlıkta anlatılmıştır. Test sonucunda hem daha hızlı olması hem de değişken ışık senaryolarına daha dayanıklı olması sebebiyle çalışmada ORB algoritmasının kullanılmasına karar verilmiştir.

3.3.3 Özellik Noktaların Eşleştirilmesi

Ardışık iki görüntü arasındaki hareket miktarını hesaplamak için bu görüntülerin üzerinde çıkarılan özellik noktalarının eşleştirilmesi gerekmektedir. Kullanılacak olan eşleştirme algoritmasının hızı yüksek ve doğruluğu sisteme hata üretmeyecek kadar yüksek olmalıdır.

Brute Force Matcher [28] algoritması olabilecek tüm eşleşme ihtimallerini deneyerek en iyi anahtar nokta eşleştirmesini bulmayı vaat etmektedir. Flann Based Matcher [29] yaklaşık olan en yakın komşulardan eşleşmeleri bulur ancak mümkün olan en iyisi olmayabilir. Bu sebeplerden ötürü Flann eşleştirme yöntemleri Brute Force Matcher eşleştirme yöntemlerinden daha hızlıdır ancak en iyi eşleştirmeyi bulmayı vaat etmez.

Sistemde çıkarılan özellik noktalarının eşleştirilmesi için Brute Force Matcher tabanlı KNN algoritması [20] seçilmiştir.

3.3.4 Hareketli Özellik Noktalarının Elenmesi ve Hareket Matrisinin Hesaplanması

Kadraj üzerindeki hareketin hesaplanması için homografi matrisi elde edilmesi gerekmektedir. homografi matrisi, bir görüntüyü farklı perspektifte elde edilmiş gibi dönüştürmemizi sağlayan bir çarpım matrisidir. Gimbal sisteminde, kameradan alınan ardışık iki farklı perspektif görüntüsü kullanılarak homografi matrisi elde edilmektedir.

Ardışık iki görüntü arasındaki zaman farkı az olduğundan (yaklaşık 10 ms) kameranın aynı düzlemde hareket ettiğini varsayarsak formülasyon şöyle olmaktadır:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Burada x_1, y_1 birinci görüntü karesine ait özellik noktalarına ait koordinatlar, x_2, y_2 ise ikinci görüntü karesine ait özellik noktalarına ait koordinatlardır. H homografi matrisini ifade eder.

Kadraaj içerisindeki hareketli noktaların elenmesi için aşağıdaki algoritma kullanılmaktadır:

- Alınan ardışık görüntüler arasındaki homografi matrisi hesaplanır.
- İki görüntü arasında eşleştirilen her özellik noktasının kayma verisi hesaplanır.
- Noktaların kayma verisi homografi matrisi ile elde edilen kadraajın genel kayma verisi arasındaki fark kontrol edilir.
- Eğer aradaki fark belirlenen eşik değerinden fazla ise bu nokta hareketli kabul edilir ve bu nokta özellik noktalarının tutulduğu matristen çıkarılır.

Yeni özellik noktaları matrisi ile homografi matrisi tekrar hesaplanır.

3.4 Veri İletişimi

Donanımlar arası haberleşmeyi sağlamak için farklı veri yolları kullanılmıştır. Seçilen veri yolları için farklı kablolama yapıları kullanılmaktadır. Bu noktada veri yoğunluğu, kablo sayısı, hat uzunluğu, besleme ve izolasyon gereksinimi gibi faktörler göz önünde bulundurularak veri yolu mimarisi oluşturulmuştur.

Gimbal kontrol ünitesi ve sürücüler arasında haberleşmek için CAN hattı kurulmuştur. CAN hattı sadece iki kablo kullanarak haberleştiğinden gimbalin eklem bağlantıları üzerinde hareket etmesinde kablo yükü azalmaktadır. Bununla beraber CAN mimarisi üniteler arası toprak birleştirmesi gerektirmediğinden motor hareketleri sırasında oluşabilecek gerilim oynamalarından haberleşme etkilenmemektedir.

Ataletsel ölçüm ünitesi ve gimbal kontrol ünitesi arasında I^2C (Inter-Integrated Circuit) hattı kullanılmıştır.

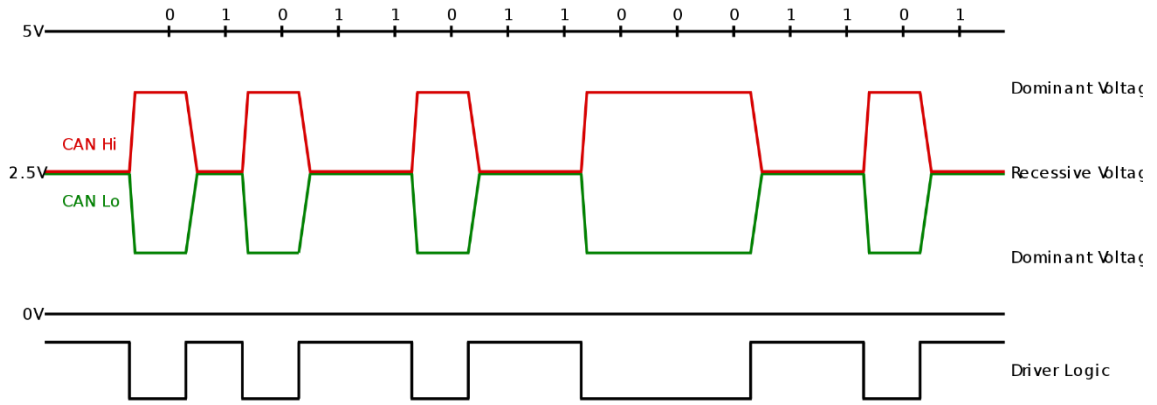
Enkoderler ile motor sürücü üniteleri arasında SPI hattı kullanılmıştır.

Görüntü işleme bilgisayar ve gimbal kontrol ünitesi arasında UART hattı kullanılmıştır.

3.4.1 CAN (Controller Area Network) Haberleşmesi

CAN, birden fazla mikro denetleyicinin tek hat üzerinden haberleşmesini sağlayan haberleşme yapısıdır. CAN haberleşmesinde CANH ve CANL olarak iki veri yolu

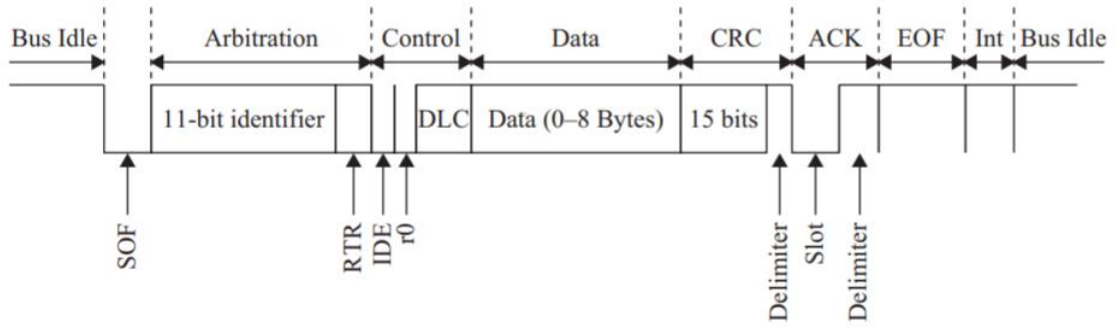
kullanılmaktadır. Veri iletimi iki hattaki gerilim seviyesinin aynı anda değiştirilmesi ile sağlanmaktadır. Şekil 3.11’da sinyal yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.11 CAN sinyal yapısı [30]

Bu yapısı sayesinde haberleşme besleme gerilimlerindeki gürültülerden etkilenmez ve haberleşen üniteler arası toprak birleştirmesi gerekmez. Hat üzerinde ilerleyen sinyalin kablo sonundan yansımaması için CANH ve CANL hatları 120 Ω değerindeki bir dirençle birbirine bağlanarak hat sonlandırılır.

Kendisine ait protokol çerçevesi vardır. Şekil 3.12’da haberleşme çerçevesi verilmiştir.



Şekil 3.12 CAN haberleşme çerçevesi [22]

Haberleşme çerçevesindeki ayrılmış bölgelerin içeriği şöyledir;

SOF; tek bit iletişimin başladığını belirtir.

Arbitration Field alanı şunları içermektedir:

11 bitlik mesaj tanımlayıcısı.

RTR: MIL-STD1553 protokolündeki transmit/receive bitinin görevini yapmaktadır. Yani iletişimin bir veri talebi mi yoksa veri aktarımı mı olduğunu belirtmektedir.

“Control” alanı şunları içermektedir;

IDE: CAN2.0A veya CAN2.0B formatlarının hangisinin kullanıldığını tanımlamaktadır.

DLC: Data uzunluğunu belirtmektedir. (0-8 byte)

“Control” alanının ardından 8 byte kadar veri alanı gelmektedir.

CRC: 15bitlik veri bozulmasını kontrol etmek için denetim alanıdır.

ACK: Veriyi alan cihaz bu bit üzerine alındı verisi yazmaktadır.

EOF: İletişimin bittiğini belirtmektedir.

INT: Veri yolunun boşaldığını haber vermektedir.

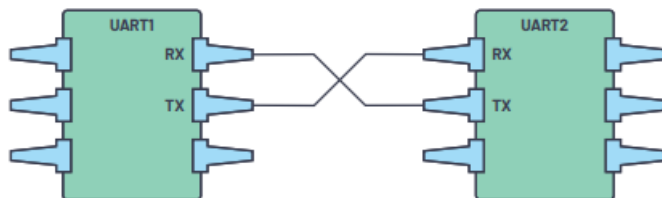
Veri haberleşme hızı kablo boyuna göre değişkenlik gösterir. Kablo boyuna göre veri hızı ilişkisi Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 Kablo boyuna göre veri hızı

Bit oranı	Maksimum kablo boyu
1Mbit/s	25 Metre
800Kbit/s	50 Metre
500Kbit/s	100 Metre
250Kbit/s	250 Metre

3.4.2 UART Haberleşmesi

UART haberleşme asenkron olarak iki ünite arasında haberleşmeyi sağlamaktadır. RX ve TX olmak üzere iki kanal çapraz bağlanarak hat kurulmaktadır. Üniteler arasında kurulacak hat yapısı Şekil 3.13’de gösterilmiştir.



Şekil 3.13 UART hat yapısı [25]

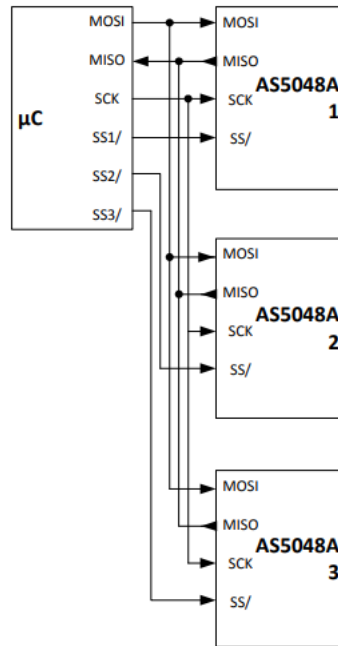
Protokol bir mesaj paketinde 8 bite kadar veri aktarabilir. Parity bitini kullanılmayacaksa mesaj paketine eklenebilir ve mesaj paketinin boyutu 9bite çıkar. Mesaj paketi Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



Şekil 3.14 UART mesaj paketi [25]

3.4.3 SPI Hattı

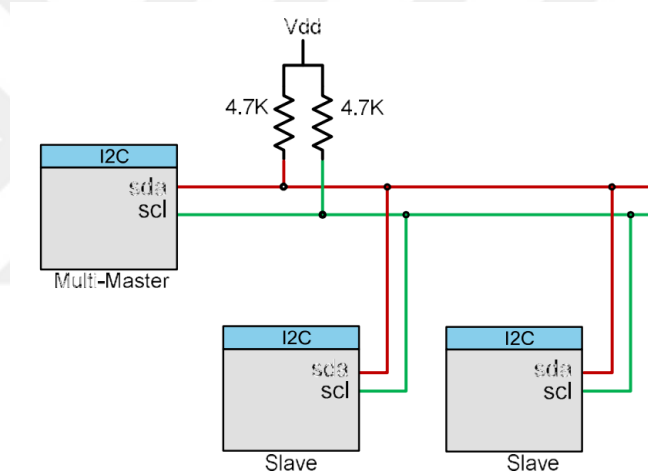
SPI, efendi-köle (master-slave) yapısı ile çalışan veri aktarımı yapısıdır. Hat, bir tane yönetici ve bir veya birden çok köle ile kurulur. Haberleşme 4 hat ile sağlanır. Bu hatlar, MOSI, MISO, SCK ve SS’dir. MOSI, efendiden köleye giden veri hattıdır. MISO, köleden efendiye giden veri hattıdır. SCK, haberleşme saat hattıdır. SS, hangi köle ile haberleşmenin aktif edildiği hattıdır. SS hattı, efendi ve köle arasında her köle için özeldir. Yani sistemde n tane köle varsa efendiden çıkan kablo sayısı $(4 + (n-1))$ kadardır. SPI, senkron ve aynı anda iki yönlü (Full Duplex) haberleşebilmektedir. Şekil 3.15’te kullanılan manyetik enkoder için SPI hattı mimarisi verilmiştir. Hatta aynı sensörden istenildiği kadar takılabildiği için manyetik MEMS enkoderlerin SPI protokolünü kullanan modeli seçilmiştir. Fakat her motora özel sürücü üretildiğinden bu özelliğin kullanılmasına gerek kalmamıştır.



Şekil 3.15 Manyetik enkoder için gösterilen spı hattı yapısı [26]

3.4.4 I2C Hattı

I²C haberleşme protokolü de SPI gibi efendi-köle yapısı ile çalışır. Aynı kimlik numarasına (ID) sahip olmamak şartı ile birden çok köle veya efendi hatta bağlanabilir. Haberleşme SDA ve SCL hatları üzerinden sağlanır. Veri SDA hattından aktarılırken, SCL hattından da haberleşmenin saat sinyali gönderilir. Tek haberleşme hattı olduğundan bir anda sadece bir cihaz hatta veri gönderebilir (Half Duplex). Gimbal sisteminde ataletsel ölçüm ünitesi ve gimbal kontrol ünitesi arasındaki haberleşmede I²C protokolü kullanılmıştır. Bu sayede gimbal kontrol ünitesinin baskı devresi üzerinde bulunan ataletsel ölçüm ünitesindeki jiroskop, ivme ölçer ve pusula sensörlerinin üçüyle birden sadece iki hat ile haberleşmeyi sağlanmıştır. Ataletsel ölçüm ünitesi için istenilen ölçüm hızına ulaşabilmek için hat 400kHz hızında kullanılmaktadır. Şekil 3.16'de I²C haberleşmesinin hat yapısı gösterilmiştir.



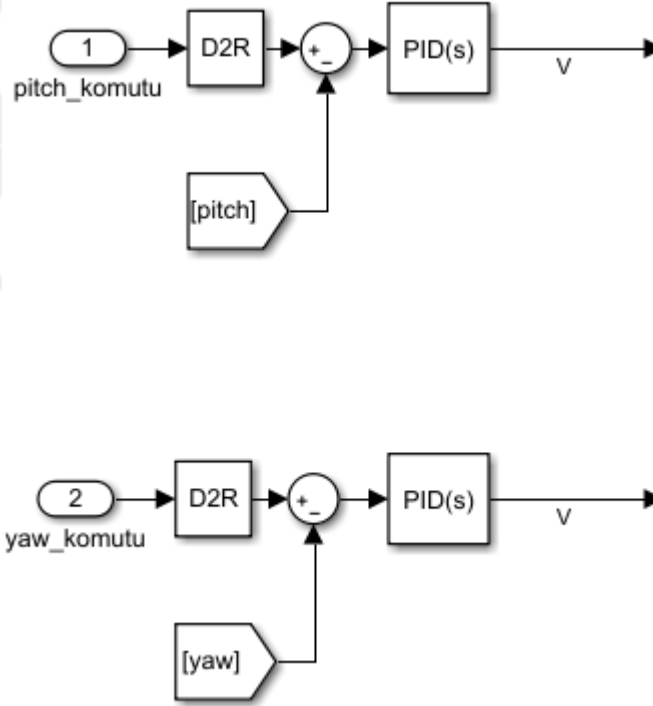
Şekil 3.16 I2C hat yapısı [31]

3.5 Kontrolcü Yapısı

Gimbalin duruş açısını kontrol için iki aşamalı (kaskad) PID kontrolcü kullanılmaktadır. İlk aşamalı kontrol, gimbal kontrol ünitesinde gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada görüntü işleme bilgisayarından gelen veri, ataletsel ölçüm ünitesi döngüsünden elde edilen Kalman filtresinden geçmiş açı değerleri ve kumanda verisi kullanılarak motor sürücü ünitesinden geri besleme olarak alınan enkoder verisine göre 400 Hz'lik bir döngü içerisinde PID kontrolcüye sokulur. Bu döngüde ataletsel ölçüm ünitesi ve kumanda verileri, 400 Hz ile yenilenirken görüntü işleme verisi 120 Hz ile yenilenmektedir. Elde edilen açı değerleri referans olarak motor sürücü ünitesine aktarılır. Bu aşamadan sonra ikinci aşama olan kontrol başlamaktadır. Motor sürücü ünitesinde ve gimbal kontrol

ünitesinden gelen referans açı değeri, enkoder geri beslemesiyle 10 kHz'lik döngü ile PID kontrolcüsüne sokulur. Elde edilen rotor açısı, sinüs faz sinyaline dönüştürülür. Şekil 3.8'daki gimbal kontrol ünitesi ve motor sürücü ünitesi alanlarında sistemin kontrol yapısına ait blok diyagramı gösterilmiştir.

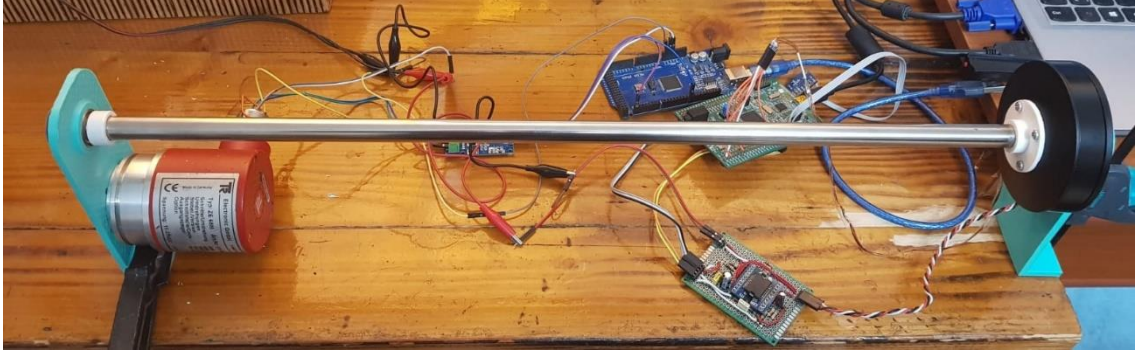
Matlab Simulink ortamında gerçekleştirilen gimbal modellemesinde ise hem ilk hem de ikinci aşamada sapma ve yunuslama açılarının kontrolcü yapıları Şekil 3.17'te gösterilmiştir. Simulink'in hazır PID blok yapısı kullanılarak kontrol sağlanmıştır. Derece cinsinden verilen yunuslama ve sapma açıları radyan birimine çevrilerek işleme alınmaktadır. Geri beslenen yunuslama ve sapma açıları ile farkları alınarak hata bulunur ve PID kontrolcüye beslenir. Kontrolcü çıkışı olarak motorlara gönderilen gerilim veya PWM sinyali bulunur. Döngü bu şekilde devam eder.



Şekil 3.17 Matlab Simulinkte hazırlanan modelin kontrolcü blokları

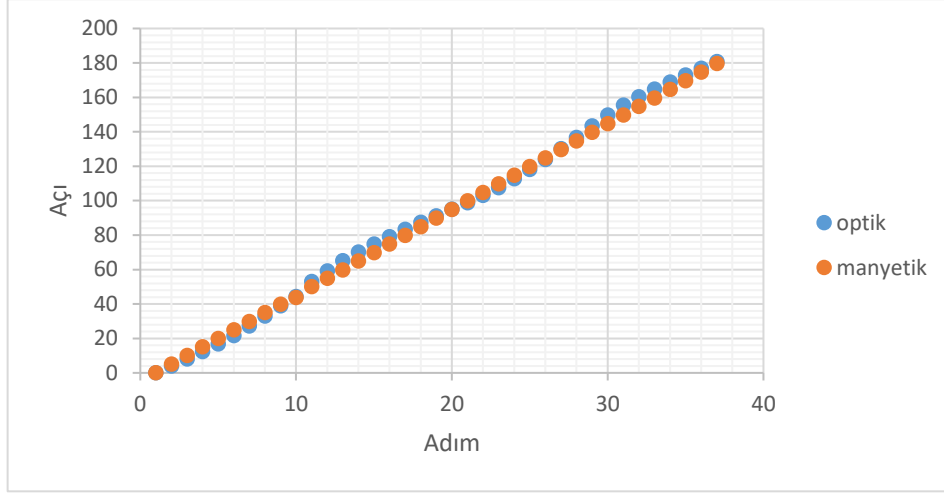
4.1 Enkoder Doğrulama Testi

Gimbalde eksenlerin birbirine göre açılarının hesaplanmasında ve buna bağlı olarak motorların kontrolünde kullanılacak MEMS manyetik enkoderlerin skala doğruluğunu gözlemlemek için test uygulanmıştır. Şekil 4.1’de manyetik enkoder doğrulama testi için kurulan düzenek gösterilmiştir. Manyetik enkodere göre pozisyonlanan fırçasız motora 640 gr ağırlığında merkezlenmiş çelik çubuk yük olarak bağlanmıştır. Çubuğun diğer ucu yataklanarak kayış kasnak mekanizması ile doğruluğu daha yüksek olan optik enkodere bağlanmıştır.



Şekil 4.1 Manyetik enkoder doğrulama testi düzeneği

Motora 0’den 180 dereceye yaklaşık 5’er derecelik adımlar verilmiştir. Bu sırada mutlak ve manyetik enkoderden alınan değerler açıya çevrilerek Şekil 4.2’deki gibi grafiklendirilmiştir.



Şekil 4.2 Enkoder doğrulama testi çıktısı

Adımlar motor üzerinden verildiğinden adım aralıkları manyetik enkoderden okunan verilerin değişimi hemen hemen lineerdir (kontrolcü etkisi tam lineer olmasını engeller.). Bununla birlikte optik enkoderden okunan açı değişimlerinin aynı oranda olması beklenir. Fakat verilen tabloda görüldüğü üzere belli ölçüm aralıklarında (yaklaşık 45 derece) açı dağılım oranı artıp azalmaktadır. Bu testten kullanılan manyetik enkoder ile optik enkoder arasında 5° kadar fark gözlemlenmiştir. Sistemin doğruluğunu arttırmak için dağılıma göre açı düzeltme tablosu oluşturulmuştur.

4.2 Görüntü İşleme Testleri

Görüntü işleme sisteminde kullanılacak özellik noktası çıkarım algoritması ve kadraj takibi modunun testleri bu bölümde anlatılmaktadır.

4.2.1 Özellik Çıkarım Yöntemi Doğrulama Testi

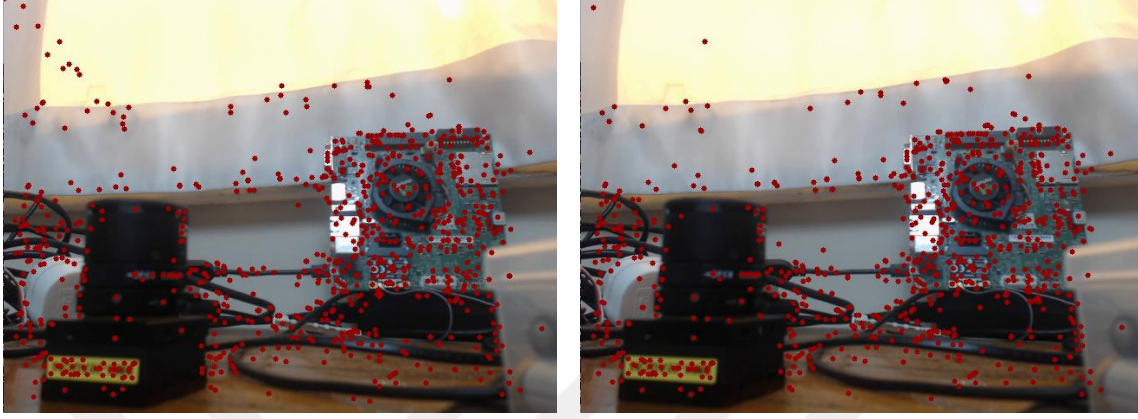
Bu test ile literatürde gerçek zamanlı özellik çıkarımı uygulamalarında en çok kullanılan SURF ve ORB algoritmalarının değişken ışık şartları altındaki performansı karşılaştırılmıştır.

4.2.1.1 SURF Algoritması

Yeterli ışık altında kadraj içerisindeki hareketli nesnelerin kontrole etkisini azaltmak için mümkün olduğunca çok özellik noktasıyla çalışmak gerekmektedir. SURF algoritmasında özellik noktalarının sayısını arttırmak için Hessian eşik değerinin düşürülmesi gerekmektedir. Fakat ışık azaldığında kararsız özellik noktaları oluşturmaktadır. Zaten yetersiz ışık altında çıkarılan özellik sayısı azaldığı gibi bir de kararsız noktalar eklendiğinde hareket verisi bozulmaktadır.

SURF, özellik çıkarımında ORB'ye göre daha güvenilir olsa da Hessian eşik değerine dinamik kontrol gerektirmektedir ve daha yavaştır.

Yetersiz ışık ve düşük Hessian eşik değeri altında yapılan test görselleri Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Kırmızı noktalar çıkarılan özellik noktalarını temsil etmektedir.

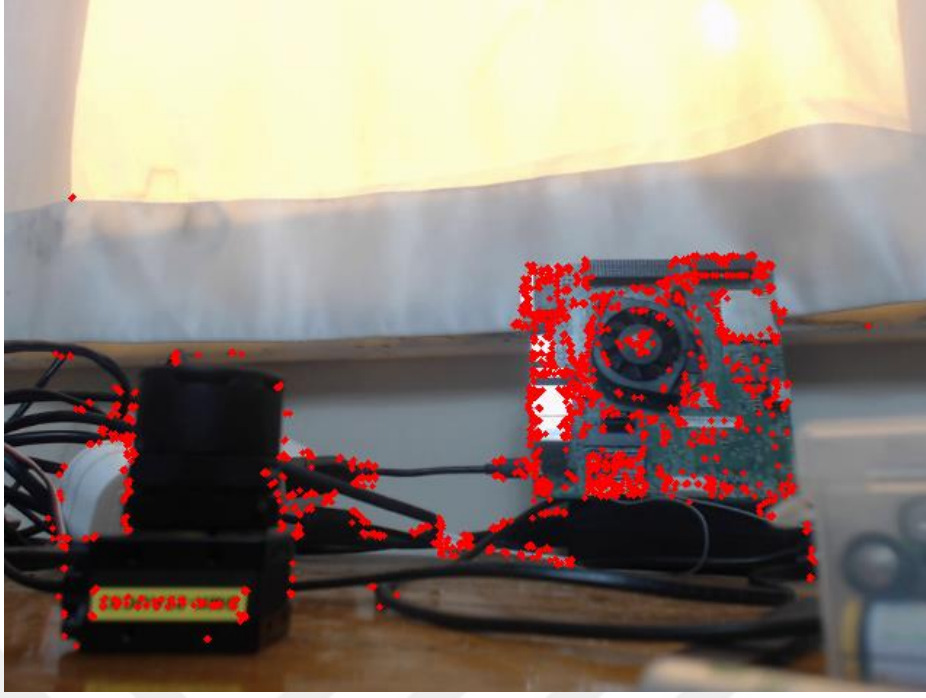


Şekil 4.3 SURF algoritması ile düşük ışık ortamında çıkarılan özellik noktaları

Şekil 4.3'de düşük ışık ortamında kamera sabitken ardışık iki kare üzerindeki özellik noktalarının dağılımı gösterilmiştir. İki karede özellik noktalarının farklı dağıldığı ve kümelenmenin az olduğu görülmektedir. Şekil 4.4'de ORB algoritması ile aynı kare üzerinde çıkarılan özellik noktalarının dağılımına bakarsak özellik noktaları belirli bölgelerde kümelenmiştir ve perde gibi fazla ton geçişinin bulunmağı yerlerden özellik noktası çıkarılmamıştır. Görüldüğü gibi düşük ışıkta SURF algoritması ile çıkarılan özellik noktaları kararsızdır, yani bir kısmı rastgele yerlerde oluşmaktadır.

4.2.1.2 ORB Algoritması

ORB, özellik çıkarımlarını daha keskin noktalar üzerinde toplamaktadır. Bu sebeple düşük ışık dayanımı daha yüksektir. Ama özellik noktalarında kümelenmeler meydana gelir. Oluşan kümelenmeler kadraj içerisindeki hareketli objelerin üzerine düşen özellik noktalarının oranını arttırmaktadır. ORB algoritması SURF algoritmasına göre hatalı veri oranı daha yüksek olsa da özellik noktası sayısının fazla olması dolayısıyla hatanın etkisi azalmaktadır. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi ORB algoritması ile çıkarılan özellik noktaları gösterilmektedir. Kırmızı noktalar çıkarılan özellik noktalarını temsil etmektedir.



Şekil 4.4 ORB algoritması ile çıkarılan özellik noktaları

ORB algoritması SURF algoritmasına göre çok daha hızlıdır. 640 x 480 çözünürlükteki kamera ile aynı işlemci ve sıralı kod yapısı ile yapılan testte ORB algoritması ile saniyede yaklaşık 70 görüntü karesi işlenebilirken, SURF algoritması ile yaklaşık 40 görüntü karesi işlenebildiği görülmüştür. Test yaklaşık 200 özellik noktası üzerinden yapılmıştır.

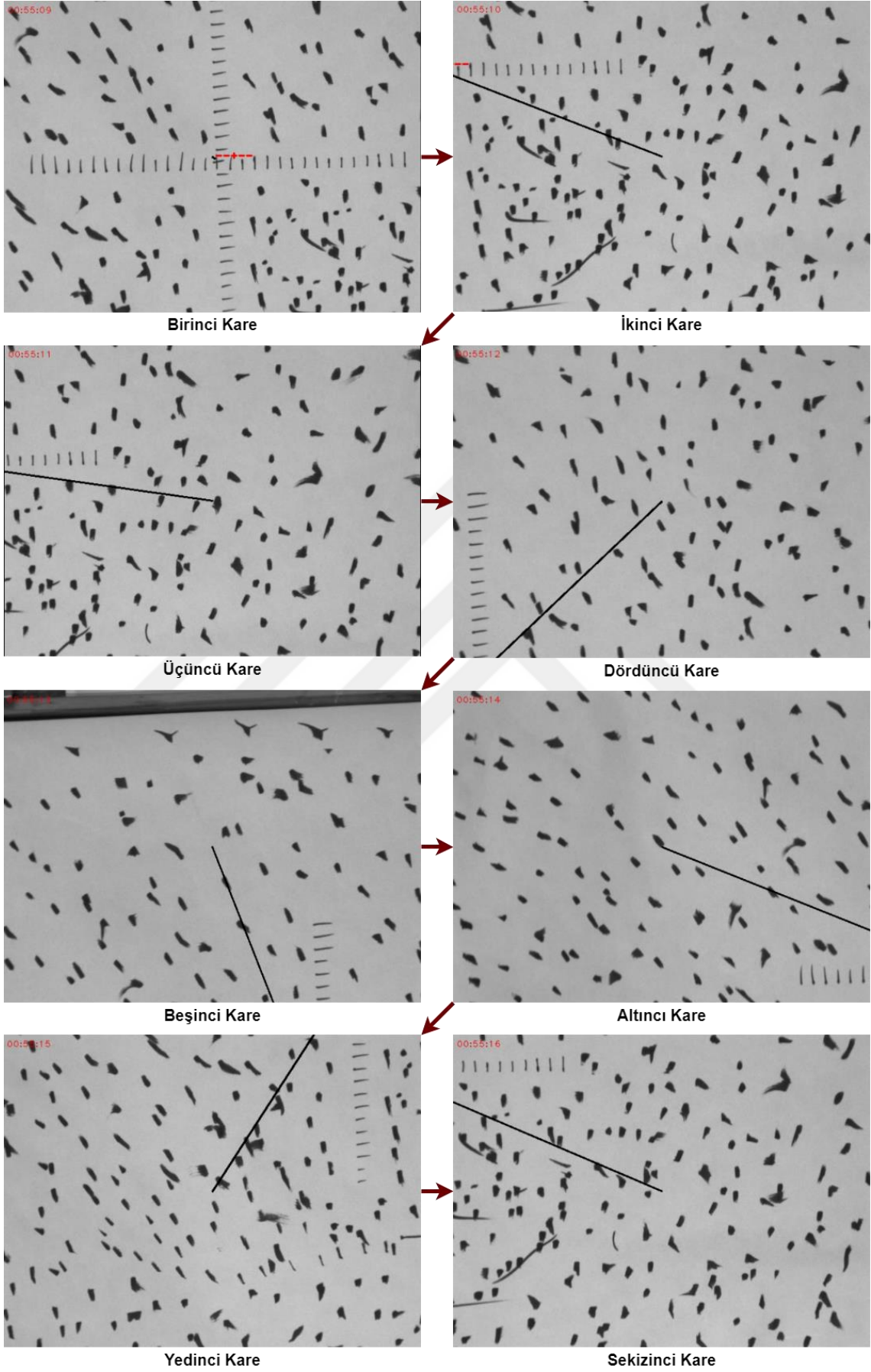
4.2.2 Görüntü İşleme Algoritması Testi

Görüntü işleme algoritmasını test etmek için iki farklı senaryoda kadraj takip testi uygulanmıştır. İlk senaryoda algoritmanın takip hatasını ölçmek için hedef olarak işaretli bir pano kullanılmıştır. Şekil 4.5’de takip hatası ölçüm testi için hazırlanan test ortamı gösterilmiştir. Pano üzerinde birer santim ara ile dikey ve yatay çizgiler çekilmiştir. Kamera hedefe 230 cm uzaklıktaki tripoda takılmıştır. Testte ilk başta kadrajın ortasına görüntü işleme yazılımı ile imleç (--+--) konmuştur. Bu nokta takip edilecek hedef olarak seçilmiştir. Kamera Test sırasında kamera, yunuslama ve sapma eksenlerinde sürekli olarak hareket ettirilmiştir. Kadrajın hareketleri hesaplandıktan sonra imlecin kadraj içerisindeki pozisyonu güncellenmiştir. Hedefin kamera merkezine göre nerede olduğunu görebilmek için imleç ile kamera merkezi arasına siyah çizgi çekilmiştir. Test sırasında kameradan alınan görüntüden saniyede bir kare alınarak Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

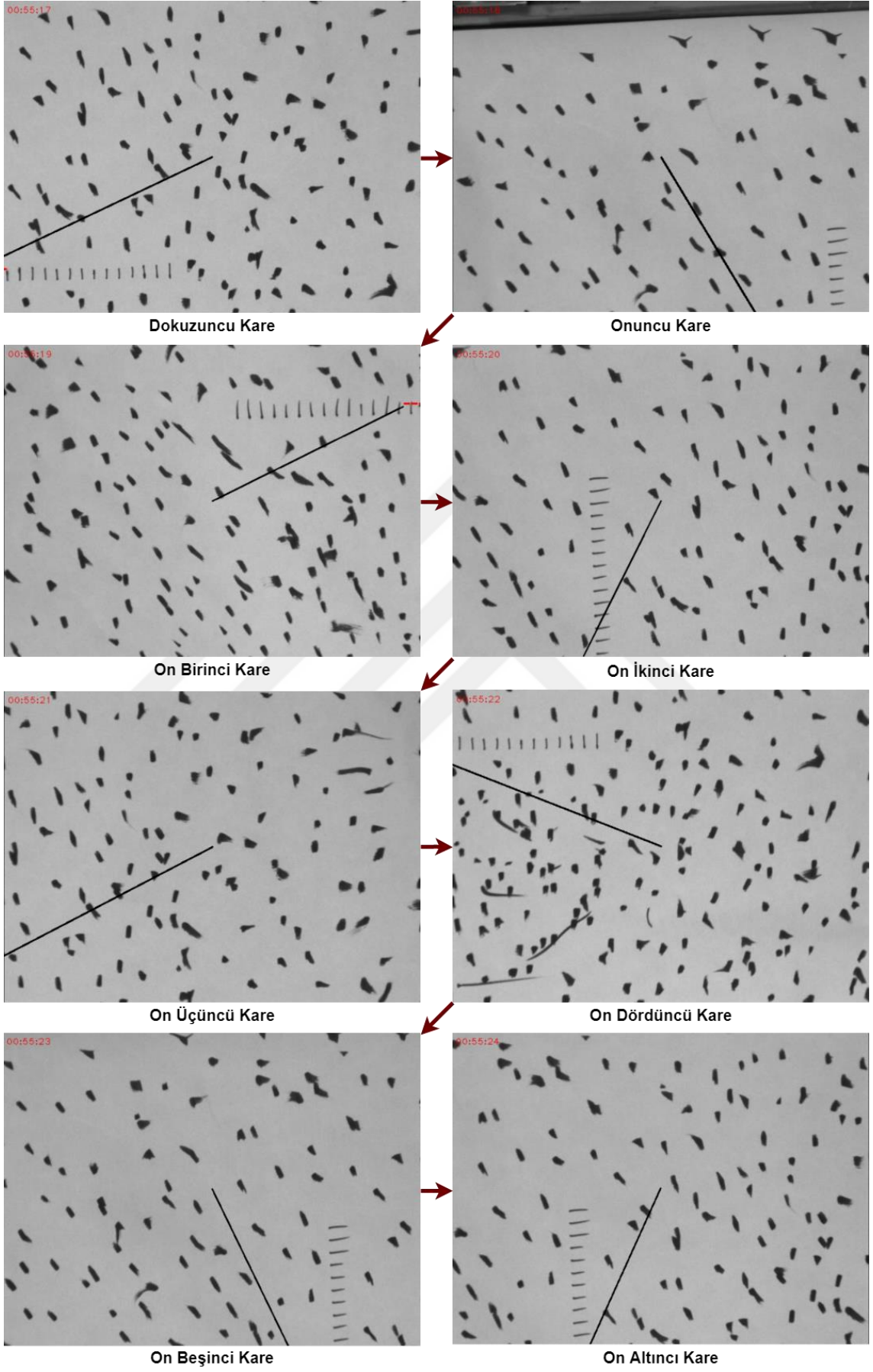
Test sonunda ilk ve son kareler karşılaştırıldığında imlecin yarım santim kadar sol tarafa kaydığı görülmüştür. 230 cm uzaklıktaki bir hedefte yarım santim hata ile takip yapan bu algoritma sistem tasarımı için hedef uzaklık olan 200 metrede yaklaşık 45 cm hata verebilir. Bunun yanında test en kötü koşullar göz önüne alınarak uygulanmıştır. Örneğin kapalı alanda yapay ışık kaynağı kullanılmıştır ve ışık kaynağındaki titreşimden dolayı yüksek hızlara çıkmadan saniyede 35 kare ile görüntü içlenmiştir. Kamera gimblele bağlı olmadan test edildiğinden sadece bozucu etkiye maruz bırakılmıştır. Gimbalin görüntü üzerindeki düzeltici hesaba katılmamıştır. Bu noktalar göz önünde bulundurulduğunda gerçek sistemde de hatanın hesaplanan değerin üstüne çıkmaması beklenmektedir.



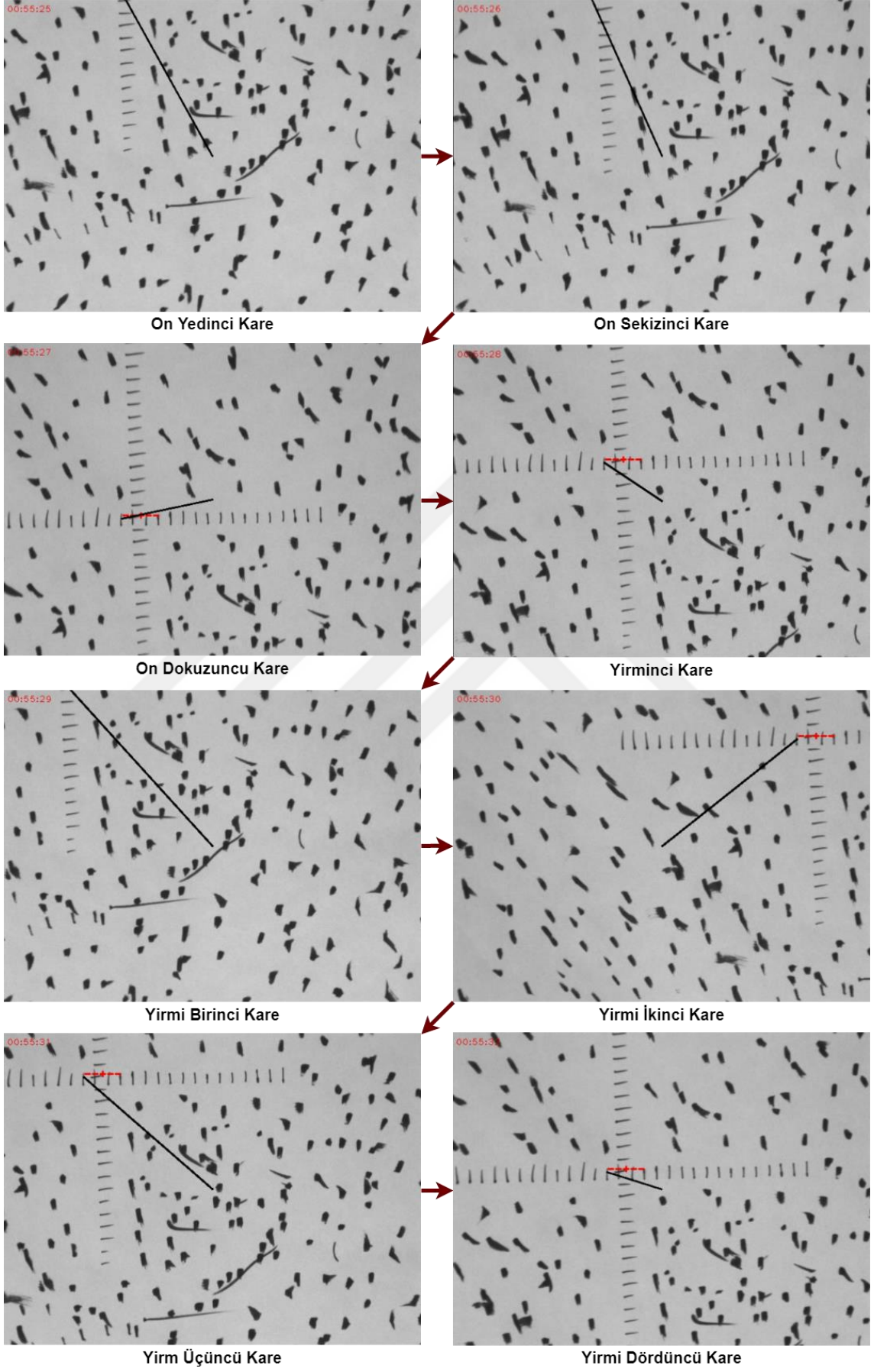
Şekil 4.5 Takip hatası ölçüm testi ortamı



Şekil 4.6 Takip hatası ölçüm testinden ilk sekiz kare



Şekil 4.7 Takip hatası ölçüm testinden ikinci sekiz kare

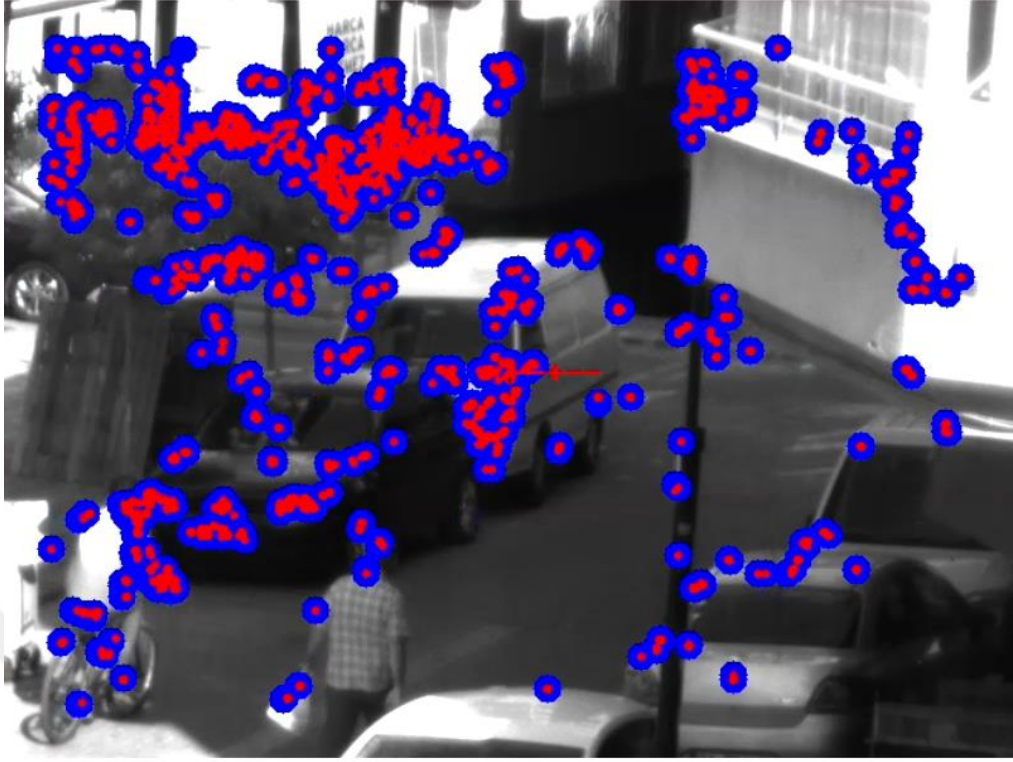


Şekil 4.8 Takip hatası ölçüm testinden son sekiz kare

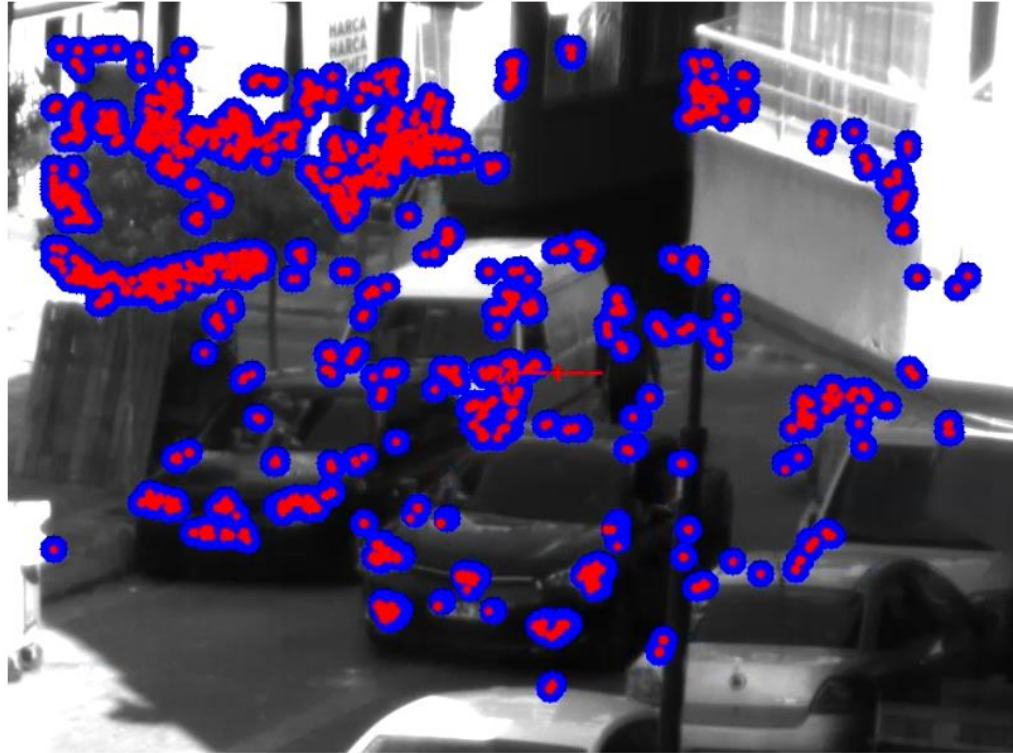
Görüntü işleme algoritmasının gerçek çalışma alanında nasıl sonuç vereceğini görmek için ikinci bir senaryo kurgulanmıştır. Kadraj takip testi videosundan farklı anlarda alınan on görüntü karesi Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te verilmiştir. Testte ilk başta kadrajın ortasında olan beyaz minibüsün üzerine kırmızı imleç (--+--) konmuştur. Kamera rast gele hareket ettirilmektedir. Kadrajın hareketleri hesaplandıktan sonra imlecin kadraj içerisindeki pozisyonu güncellenmektedir. Bu sayede imlecin hep beyaz minibüsün üzerinde kalması sağlanmaktadır. Hedefin kamera merkezine göre nerede olduğunu görebilmek için imleç ile kamera merkezi arasına siyah çizgi çekilmiştir. Görüntülerdeki mavi noktalar güncel anahtar noktalarını, kırmızı noktalar ise bir önceki karede hesaplanan anahtar noktalarını göstermektedir. Test yaklaşık 100 metre uçaklıktan gerçekleştirilmiştir.

İlk dört görüntü karesinde kamera sabitken kadrajın içerisinde hareketli nesnelere geçmektedir. Hareketli nesnelere üzerindeki anahtar noktaların hareket miktarı, kadrajın genel hareketinin belirli bir eşik kadar üzerinde veya altında olduğundan bu anahtar noktalar kadrajın hareket hesabına katılmamaktadır.

Beşinci görüntüden itibaren kamera hedef komple kadrajın dışında kalacak şekilde hareket ettirilir. Kamera hedefin etrafında döndürülüp tekrar hedef kadraj içerisine alındığında imlecin yine beyaz minibüsün üzerinde olduğu görülmektedir.



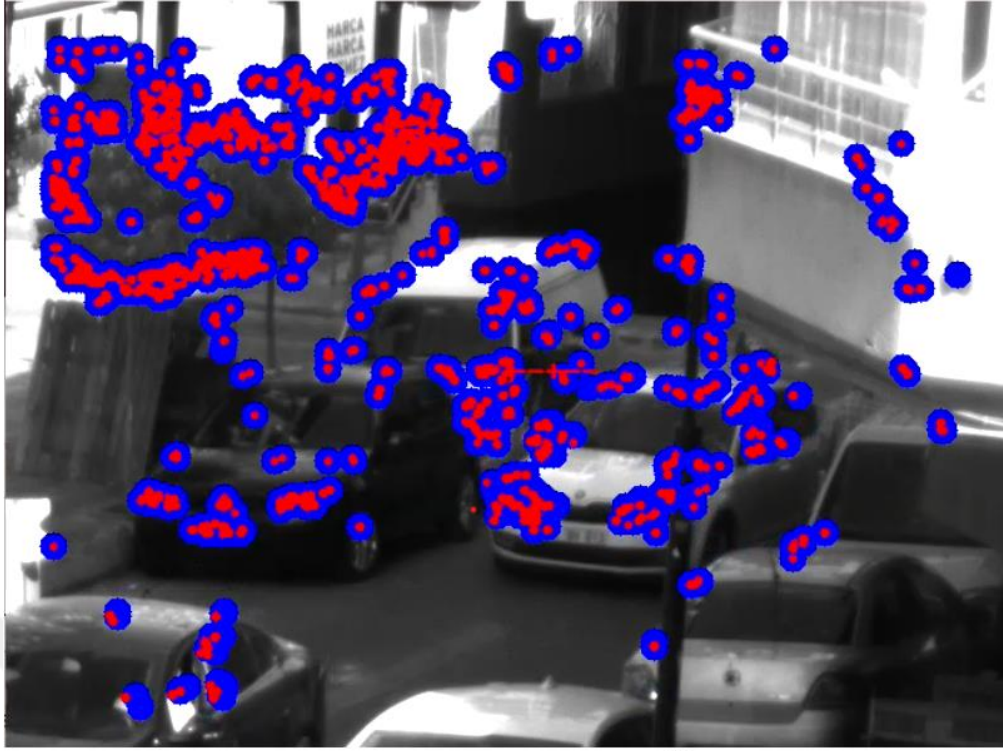
Birinci Kare



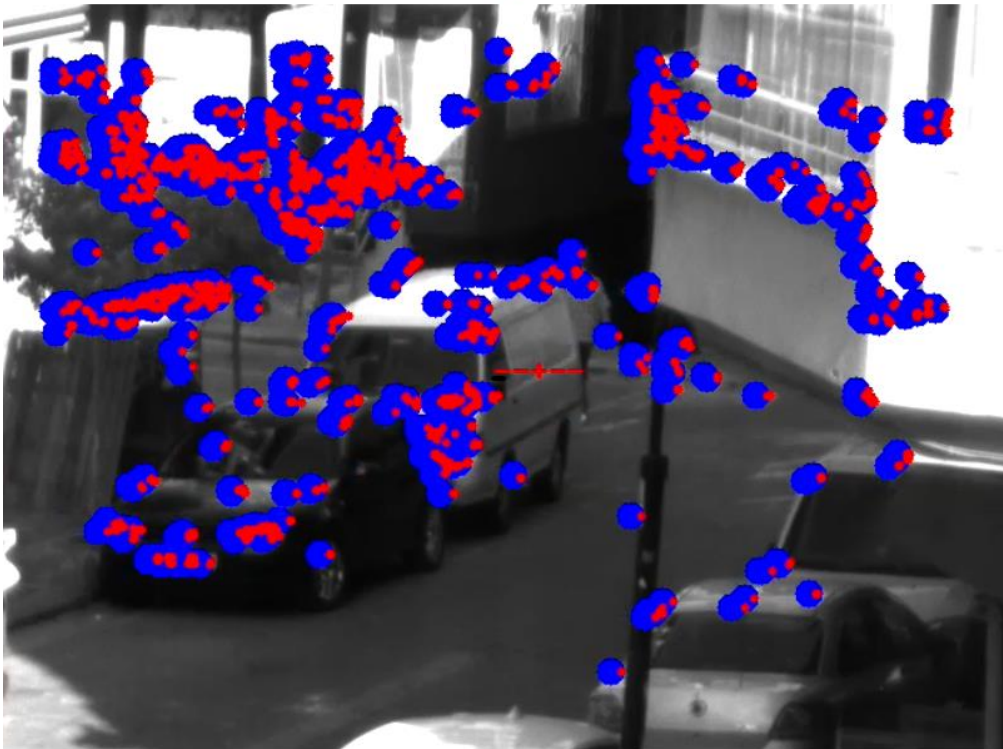
İkinci Kare



Şekil 4.9 Kadraj takip testinden 1. ve 2. kareler



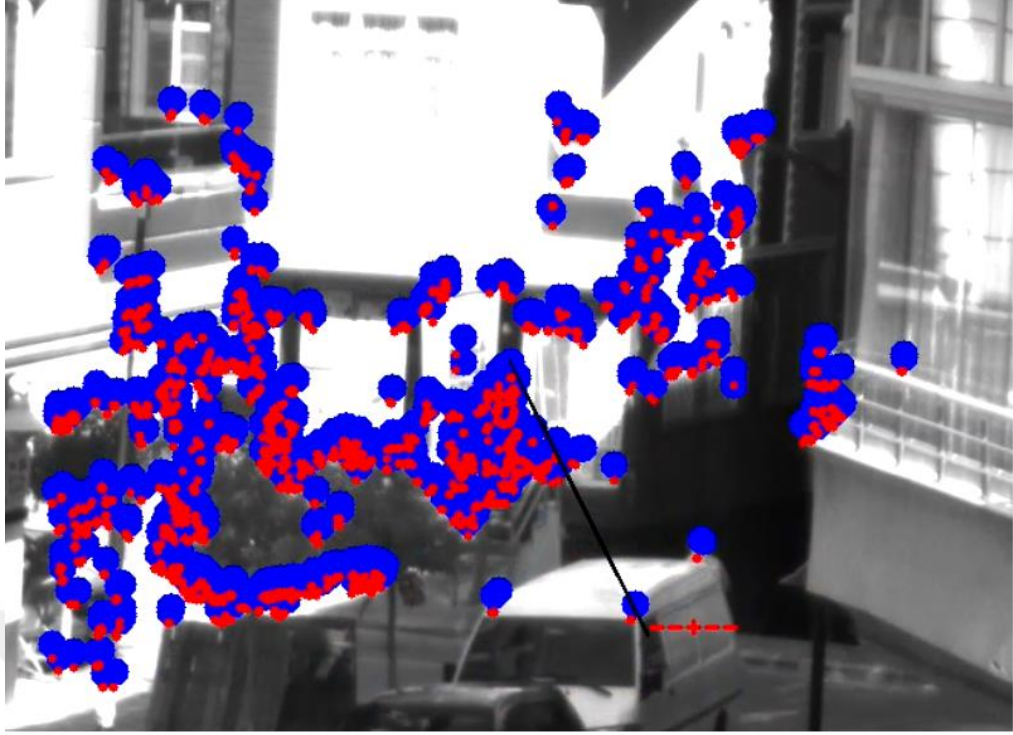
Üçüncü Kare



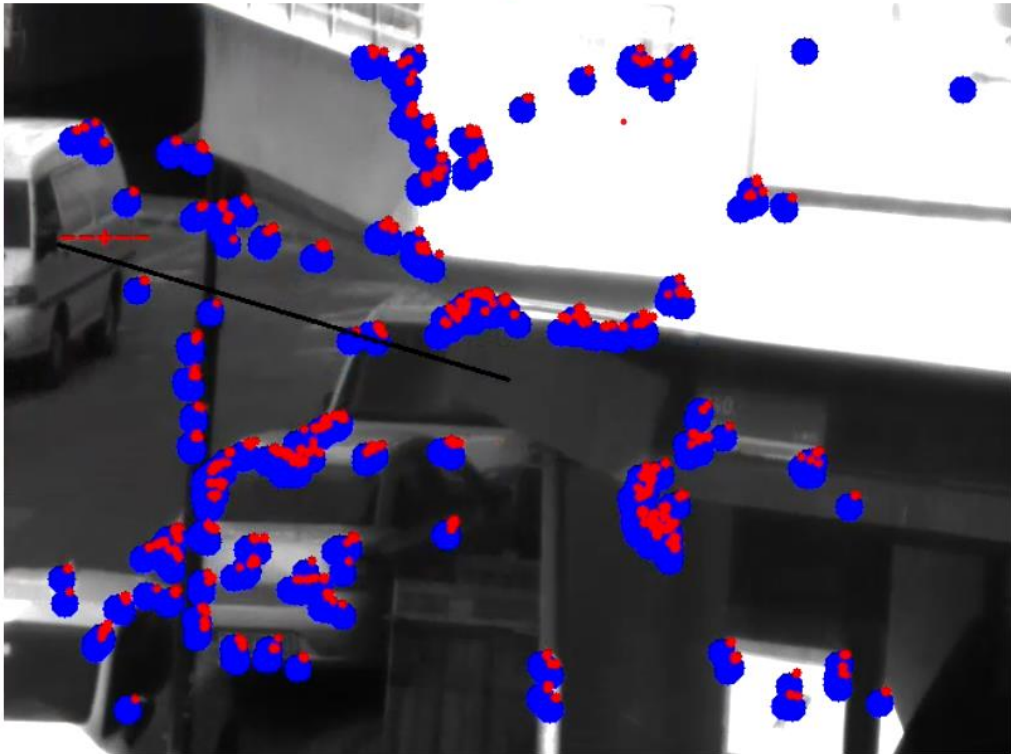
Dördüncü Kare



Şekil 4.10 Kadraj takip testinden 3. ve 4. kareler



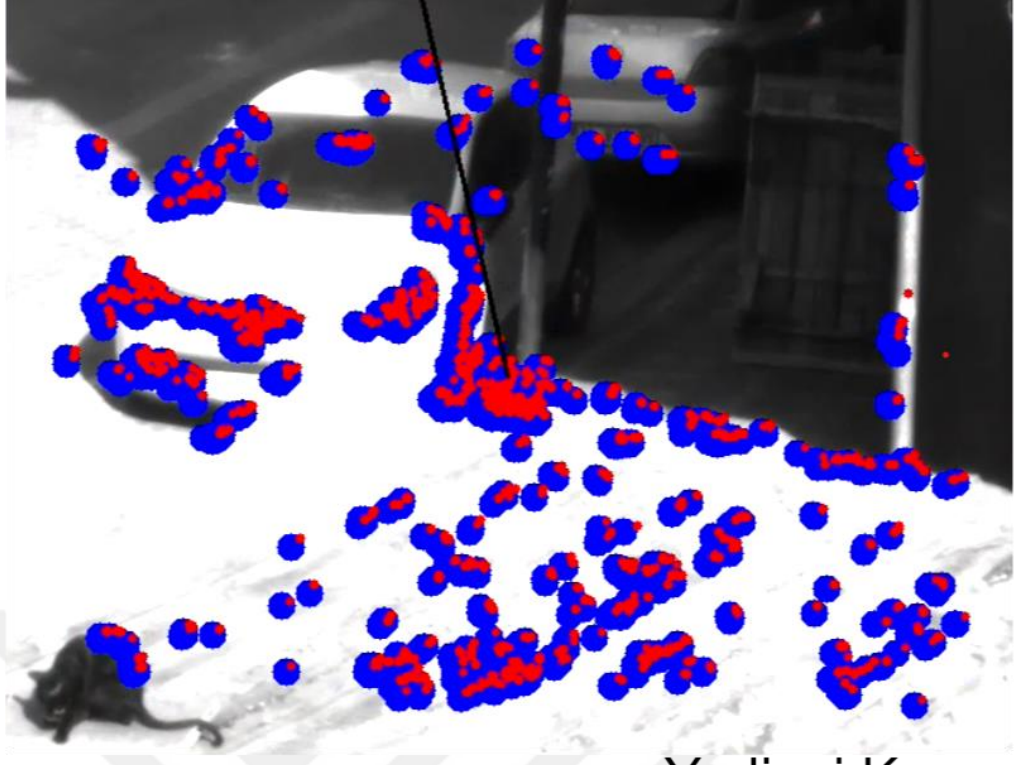
Beşinci Kare



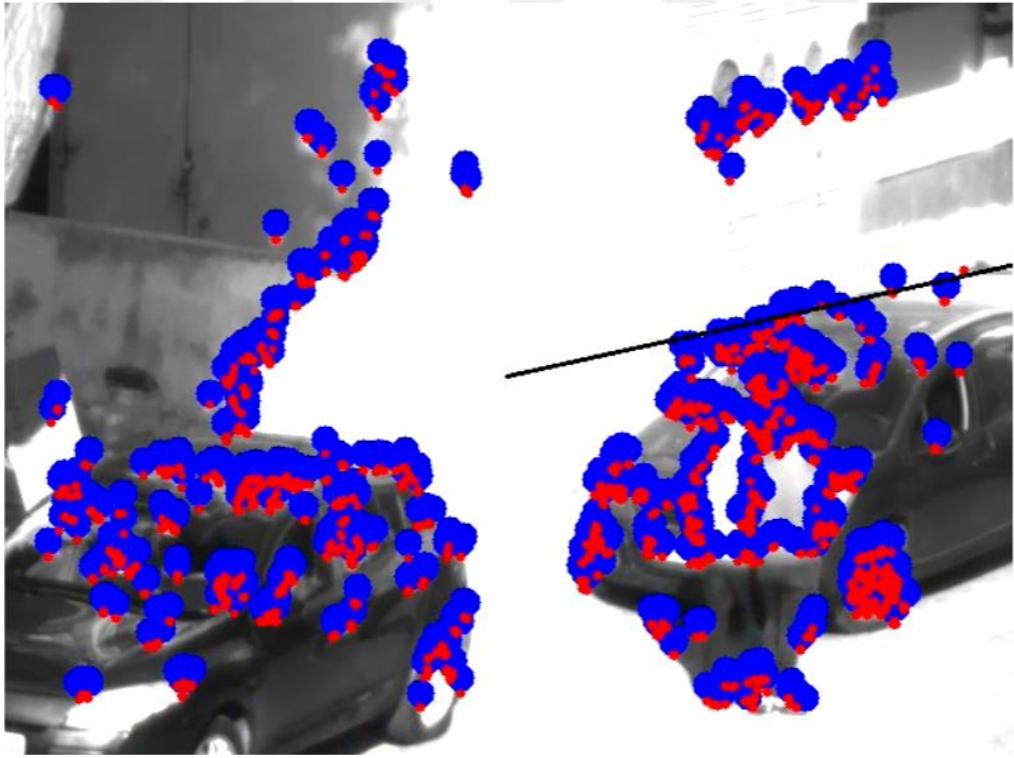
Altıncı Kare



Şekil 4.11 Kadraj takip testinden 5. ve 6. kareler

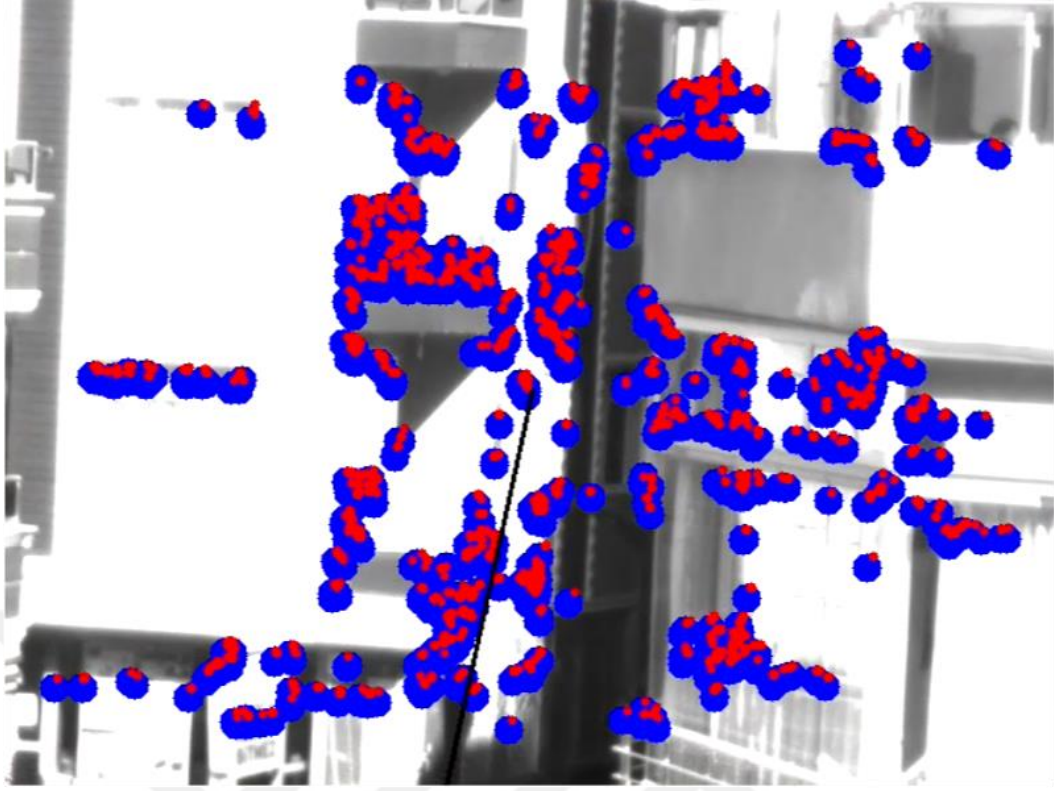


Yedinci Kare

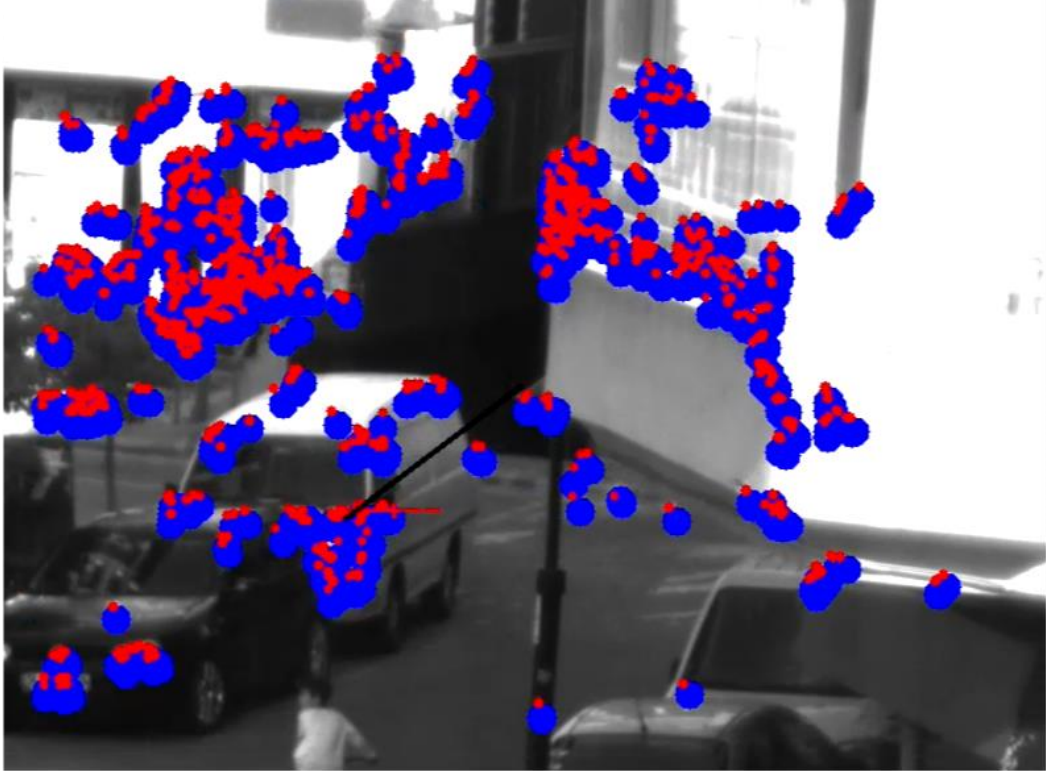


Sekizinci Kare

Şekil 4.12 Kadraj takip testinden 7. ve 8. kareler



Dokuzuncu Kare



Onuncu Kare

Şekil 4.13 Kadraj takip testinden 9. ve 10. kareler

5.1 Sonuç

Özellikle havadan görüntüleme uygulamalarında, öncelikle kameranın yönlendirilmesi sonrasında ise hava aracı hareketlerinin kamera üzerindeki etkisinin giderilmesi için gimbal mekanizmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Literatürdeki uygulamalarda küresel konumlama ve ataletsel ölçüm verileri bir arada kullanılarak hedefleme uygulamaları yapılmıştır. Sistemin çalışma hassasiyetini arttırmak için iki aşamalı gimbal tasarımı geliştirilmiştir.

Bu çalışma ile iki aşamalı gimbal sisteminin sistem mimarisi kurulmuştur. Kurulan mimariye uygun olacak şekilde sistem tasarlanmış ve tasarlanan parçaların imalatına başlanmıştır. Matlab Simulink ortamında 2 aşamalı Gimbalin matematiksel modellemesi yapılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Gimbalin belirlenen kadrajı takip etmesi için görüntü işleme yazılımı, gimbal kontrol yazılımı ve motor sürücüsü yazılımı geliştirilmiştir. Bu aşamada görüntü işleme algoritmasının testleri gerçekleştirilmiştir. Gimbal kontrol ünitesi ve motor sürücü ünitesi için baskı devre kartları tasarlanmış ve imal ettirilmiştir. Üretilen parçalar ve ünitelerin entegrasyonu sağlanarak çalıştırma aşamasına geçilmiştir.

Sistemi çalışır hale getirmek için çalışmalara başlanmıştır. İlk olarak kontrolcü parametreleri test edilerek belirlenmiştir. Devamında ataletsel kontrol ünitesi ile açı kontrolü denemeleri yapılmıştır. Son olarak görüntü işleme verisi kontrolcüye referans sinyal olarak sokularak kadraj takibi yapılmıştır.

Geliştirilen sistem hedef belirleme aşamasında kumanda verisine ihtiyaç duymaktadır. Sonrasında ise dışarıdan sinyal almadan hedefi takip etmektedir.

Sistemin test videosu [32]'deki linkte verilmiştir.

Çalışmanın devamında görüntü işleme yazılımının üzerine yapay zeka uygulamaları ile hareketli hedef takibi ve otomatik hedef seçimi gibi uygulamalar yapılabilir. Gerçek dünyada çalışırken algoritmayı hata durumuna sokup sistemin çökmesine sebep olabilecek durumların tespit edilip giderilebilir.

Füzelerde kullanılan arayıcı başlıklar tez kapsamında geliştirilen gimbal mekanizmasına benzer bir şekilde çalışmaktadır. Kaba bir benzetme ile tasarlanan sistemdeki dış gimbalin yerini füzenin kontrol yüzeyleri almaktadır. İç gimbal ise hedefin ani hareketlerle kadrajdan kaçmasını engellemek için yine takibe devam etmektedir. Tez kapsamında geliştirilen görüntü işleme ile hedef takibi algoritması daha da hızlandırılarak, sistem füzelerde kullanılabilir bir arayıcı başlık haline getirilebilir.



- [1] J.-L. Miller, S. Way, B. Ellison and C. Archer, “Design challenges regarding high-definition electro-optic/infrared stabilized imaging systems”, *Optical Engineering*, vol. 52, no.6, pp. 1-11, 2013.
- [2] C. Shen, S. Fan, X. Jiang, R. Tan and D. Fan, “Dynamics modeling and theoretical study of the two-axis four-gimbal coarse–fine composite uav electro-optical pod”, *Applied Science*, vol. 10, No.1923, pp. 1-19, 2020.
- [3] M.-A. Güney, T.-B. Saydam, İ. Uluçay ve M.-S. Eroğlu, “İnsansız hava araçlarında otonom kamera kontrolü”, HİTEK (Havacılıkta İleri Teknolojiler Konferansı) Hava Harp Okulu, 2004.
- [4] S. Yoon and J.-B. Lundberg, “Equations of motion for a two-axes gimbal system”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 37, no. 3, pp. 1083-1091, 2001.
- [5] M. Bhardwaj, “Sensored field oriented control of 3-phase permanent magnet synchronous motors”, Texas Instruments Application Report, SPRABQ2, pp. 1-34, July 2013.
- [6] “SmartFusion field oriented control of permanent magnet synchronous motors using HALL and encoder”, Microsemi user’s guide, 2012.
- [7] J. Lee, D.-H. Jung, H.-W. Kim, Y. Park, Y.-G. Min, K.-C. Ko, S. Kim, W. Park and J. Lee, “A study on design of torque motor for drone gimbal system”, 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 211-214, 2018.
- [8] A. Becker, “Introduction to kalman filter”, <https://www.kalmanfilter.net/>, (accessed Nov. 30, 2022).
- [9] Z.-M.-M. Htun, M.-M.-Latt, C.-M. Nwe and S.-S.-Y. Mon, “Performance comparison of experimental-based kalman filter and complementary filter for imu sensor fusion by applying quadrature encoder”, *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 8, no. 11, pp. 17-24, 2018.
- [10] S. Li, Y. Gao, G. Meng, G. Wang, and L. Guan, “Accelerometer-based gyroscope drift compensation approach in a dual-axial stabilization platform”, *Electronics*, vol. 8, no. 594, pp. 1-12, 2019.
- [11] M.-J. Caruso, “Applications of magnetoresistive sensors in navigation systems”, SAE Technical Paper, 970602, 1997.
- [12] R.-I. Hartley and A. Zisserman, “Computation of the camera matrix P” in *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Ed. 2, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2003, pp. 189-193.
- [13] M. Sonka, V. Hlavac, and R. Boyle, *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*, Ed. 4, Stamford, USA, Published by Cengage Learning, 2014.
- [14] A. Louloudi, “Evaluation of a bisensor system for 3d modeling of indoor environments”, Örebro University, International master's thesis, pp. 1-76, 2010.

- [15] J. Park, S.-C. Byun, and B.-U. Lee, "Lens distortion correction using ideal image coordinates", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, pp. 987-991, 2015.
- [16] D. Lowe, "Distinctive image features from scale invariant keypoints", *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, no. 2, pp. 1-28, 2004.
- [17] H. Bay, T. Tuytelaars, and L.-V. Gool, "SURF: Speeded up robust features", *Computer Vision – ECCV*, pp. 404-417, 2006.
- [18] E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige and G. Bradski, "ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF", *IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 1-8, 2011.
- [19] S.-A.-K. Tareen, and Z. Saleem, "A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK" *International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies*, pp. 1-10, 2018.
- [20] M.-W. Cao, W. Jia, Z.-H. Lv, W.-J. Xie, L-P. Zheng, and X-P. Liu, "Two-pass k nearest neighbor search for feature tracking", *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 2169-3536, 2018.
- [21] A. Baş, "SURF ve RANSAC tabanlı homografi tahmini kullanarak otomatik imaj birleştirme", *Politeknik Dergisi*, vol. 25, no. 2, pp. 597-604, 2022.
- [22] "CAN specification 2.0", Robert Bosch GmbH, 1991.
- [23] "The I2C-bus and how to use it (including specifications)", Philips Semiconductors, 1995.
- [24] P. Dhaker, "Introduction to SPI interface", *Analog Dialogue*, vol. 52, no. 9, pp. 1-5, 2018.
- [25] E. Peña, and M. G. Legaspi, "UART: A hardware communication protocol understanding universal asynchronous receiver/transmitter", *Analog Dialogue*, vol. 54, no. 4, pp. 1-5, 2020.
- [26] "AN5000 rotary magnetic position sensors magnet selection guide", Published by ams OSRAM Group, 2016.
- [27] N.-P. Palanisamy, "Filtering of IMU data using kalman filter", *California State University, Master's Thesis*, pp. 1-77, 2016.
- [28] A. Jakubovic and J. Velagic, "Image feature matching and object detection using brute-force matchers", *2018 International Symposium ELMAR*, pp. 83-86, 2018.
- [29] V. Vijayan and P. Kp, "FLANN based matching with SIFT descriptors for drowsy features extraction", *2019 Fifth International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*, pp. 600-605, 2019.
- [30] By EE JRW - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=55237229>, (accessed Sept. 12, 2022).
- [31] "I²C Master/Multi-master/Slave 3.0", Cypress Perform, 2011.
- [32] M.-F. Levent, "Gimbal testi", https://drive.google.com/file/d/1RJJXy7fWLIRu0OYqOOJC4t6yokij9bl6/view?usp=share_link, (accessed March, 03, 2023).

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. M.-F. Levent, V.-E. Ömürlü, “Hava araçları için hassas hedeflemeli gimbal tasarlanması” SAVTEK 2022 10. Savunma Teknolojileri Kongresi, 2022.

