<u>İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ</u>

QUADROTOR HAVA ARACININ KATADİOPTRİK İMGELERDEKİ KAÇIŞ NOKTALARI KULLANILARAK KONTROL EDİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ Metin TARHAN

Anabilim Dalı : Makina Mühendisliği

Programi : Sistem Dinamiği ve Kontrol

HAZİRAN 2009

<u>İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ</u>

QUADROTOR HAVA ARACININ KATADİOPTRİK İMGELERDEKİ KAÇIŞ NOKTALARI KULLANILARAK KONTROL EDİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ Metin TARHAN 503061607

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :04 Mayıs 2009Tezin Savunulduğu Tarih :03 Haziran 2009

Tez Danışmanı :Yrd. Doç. Dr. Erdinç ALTUĞ (İTÜ)Diğer Jüri Üyeleri :Doç. Dr. Şeniz ERTUĞRUL (İTÜ)Prof. Dr. Muhittin GÖKMEN (İTÜ)

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

TÜBİTAK'ın 107E211 no'lu "İnsansız Hava Araçlarının Görsel Kontrolü ve Görsel Verinin Yönlendirme Uygulamalarında Kullanılması" projesi kapsamında gerçekleştirilen bu tez çalışmasında quadrotor katadioptrik tüm yönlü kamera ile pozu bulunarak kontrol edilmeye çalışılmıştır.

Katadioptrik kameralar üzerine son on yılda yurtdışında oldukça çok araştırma yapılmış ve bu kameralar pek çok uygulamada kullanılmıştır. Ancak Türkiye'de yapılan çalışma sayısı çok azdır. Bu nedenle bu tez çalışması hem dünya literatürüne bir katkı hem de Türkiye'de ve İTÜ'de yapılan çalışmalara ön ayak olma niteliğindedir.

Tez çalışmalarım boyunca öncelikle kıymetli görüşleri ile beni yönlendiren, teşvik ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Erdinç Altuğ'a ve proje desteğinden dolayı TÜBİTAK'a çok teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Ayrıca aynı laboratuvarı paylaştığım Zehra Ceren'e ve yardımlarını esirgemeyen Nurettin Gökhan Adar'a teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak desteği ve sevgisi olmadan bu tezi tamamlayamayacağım Esen Gündoğan'a ve eğitim öğretim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan aileme şükranlarımı sunarım.

Mayıs 2009

Mak. Müh. Metin TARHAN

İÇİNDEKİLER

<u>Sayfa</u>

ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET	XV
SUMMARY	. xvii
1. GİRİŞ	1
2. QUADROTOR	7
2.1 Giriş	7
2.2 Quadrotorun Genel Özellikleri	8
2.3 Quadrotor Modeli	9
3. KATADİOPTRİK TÜM YÖNLÜ GÖRÜŞ	15
3.1 Giriş	15
3.2 İmge Oluşumu	16
3.3 Tek Görüş Noktası ve Katadioptrik Kameralar	17
3.4 Katadioptrik Kameranın Modellenmesi	20
3.5 Kalibrasyon	23
3.6 Pozun Tahmini	27
3.6.1 Çizgilerin bulunması	27
3.6.2 Paralel çizgi demetlerinin bulunması	31
3.6.3 Sonsuz homografi	32
3.6.4 Pozun tespiti	34
3.6.4.1 Yaygın yaklaşım	34
3.6.4.2 Dayanıklı yaklaşım	35
4. KONTROLCU TASARIMI	37
4.1 Oransal – Türevsel (PD) Kontrol	37
4.2 Kalman Süzgeci	38
4.3 Çoklu İş Parçacığı Kullanımı	40
5. BENZETIMLER	43
5.1 Poz Tahmini Benzetimleri	43
5.2 Kontrolcü Benzetimleri	49
6. DENEYLER	55
6.1 Deney Düzeneği	55
6.2 Yapılan Deneyler ve Sonuçları	57
7. SONUÇLAR VE ONERILER	63
KAYNAKLAR	65
EKLER	69

GEÇMİŞ83

KISALTMALAR

GPS IMU INS İHA PD PTZ RGB 3B	 : Global Positioning System : Küresel Konumlandırma Sistemi : Inertial Measurement Unit : Atalet Ölçüm Birimi : Inertial Navigation System : Ataletli Seyrüsefer Sistemi : İnsansız Hava Aracı : Proportional Derivative : Oransal Türev : Pan Tilt Zoom : Yatay Kaydırma, Eğim, Optik Kaydırma : Red Green Blue : Kırmızı Yeşil Mavi Renk Sistemi : 3 Boyutlu
--	---

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Sayfa</u>

Çizelge 2.1 : Quadrotorun artı ve eksileri	8
Çizelge 2.2 : Helikopterin maruz kaldığı temel etkiler	10
Çizelge 3.1 : Ayna parametreleri	22
Çizelge 3.2 : Kalibrasyon sonuçları	27
Çizelge 5.1 : Quadrotor hava aracının model parametreleri	51
Çizelge 5.2 : Kontrolcü katsayıları.	52
Çizelge 5.3 : Kontrolcü katsayıları.	54
Çizelge C.1 : Katadioptrik Tüm Yönlü Kameranın Teknik Özellikleri	79
Çizelge C.2 : IMU Teknik Verileri	81

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Sayfa</u>

Şekil 2.1 : Draganflyer.	.7
Şekil 2.2 : Quadrotor modeli.	.9
Şekil 3.1 : (a) Geleneksel ve (b) tüm yönlü kamera ile elde edilmiş görüntüler 1	15
Şekil 3.2 : Hiperbolik ayna ile tüm yönlü görüntü oluşumu 1	16
Şekil 3.3 : (a) Tek görüş noktalı ve (b) tek görüş noktasız sistemlerde ışınların yönü.	17
Şekil 3.4 : Tek görüş noktalı ayna geometrileri (a) düzlemsel (b) eliptik (c) hiperbolik (ç) parabolik (d) konik (e) küresel.	19
Şekil 3.5 : Kullanılan katadioptrik kamera	19
Şekil 3.6 : Katadioptrik izdüşüm ve birim küre vasıtasıyla iki aşamalı gönderim 2	20
Şekil 3.7 : Görüntü oluşum modeli	21
Şekil 3.8 : Bir parçacık süzgeci çevrimi	26
Şekil 3.9 : 3B çizginin eşdeğer küre vasıtasıyla imge üzerine izdüşümü	28
Şekil 3.10 : (a) Alınan görüntü, (b) maske, (c) tespit edilen ayrıtlar, (ç) kısalar elendikten sonra, (d) ayrıtların bölünmesinden ve kısalar tekrar elendikten sonra, (e) gerçek çizgiler.	29
Şekil 3.11 : Üç paralel çizginin küre üzerine izdüşümü ve kaçış doğrultusu	31
Şekil 3.12 : Paralel çizgilerin belirlenmesi.	32
Şekil 4.1 : Çoklu iş parçacığı akış şeması	40
Şekil 5.1 : Sanal benzetim ortamı ve İHA'nın hareketi	14
Şekil 5.2 : Sadece öteleme hareketi	14
Şekil 5.3 : Ötelemede kaçış noktaları	45
Şekil 5.4 : Dönme hareketi	45
Şekil 5.5 : Yaygın ve dayanıklı yaklaşımla poz tahmini	16
Şekil 5.6 : Kaçış noktaları.	17
Şekil 5.7 : Sınır açıları	18
Şekil 5.8 : Ölçüme gürültü eklenmiş benzetim sonucu	19
Şekil 5.9 : Katadioptrik kamera ile kontrolcü benzetim diyagramı	50
Şekil 5.10 : Dengeleme benzetimi	52

Şekil 5.11 : Ölçüm hataları.	53
Şekil 5.12 : Gürültü eklenmiş ölçüm hataları	53
Şekil 5.13 : Gürültülü ölçüm altında kontrol sonuçları	54
Şekil 6.1 : Deney düzeneği.	55
Şekil 6.2 : Sistem yapısı	56
Şekil 6.3 : Radyo verici	57
Şekil 6.4 : El ile hareket	58
Şekil 6.5 : Sapma kontrolü	59
Şekil 6.6 : Yunuslama kontrolü	59
Şekil 6.7 : Yalpalama kontrolü	59
Şekil 6.8 : Quadrotor kontrolü.	60
Şekil 6.9 : Bozucu etkiler altında kontrol	61
Şekil B.1 : Quadrotor Modeli	77

SEMBOL LİSTESİ

- ϕ : Yalpalama açısı
- θ : Yunuslama açısı
- ψ : Sapma açısı
- *m* : Kütle
- *g* : Yerçekimi ivmesi
- V : Hız vektörü
- ω : Gövde açısal hız vektörü
- Ω_i : Pervane açısal hızları
- *F* : Kuvvet
- τ : Tork
- *b* : İtme faktörü
- *d* : Dönme faktörü
- *l* : Rotor ile quadrotor merkezi arası mesafe
- *I* : Gövde ataleti
- J_r : Rotor ataleti
- U_i : Kontrol komutları
- *i* : Rotor numarasını gösteren indis
- *x* : Yönlü izdüşüm ışını
- *x_w* : Homojen 3B dünya noktası
- *x_i* : Sonsuzdaki düzleme izdüşen nokta
- x_c : İmge düzleminde nokta
- *P* : Ayna dönüşüm matrisi
- *R* : Dönme matrisi
- *C* : Yer ekseninin aynaya göre konumu
- *I* : Birim matris
- *O*₁ : Birim kürenin merkezi
- *O*₂ : Yeni izdüşüm merkezi
- *O_i* : Sonsuzdaki düzlemin merkezi
- O_c : İmge düzleminin merkezi
- *h* : Yönlü izdüşüm düzlemleri arası dönüşüm matrisi
- H_c : Düzlemde doğrultma matrisi
- K_c : Kamera iç parametreleri matrisi
- R_c : Kamera ile ayna arasındaki dönme matrisi
- M_c : Ayna şeklini ifade eden matris
- *d* : İki odak arası mesafe
- 4*p* : Özkiriş

ζ	: Ayna parametresi, küre üzerindeki $ O_1O_2 $ mesafesi
Ψ	: Diğer ayna parametresi
n	: Birim küre üzerinde büyük çember normali
u	: Kaçış doğrultusu
H	: Homografi matrisi
H_{∞}	: Sonsuz homografi matrisi
X^{\prime}	: Kalıbrasyon parametrelerini içeren parçacık
P(X Z)	: Sonraki olasılık
P(Z X)	: Olabilirlik
P(X)	: Önceki olasılık
f	: Maliyet fonksiyonu
Ν	: Parçacık sayısı
$\tilde{w}(x^i)$: x ⁱ parçacığının ağırlığı
$w(x^i)$: x ⁱ parçacığının normalleştirilmiş ağırlığı
N_{etk}	: Etkin örnekleme boyutu
$N_{\scriptscriptstyle e m s ik}$: Etkin örnekleme boyutu için eşik değeri
$\hat{x}_{k k-1}$: <i>k-1</i> anına kadar yapılan ölçümlere göre <i>k</i> anındaki öngörülen durum
$P_{k k-1}$: Hata ortak kovaryansı
F_k	: Durum değişim modeli
B_k	: Kontrol – giriş modeli
$H_k^{}$: Ölçüm modeli
W _k	: Sıfır ortalamalı ve normal dağılımlı süreç gürültüsü
v_k	: Sıfır ortalamalı ve normal dağılımlı ölçüm gürültüsü
Q_k	: Süreç gürültüsünün kovaryansı
R_k	: Ölçüm gürültüsünün kovaryansı
S_k	: Ölçüm ile öngörülen durum arasındaki farkın kovaryansı
Z_k	: Ölçüm vektörü
\tilde{y}_k	: Ölçüm ile öngörülen durum arasındaki fark
K_k	: Kalman katsayısı

QUADROTOR HAVA ARACININ KATADİOPTRİK İMGELERDEKİ KAÇIŞ NOKTALARI KULLANILARAK KONTROL EDİLMESİ

ÖZET

İnsansız hava araçları (İHA) günümüzde büyük önem kazanmıştır. Özellikle insan hayatını tehlikeye atabilecek şartlarda veya insanlı iken imkânsız olan manevraların olduğu durumlarda, askeri uygulamalardan film çekimlerine kadar pek çok uygulamada bu araçlardan yararlanılmaktadır.

İHA'nın uçuş esnasında en önemli parametrelerinden biri de onun sahip olduğu yönelimidir. Küresel konumlandırma sisteminin (GPS) veya ataletli seyrüsefer sisteminin (INS) kullanılamaz olduğu şartlarda veya normal şartlarda bunlara ek olarak görüntü sistemleri kullanılabilir.

Katadioptrik tüm yönlü kamera kullanımı son yıllarda büyük oranda artmıştır. Tek bir çerçevede yatay düzlemde 360° görüntü alınmasına olanak sağlayan bu sistemler ile pek çok alanda yenilikçi çalışmalar yapılmaktadır. Ancak tüm yönlü kameranın insansız hava araçlarında kullanılması çok yeni bir konudur. Bir grup araştırmacı İHA'nın pozunun bulunmasına yönelik çalışmalar yapmış ancak bu pozun bir İHA üzerinde uygulaması yapılmamıştır.

Kentsel ortamlarda binaların üzerinde birbirlerine paralel çok sayıda çizgi bulunur. Bu paralel çizgiler ufukta bir noktada kesişir. Bu noktalar kaçış noktaları olarak isimlendirilir. Bu noktalar ötelemeden bağımsızdır ve İHA'nın dönüşüyle birlikte onlar da görüntü düzleminde dönerler. Üç birbirine dik kaçış doğrultusunun oluşturduğu eksen takımının dönmesi bize İHA'nın dönmesini verir. Bu şekilde katadioptrik imgelerdeki kaçış noktaları takip edilerek İHA'nın mutlak yönelimi tahmin edilebilir.

Bu çalışmada ilk önce quadrotordan ve modelinden bahsedilmiş daha sonra katadioptrik sistemler tanıtılmıştır. Poz bulunmasında kullanılan algoritmadan ve kontrolcüden bahsedildikten sonra bunlar benzetimlerde sınanmıştır. Son olarak yapılan deneyler ile quadrotor katadioptrik tüm yönlü kamera ile kontrol edilmeye çalışılmıştır.

CONTROL OF A QUADROTOR AIR VEHICLE BY VANISHING POINTS IN CATADIOPTRIC IMAGES

SUMMARY

Nowadays, Unmanned Air Vehicles (UAVs) have become more and more important. These vehicles are employed in many applications from military operations to movie shooting especially under life threatening conditions or in cases where maneuvers by human beings are not possible.

Attitude is one of the most important parameters for a UAV during a flight. Under situations where global positioning system (GPS) and inertial navigation system (INS) do not function, or as an additional sensor, vision systems can be used.

In recent years omnidirectional camera usage has experienced a remarkable increase. In many fields innovative research has been done by this camera which captures 360° view in a single frame. However, employment of omnidirectional cameras in UAVs is very new. A group of researchers have studied about attitude estimation of UAVs; however, this estimation has never been applied to a real UAV.

In urban environment, on buildings there exist many parallel lines. These parallel lines intersect in the horizon. These intersection points are called vanishing points. These points are independent from translation and they rotate on the image plane with the rotation of the UAV. The rotation of reference frame that is composed of three orthonormal vanishing directions gives us the rotation of the UAV. In this way, by tracking vanishing points in catadioptric images one can estimate the absolute orientation of the UAV.

In this thesis, firstly quadrotor and its model were presented. Then catadioptric systems were introduced. After explaination of the algorithm that is used to estimate the attitude, and description of the controller, some simulations have been done. Finally, in real experiments quadrotor has been controlled.

1. GİRİŞ

İnsansız hava aracı (İHA) tanımı askeri ve sivil uygulamalar için kullanılabilen son nesil insansız hava araçları için kullanılır. İHA'larının insanlı sistemlere göre manevra kabiliyeti, düşük maliyet, düşük radar belirtileri, uzun dayanım ve ekip için düşük risk gibi belli temel avantajları vardır.

İHA'ların çok çeşitli uygulama alanları bulunur. Öncelikle güvenliğin önemli olduğu hava sahasının ve kent trafiğinin kontrolü gibi görevlerde, aktif volkanlar gibi doğal risklerin yönetiminde, hava kirliliği veya orman gözetimi gibi çevresel etkinliklerde, radyoaktif atmosferde, baraj, elektrik veya boru hattı gibi yer yapılarının denetiminde, tarımsal faaliyetlerde ve film çekimlerinde gökyüzünden görüntü alma gibi alanlarda kullanılabilirler [1].

Helikopterler en karmaşık uçan aletlerden biridir. Ana rotor ve kuyruk rotorundan oluşan klasik helikopterin yanı sıra çift rotor veya tandem helikopter, eş eksenli helikopter ve quadrotor da helikopter modellerindendir.

Quadrotor simetrik olarak yerleştirilmiş dört rotora sahip bir helikopterdir. Hareketi motor hızlarının bağıl olarak azaltılıp arttırılması esasına dayanır. Dikey iniş ve kalkış yapabilen ve askıda da kalabilen quadrotor aynı zamanda düşük hızlarda da uçabilmektedir. Bunların dışında manevra kabiliyetinin yüksekliği ve insansız olarak küçük boyutlarda tasarlanabilmesi diğer pozitif yönleridir. Bu tez çalışması quadrotor üzerine gerçekleştirilmiştir.

İHA'ların ve quadrotorun dengelenmesi, özerkliğine (otonomisine) giden yolda en önemli adımlardan birisidir. Aracın pozunun kesin ve doğru şekilde belirlenmesi için alışılagelmiş çözüm, algılayıcıların sayısının arttırılması ve elde edilen verilerin birlikte değerlendirilmesidir. Küresel yer belirleme sistemi (GPS), atalet navigasyon sistemleri (INS) gibi geleneksel seyrüsefer donanımları bir takım kısıtlamalardan muzdariptir. Mesela GPS, kesilen sinyallere ve düşmanca yayının bozulmalarına karşı hassastır. INS'in olumsuz yanı ise konum hatalarının zaman içinde birikmesi ve büyük hatalara neden olabilmesidir. Bu yöntemlerin temel eksikliklerinin giderilmesi için görüntü tabanlı seyrüsefer yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler GPS'in veya atalatsel rehberliğin mümkün olmadığı koşullarda veya bu algılayıcılara ilave olarak konumun ve yönelimin bulunmasında yardımcı olurlar.

Görüntüleme sistemlerinin İHA'larda kullanımı son otuz yıldır yapılan çalışmalarla oldukça artmıştır. Görsel odometre, stereo kamera ile engellerden sakınma, iniş ve kalkış, yörünge planlama, GPS ve/veya IMU'nun görsel bilgi ile birlikte kullanımı, görsel servolama ile köprülerin, barajların, boru hatlarının vs. gözlenmesi, otopilot, cadde trafiğinin gözlemlenmesi, hedef algılama ve takip, haritalama, havada yakıt ikmali, optik akış ile hareket tahmini, yerdeki hareketli cisimlerin takibi, ufuk çizgisinden yararlanılarak poz tahmini gibi pek çok alanda araştırma ve uygulama yapılmıştır.

Quadrotorun görsel veri kullanılarak kontrolü üzerine yapılan çalışmalardan başlıcaları şunlardır: [2] ve [3] yayınlarında birincil algılayıcı olarak görsel veri kullanılmıştır. Bir veya daha fazla kamera kullanılarak çeşitli konumlandırma, poz tahmini ve kontrol yöntemleri karşılaştırılmıştır. [4] de ise görsel servolama kullanılarak quadrotor kontrol edilmiştir.

Görüntüleme sistemleri için, özellikle robotik uygulamalarında, geniş açılı imge elde edebilme her zaman önemli bir hedef olmuştur. Geleneksel kameraların çok kısıtlı bir görüş alanı vardır. Bu alanı arttırmak için kameranın döndürülmesi bir çözüm olabilir ancak bu sistem hareketli parçalara ve hassas konumlandırmaya ihtiyaç duyar. En önemli kusuru geniş açı elde etmek için gereken zamandır. Bunun nedenle gerçek zamanlı uygulamalar için uygun değildir. Balıkgözü mercekli kameralar ise çok kısa odak mesafesi olan dolayısıyla bir yarım küre içindeki objeleri görmemize olanak sağlayan kameralardır. Ancak bu kameraların zorluğu tüm gelen ana ışınların tek bir noktada kesişmesini sağlayacak merceğin tasarımıdır. Sahnenin bozunumsuz olarak perspektif şekilde görüntülenmesi gerekir. Bir diğer çözüm ise aynaların (kataoptrik elemanlar) merceklerle (dioptrik elemanlar) birlikte kullanıldığı katadioptrik sistemlerdir. Bu sistemlerde çok geniş görüş açısı tek seferde elde edilebilmektedir. Fiyatlarının da ucuzlamasıyla bu sistemler gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır.

2

Katadioptrik kameraların kullanımı üzerine çok çeşitli alanlarda uygulama yapılmıştır: gözetim, video konferans, sanal gerçeklikle uzaktan varlık, robot gezinimi vs. Bu uygulamalar normal görüş açılı kameralar ile yapılan araştırmaların tüm yönlü kameralara da uyarlanmasıyla daha da ilerlemektedir.

Yer robotlarında tüm yönlü kamera kullanımı son on yılda oldukça artmıştır. Tek başına, stereo veya diğer algılayıcılarla birlikte kullanılan uygulamalar gerçekleştirilmiştir. [5] yayınında robot sürüsünün koordinasyonu tüm yönlü kameraya sahip bir lider robot tarafından sağlanmıştır. [6], [7], [8] yayınlarında konumlandırmanın, obje takibinin ve engelden kaçınmanın çok önemli olduğu futbol müsabakaları için tasarlanmış robotlarda tüm yönlü kamera kullanımı anlatılmıştır. [9] yayınında ise tüm yönlü kameranın topolojik seyrüsefer ve görsel yörünge takibi gibi temel seyrüsefer konularında nasıl kullanılabileceğinden bahsedilmiştir. Nirengi noktalarının (landmark) panoramik takibiyle yapılan seyrüsefer [10], yer yüzey renginin kullanılarak engellerden kaçınma ve konumlandırma [11], havadan çekilmiş görüntülerle tüm yönlü kamera ile yer aracından toplanmış verilerle semantik haritalama [12] ve tüm yönlü kameranın derinlik sensörleriyle birlikte kullanılması [13] diğer uygulamalardır.

Tüm yönlü kameraların İHA'larda kullanımı son birkaç yılda görülmektedir. Katadioptrik kamerayı otonom hava aracına ilk uygulayanlar Hrabar ve Sukhatme'dir. İlk çalışmalarında helikopterin üç adet 'H' harfinin merkezine yönlenmesi sağlanmıştır. Ancak yaptıkları çalışmada katadioptrik imgelerin bozulma gibi karakteristik özellikleri dikkate alınmamıştır. Uygulamada yapay görsel hedeflere ihtiyaç duyulmakla birlikte aracın sadece iki boyutlu kontrolü yapılmıştır [14]. Diğer çalışmalarında ise helikopter üzerine yerleştirilmiş katadioptrik kamera ile balıkgözü mercekli iki kameranın kıyaslaması yapılmıştır [15]. Bir diğer grup araştırmacı ise İHA'larının üç boyutlu pozunun tahmini üzerine çalışmaktadır. [16], [17] çalışmaları yunuslama ve yalpalama açılarının katadioptrik imgede ufkun Rasgele Markov Alanı (Random Markov Field) veya KYM (RGB) tabanlı Mahalanabis mesafesinin büyütülerek bulunmasına dayanır. Ancak bu çalışmalarda ufkun açıkça görünebildiği farz edilmiştir. Ayrıca bu ufka dayalı yöntemler sapma açısının belirlenmesine olanak vermediğinden tam bir durum saptaması yapılamamaktadır. [18]'de yazarlar ufuk tabanlı teknik ile düzlemsel homografiyi birlikte kullanan hibrit bir yaklaşım öne sürmüşlerdir. Ancak üç dönme açısı hesaplanırken düz araziye ihtiyaç duyulmaktadır ve hata birikmesini sıfırlamak için büyük oranda ufkun çıkarılmasına dayanmaktadır. Daha sonra ufka bağımlılıktan kurtulmak için kentsel çevrelerde kullanılmak üzere çizgiye dayalı bir metot geliştirilmiştir [19]. Dikey yönü yeryüzü düzleminin normali gibi düşünerek [16] ve [17]'deki yöntemlerle yine yalpalama ve yunuslama açıları tahmin edilebilmektedir. Ancak hala önemli kısıtlamalar vardır. Sapma açısı hesaplanamadığı gibi dikey yönün belirlenebilmesi için gökyüzünü temsil eden bölgelerin belirlenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla bu yöntem yoğun kentsel bölgelerde ve kapalı alanlarda uygulanamamaktadır. Aynı zamanda gökyüzü ve yer piksellerinin ayrılması kolay bir işlem değildir. En son olarak [20] yayınında bu eksiklikleri tamamlayacak bir yöntem sunulmustur. Kentsel bölgelerde kullanılabilen ve hatanın birikmediği bu yayında katadioptrik imgelerdeki kaçış noktaları ve bu imgeler arasında sonsuz homografi kullanılmıştır. Bu yöntemle tüm dönme açıları belirlenebilmektedir. Gerçek görüntü dizileriyle yaptıkları deneylerin sonuçları gerçek değerlere çok yakındır.

Bu tezin amacı katadioptrik hiperbolik tüm yönlü kamera ile quadrotorun açısal konumunun kontrol edilmesidir. Bu amaçla ilk önce çevredeki çizgiler katadioptrik kamera ile tespit edilir. Daha sonra kaçış doğrultuları bulunarak ve bir önceki doğrultularla karşılaştırılarak o anki poz tahmin edilir ve istenen değerlere göre helikopterin kontrolü gerçekleştirilir. Detaylar ilgili bölümlerde açıklanmıştır.

Birinci bölümünde genel giriş yapılıp tezin bölümleri hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümünde quadrotor, quadrotorun çalışma prensibi ve modellenmesi hakkında bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde ise katadioptrik sistemlerde görüntü oluşumundan, kameranın kalibrasyonundan ve tez kapsamında pozun tahmini için kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde tasarlanan kontrolcü, Kalman süzgeci ve çoklu iş parçacığı kullanımını anlatılmıştır.

Beşinci bölümde yapılan benzetimler açıklanmıştır.

4

Altıncı bölümde deney düzeneğinden ve kullanılan ekipmanlardan bahsedilmiş ve yapılan deneylerin grafikleri verilmiştir.

Yedinci bölümde ise sonuçlar ve öneriler belirtilmiştir.

2. QUADROTOR

2.1 Giriş

Quadrotor çalışmaları 20. yy. başlarında başlamış, günümüze kadar gelmiştir. Erken zamanlarda elektronik biliminin ve kontrol teknolojisinin gelişmemiş olması nedeniyle ilk quadrotorlar insanlıdır. Daha sonra teknoloji ve bilimdeki ilerlemelerle quadrotor araştırmaları insansız hava araçları olarak devam etmiştir.

McKerrow'ın tarifine göre dört rotorlu helikopterler (X4 flyer veya quadrotor olarak da anılırlar), dört rotor tarafından üretilen kuvvetleri dengeleyerek havada askıda kalmaya (hovering) ve hassas uçuş yapmaya çalışan araçlardır. Tek rotorlu helikopter (indüklenen momenti karşılayacak kuyruk rotor ile birlikte) kapalı alanlarda rotor pallerinin bir cisme çarpması ve helikopterin çakılması potansiyelinden dolayı tehlikelidir [21].



Şekil 2.1 : Draganflyer.

Ancak dört rotorlu helikopterler pervanelerin küçük olmasından ve etrafi kapanabilir olmasından dolayı güvenli ve ilgi çekicidir. Bunun yanında ağırlık merkezine belli

uzaklıktaki dört itme kuvveti ile ağırlık merkezine etkiyen tek itme kuvvetine göre daha sabit havada askıda kalmak mümkündür [21]. Quadrotorun temel artı ve eksileri Çizelge 2.1'de verilmiştir [22].

Artıları	Eksileri
Basitleşmiş rotor mekaniği	Ağırlık artışı
Taşıma kapasitesi artışı	Yüksek enerji tüketimi
Cayroskopik etkilerin azlığı	

Çizelge 2.1 : Quadrotorun artı ve eksileri.

Şekil 2.1'de RCToys tarafından pazarlanan ve bu tez çalışmasında kullanılan Draganflyer marka quadrotor görülmektedir.

2.2 Quadrotorun Genel Özellikleri

Bu tezde eksen takımı N,E,D (North, East, Down) standardına göre belirlenmiştir (Şekil 2.2). Buna göre quadrotorun ileri yöndeki hareketi x eksenini tanımlarken, düşey yöndeki hareketi ise z eksenini tanımlar. Diğer taraftan x ekseni etrafında saat yönünde yaptığı açı yalpalama açısı (ϕ), y ekseni etrafında saat yönünde yaptığı açı ise sapma açısı (ψ) olarak isimlendirilir.

Geleneksel helikopterlerin aksine quadrotorlarda eğik plaka (swashplate) veya değişken yunuslama açıları yoktur. Herhangi bir servo mekanizmaya gereksinim duyulmamaktadır. İstenen taşıma kuvvetleri rotor hızları değiştirilerek elde edilir.

Quadrotorlarda ön ve arka motorların dönüş yönleri aynı olup diğer iki motorunki ile ters yöndedir. Bu sayede bütün pervaneler eşit hızda döndüğünde helikopterin merkezinde oluşan tork dengelenir ve helikopterin kendi ekseni etrafında dönmesi engellenir (Klasik helikopterlerde bu amaç için kuyruk rotoru kullanılmaktadır). Dolayısıyla sapma hareketi bir taraftan ön ve arka motorların hızlarını arttırarak (azaltarak) diğer taraftan yanal motorların hızları azaltılarak (arttırılarak) kontrol edilebilir. Burada toplam taşıma kuvveti sabit kalmaktadır.



Şekil 2.2 : Quadrotor modeli.

Benzer şekilde ön ve arka pervaneler arasındaki hız farkı yunuslama hareketine sebep olurken, sağ ve sol pervaneler arasındaki hız farkı ise yalpalama ile sonuçlanır. Düşey hareket ise tüm rotor hızlarının aynı anda değiştirilmesi ile elde edilir.

2.3 Quadrotor Modeli

Helikopterler oldukça karmaşık bir yapıya sabittir. Bu nedenle modelleme yapılırken bazı kabuller yapılır ve sistem basite indirgenir. Ancak elde edilen model gerçeğe en yakın sonuçlar vermelidir. Temel olarak helikopterin maruz kaldığı fiziksel etkiler Çizelge 2.2'de verilmiştir [22].

Etki	Kaynağı
Aerodinamik etkiler	Pervane dönüşü Pallerin flap hareketi
Ataletsel karşı torklar	Pervane dönüş hızındaki değişiklikler
Yerçekimi etkisi	Kütle merkezinin konumu
Cayroskopik etkiler	Katı cismin yöneliminin değişmesi
Sürtünme	Tüm helikopter hareketleri

Çizelge 2.2 : Helikopterin maruz kaldığı temel etkiler.

Bu tez çalışmasında quadrotor modeli Bouabdallah ve Siegwart'ın [23] yayınından alınmıştır.

Newton-Euler biçimciliğine (formalism) göre, kütle merkezinde dış kuvvetlere maruz kalan bir katı cismin dinamiği gövde ekseninde şu şekilde ifade edilir:

$$\begin{bmatrix} mI_{3x3} & 0\\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}\\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega \times mV\\ \omega \times I\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F\\ \tau \end{bmatrix}$$
(2.1)

Burada $I \in \mathbb{R}^{(3\times3)}$ atalet matrisi, *V* gövde çizgisel hız vektörü ve ω ise gövde açısal hız vektörüdür. *F* ve τ sırasıyla gövde kuvveti ve torkudur. *m* ise sistemin kütlesidir.

Denklem göbek (hub) kuvvetleri ve yalpalama momentleri ihmal edilerek, aynı zamanda itme ve sürükleme faktörleri sabit alınarak model sadeleştirilerek çözülebilir.

Buna göre pervanelerin dönüşlerinden kaynaklanan taşıma kuvvetleri,

$$F_i = b\Omega_i^2 \tag{2.2}$$

ve dört pervanenin oluşturduğu toplam taşıma kuvveti

$$F_{T} = b \sum_{i=1}^{4} \Omega_{i}^{2}$$
 (2.3)

şeklinde ifade edilebilir. Burada Ω_i (i: 1,2,3,4) pervanelerin açısal hızları ve b itme faktörüdür.

Bu kuvvetler altında oluşan ivme ise

$$a_F = \frac{b}{m} \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2$$
(2.4)

olarak bulunur.

g yerçekimi ivmesi ve R dönme matrisi olmak üzere yere göre kuvvet dengesi yazılırsa,

$$\dot{v} = -ge_z + Re_z a_F \tag{2.5}$$

ve çözülürse öteleme hareket denklemleri şu şekilde elde edilir:

$$\ddot{x} = (\cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi)\frac{b}{m}(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)$$

$$\ddot{y} = (\cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi)\frac{b}{m}(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)$$

$$\ddot{z} = -g + (\cos\phi\cos\theta)\frac{b}{m}(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)$$

(2.6)

Diğer taraftan helikopterin eksenleri etrafında ω açısal hızlarıyla döndüğü için oluşan açısal momentum ve açısal tork :

$$L = I\omega \tag{2.7}$$

$$\tau_{\rm B} = \dot{L} = \omega \times I \omega + I \dot{\omega} \tag{2.8}$$

şeklindedir.

Helikopterin gövdesinin ve pervanelerinin kendi eksenleri etrafında dönmesinden dolayı ortaya çıkan cayroskopik tork ise :

$$\tau_G = \sum_{i=1}^4 J_r(\omega \times e_z) \Omega_i (-1)^i$$
(2.9)

denklemi ile ifade edilebilir. Burada J_r rotor ataletini temsil etmektedir.

Son olarak pervanelerin dönmesiyle oluşan taşıma kuvvetlerinin oluşturduğu torklar:

$$\tau_{a} = \begin{bmatrix} lb(\Omega_{4}^{2} - \Omega_{2}^{2}) \\ lb(\Omega_{3}^{2} - \Omega_{1}^{2}) \\ d(-\Omega_{1}^{2} + \Omega_{2}^{2} - \Omega_{3}^{2} + \Omega_{4}^{2}) \end{bmatrix}$$
(2.10)

olarak yazılabilir. Burada da d dönme faktörü ve l rotorun quadrotorun merkezine olan uzaklıktır.

Tork dengesi kurulursa

$$\tau_G + \tau_B = \tau_a \tag{2.11}$$

ve çözülürse dönme hareket denklemleri elde edilir:

$$\ddot{\phi} = \dot{\theta} \dot{\psi} \left(\frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}}\right) - \frac{J_r}{I_{xx}} \dot{\theta} \left(-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4\right) + \frac{lb}{I_{xx}} \left(-\Omega_2^2 + \Omega_4^2\right)$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\phi} \dot{\psi} \left(\frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}}\right) - \frac{J_r}{I_{yy}} \dot{\phi} \left(-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4\right) + \frac{lb}{I_{yy}} \left(\Omega_1^2 - \Omega_3^2\right)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\phi} \dot{\theta} \left(\frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}}\right) + \frac{d}{I_{zz}} \left(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2\right)$$

(2.12)

Burada kontrolcü girişleri basitçe

$$U_{1} = b(\Omega_{1}^{2} + \Omega_{2}^{2} + \Omega_{3}^{2} + \Omega_{4}^{2})$$

$$U_{2} = b(-\Omega_{2}^{2} + \Omega_{4}^{2})$$

$$U_{3} = b(\Omega_{1}^{2} - \Omega_{3}^{2})$$

$$U_{4} = d(-\Omega_{1}^{2} + \Omega_{2}^{2} - \Omega_{3}^{2} + \Omega_{4}^{2})$$
(2.13)

olarak belirlenebilir. U_1 toplam taşıma kuvveti ile, U_2 yalpalama hareketi ile, U_3 yunuslama hareketi ile, U_4 ise sapma hareketi ile ilişkilidir.

Kontrolcü girişleri yerlerine yazılırsa

$$\ddot{x} = (\cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi)\frac{1}{m}U_{1}$$

$$\ddot{y} = (\cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi)\frac{1}{m}U_{1}$$

$$\ddot{z} = -g + (\cos\phi\cos\theta)\frac{1}{m}U_{1}$$

$$\ddot{\phi} = \dot{\theta}\dot{\psi}(\frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}}) - \frac{J_{r}}{I_{xx}}\dot{\theta}\Omega + \frac{l}{I_{xx}}U_{2}$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\phi}\dot{\psi}(\frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}}) - \frac{J_{r}}{I_{yy}}\dot{\theta}\Omega + \frac{l}{I_{yy}}U_{3}$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\phi}\dot{\theta}(\frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}}) + \frac{1}{I_{zz}}U_{4}$$

(2.14)

elde edilir. Burada

$$\Omega = (-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) \tag{2.15}$$

şeklindedir.

Bu sistemde şunu belirtmek gerekir ki, açılar ve bunların zaman türevleri öteleme bileşenlerine bağlı değildir. Diğer taraftan, ötelemeler açılara bağlıdır. Yani toplam sistemin, açısal dönüşler ve çizgisel ötelemeler gibi iki alt sistemden oluştuğu söylenebilir [23].

3. KATADİOPTRİK TÜM YÖNLÜ GÖRÜŞ

3.1 Giriş

Aynaların (kataoptrik elemanlar) merceklerle (dioptrik elemanlar) birlikte kullanıldığı sistemler katadioptrik sistemler olarak isimlendirilir. Bu sistemlerin en büyük getirisi çok geniş görüş açısının tek seferde elde edilmesidir. Şekil 3.1'de geleneksel kamera ile elde edilmiş sınırlı görüntü ve tüm yönlü kamera ile elde edilmiş geniş açılı görüntü görülmektedir.



Şekil 3.1 : (a) Geleneksel ve (b) tüm yönlü kamera ile elde edilmiş görüntüler.

Elde edilen geniş açılı görüntü İHA'larda çok büyük bir avantaj teşkil etmektedir. Tek bir çerçevede İHA'nın 360° etrafi görülebildiği için katadioptrik imge poz tahmininde, cisimlerin takip edilmesinde veya olası engellerden kaçmada kullanılabilir.

Bu çalışmada amaç katadioptrik kamerayı birincil ve tek algılayıcı olarak kullanarak pozu tahmin etmektir. Poz tahmininde çevredeki (şehir içinde binaların üzerindeki) çizgilerden faydalanılır. Bulanan çizgiler paralellik durumlarına göre ayrıştırılarak kaçış noktaları yani paralel çizgilerin ufukta birleşme noktaları tespit edilir. Daha sonra üç kaçış noktasının oluşturduğu eksen takımının dönmesi izlenerek quadrotorun o anki açısal konumu tahmin edilir.

Bu tez çalışmasında poz tahmini [20] yayını temel alınarak yapılmıştır.

Bu bölümde katadioptrik sistemlerde imgenin nasıl oluştuğu, kısaca katadioptrik sistemler, sistemin modellenmesi ve kalibrasyonu ve son olarak oluşan imgeden nasıl işlenerek poz bilgisinin alındığı anlatılmıştır.

3.2 İmge Oluşumu

Katadioptrik sistemlerde aynaya gelen ışın yansır ve kameranın merceğinden geçerek imge düzlemine düşer. Şekil 3.2'te hiperbolik aynalı bir sistemde görüntü oluşumu gösterilmiştir. İmge kamera merkezinin arkasında ters olarak oluşur ancak işlem kolaylığı açısından önde ve düz olarak belirtilir.



Şekil 3.2 : Hiperbolik ayna ile tüm yönlü görüntü oluşumu.

Oluşan tüm yönlü görüntü Şekil 3.1 (b)'deki gibidir.

3.3 Tek Görüş Noktası ve Katadioptrik Kameralar

Katadioptrik tüm yönlü görüş teorisinde en önemli hususlardan biri tek görüş noktasıdır (single view point) ve kameraların sınıflandırılmasında kullanılır. Bu konu Nayar ve Baker tarafından [24], [25] yayınlarında etraflıca incelenmiştir

Tek görüş noktası, tüm yönlü imgenin tek bir noktayı hedef alan ışınlar tarafından oluştuğunu belirtir. Örneğin Şekil 3.3'te solda gösterilen aynada, gerçek dünya noktalarından gelen ve hiperbolik aynanın odak noktasını (tek görüş noktası) hedef alan ışınlar ayna yüzeyinden yansıyarak kamera merkezinden geçerler. Bu tek görüş noktası sanal bir iğne deliği (pinhole) gibi davranır ve sahne normal kameralarda oluşuyor gibi görülür. Fakat diğer sistemde imge oluşumu için kullanılan ışık huzmeleri tek görüş noktalı durumundaki gibi tek bir noktada kesişmezler. Dolayısıyla böyle bir nokta tanımlanamaz [26].



Şekil 3.3 : (a) Tek görüş noktalı ve (b) tek görüş noktasız sistemlerde ışınların yönü.

Tek görüş noktası katadioptrik sistemlerde arzu edilen bir özelliktir. Bunun nedeni katadioptrik kameralarla yakalanan imgelerden geometrik olarak doğru perspektif imgelerin yaratılmasına olanak sağlamasıdır. Bu doğrudur çünkü tek görüş noktası şartı altında algılanan görüntüdeki her piksel bu tek noktadan geçen tek bir özel
yöndeki ışının şiddetini verir. Katadioptrik sistemin de geometrisini bildiğimizden her piksel için bu yönü hesaplayabiliriz. Dolayısıyla, düzlemsel bir perspektif görüntü oluşturmak için her piksel tarafından ölçülen aydınlatma miktarını görüş noktasından herhangi bir uzaklıktaki düzleme gönderebiliriz. Bu perspektif görüntüler daha sonra pek çok teknikle işlenebilir [25].

Düzlemsel, parabolik, hiperbolik, eliptik, küresel ve konik, bunların hepsi tek görüş noktalı aynalardır. Ancak son iki tip ayna için tek noktalı görüş elde edebilmek için kameranın koninin zirvesine ve kürenin yüzeyine yerleştirilmesi gerekir. Bu durumda bu aynalar kullanışlı değildir. Pratikte kameralar aynalardan uzak tutulur. Yani bu şartlarda tek görüş noktası özelliği kaybolur ancak algılayıcı kullanılabilir. Diğer bir ifadeyle, küresel ve konik aynalar tek görüş noktasına sahiptir ancak kamera ve ayna montajı sahip değildir. Parabolik aynalı sistemde ise diğerlerinden farklı olarak ışınlar optik eksene paralel olarak yansıdığı için telesentrik mercek kullanılır [27].







Şekil 3.4 : Tek görüş noktalı ayna geometrileri (a) düzlemsel (b) eliptik (c) hiperbolik (ç) parabolik (d) konik (e) küresel.

Şekil 3.5'te ise bu tez kapsamında kullanılan hiperbolik aynalı VStone VS-C450N-TK model kamera gösterilmiştir. Kameranın teknik verileri EK C.1'de bulunabilir.



Şekil 3.5 : Kullanılan katadioptrik kamera.

Yukarıda belirtilen ayna formlarının dışındaki hiçbir ayna tek görüş noktasına sahip değildir. Bu tip aynalar farklı geometrik davranışlar ve sabit dikey çözünürlük, merkezde daha önemli çözünürlük gibi özel optik uygulamalar için kullanılır.

3.4 Katadioptrik Kameranın Modellenmesi

Yamazawa ve diğerleri [28] hiperbolik aynalı bir sistemi direk hiperbolün denklemlerini kullanarak modellemiş ve bu modeli gezgin bir robotun seyrüseferi için kullanmışlardır.

Daha sonra, [29] yayınında Geyer ve Daniilidis tek görüş noktalı katadioptrik kameraları tek çatı altında toplayan bir teoriyi tanıtmışlardır. Buna göre merkezi panoramik izdüşüm, ilk olarak sahnenin aynanın odak noktasına (tek görüş noktasına) merkezlenmiş birim küreye izdüşürülmesi ve daha sonra kürenin imge düzlemine izdüşürülmesi şeklinde iki aşamalı izdüşüme denktir (Şekil 3.6). İkinci izdüşümde, izdüşüm merkezinin konumu ayna şekline ve boyutuna bağlıdır ve iki parametre ile ifade edilir (ζ , φ).



Şekil 3.6 : Katadioptrik izdüşüm ve birim küre vasıtasıyla iki aşamalı gönderim.

Daha sonraki zamanlarda, Barreto ve Araujo [30] bu modelin değiştirilmiş bir versiyonu sunmuştur. Bu tez çalışmasında da kullanılan bu model üç aşamalıdır (Şekil 3.7). İlk etapta, 3B x_w noktasından ve kürenin merkezinden geçen x yönlü

izdüşüm ışını (oriented projective ray) tanımlanmıştır. Homojen x_w noktası ile x arasındaki ilişki

$$x = Px_w \tag{3.1}$$

şeklindedir. Burada

$$P = R[I \mid -C] \tag{3.2}$$

3x4 matris olup *R* yer ve ayna koordinat sistemleri arasındaki dönme matrisi, *C* ise yer ekseni merkezinin ayna eksen takımındaki konumudur. Eğer dünya ve ayna koordinat sistemleri aynı ise

$$P = [I \mid 0] \tag{3.3}$$

şeklindedir. x izdüşüm ışını T^2 yönlü izdüşüm düzleminde bir nokta gibi düşünülür. Çünkü panoramik görüntü sistemi modellenirken izdüşüm merkezine göre karşı tarafta bulunan noktalar da eş zamanlı olarak görüntülenebilir.



Şekil 3.7 : Görüntü oluşum modeli.

Diğer bir yönlü izdüşüm ışını ise x_s 'ten ve kürenin merkezi ile kutbu arasındaki ve z ekseni üstündeki O₂ noktasından geçer. Bu nokta küre merkezinden ζ mesafesindedir ve sadece aynanın geometrik yapısına bağlıdır. Yeni izdüşüm merkezinden çıkan bu ışın yönlü x_i noktasını tanımlar. x_i noktası doğrusal olmayan *h* fonksiyonu ile bulunur:

$$x_i = h(x) = (x, y, z + \zeta \sqrt{x^2 + y^2 + z^2})^T$$
(3.4)

Burada *h* birebir fonksiyondur. Yani her *x* yönlü izdüşüm ışını için sadece bir tane x_i vardır.

Son olarak, x_i 'nin oluştuğu sonsuzdaki düzlemle (plane at infinity) katadioptrik imge düzlemi arasında tanımlı olan H_c matrisi ile x_i noktası x_c noktasına izdüşürülür:

$$x_c = H_c x_i \tag{3.5}$$

 H_c matrisi, kameranın iç parametrelerini (K_c), küre ile imge düzlemi arasındaki olası dönmeleri (R_c) ve ayna parametrelerini (M_c) içerir:

$$H_c = K_c R_c M_c \tag{3.6}$$

$$M_{c} = \begin{bmatrix} \psi - \xi & 0 & 0 \\ 0 & \xi - \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3.7)

 M_c matrisinde geçen ayna parametreleri d iki odak arası mesafe ve 4p özkiriş (latus rectum) olmak üzere Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Ayna parametreleri.

	Parabolik	Hiperbolik	Eliptik	Düzlemsel
(ζ,ψ)	(1,1+2 <i>p</i>)	$(\frac{d}{\sqrt{d^2+4p^2}}, \frac{d+2p}{\sqrt{d^2+4p^2}})$	$(\frac{d}{\sqrt{d^2+4p^2}}, \frac{d-2p}{\sqrt{d^2+4p^2}})$	(0,1)

İmge düzleminden tekrar birim küreye dönmek için kullanılan fonksiyonların tersi alınır. *h* fonksiyonunun tersi şu şekildedir:

$$h^{-1}(x_{i}) = \begin{bmatrix} \lambda_{c} x_{i} & \lambda_{c} y_{i} & \lambda_{c} z_{i} - \zeta \end{bmatrix}^{T}$$

$$\lambda_{c} = \frac{z_{i} \zeta + \sqrt{z_{i}^{2} + (1 - \zeta^{2})(x_{i}^{2} + y_{i}^{2})}}{x_{i}^{2} + y_{i}^{2} + z_{i}^{2}}$$
(3.8)

İlk bakışta fark edilmemekle birlikte küre eşitliği bazı nedenlerle çok ilginçtir. İlk olarak katadioptrik bozulumların hesaba katılmasını büyük oranda kolaylaştırılır. Katadioptrik imgeler ayna izdüşümünden dolayı büyük oranda bozulur ve imge analizini zorlaştırır. Küre kullanımı bu bozulmaların üstesinden gelmemize olanak sağlar. İkinci olarak, küre genel bir çerçeve oluşturur ve aynanın parabolik veya hiperbolik olmasından bağımsız olarak çalışmamıza imkân verir. Son olarak küre uzayı çok ilginç izdüşüm özellikleri sunar. Örnek olarak bir çizgi küre üzerine büyük çember olarak iz düşer [20].

3.5 Kalibrasyon

İmge düzleminde oluşan görüntülerin düzgün yorumlanabilmesi için kullanılan kameranın kalibre edilmesi gerekir. Katadioptrik kameranın kalibrasyonu için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bunlar genel olarak belli bir patern üzerindeki köşelerin kullanıldığı, görüntüdeki çizgilere konik uydurulduğu, küre görüntüleri kullanıldığı, çeşitli kendi kendini kalibrasyon tekniklerinin kullanıldığı ve son olarak bir maliyet fonksiyonunun kullanıldığı yöntemlerdir.

Kamera kalibrasyonu için ilk olarak modelini kullandığımız [30] yayını seçilmiştir. Geliştirdikleri yönteme göre katadioptrik kameralar üç adet çizgi kullanılarak kalibre edilebilirler. Ancak kendi internet sayfalarında [31] yayınladıkları MATLAB araç kutusu kullanılarak yapılan kalibrasyonlarda her seferinde farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar ile yapılan çizgi bulma çalışmalarında ise istenen sonuçlar elde edilememiştir. Kalibrasyonda her seferinde farklı sonuçlar elde edilmesinin ve çizgilerin düzgün tespit edilememesinin sebebi, bir çizgi için birden fazla eğri uydurulabilmesidir. Yanlış uydurulan çizgiler kalibrasyonun hatalı olmasına ve dolayısıyla bu kalibrasyon değerleri ile gerçekleştirilen deneylerin de başarısız olmasına yol açmaktadır. Bu nedenle görüntüdeki çizgilerin paralelliğini ve paralel çizgilerin birbirlerine dikliğini bir maliyet fonksiyonu olarak kullanan ve parçacık süzgeçlemeden yararlanan [32] yayını incelenmiş ve basitleştirilerek kullanılmıştır. Bu amaçla C++ ortamında yazılan programda ilk olarak görüntüdeki çizgiler 3.6.1 bölümünde açıklandığı şekilde bulunmuştur ve kullanıcıdan gerçek dünyada birbirlerine dik doğrultuda olacak şekilde üçer paralel çizgi yani toplamda dokuz çizgi seçmesi istenmiştir. Daha sonra bu paralel çizgilerin rastgele kalibrasyon parametreleri kullanılarak kaçış doğrultuları hesaplanmış ve birbirlerine olan diklikleri karşılaştırılarak en iyi kalibrasyon parametreleri bulunmaya çalışılmıştır.

Daha detaylı olarak, katadioptrik kameranın en-boy oranı, odak uzaklığı, kaykıklık, düşey ve yatay imge merkezleri ve ζ ayna parametresi olmak üzere altı tane kalibrasyon parametresi vardır. Dolayısıyla amacımız kameranın gerçek kalibrasyon parametreleri olma olasılığı en büyük \hat{X} parametre takımını bulmaktır:

$$\widehat{X} = \underset{X}{\arg\max} P(X \mid Z)$$
(3.9)

Burada P(X|Z) kaçış doğrultularından oluşan verilen Z ölçümüne göre X'in kalibrasyon parametreleri olma olasılığıdır. Bu denklem P(X|Z) sonraki olasılık, P(X) önceki olasılık ve P(Z|X) olabilirlik olmak üzere $P(X|Z) \sim P(Z|X)P(X)$ Bayes kuralı kullanılarak şu şekilde yazılabilir:

$$\widehat{X} = \underset{X}{\arg\max} P(Z \mid X)P(X)$$
(3.10)

Burada P(Z|X) olabilirliği, hesaplanan kaçış doğrultularının birbirlerine dikliğini ölçen *f* fonksiyonu kullanılarak hesaplanır:

$$f = \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=i+1}^{3} abs(\frac{\pi}{2} - \arccos(u_X^i \cdot u_X^j))$$
(3.11)

Burada u_x^i , X kalibrasyon takımı kullanılarak hesaplanan i'inci birim kaçış doğrultusudur.

Çözülmesi gereken enbüyütme problemi R⁶ uzayında geçmektedir ve bu problem parçacık süzgeci kullanılarak çözülebilir.

Parçacık süzgecinin ana fikri sonraki olasılık fonksiyonunu ağırlıklı rastgele parçacıklar kümesi olarak temsil etmek ve tahminleri bu parçacıklara ve ağırlıklara göre yapmaktır [33].

İlk olarak kalibrasyon parametrelerinin geçerli olduğu aralıklarda rastgele ve birörnek (üniform) N adet X^i parçacığı seçilir: $X^i \sim U(0,1)^6$. Sonrasında bu rastgele parçacıklar kalibrasyon parametrelerinin en küçük ve en büyük değerleri kullanılarak geçerli değerlerine gönderilir. Bu aşamada her birinin ağırlığı $\widetilde{w}(x^i) = 1/N$ 'dir. Daha sonra yapılan yapılan döngünün her adımında bu rastgele kalibrasyon değerleri kullanılarak kaçış doğrultuları ve bu doğrultuların birbirlerine dik olma durumları yani f hesaplanır. Bulunan f değerleri en büyük değerine göre normalleştirildikten sonra P(Z|X) = 1-f ile olabilirlik hesaplanır. Daha sonra parçacıkların bir önceki ağırlıkları ve olabilirlikleri kullanılarak parçacıkların yeni ağırlıkları hesaplanır. Daha sonra bu parçacıklar

$$w(x^{i}) = \frac{\widetilde{w}(x^{i})}{\sum_{i=1}^{N} \widetilde{w}(x^{i})}$$
(3.12)

denklemi kullanılarak normalleştirilir. Bu ağırlıklar bize P(X|Z) sonraki olasılığını verir.

Sıralı önem örneklemesi (SIS - Sequential Importance Sampling) olarak adlandırılan bu algoritmada zamanla ağırlıkların varyansı artmaktadır ve dolayısıyla çözümün kesinliği azalmaktadır [33]. Bunun için

$$N_{etk} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N} (w(x^{i}))^{2}}$$
(3.13)

etkin örnekleme boyutu geliştirilmiştir. Eğer normalleştirilmiş ağırlıklar $w(x^i) = 1/N$ şeklinde birörnek (üniform) dağılmışsa $N_{etk} = N$ olacaktır. Diğer taraftan $i \neq j$ olmak üzere $w(x^j) = 1$ ve $w(x^i) = 0$ ise $N_{etk} = 1$ olacaktır. Yani etkin örnekleme boyutu $1 \le N_{etk} \le N$ aralığındadır. N_{etk} 'in küçük olması durumu problem teşkil eder ve çözüm olarak yeniden örnekleme (resampling) yapılması gerekir. Eğer N_{etk} belli bir eşik değerinin $(N_{eşik})$ altına düşerse, az önem ağırlığına sahip örnekler elenir ve çok önem ağırlığına sahip örnekler çoğaltılır. Bunun için ilk olarak birikimli olasılık dağılım fonksiyonu hesaplanır:

$$g(i) = \sum_{k=1}^{i} w(x^k)$$
(3.14)

Daha sonra $U(0,N^{-1})$ 'den rastgele bir değer seçilir ve *N* adımlı bir döngüde her çevrim N^{-1} birim birikimli olasılık dağılım fonksiyonu boyunca ilerlenir. Eğer bir parçacığın ağırlığı yani seçilme şansı büyükse o parçacık seçilerek çoğalır, eğer aksine azsa bu sefer atlanır ve elenir. Şekil 3.8'de bir parçacık süzgeci çevrimi görülmektedir.



Şekil 3.8 : Bir parçacık süzgeci çevrimi.

Son olarak parçacıkların ağırlıklarının dağılımına göre kalibrasyon parametreleri tayin edilir.

Bu süzgeç algoritmasında parçacıkların hareketsizliğinden dolayı örnek yoksulluğu vardır ancak kaçış doğrultularının bulunması ve pozun tahmini için yeterli sonuçlar vermektedir.

Bu tez çalışmasında düşey ve yatay imge merkezlerinin bilinmesinden dolayı uzay R^4 'e düşürülmüş ve bu uzayda rastgele 5000 nokta kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyonda Çizelge 3.2'deki sonuçlar elde edilmiştir.

H_c matrisi	$\begin{bmatrix} 165.76\\0\\0 \end{bmatrix}$	2.46 187.47 0	333.39 269.29 1.00
Ayna tipi (ζ)		0.81	

Çizelge 3.2 : Kalibrasyon sonuçları.

Parçacıklar [32] yayınında olduğu gibi Metropolis-Hastings veya benzeri bir algoritma kullanılarak hareketlendirilirse uzay daha verimli şekilde araştırılarak daha global ve daha doğru sonuçlar elde edilebilir.

3.6 Pozun Tahmini

Pozun tahmininde izlenen yöntem [20]'de açıklanan yöntemdir. Buna göre, pozun kestirimi için ilk olarak katadioptrik imgedeki kaçış noktaları yani paralel çizgilerin kesişme noktaları çıkartılır. Daha sonra ise ardışık imgeler üzerinde sonsuz homografi kullanılarak poz bilgisine ulaşılır. [34]'ye göre sonsuzdaki noktalar yani sonsuz homografi, kamera hareketinin sadece dönme kısmına bağlıdır ve ötelemesinden bağımsızdır. Bu şekilde İHA'nın dönme hareketi ötelemesinden bağımsız olarak ele alınabilir. Bu da kontrol uygulaması açısından kolaylık sağlar.

Katadioptrik sistemlerin sahip olduğu geniş görüş açısı da, diğer bir taraftan, daha fazla sayıda çizgi görülmesine, dolayısıyla daha kolay bir şekilde paralel çizgilerin elde edilmesinde olanak sağlar. Ayrıca kaçış noktalarının görüntü içinde kalmasından dolayı çok daha dayanıklı sonuçlar elde edilebilir. Son olarak, bir kaçış doğrultusu uzun süre takip edilebilir ve bu da İHA'nın mutlak dönmesinin hata birikmeden hesaplanmasına izin verir.

3.6.1 Çizgilerin bulunması

3B uzaydaki bir çizgi ayna geometrisini temsil eden eşdeğer küre üzerine büyük bir çember olarak izdüşer (Şekil 3.9). Dolayısıyla imge üzerindeki bir ayrıtın küre üzerine izdüşümü büyük çember veya büyük çember parçası oluşturuyorsa o ayrıtın

3B uzayda bir çizgi olduğu ifade edilebilir. Kullanılan algoritma da bu esasa dayanmaktadır.



Şekil 3.9 : 3B çizginin eşdeğer küre vasıtasıyla imge üzerine izdüşümü.

Çizgilerin tanımlanması için ilk olarak imge üzerinde ayrıtlar tespit edilir (Şekil 3.10). (Öncesinde istenmeyen bölgeler maskeleme ile hesaptan çıkartılmıştır). Bu ayrıtlardan boyu belli bir değerin altında kalanlar elenir. Bir sonraki aşama bu ayrıtları yön değişimlerine göre bölmektir. Bunun için her ayrıttaki her piksel çifti arasındaki gradyan yönelim farkına bakılır. Eğer ardışık iki piksel belli bir değerden fazla yönelim farkı gösteriyorsa o ayrıt o noktadan bölünür. Burada amaç 3B uzaydaki çizgilerin imge üzerinde izdüşümü olabilecek ayrıtları elde edebilmektir.



Şekil 3.10 : (a) Alınan görüntü, (b) maske, (c) tespit edilen ayrıtlar, (ç) kısalar elendikten sonra, (d) ayrıtların bölünmesinden ve kısalar tekrar elendikten sonra, (e) gerçek çizgiler.

Bundan sonraki aşama hangi ayrıt zincirlerinin 3B çizgilerin görüntüsü olduğunu doğrulamaktır. Bunun için iki temel yöntem vardır. İlkinde her zincir küre üzerine geri izdüşürülür ve noktaların büyük bir çember oluşturması beklenir. İkincisinde 3B çizginin imge düzleminde oluşturduğu konik şeklin denklemini kullanılır. Çizginin sonsuzdaki düzlemde oluşturduğu şeklin (Şekil 3.9) denklemi aşağıdaki şekildedir:

$$C_{i} = \begin{bmatrix} n_{x}^{2}(1-\zeta^{2}) - n_{z}^{2}\zeta^{2} & n_{x}n_{y}(1-\zeta^{2}) & n_{x}n_{z} \\ n_{x}n_{y}(1-\zeta^{2}) & n_{y}^{2}(1-\zeta^{2}) - n_{z}^{2}\zeta^{2} & n_{y}n_{z} \\ n_{x}n_{z} & n_{y}n_{z} & n_{z}^{2} \end{bmatrix}$$
(3.15)

Burada $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ birim küre yüzeyinde oluşan büyük çemberin normal vektörüdür.

Daha sonra C_i imge düzlemine H_c matrisi kullanılarak izdüşürülür:

$$C_{c} = H_{c}^{-T} C_{c} H_{c}^{-1}$$
(3.16)

Tekrar çizgilerin doğrulanmasına dönersek, ilk önce zincir üzerinden iki nokta seçilir. Bu noktalar zincirin uçlarına yakın iki noktadır. Uç noktaların seçilmemesi bu noktaların gürültüye açık olmasındandır. Daha sonra bu noktalar küre üzerine geri izdüşürülür ve vektörel çarpımları alınarak büyük çemberi ve gerçek 3B çizgiyi içine alan düzlemin normalinin denklemi bulunur. Bu noktaların küre üzerindeki izdüşümleri X_s^1 ve X_s^N diye adlandırılırsa, elde edilen düzlemin normali şu şekildedir:

$$\vec{n} = (n_x, n_y, n_z) = \overline{O_1 X_s^1} \times \overline{O_1 X_s^N}$$
(3.17)

Burada O1 kürenin merkezidir.

Daha sonra ilk yöntem için ayrıt zincirindeki diğer noktalar da küre üzerine izdüşürülür ve bu noktaların aynı büyük çember üzerinde yer almaları beklenir:

$$\left|n_{x}x_{s}+n_{y}y_{s}+n_{z}z_{s}\right| \leq Mesafe_Eşiği$$
(3.18)

Eğer noktaların %90'ı bu toleransı sağlıyorsa söz konusu zincir bir 3B çizginin görüntüsü olarak kabul edilir.

İkinci yöntemde ise imge üzerindeki her pikselin o çizginin imge düzleminde oluşturduğu C_c şeklini sağlaması gerekir. Bunun için,

$$\left| x_{c}^{T} C_{c} x_{c} \right| \leq Mesafe _ Eşiği$$
(3.19)

olmalıdır. Yine benzer şekilde noktaların %90'ı bu toleransı sağlıyorsa söz konusu zincir bir 3B çizginin görüntüsü olarak kabul edilir.

3.6.2 Paralel çizgi demetlerinin bulunması

Paralel çizgi demetleri küre üzerinde karşılıklı iki noktada kesişir (Şekil 3.11). Bu iki nokta \vec{u} birim vektörü ile ifade edilen kaçış doğrultusunu tanımlar. Eğer üçten fazla çizgi aynı kaçış doğrultusuna sahipse bu çizgiler paralel kabul edilir.



Şekil 3.11 : Üç paralel çizginin küre üzerine izdüşümü ve kaçış doğrultusu.

 $\vec{n_1}$ ve $\vec{n_2}$ iki büyük çemberin normal vektörleri olsun. Bunların kesişimleri

$$\vec{u} = \vec{n_1} \times \vec{n_2} \tag{3.20}$$

kaçış doğrultusunu verir. Diğer bir çizginin bu iki çizgiye paralel olması için küre üzerinde aynı doğrultuda kaçması gerekir. Bunun için o çizginin oluşturduğu çember normali n_i 'nin

$$\left|\overline{n_{i}} \times \overline{u}\right| \leq Benzerlik _Eşiği$$
(3.21)

şartını sağlaması gerekir.

Bu işlem her iki normal kombinasyonu için yapılırsa en çok sayıda paralel çizginin oluşturduğu vektör yani bu çizgilerin kaçış noktası ve ilgili paralel çizgiler hesaplanabilir. Bu baskın doğrultuyu belirleyen çizgiler hesaptan çıkartılarak aynı işlem tekrarlanırsa ikinci ve üçüncü baskın doğrultular da bulunabilir. Şekil 3.12'de bu şekilde elde edilmiş iki demet paralel çizgi görülmektedir. Elde edilen görüntüde

kırmızı ve mavi çizgiler birbirlerine paralel baskın çizgiler (yatay ve düşey) olup, sarı ve mor çizgi kaçış doğrultularını göstermektedir.



Şekil 3.12 : Paralel çizgilerin belirlenmesi.

Diğer taraftan, paralel çizgiler hesaplanırken, eğer bu çizgilerin kaçış noktasından geçen başka bir çizgi varsa o da yanlış olarak bu paralel demetinin içinde yer alabilir.

3.6.3 Sonsuz homografi

Homografi, kamera hareketinin tahmininde ardışık imgelerde saptanan eşdüzlemsel öznitelik noktalarını kullanılan yaygın ve önemli bir araçtır [35]. Sonsuz homografinin farkı ise hareketi kaçış noktaları gibi sonsuzdaki noktaları kullanarak hesaplamasıdır [20]. Sonsuz homografinin özellikle katadioptrik imgelerde kullanımı çok yeni bir konudur.

Sonsuz homografiden bahsetmeden önce kullanılan yazımı belirtelim. [20] yayınında açıklandığı üzere bir dünya noktasının koordinatları ilk imge koordinat takımında $(x_w, y_w, z_w)^T$ olsun. Bu nokta küreye $(x_s, y_s, z_s)^T = \lambda(x_w, y_w, z_w)^T$ şeklinde izdüşer. Burada

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{x_w^2 + y_w^2 + z_w^2}}$$
(3.22)

dır. Aynı nokta ikinci imge koordinat sisteminde $(x_w, y_w, z_w)^T$ olup küreye $(x_s, y_s, z_s)^T = \lambda (x_w, y_w, z_w)^T$ şeklinde izdüşer.

Geleneksel perspektif kameralar için kullanılan homografi [36] yayınında tüm yönlü imgeler için şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\begin{pmatrix} x_{s}^{'} \\ y_{s}^{'} \\ z_{s}^{'} \end{pmatrix} = \frac{\lambda^{'}}{\lambda} H \begin{pmatrix} x_{s} \\ y_{s} \\ z_{s} \end{pmatrix}$$
(3.23)

Burada $H = R + T\tilde{n}^T$ olup *d* küre merkezinin düzleme olan uzaklığı olmak üzere $\tilde{n} = n/d$ düzlemin normalidir.

Sonsuz homografi ise sonsuzdaki düzleme uyarlanmış homografidir ve H_{∞} ile ifade edilir. Bir çift perspektif imgedeki sonsuzda bulunan X ve X' noktaları şu şekilde ilişkilendirilir:

$$X' = H_{\infty}X \tag{3.24}$$

Burada, $H_{\infty} = KRK^{-1}$ olarak ifade edilir.

Bu arada, katadioptrik imge düzlemindeki bir nokta eşdeğer küreye izdüşürüleceği zaman *K* matrisine benzer olarak kalibrasyon işlemi uygulanır. Bu yüzden [36] yayınına dayanarak küre üzerindeki iki sonsuz nokta için sonsuz homografi

$$\begin{pmatrix} x'_{s} \\ y'_{s} \\ z'_{s} \end{pmatrix} = H_{\infty} \begin{pmatrix} x_{s} \\ y_{s} \\ z_{s} \end{pmatrix}$$
(3.25)

olarak tanımlanır. Burada $H_{\infty} = R$ 'dir.

Benzer şekilde $\vec{u_i}$ ve $\vec{u_i}$ kaçış doğrultuları arasında da

$$\vec{u_i} = R\vec{u_i}$$
(3.26)

ilişkisi vardır.

Sonsuz homografi, dönme matrisinin serbestlik derecesiyle ilişkili olarak üç serbestlik derecesine sahiptir. Küre uzayındaki her kaçış noktası ($\vec{u_i}$ ve $\vec{u_i}$ olmak üzere) iki denklem sağladığından dolayı da denklem çözümü için iki sonsuz nokta eşleştirmesi yeterli olacaktır. Üçüncü bir kaçış doğrultusu ise diğer ikisinin vektörel çarpıyla elde edilebilir ve bu doğrultunun da hesaba katılmasıyla daha sağlıklı sonuçlar elde edilebilir. Dönme matrisinin hesaplanmasında Horn [37] tarafından geliştirilen kuaterniyon (quaternion) tabanlı kapalı çözüm yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem EK A.1'de kısaca açıklanmıştır. Dönmenin değişik ifadeleri arasındaki dönüşümler ise EK A.2'de bulunabilir.

3.6.4 Pozun tespiti

Paralel çizgi demetleri ve bunlara ait kaçış doğrultuları bulunduktan sonra poz tahminine geçilebilir. Üç birbirine dik kaçış doğrultusu hayali bir eksen takımı oluşturur. Her bir adımda bulunan bu eksen takımının bir önceki yönelimi ile arasındaki dönme miktarı kameranın ve dolayısıyla helikopterin aradan geçen o kısa zamandaki dönmesini verir. İki ardışık çerçevedeki eksen takımlarının eşleştirilmesi basit bir benzerlik ölçütü kullanılarak yapılabilir:

$$\arg\max_{k} \left| v_{i}^{t} \cdot v_{k}^{t+1} \right| \tag{3.27}$$

t+1 anındaki bir kaçış doğrultusu bir önceki andaki kendi yönelimine en yakın kaçış doğrultusu ile eşleşmelidir. Dolayısıyla bulunan kaçış doğrultularının skaler çarpımları alınır ve en büyük değerleri veren kaçış doğrultuları eşleştirilir. Eşleştirme yapıldıktan sonra bir önceki bölümde açıklandığı şekilde sonsuz homografi kullanılarak iki çerçeve arasındaki anlık dönme hesaplanabilir.

Anlık dönmeden mutlak dönmenin hesaplanabilmesi için Bazin ve diğerleri [20] tarafından iki yöntem geliştirilmiştir.

3.6.4.1 Yaygın yaklaşım

Çok basit olarak mutlak dönme, bağıl (anlık) dönmelerin kompozisyonu olarak hesaplanabilir. i çerçevesine ait R_i dönme matrisi

$$R_{i} = R_{0} \circ R_{1}^{'} \circ R_{1}^{'} \circ \dots \circ R_{i}^{'}$$
(3.28)

şeklinde R_0 ilk mutlak dönme matrisi ve R_k k çerçevesindeki dönme matrisi olmak üzere o ana kadarki her anlık dönme matrisi birbirlerine eklenerek hesaplanabilir.

Yapılan çalışmalarda ilk dönme matrisi olarak x, y, z yönlerindeki birim vektörlerin oluşturduğu eksen takımı yani birim matris alınmıştır. Bir sonraki çerçeve birim matris ile karşılaştırılır ve bulunan anlık dönme aynı zamanda mutlak dönmeyi verir. Daha sonraki her adımda bu matrisler bir önceki ile çarpılarak her adımda mutlak dönme hesaplanır.

Son çerçevedeki mutlak dönme matrisinden daha sonra EK A.2'de belirtilen dönüşüm kullanılarak yalpalama, yunuslama ve sapma açılarının değerleri elde edilebilir.

3.6.4.2 Dayanıklı yaklaşım

Daha dayanıklı olan ikinci yöntemde ise uzak çerçeveler arasındaki kaçış noktaları eşleştirilerek doğrudan poz tahmini gerçekleştirilir.

Açıkçası, her bir dönme matrisinde kaçış noktalarının hesaplanmasındaki şaşmadan dolayı küçük bir hata olacaktır. Bu hatalar zaman içinde birikerek daha büyük hatalara yol açacaktır. Ancak katadioptrik sistemlerin geniş görüş açısı sayesinde kaçış noktaları uzun süreler boyunca takip edilebilir çünkü o anki çerçevede bulunan kaçış noktası ilk çerçevede de mevcuttur. Bunun için kolay bir iş olmayan iki uzak çerçevede eşleme yapmak yerine yaygın yaklaşımla mutlak dönme matrisi bulunduktan sonra güncel çerçevedeki kaçış noktasının ilk çerçevedeki konumu bulunur:

$$u_k^{t=0} = R_i^{-1} u_k^{t=i}$$
(3.29)

ve gerçek değeri ile arasındaki hata yine kuaterniyonlar kullanılarak hesaplanır. Yapılan çalışmalarda ilk değer birim matris olduğu için bulunan kaçış doğrultuları x,y,z yönlerindeki birim vektörlerle karşılaştırılır.

Daha sonra bu hata mevcut mutlak dönme matrisine eklenerek hatasız bir poz tahmini elde edilir:

$$R_i = R_i \circ R_{hata} \tag{3.30}$$

Bu büyük bir getiri sağlar çünkü bağıl dönme matrislerinin kompozisyonu sırasında biriken hata giderilmiş olur.

4. KONTROLCÜ TASARIMI

Bu bölümde quadrotor modelinin ve katadioptrik yüm yönlü kamera ile tahmin edilen poz verilerinin kullanıldığı bir kontrolcü tasarlanması amaçlanmıştır. Amaç helikopterin stabil hale getirilmesi veya istenen yalpalama, yunuslama ve sapma açılarına yönelmesidir.

4.1 Oransal – Türevsel (PD) Kontrol

Quadrotorun kontrolü sistemin girdileri olan U_1, U_2, U_3, U_4 kontrol sinyalleri kullanılarak yapılır. U_1 sinyali ile rotorlarda oluşan toplam kuvveti temsil ettiği için z yönündeki hareketi, U_2 sinyali ile yanal rotor hızlarını arasındaki farkı temsil ettiğinden yalpalama açısını, benzer şekilde U_3 sinyali ile yunuslama açısını ve son olarak U_4 sinyali ile de sapma açısını kontrol edebiliriz.

3. bölümde açıklanan yöntemler quadrotorun öteleme hareketinden bağımsızdır. Dolayısıyla öteleme hareketi katadioptrik imgelerdeki kaçış noktaları kullanılarak kontrol edilemez. Yapılan çalışmalarda da sadece açısal konum kontrol edilmeye çalışılmıştır.

Quadrotorun açısal konumunu kontrol etmek için kullanılan kontrolcüler oransaltürevsel (PD) kontrolcüdür.

Quadrotorun istenen yalpalama açısını elde edilmesi için kullanılan kontrolcü şu şekildedir:

$$U_{2} = K_{p\phi}(\phi_{d} - \phi) + K_{d\phi}(\phi_{d} - \phi)$$
(4.1)

Benzer şekilde yunuslama açısı için

$$U_3 = K_{p\theta}(\theta_d - \theta) + K_{d\theta}(\dot{\theta}_d - \dot{\theta})$$
(4.2)

ve sapma açısı için

$$U_{4} = K_{p\psi}(\psi_{d} - \psi) + K_{d\psi}(\dot{\psi}_{d} - \dot{\psi})$$
(4.3)

şeklindedir.

4.2 Kalman Süzgeci

Kalman süzgeci, gürültülü ölçümler altında bir sistemin durumunu tahmin eden etkili bir yöntemdir. Pozun tahmini için kullanılan algoritmanın iş yükünün fazla olmasından dolayı poz tahmini gerçek zamanlı bir uygulama için yavaş kalmaktadır (Yapılan deneylerde ortalama saniyede 3 çerçeve hız elde edilmiştir). Bu aşamada iki ölçüm arasında İHA'nın pozunun ve hızının Kalman süzgeci kullanılarak tahmin edilebileceği düşünülmüştür.

Kalman süzgeci modeline göre k anındaki sistemin k-1 anına göre durum geçiş modeli ve o anki ölçüm modeli şu şekilde yazılabilir [38]:

$$x_{k} = f(x_{k-1}, u_{k}) + w_{k}$$

$$z_{k} = h(x_{k}) + v_{k}$$
(4.4)

Burada w_k ve v_k sıfır ortalama değere ve sırasıyla Q_k ve R_k ortak değişintiye (kovaryans) sahip normal dağılımlı gürültülerdir.

Ölçüm olmadığı anlarda Kalman süzgeci sistemin durumunu şu şekilde tahmin eder:

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_{k-1} u_{k-1}$$

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_{k-1}$$
(4.5)

Burada $\hat{x}_{k|k-1}$ ön görülen durum ve $P_{k|k-1}$ hata ortak değişintisi olup tahminin kesinliğinin bir ölçütüdür. F_k bir önceki x_{k-1} durum modeline uygulanan durum değişim modeli ve B_{k-1} ise u_{k-1} kontrol vektörüne uygulanan kontrol-giriş modelidir.

Bu model İHA'nın (2.6)'da verilen dinamik denklemlerine göre cayroskobik etki ihmal edilerek ve o anki tahmine göre doğrusallaştırılarak düzenlenirse,

$$\begin{bmatrix} \phi_{k|k-1} \\ \dot{\phi}_{k|k-1} \\ \dot{\phi}_{k|k-1} \\ \dot{\psi}_{k|k-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & \dot{\psi}(\frac{I_{yy}-I_{zz}}{I_{xx}}) \frac{\Delta t^{2}}{2} & 0 & \dot{\theta}(\frac{I_{yy}-I_{zz}}{I_{xx}}) \frac{\Delta t^{2}}{2} \\ 0 & 1 & 0 & \dot{\psi}(\frac{I_{yy}-I_{zz}}{I_{xx}}) \Delta t & 0 & \dot{\theta}(\frac{I_{yy}-I_{zz}}{I_{xx}}) \Delta t \\ 0 & \dot{\psi}(\frac{I_{zz}-I_{xx}}{I_{yy}}) \frac{\Delta t^{2}}{2} & 1 & \Delta t & 0 & \dot{\phi}(\frac{I_{zz}-I_{xx}}{I_{yy}}) \frac{\Delta t^{2}}{2} \\ 0 & \dot{\psi}(\frac{I_{zz}-I_{xx}}{I_{yy}}) \frac{\Delta t^{2}}{2} & 1 & \Delta t & 0 & \dot{\phi}(\frac{I_{zz}-I_{xx}}{I_{yy}}) \frac{\Delta t^{2}}{2} \\ 0 & \dot{\psi}(\frac{I_{zz}-I_{xy}}{I_{zz}}) \frac{\Delta t^{2}}{2} & 0 & \dot{\phi}(\frac{I_{xx}-I_{yy}}{I_{zz}}) \frac{\Delta t^{2}}{2} & 1 & \Delta t \\ 0 & \dot{\theta}(\frac{I_{xx}-I_{yy}}{I_{zz}}) \frac{\Delta t^{2}}{2} & 0 & \dot{\phi}(\frac{I_{xx}-I_{yy}}{I_{zz}}) \frac{\Delta t^{2}}{2} & 1 & \Delta t \\ 0 & \dot{\theta}(\frac{I_{xx}-I_{yy}}{I_{zz}}) \frac{\Delta t^{2}}{2} & 0 & \dot{\phi}(\frac{I_{xx}-I_{yy}}{I_{zz}}) \frac{\Delta t^{2}}{2} & 1 & \Delta t \\ 0 & \dot{\theta}(\frac{I_{xx}-I_{yy}}{I_{zz}}) \Delta t & 0 & \dot{\phi}(\frac{I_{xx}-I_{yy}}{I_{zz}}) \frac{\Delta t^{2}}{2} & 1 & \Delta t \\ 0 & \dot{\theta}(\frac{I_{xx}-I_{yy}}{I_{zz}}) \Delta t & 0 & \dot{\theta}(\frac{I_{xx}-I_{yy}}{I_{zz}}) \frac{\Delta t^{2}}{2} & 1 & \Delta t \\ 0 & \dot{\theta}(\frac{I_{xx}-I_{yy}}{I_{zz}}) \frac{\Delta t^{2}}{2} & 0 & \dot{\theta}(\frac{I_{xx}-I_{yy}}{I_{zz}}) \frac{\Delta t^{2}}{2} & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_{zz}} \frac{\Delta t^{2}}{2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_{zz}} \Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{2} \\ u_{3} \\ u_{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{2} \\ u_{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{2} \\ u_{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{2} \\ u_{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{2} \\ u_{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{2} \\ u_{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{2} \\ u_{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{2} \\ u_{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{2} \\ u$$

elde edilir. Modele göre her açı, bir önceki değeri, açısal hızı ve açısal ivmesi göz önüne alınarak tahmin edilmektedir. Buna ek olarak İHA'nın o anki hızı bir önceki hızı ve ivmesi kullanılarak tahmin edilmektedir. Burada Δt iki tahmin arasında geçen zamandır.

Katadioptrik kameradan gelen ölçümler ise şu şekilde modellenmiştir:

$$z_{k} = \begin{bmatrix} \phi_{k} \\ (\phi_{k} - \phi_{k-1}) / \Delta t \\ \theta_{k} \\ (\theta_{k} - \theta_{k-1}) / \Delta t \\ \psi_{k} \\ (\psi_{k} - \psi_{k-1}) / \Delta t \end{bmatrix}$$
(4.7)

Burada ise Δt iki kamera ölçümü arasında geçen zamandır.

Katadioptrik kameradan bir ölçüm geldiği zaman güncelleme evresine geçilir:

$$\tilde{y}_{k} = z_{k} - H_{k} \hat{x}_{k|k-1}
S_{k} = H_{k} P_{k|k-1} H_{k}^{T} + R_{k}
K_{k} = P_{k|k-1} H_{k}^{T} S_{k}^{-1}
\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_{k} \tilde{y}_{k}
P_{k|k} = (I - K_{k} H_{k}) P_{k|k-1}$$
(4.8)

Burada \tilde{y}_k gerçekleştirilen ölçüm ile öngörülen durum arasındaki farktır. Bu farkın ortak değişintisi S_k hesaplanarak en uygun Kalman katsayısı K_k bulunur ve durum bu katsayı ve fark kullanılarak güncellenir. Benzer şekilde yeni ölçümle birlikte hata ortak değişintisinin yeni değeri hesaplanır.

4.3 Çoklu İş Parçacığı Kullanımı

Gerçek zamanlı uygulamalarda hız çok önemlidir. Tahmin yönteminin hızının düşük olmasından dolayı Kalman süzgeci kullanılmıştır. Buna ilave olarak işlemler çoklu iş parçacığı (multi-threading) kullanılarak daha da hızlandırılmıştır. Yapılan düzenlemelere göre, kameradan ölçüm beklenirken aynı zamanda Kalman süzgeci ile durum tahmin edilmiş ve IMU'dan gelen veriler alınmıştır (Şekil 4.1).



Kontrol ve verilerin saklanması

Şekil 4.1 : Çoklu iş parçacığı akış şeması.

Bu şartlarda, ana parçacık diğer parçacıkların eşzamanlamasından (senkronizasyonundan), kalman filtresinden gelen verilere göre quadrotora kontrol sinyallerinin gönderilmesinden ve sonuçların dosyaya yazılmasından sorumludur.

İlk olarak IMU'nun sapma açısı kameranınkine göre ayarlanır. Bunun için helikopter kemaraya göre 0° sapma açısına getirilir ve IMU'nun açısı okunur. Daha sonra her çevrimde IMU'dan okunan sapma açısı, bu ilk değere ve tekillik (singularity) durumuna göre tekrar hesaplanır.

Daha sonra kamera başlatılır ve helikopter ilk başlangıç değerlerine getirilerek bu değerler kamera ile ölçülür. Kalman süzgecinde ilk açı değerleri olarak bu açılar kullanılır.

Kamera ile bir iş parçacığında ölçümler yapılırken, diğer iki iş parçacığında IMU ve Kalman süzgeci eş zamanlı olarak çalıştırılır. IMU verileri sadece karşılaştırma içindir. Kalman süzgeci her çevrimde eski değerleri kullanarak quadrotorun son durumunu öngörür ve kameradan ölçüm gelip gelmediğini kontrol eder. Şayet kameradan ölçüm alındıysa son durumu bu verilere göre günceller. İstenirse Kalman ve IMU iş parçacıklarına bekleme eklenebilir.

Kamera normal çevrimini tamamladığında diğer iki iş parçacığını beklenerek eşzamanlılık sağlanır.

Her çevrim sonunda kontrol sinyalleri quadrotora gönderilir. Açılar ve kontrol sinyalleri daha sonra analiz etmek için bir dosyaya yazılır.

5. BENZETİMLER

MATLAB ve SIMULINK programları kullanılarak hazırlanan benzetimlerde katadioptrik tüm yönlü kamera kullanılarak poz bulma algoritmalarının işlevselliği ve tasarlanan kontrolcü sınanmıştır.

5.1 Poz Tahmini Benzetimleri

Bu benzetimde quadrotor modeli kullanılmadan sadece kaçış noktalarından faydalanılarak poz tahmini yapılmaya çalışılmıştır. Bunun için sanal bir odada sanal yatay ve düşey çizgiler çizilmiştir. İHA için bu oda içinde istenen bir yörünge veya hareket parametrik olarak girilerek İHA'nın hareket etmesi sağlanmıştır (Şekil 5.1).

Katadioptrik sistem sadece eşdeğer küre olarak düşünülmüş ve odada bulunan çizgiler her çevrimde küre üzerine düşürülmüştür. Daha sonra 3. bölümde açıklandığı gibi izdüşürülen çizgilerin normalleri alınmış ve paralellik durumuna göre kaçış doğrultuları belirlenmiştir. Takip eden çevrimde de aynı işlemler tekrarlanmış ve yine kaçış doğrultuları bulunduktan ve eşleştirildikten sonra iki ardışık çerçevedeki doğrultular karşılaştırılmış ve kuaterniyonlar kullanılarak anlık dönme tahmin edilmiştir. Yaygın yaklaşımda bu anlık dönmeler her adımda birbirine eklenerek mutlak poz elde edilmiştir. Dayanıklı yaklaşımda ise mutlak dönme matrisi bulunduktan sonra çerçevelerde geriye dönerek güncel çerçevedeki kaçış noktalarının ilk çerçevedeki konumları bulunmuş ve gerçek değerleri ile aralarındaki dönme hataları hesaplanmıştır. Daha sonra bu hata mevcut mutlak dönme matrisine eklenerek yeni ve daha doğru dönme matrisi elde edilmiştir.



Şekil 5.1 : Sanal benzetim ortamı ve İHA'nın hareketi.

İlk benzetim sadece öteleme için yapılmıştır. Şekil 5.2'de İHA'nın (veya kürenin) konumunun X, Y, Z koordinatlarındaki değişimi ve Şekil 5.3'te bu öteleme hareketi esnasında kaçış doğrultularının durumu görülmektedir. Benzetimde öteleme hareketlerinin kaçış doğrultularında herhangi bir değişim yaratmadığı, yani kaçış doğrultularının ötelemeden bağımsız olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.2 : Sadece öteleme hareketi.



Şekil 5.3 : Ötelemede kaçış noktaları.

Dönme hareketi esnasında poz tahmini için İHA'nın hareket parametreleri değiştirilerek sinüzoidal bir yönelim tanımlanmış ve benzetim tekrarlanmıştır (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 : Dönme hareketi.

Bölüm 3.6.4'te açıklanan yaygın ve dayanıklı yaklaşım ile tekrarlanan benzetim sonucunda yaygın yaklaşım kullanıldığında yalpalama açısı için -0.19°/ 2.29°,

yunuslama açısı için 0.11°/1.75° ve sapma açısı için 0.41°/1.21° ortalama hata / standart sapma gözlenmiştir (Şekil 5.5). Elde edilen grafiklere göre gerçek değer ile tahmin edilen değer arasındaki hata aynı yönlü harekette zaman içinde artmaktadır. Bu hata her adımda kaçış noktalarının hesaplanmasından meydana gelen küçük hatanın birikmesinden ileri gelmektedir. Dayanıklı yaklaşım için herhangi bir hata oluşmamıştır.



Şekil 5.5 : Yaygın ve dayanıklı yaklaşımla poz tahmini.

Dayanıklı yaklaşımla gerçekleştirilen benzetimdeki kaçış noktalarının değişimi de Şekil 5.6'da görülmektedir.



Şekil 5.6 : Kaçış noktaları.

Daha sonra tek bir çerçevede en fazla ne kadarlık bir dönmenin tahmin edilebileceği bulunmak istenmiştir. Bunun için her çerçevede 0°'den belirlenen bir sınır açısına, takip eden çerçevede mevcut açıdan tekrar 0°'ye yönelmesi durumu incelenmiştir (Şekil 5.7). Denenen farklı sınır açıları sonucunda her iki yaklaşımın da tüm yönelimler için aynı anda 30°'ye kadar anlık dönüşleri tahmin edebildiği görülmüştür.



Şekil 5.7 : Sınır açıları.

Son olarak kaçış doğrultularının çıkarımında oluşabilecek hataların yani ölçüm hatalarının ne gibi sonuçlar doğurduğu gözlemlenmek istenmiştir. Bu amaçla, gürültülü ölçüm elde etmek için, her kaçış doğrultusuna [-0.1, 0.1] aralığında eşit dağılımlı sözde rastgele sayılar eklenmiştir (Şekil 5.8). Yaygın yaklaşımla gerçekleştirilen benzetimde yalpalama açısı için $3.49^{\circ}/3.74^{\circ}$, yunuslama açısı için $2.28^{\circ}/4.15^{\circ}$ ve sapma açısı için $0.43^{\circ}/3.24^{\circ}$ ortalama hata / standart sapma elde edilmiştir. Diğer taraftan dayanıklı yaklaşımla gerçekleştirilen benzetimde ise yalpalama açısı için $0.60^{\circ}/3.45^{\circ}$, yunuslama açısı için $-0.18^{\circ}/2.13^{\circ}$ ve sapma açısı için $-0.57^{\circ}/3.43^{\circ}$ ortalama hata / standart sapma elde edilmiştir.



Şekil 5.8 : Ölçüme gürültü eklenmiş benzetim sonucu.

Elde edilen sonuçlara göre dayanıklı yaklaşım, yaygın yaklaşıma göre gürültülü ölçümde çok daha düşük hata ortalaması meydana getirirken, standart sapmalarda çok az iyileştirme gözlenmiştir. Buna göre gerçek deneylerde dayanıklı yaklaşımın daha iyi sonuç vereceği beklenebilir.

5.2 Kontrolcü Benzetimleri

Daha sonra yapılan benzetimler helikopter modeli de eklenerek gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda, [39]'te verilmiş olan model değiştirilerek kullanılmıştır (Şekil 5.9). Quadrotor modelinin çıktıları tüm yönlü kameranın konumu ve oryantasyonu için katadioptrik sisteme girdi olarak alınmıştır. Daha sonra bu bilgilere göre eşdeğer küre üzerinde paralel çizgiler ve onların kaçış doğrultuları kullanılarak dayanıklı yaklaşımla poz değerleri tahmin edilmiştir. Bu değerler daha sonra kontrolcülere beslenmiştir. Kontrolcülerin çıkışlarına konulan sınırlayıcılar motorların hızını sınırlamaktadır. Bu şekilde motor hızları belli bir değeri geçememektedir. Burada amaç gerçekte olduğu gibi motorlara ve elde edilecek itme kuvvetine bir üst sınır vermektir. Kullanılan quadrotor modelinin SIMULINK diyagramı EK B.1'de bulunmaktadır, ancak katadioptrik poz tahmini kodları uzun olması nedeniyle konulmamıştır.



Şekil 5.9 : Katadioptrik kamera ile kontrolcü benzetim diyagramı.

Benzetimde kullanılan quadrotora ait veriler aynı model quadrotor üzerinde çalışan araştırmacıların [40] çalışmasından alınmıştır (Çizelge 5.1). Sadece yunuslama ataleti, sistem üzerindeki kameraların etkisi düşünülerek belirtilen değerden tahmini olarak fazla alınmıştır.

Parametre	Açıklama	Değer	Birim
g	Yerçekimi	9.81	m/s ²
m	Kütle	0.468	kg
1	Rotor Mesafesi	0.225	m
J _r	Rotor Ataleti	3.4×10^{-5}	kgm ²
I _{xx}	Yalpalama Ataleti	4.9×10^{-3}	kgm ²
I_{yy}	Yunuslama Ataleti	9.8x10 ⁻³	kgm ²
I _{zz}	Sapma Ataleti	8.8x10 ⁻³	kgm ²
b	İtme Sabiti	2.9x10 ⁻⁵	
d	Sürükleme Sabiti	1.1×10^{-6}	

Çizelge 5.1 : Quadrotor hava aracının model parametreleri.

Yapılan ilk benzetim, -10° yalpalama, 10° yunuslama ve 20° sapma ilk değerlerindeki quadrotorun kontrolcüler vasıtasıyla kendisini dengelemesidir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10 : Dengeleme benzetimi.

Elde edilen sonuçlara göre yalpalama açısı 0.12sn'de, yunuslama açısı 0.18sn'de ve sapma açısı 0.16sn'de kararlı hale gelmiştir. Hiçbir yönelimde salınım olmamıştır. Yükseklik kontrol edilmediği için U1 girişinin sabit tutulduğu benzetimde kullanılan kontrolcü katsayıları Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Kontrolcü katsayıları.

Kontrolcü	Oransal Katsayı	Türevsel Katsayı
U2 (Yalpalama)	400	18
U3 (Yunuslama)	800	40
U4 (Sapma)	400	15

Aynı benzetimde katadioptrik kamera ile yapılan tahminlerdeki hata Şekil 5.11'de verilmiştir. Buna göre ölçümde/tahminde herhangi bir hata yoktur.



Şekil 5.11 : Ölçüm hataları.

Bir sonraki benzetimde, sistemin gerçek dünya koşullarında çeşitli gürültülere maruz kalacağı düşünülerek, katadioptrik sisteme ölçüm hataları eklenmiş ve tüm sisteme olan etkisi incelenmiştir. Benzetimde katadioptrik ölçümlere -0.18° ortalama değer ve 3.85° standart sapmaya sahip gürültü eklenmiş ve bir önceki benzetimde olduğu gibi -10° yalpalama, 10° yunuslama ve 20° sapma ilk değerleriyle başlayan quadrotorun kontrolcüler vasıtasıyla kendisini dengelemesi beklenmiştir (Şekil 5.12).



Şekil 5.12 : Gürültü eklenmiş ölçüm hataları.

Bu hatalara karşı quadrotorun pozu Şekil 5.13'deki gibi değişmiştir. Gürültüsüz yapılan benzetime göre sistemin dengeye gelme süresinde belirgin bir değişme yoktur. Sistem gürültülü ölçümler altında ufak salınımlar yapmaktadır. Sonuçlara göre 0.2. saniyeden sonra yalpalama -0.38°/0.66°, yunuslama -0.27°/0.56° ve sapma - 0.13°/0.76° ortalama değer/sapma göstermiştir.


Şekil 5.13 : Gürültülü ölçüm altında kontrol sonuçları.

Bu benzetimde kullanılan kontrolcü katsayıları ise Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Kontrolcü	Oransal Katsayı	Türevsel Katsayı
U2 (Yalpalama)	150	18
U3 (Yunuslama)	350	45
U4 (Sapma)	150	15

Çizelge 5.3 : Kontrolcü katsayıları.

Benzetimler sonucunda diyebiliriz ki uygun PD katsayıları ile ölçümde hata olsa bile kontrolcü kararlı hale yeterli sürede gelebilmektedir.

6. DENEYLER

Katadioptrik imgelerdeki kaçış noktalarının kullanılarak poz tahmini benzetimlerde oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Dolayısıyla bir sonraki adım algoritmanın gerçek deney ortamında sınanmasıdır. Bu amaç için daha önce Erginer'in [39] kullandığı deney düzeneğine eklemeler yapılarak uygun deney platformu hazırlanmıştır.

Bu bölümde ilk olarak deney düzeneğinden bahsedildikten sonra yapılan deneyler ve elde edilen sonuçlar verilmiştir.

6.1 Deney Düzeneği

Deney için kullanılan quadrotorun (Şekil 2.1) deney düzeneğine bağlanmış hali Şekil 6.1'de görülmektedir. Düzenek, quadrotor'a 360° sapma ve yaklaşık ±20° yalpalama ve yunuslama hareketine müsaade etmektedir. Düşey yönde hareket de mümkündür ancak helikopterin üzerindeki kameralarla birlikte ağırlığından dolayı deney kapsamında sadece quadrotorun açılarının kontrolü incelenmiştir.



Şekil 6.1 : Deney düzeneği.

Deneyler için düzenlenen sistem yapısı Şekil 6.2'de görülmektedir.



Şekil 6.2 : Sistem yapısı.

Kullanılan ana bilgisayar dört çekirdekli Intel Core2Quad 2.40Ghz işlemciye ve 3 GB RAM'e sahiptir. İşletim sistemi Windows XP olup gerçek zamanlı kontrol için C++ ve sonuçların incelenmesi için MATLAB yazılımları kullanılmıştır.

Görüntü işleme kartı Matrox Morphis olup üzerinde iki ayrı resim sayısallaştırıcı barındırır. Bu, iki ayrı kameradan gelen verilerin birbirlerinden bağımsız olarak kart üzerinde işlenebilmesine olanak sağlar. Kütüphane olarak Matrox Görüntüleme Kütüphanesi 8.0 (Matrox Imaging Library, MIL) kullanılmıştır.

Quadrotor üzerine VStone VS-C450N-TK marka katadioptrik tüm yönlü kamera ile SONY EVI-D70P PTZ kamera yerleştirilmiştir. Katadioptrik kameranın üretici firması tarafından sağlanan teknik veriler EK C.1'de verilmiştir. Yapılan deneylerde 640x480 siyah beyaz görüntü kullanımı tercih edilmiştir. PTZ kamera daha sonraki çalışmalar için ön hazırlık niteliğindedir. PTZ kameranın hareketi ve optik kaydırması seri port üzerinden yapılmaktadır.

Quadrotora pilot sinyalleri kendi uzaktan kumandası olan FUTABA T4VF FM verici ile gönderilir (Şekil 6.3). Üzerindeki iki kol vasıtasıyla dört farklı kontrol sinyali üretilebilir. Bunlar quadrotor modeline uygun olarak motor dönüş hızlarını değiştirerek sırasıyla düşey yöndeki hareketi, yunuslamayı, yalpalamayı ve sapmayı kontrol eder. Verici, paralel port vasıtasıyla ana bilgisayara bağlanmıştır ve yazılan

kod vasıtasıyla komutlar ana bilgisayardan quadrotora gönderilebilmektedir. Quadrotor üzerindeki yerleşik devre bu sinyalleri işleyerek motorlara iletir.



Şekil 6.3 : Radyo verici.

Quadrotor üzerinde ayrıca açısal hızı algılamak için üç adet piezo cayroskop ve açık hava uçuşları için dört adet kızıl ötesi sensör vardır. Bu kızıl ötesi algılayıcılar gökyüzü ile yer arasındaki kızıl ötesi ışık farkından yararlanarak quadrotoru dengede tutmaya yardımcı olurlar.

Deneyler esnasında kaçış noktaları ile bulunan pozun karşılaştırılabilmesi için 3DM-GX1 model IMU eklenmiştir. IMU'dan alınan verilerin daha doğru olduğu varsayılarak algoritmanın performansı değerlendirilmiştir. IMU için üretici firma tarafından sağlanan teknik veriler EK-C.2'de görülebilir.

6.2 Yapılan Deneyler ve Sonuçları

İlk olarak algoritmanın quadrotorun açılarını tahmin edip etmediği gözlenmek istenmiştir. Bu amaçla, quadrotor el ile çeşitli yönlerde hareket ettirilirken, kamera ile ölçümler alınmış ve IMU verileri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.4). Elde edilen sonuçlara göre kamera ile yapılan ölçümlerin ortalama hatası ve standart sapmaları şu şekildedir: Yalpalama için 1.67° / 1.37°, yunuslama için -0.72° / 1.66° ve sapma için -2.55° / 4.61°. Buna göre kamera ile yapılan ölçümlerin küçük hatalar ile gerçek değerleri takip ettiği söylenebilir. Aradaki fark kaçış doğrultularının bulunması ve hesaplanmasındaki gürültüden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.4 : El ile hareket.

Daha sonra yalpalama, yunuslama ve sapma kontrolcüleri ayrı ayrı sınanmıştır.

Yapılan deneylerde kamera en iyilenmemiş kod ile saniyede yaklaşık 3 sonuç vermektedir. Diğer taraftan helikopterin durumu Kalman süzgeci tarafından iş parçacığı içindeki bekleme süresi değiştirilerek saniyade 40 çerçeveye kadar tahmin edebilmektedir. Deneylerde Kalman ve IMU iş parçacıklarına 50ms bekleme verilerek 12 çerçeve/sn hızda kullanılmışlardır.

Sadece sapma açısının değerlendirildiği deney sonucu Şekil 6.5'te verilmiştir. Buna göre Kalman süzgeci gerçek değeri takip edebilmekte ve kontrolcü ile helikopterin sapma açısı 0° denge değerine yaklaşmaktadır. İntegral etkinin olmaması ve kameradan gelen ölçümlerin gürültülü olması nedeniyle sonuçta kalıcı bir hata kalmaktadır. Ölçümün yapılamadığı 2. ve 3. saniyeler arasında Kalman süzgecinin tahmininin başarılı olduğu görülmektedir.



Şekil 6.5 : Sapma kontrolü.

18° yunuslama açısıyla başlayan deneyde (Şekil 6.6) ve -21° yalpalama açısıyla başlayan deneyde (Şekil 6.7) quadrotor yine istenen denge değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 6.6 : Yunuslama kontrolü.



Şekil 6.7 : Yalpalama kontrolü.

Gerçekleştirilen deneylerde görülmüştür ki helikopterin ani hareketlerinde kamera iş yükünün ağırlığından dolayı yeterli hızda bu hareketleri takip edememektedir. Geç gelen ölçümler Kalman süzgecinde de gecikmeye yok açmaktadır. Bu nedenle kontrolcü katsayıları, motor hızlarını uygun seviyede tutacak ve helikopterin denge konumuna gelmesini yavaşlatacak şekilde seçilmiştir. Her üç deneyde de 2 sn'ye kalmadan helikopter denge konumuna ulaşmıştır.

Daha sonra quadrotor herhangi bir konumdan denge haline getirilmek istenmiştir. Her üç kontrolcünün de kullanıldığı deneyde 2.5 sn'de helikopter dengeye kavuşmuştur (Şekil 6.8).



Şekil 6.8 : Quadrotor kontrolü.

Bir başka benzer deneyde quadrotor 25° sapma açısıyla hareketine başlamıştır (Şekil 6.9). Kalman süzgecinin ilk değeri yanlış atanmasına rağmen hemen olması gereken değeri almış ve sapma kontrolünü gerçekleştirmiştir. Oluşan salınımın nedeni Kalman süzgecinin kısa bir süre negatif değer olması ve ters yönde bir kontrol uygulamasıdır. Daha sonra el ile verilen yunuslama açısı yine kontrolcü tarafından dengelenmiştir. Bir sonraki yine el ile bozucu etki olarak verilen yalpalama açısı ve kontrolü sırasında meydana gelen küçük yunuslama ve sapma açıları kontrolcü tarafından başarılı şekilde 0° referans değerine ulaştırılmıştır.



Şekil 6.9 : Bozucu etkiler altında kontrol.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bugün İHA'lar askeri görevlerden film çekimlerine kadar pek çok operasyonda görev almaktadırlar. Quadrotor da basit yapısı ve ilginç çalışma prensibi ile pek çok araştırmacının ilgi noktasındadır.

Bunun yanında, görüntü sistemlerinin İHA'lar üzerinde kullanımı İHA'ya pek çok artı özellik sağlar. Kameralar, GPS veya IMU ile kontrolün mümkün olmadığı yerlerde algılayıcı elemanlar olarak kullanılabilir. Katadiptrik sistemler ise geniş görüş alanları ile çok daha dayanıklı sonuçlar almamıza olanak sağlar.

Bu tez çalışmasında, katadioptrik imgelerdeki kaçış noktaları kullanılarak quadrotor kontrol edilmeye çalışılmıştır. Her bir çerçevede bulunan kaçış doğrultularının bir önceki çerçeveye göre değişimi bize quadrotorun açısal konumu hakkında bilgi verir. Kaçış doğrultularındaki dönme miktarları her çerçevede toplanarak mutlak dönme hesaplanabilir. Bu sayede quadrotorun pozu tahmin edilmiş olur. Bu tahmin istenen değer ile karşılaştırılarak bir hata hesaplanabilir ve bu hata PD kontrolcü ile giderilebilir. Bu şekilde quadrotorun açısal konumu kontrol edilebilir. Kontrolcü olarak PD seçilmesinin nedeni en basit kontrol mantığına sahip olması ve modeli kararlı hale getirebilmesidir.

Benzetimler sonucunda görülmüştür ki dönme matrislerinin kompozisyonu ile elde edilen poz tahmininde zamanla hatalar birikmektedir ve bu hatalar uzun operasyonlarda açıların doğru tahmin edilememesine neden olmaktadır. Bunun yerine dayanıklı yaklaşım tercih edilmelidir. Bu yöntemde her çerçevede tekrar o anki kaçış doğrultularının ilk çerçevedeki değerleri hesaplanarak ilk değeri ile arasındaki hata hesaplanır. Bu hatanın bulunan mutlak dönme ile çarpılmasıyla hata sıfırlanır. Bu şekilde uzun operasyonlarda dahi hatasız tahmin sağlanabilir. Ölçümlere gürültü eklendiği durumda ise dayanıklı yaklaşım ortalamada çok daha az hata göstermiştir. Bu tahmin yöntemi daha sonra quadrotor modeli üzerine ölçüm elemanı olarak eklenmiştir. Hatasız ölçüm yapılan benzetimde belirlenen oransal ve türevsel katsayılarla quadrotor kısa zamanda dengesini sağlamıştır. Daha sonra yapılan benzetimde kontrolcünün ölçüm değerlerine eklenen hatalara dayanıklı olduğu gösterilmiştir.

Deneylerde katadioptrik poz bulma algoritmasının bir miktar gecikme ve küçük bir hata ile gerçek değerleri takip ettiği görülmüştür. Tek tek ve daha sonra üçü bir arada sınanan kontrolcüler quadrotoru denge konumlarına getirmiştir. Son deneyde uygulanan bozucu etkiler yine kontrolcü tarafından kontrol edilmiştir.

Yapılan çalışmalarda çizgi bulma algoritmasının işlem yükü ve dolayısıyla yavaşlığı göze çarpmaktadır (3 çerçeve/sn). Bu yavaşlık Kalman süzgeci ve çoklu iş parçacığı kullanılarak giderilmeye çalışılmıştır (40 çerçeve/sn'ye kadar). Diğer taraftan ortamda bulunun çizgilerin yetersiz kaldığı veya ışık şartlarının aldatıcı olduğu durumlarda katadioptrik sistem ölçüm veremeyebiliyor. Bu gibi durumların uzun süre tekrar etmesi halinde yanlış sonuçlar elde edilebiliyor. Ancak daha farklı (belki çizgilerin bulunmasından bağımsız) ve hızlı bir algoritma kullanılarak kaçış noktaları/doğrultuları hesaplanırsa gerçek zamanda daha güzel ve daha hızlı sonuçlar elde edilebilir. Bunlara ek olarak, kalibrasyonda Metropolis-Hastings gibi bir yöntemle parçacıklar hareketlendirilerek daha doğru kalibrasyon sonuçları ve dolayısıyla daha hatasız ölçümler elde edilebilir. Kontrolcü olarak daha farklı bir yaklaşım kullanılabilir.

İleriki çalışmalarda daha hızlı bir algoritma bulunabileceği gibi katadioptrik kamera ile derinlik hesaplaması yapılarak yükseklik kontrolü de gerçekleştirilebilir. Bunun yanında çevrede bulunan ilgi noktalarının takibi ile veya mevcut çizgilerin uzunluklarındaki değişme miktarı göz önüne alınarak öteleme kontrol edilebilir. Benzetim çalışması geliştirilerek belki sanal bir şehir içinde gezinti düzenlenebilir. Ayrıca sistem üzerine yerleştirilmiş PTZ kameranın da yardımıyla obje takibi veya katadioptrik sistem ile birlikte stereo kullanım üzerine araştırma yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Castillo, P., Lozano, R., Dzul A. E.,** 2005. Modelling and Control of Mini-Flying Machines, Springer-Verlag, London.
- [2] Altuğ E., Ostrowski J. P., Mahony R., 2002. Control of a Quadrotor Helicopter Using Visual Feedback. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Wahington, DC, s.72-77.
- [3] Altuğ E., 2003. Vision Based Control of Unmanned Aerial Vehicles with Applications to an Autonomous Four Rotor Helicopter, Quadrotor. Ph.D. Thesis, University of Pennsylvania.
- [4] Guenard N., Hamel T., Mahony R., 2007. A practical Visual Servo Control for a Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE International Conference* on Robotics and Automation, Roma, Italy, s.1342-1348.
- [5] Gava C. C., Vassallo R. F., Roberti F., Carelli C., Bastos-Filho T. F., 2007. Nonlinear Control Techniques and Omnidirectional Vision for Team Formation on Cooperative Robotics, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, s.2409-2414.
- [6] Sun Y., Cao Q., Chen W., 2004. An Object Tracking and Global Localization Method using Omnidirectional Vision System, *Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Hangzhou. P.R. China, s. 4730-4735.
- [7] Jamzad M., Hadjkhodabakhshi A. R., Mirrokni V. S., 2007. Object Detection and Localization Using Omnidirectional Vision in the RoboCup Environment, *Scientia Iranica, Vol.* 14, No. 6, s. 599-611.
- [8] Chen Z., Chen Y., Wang Y., 2007. Image-based Control of an Autonomous Robot with Omnidirectional Vision. *IEEE Internation* Symposium on Industrial Embedded Systems, Lisbon.
- [9] Winters N., Gaspar J., Lacey G., Santos-Victor J., 2000. Omni-directional Vision for Robot Navigation. *Proc.of IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, Hilton Head Island, SC.
- [10] **Fiala M., Basu A.,** 2004. Robot Navigation Using Panoramic Tracking, *Pattern Recognition 37* s. 2195-2215.

- [11] Sekimori D., Usui T., Masutani Y., Miyazaki F., 2002. High-Speed Obstacle Avoidance and Self Localization for Mobile Robots Based on Omni-directional Imaging of Floor Region, *LNAI 2377* s. 204-213
- [12] Persson M., Duckett T., Lilienthal A. J., 2008. Fusion of Aerial Images and Sensor Data From A Ground Vehicle for Improved Semantic Mapping. *Robotics and Automation Systems* 56 s. 483-492.
- [13] Yata T., Ohya A., Yuta S., 2000. Fusion of Omni-directional Sonar and Omni-directional Vision for Environment Recognition of Mobile Robots, *International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, USA, s. 3925-3930.
- [14] **Hrabar S., Sukhatme G. S.,** 2003. Omnidirectional Vision for an Autonomous Helicopter, *IEEE Conference on Robotics and Automation*.
- [15] Hrabar S., Sukhatme G. S., 2004. A Comparison of Two Camera Configurations for Optic-flow Based Navigation of a UAV Through Urban Canyons. Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems.
- [16] **Demonceaux C., Vasseur P., Pégard C.,** 2006. Robust Attitude Estimation with Catadioptric Vision, *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China.*
- [17] Demonceaux C., Vasseur P., Pégard C., 2006. Omnidirectional Vision on UAV for Attitude Computation, *IEEE International Conference* on Robotics and Automation.
- [18] Bazin J. C., Kweon I. S., Demonceaux C., Vasseur P., 2007.UAV Attitude Estimation by Combining Horizon-Based and Homography-Based Approaches for Catadioptric Image, 6th IFAC/EURON *Intelligent Autonomous Vehicles*, Toulouse, France.
- [19] **Demonceaux C., Vasseur P., Pégard C.,** 2007. UAV Attitude Computation by Omnidirectional Vision in Urban Environment, *IEEE International Conference on Robotics and Automation.*
- [20] Bazin J. C., Kweon I., Demonceaux C., Vasseur P., 2008. UAV Attitude Estimation by Vanishing Points in Catadioptric Images, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, s.2743-2749.
- [21] McKerrow P., 2004. Modeling the Draganflyer four-rotor helicopter, *Proc. of Int. C. on Robotics and Automation*, New Orleans, LA, USA. s. 3596-3601.

- [22] Bouabdallah S., Murrieri P., Siegwart R., 2004. Design and Control of n Indoor Micro Quadrotor, *Proc. of Int. C. on Robotics and Automation*, New Orleans, LA, USA. s. 4393-4398.
- [23] **Bouabdallah S., Siegwart R.,** 2007. Design and Control of a Miniature, *Advances In Unmanned Aerial Vehicles.* Springer, s. 171–210
- [24] Nayar S. K., 1997. Catadioptric Omnidirectional Camera, Proceedings of the 1997 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, s. 482-488.
- [25] Baker S., Nayar S. K., 1999. A Theory of Single-Viewpoint Catadioptric Image Formation. International Journal of Computer Vision 35(2), s. 175–196
- [26] Baştanlar Y., 2005. Parameter Extraction And Image Enhancement for Catadioptric Omnidirectional Cameras, *Master of Science Thesis*, METU.
- [27] **Mouaddib E.,** 2005. La Vision Omnidirectionelle, Journées Nationales de la Recherche en Robotique, JNRR'05, Guidel, France.
- [28] Yamazawa K., Yagi Y., Yachida M., 1993. Omnidirectional Imaging with Hyperboloidal Projection, Proc. of Int. C. On Intelligent Robots and Systems, Yokohama, Japan. s. 1029-1034.
- [29] Geyer C., Daniilidis K., 2001. Catadioptric Projective Geometry. International Journal of Computer Vision vol. 45 no. 3,s.223-243.
- [30] Barreto J.P., Araujo H., 2005. Geometric Properties of Central Catadioptric Line Images and Their Application in Calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 27, No.8. s.1327-1333.
- [31] < http://www.isr.uc.pt/~jpbar/CatPack/main.htm>, alındığı tarih 10.04.2009
- [32] Bazin J. C., Kweon I., Demonceaux C., Vasseur P., 2008. Automatic Calibration of Catadioptric Cameras In Urban Environment. *IEEE/RSJ Int. C. On Intelligent Robots and Systems*, Nice, France, s.3108-3114.
- [33] **Ristic B., Arulampalam S., Gordon N.,** 2004. Beyond the Kalman Filter. Artech House, London.
- [34] Rives P., Azinheira J. R., 2004. Linear Structures Following by an Airship using Vanishing Point and Horizon Line in a Visual Servoing Scheme, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, LA, USA. s. 255-260.

- [35] Hartley R. I., Zisserman A., 2004. Multiple View Geometry in Computer Vision, 2nd ed. Cambridge University Press, ISBN: 0521540518
- [36] Mei C., Benhimane S., Malis E., Rives P., 2006. Homography-based tracking for central catadioptric cameras, *Proc. of Int. C. On Intelligent Robots and Systems.*
- [37] Horn B., 1987. Closed-Form Solution of Absolute Orientation Using Unit Quaternions, *Journal of Optical Society of America. A, vol 4. no.4*, s.629-642.
- [38] **Orderud F.,** 2005: Comparison of Kalman Filter Estimation Approaches for State Space Models with Nonlinear Measurements, Proc. of Scandinavian Conference on Simulation and Modeling.
- [39] **Erginer B.,** 2007. Quadrotor VTOL Aracının Modellenmesi ve Kontrolü. İTÜ Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [40] Tayebi A., McGilvray S., 2006. Attitude Stabilization of a VTOL Quadrotor Aircraft, IEEE Transactions on Control Systems Technology Vol. 14 No.3 s.562-571.
- [41] **Dam E. B., Koch M., Lillholm M.,** 1998. Quaternions, Interpolation and Animation. Technical report DIKU-TR-98/5, Copenhagen, Denmark.

EKLER

EK A.1: Birim Kuaterniyonlar Kullanılarak Dönmenin Kapalı Çözümü

Horn [37] geliştirdiği metod, mutlak yönelimin bulunmasında verilen nokta ölçümlerine göre iki koordinat sistemi arasındaki en iyi dönüşümü verir. Kullanılan algoritmada herhangi bir döngüye gerek olmadığı gibi iyi bir ilk başlangıç değerine de ihtiyaç duyulmamaktadır. Pozitif determinantlı ortonormal matrislerin kullanımı orthonormalliğin sağlanması açısından ve yer yer karşılaşılan tekillikten (singularity) dolayı uygun bir çözüm değildir. Bunun aksine kuaterniyonlar dört boyutlu bir sistem olduğu için üç boyutlu uzayda daha etkindir ve aynı zamanda birim vektör olma şartı ortonormalliğe göre çok daha kolay sağlanabilir.

Bir kuaterniyon bir skaler ve bir sıradan vektörden oluşan dört elemanlı bir vektör olarak düşünülebilir:

$$q = q_0 + iq_x + jq_y + kq_z \tag{1}$$

Dolayısıyla sıradan bir vektör $r = (x, y, z)^T$ kuaterniyon olarak

$$r = 0 + ix + jy + kz \tag{2}$$

şeklinde ifade edilir.

0

r' = Rr gibi bir dönme kuaterniyon kullanılarak kompozit çarpımla gösterilir:

$$\stackrel{\circ}{r'} = \stackrel{\circ}{q} \stackrel{\circ}{r} \stackrel{\circ}{q}^* \tag{3}$$

Burada $\overset{\circ}{q}^* = q_0 - iq_x - jq_y - kq_z$ olup $\overset{\circ}{q}$ 'nın eşleniğidir.

Diğer bir taraftan aralarında dönüşüm yapılacak iki koordinat siteminin üç noktasının koordinatları sırasıyla $r_{l,1}, r_{l,2}, r_{l,3}$ ve $r_{r,1}, r_{r,2}, r_{r,3}$ olsun.

Döndürülen noktaların merkezini

$$\bar{r}_{l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} r_{l,i}, \quad \bar{r}_{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} r_{r,i}$$
(4)

şeklinde yazalım ve her *i* noktasını bağıl olarak ifade edelim:

$$r'_{l,i} = r_{l,i} - \bar{r}_l, \quad r'_{r,i} = r_{r,i} - \bar{r}_r$$
 (5)

Detayları [37] yayınında olmakla birlikte iki koordinat sistemi arasındaki en iyi dönmeyi veren çözüm

$$\sum_{i=1}^{n} r'_{r,i} \cdot R(r'_{l,i})$$
(6)

ifadesini en büyütmekten geçer. Bu da

$$\sum_{i=1}^{n} (\mathring{q} \, \mathring{r'}_{l,i} \, \mathring{q}^*) \cdot \mathring{r'}_{l,i}$$
(7)

ifadesini en büyük yapan q birim kuaterniyonunu bulmaktır. Bu ifade geliştirilirse

$$\sum_{i=1}^{n} (\overset{\circ}{q} \overset{\circ}{r'}_{l,i}) \cdot (\overset{\circ}{r'}_{r,i} \overset{\circ}{q})$$

$$\overset{\circ}{q^{T}} \sum_{i=1}^{n} N_{i} \overset{\circ}{q} = \overset{\circ}{q^{T}} N \overset{\circ}{q}$$

$$(9)$$

$$(8)$$

elde edilir. Şu halde amacımız N simetrik matrisini en büyütmektir:

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^{n} x'_{l,i} x'_{r,i} \quad \text{ve} \quad S_{xy} = \sum_{i=1}^{n} x'_{l,i} y'_{r,i} \quad \text{olmak üzere}$$

$$N = \begin{bmatrix} (S_{xx} + S_{yy} + S_{zz}) & S_{yz} - S_{zy} & S_{zx} - S_{xz} & S_{xy} - S_{yx} \\ S_{yz} - S_{zy} & (S_{xx} - S_{yy} - S_{zz}) & S_{xy} + S_{yx} & S_{zx} + S_{xz} \\ S_{zx} - S_{xz} & S_{xy} + S_{yx} & (-S_{xx} + S_{yy} - S_{zz}) & S_{yz} + S_{zy} \\ S_{xy} - S_{yx} & S_{yz} + S_{zy} & S_{yz} + S_{zy} & (-S_{xx} - S_{yy} + S_{zz}) \end{bmatrix}$$
(10)

Sonuç olarak (7) veya (9) ifadesini en büyük yapan birim kuaterniyon N matrisinin en pozitif özdeğerine ait özvektörüdür.

Özdeğerler,

$$\det(N - \lambda I) = 0$$

dördüncü derece denkleminden elde edilir.

En pozitif özdeğer (λ_m) bulunduktan sonra ilgili özvektör (e_m) şu denklemin sonucundan elde edilir:

$$[N - \lambda_m I] \overset{\circ}{e}_m = 0 \tag{12}$$

İki koordinat sistemi arasındaki en iyi dönmeyi temsil eden kuaterniyon daha sonra ZYX formuna göre dönme matrisine ve oradan da yalpalama, yunuslama ve sapma açılarına çevrilir.

EK A.2: Dönüşümler

Bu ekte dönmenin değişik tanımları arasındaki dönüşümler gösterilmiştir: Euler açıları, matrisler ve kuaterniyonlar.

A.2.1: Euler Açılarından Matris Formuna

x ekseni etrafinda α , *y* ekseni etrafinda β ve son olarak *z* ekseni etrafinda γ açısı kadar dönme matris formunda şu şekilde gösterilir [41]:

$$R(\alpha,\beta,\gamma) = R_z(\gamma)R_y(\beta)R_x(\alpha)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \gamma \sin \alpha \sin \beta - \cos \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma \sin \beta + \sin \alpha \sin \gamma & 0 \\ \cos \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -(\cos \gamma \sin \alpha) + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A.2.2: Matris Formundan Euler Açılarına

Yukarıda çıkartılan dönme matrisi tekrar Euler açılarını elde etmek için kullanılabilir [41]. Dönüşümde ters trigonometrik fonksiyonlar kullanılır. $\cos \beta$ 'nın pozitif yani $\beta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ olduğu farzedilerek, $\beta = \arcsin(-R_{31})$ $\cos \alpha = \frac{R_{33}}{\cos \beta}$

$$\sin \alpha = \frac{R_{32}}{\cos \beta}$$
$$\cos \gamma = \frac{R_{11}}{\cos \beta}$$
$$\sin \gamma = \frac{R_{21}}{\cos \beta}$$

bulunur. Ancak bu $\cos \beta \neq 0$ için geçerlidir. Ancak eğer $\beta = \pm \frac{\pi}{2}$ için $\cos \beta = 0$ 'dır ve *gimbal lock* söz konusudur. Bu durumda α ve γ belirlenemez. Bu durumda $\gamma = 0$ olarak alınırsa,

$$\beta = \arcsin(-R_{31}), \beta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$$
$$\cos \alpha = R_{22}$$
$$\sin \alpha = -R_{23}$$
$$\gamma = 0$$

bulunur.

A.2.3: Kuaterniyondan Matris Formuna

İki kuaterniyonun çarpımı bir 4x4 dik matris ve bir dört elemanlı bir vektörün çarpımı olarak yazılabilir [37]:

$$\overset{\circ}{r}\overset{\circ}{q} = \begin{bmatrix} r_{0} & -r_{x} & -r_{y} & -r_{z} \\ r_{x} & r_{0} & -r_{z} & r_{y} \\ r_{y} & r_{z} & r_{0} & r_{x} \\ r_{z} & -r_{y} & r_{x} & r_{0} \end{bmatrix} \overset{\circ}{q}$$

Kuaterniyon kullanılarak dönme,

$$\overset{\circ}{q}\overset{\circ}{r}\overset{\circ}{q}^* = (Q\overset{\circ}{r})\overset{\circ}{q}^* = \overline{Q}^T(Q\overset{\circ}{r}) = (\overline{Q}^TQ)\overset{\circ}{r}$$

olarak ifade edilebilir. Burada Q ve \overline{Q} , $\overset{\circ}{q}$ 'a ait 4x4 matrislerdir. Çarpım yapılırsa,

$$\overline{Q}^{T}Q = \begin{bmatrix} \stackrel{\circ}{} \stackrel{\circ}{} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (q_{0}^{2} + q_{x}^{2} - q_{y}^{2} - q_{z}^{2}) & 2(q_{x}q_{y} - q_{0}q_{z}) & 2(q_{x}q_{z} + q_{0}q_{y}) \\ 0 & 2(q_{y}q_{x} + q_{0}q_{z}) & (q_{0}^{2} - q_{x}^{2} + q_{y}^{2} - q_{z}^{2}) & 2(q_{y}q_{z} - q_{0}q_{x}) \\ 0 & 2(q_{z}q_{x} - q_{0}q_{y}) & 2(q_{z}q_{y} + q_{0}q_{x}) & (q_{0}^{2} - q_{x}^{2} - q_{y}^{2} + q_{z}^{2}) \end{bmatrix}$$

bulunur. q eğer birim kuaterniyonsa $q \cdot q = 1$ olur ve $\overline{Q}^T Q$ matrisinin sağ alt 3x3 alt matrisi ortonormal R matrisini verir.

A.2.4: Matris Formundan Kuaterniyona

 $\overline{Q}^{T}Q$ veya R matrisinin köşegeninin toplamı

$$1 + r_{11} + r_{22} + r_{33} = 4q_0^2$$

denklemini verir. Buradan

$$q_0 = \pm \frac{1}{2}\sqrt{1 + r_{11} + r_{22} + r_{33}}$$

olarak bulunur. Diğer köşegenlerin denklemleri yazılırsa,

$$r_{32} - r_{23} = 4q_0q_x$$

$$r_{13} - r_{31} = 4q_0q_y$$

$$r_{21} - r_{12} = 4q_0q_z$$

elde edilir. Bu denklemlerde q_0 yerine yazılarak kuaterniyonun diğer terimleri hesaplanır.

A.2.5: Kuaterniyondan Euler Açılarına

Bu çevrim ilk olarak dönme matrisi hesaplanarak, oradan da Euler açılarına geçilerek yapılır. Dolayısıyla β açısının getirdiği kısıtlama bu çevrimde de geçerlidir.





Şekil B.1 : Quadrotor Modeli

EK C.1: Katadioptrik Tüm Yönlü Kameranın Teknik Özellikleri

Sistem Modeli		(VStone) VS-C450N-TK (Standart Model)
Kamera Modeli		(Watec) WAT-250D (NTSC)
Eleman		1/3 inç renkli CCD
Toplam Piksel Sayısı		811(yatay) x 508(düşey)
Efektif Piksel Sayısı		768(yatay) x 494(düşey)
Birim Hücre Boyutu		6.35μm(yatay) x 7.4 μm(düşey)
Görüntüleme Sistemi		Çip üzerinde Sarı, Cam göbeği, Galibarda ve
		Y eşil tamamlayıcı renk mozalk filtreleri
Senkronizasyon Sistemi		Dahili
Tarama Sistemi		2:1 Geçişme
Video Çıkışı		Komprozit video, 1.0 V(p-p) 75Ω (dengesiz)
Çözünürlük		450TVL'den fazla (Merkezi)
En az Işıklandırma		0.1 lx. F1.2
S/N		50dB'den fazla (AGC=8dB, γ=1.0)
	Kapalı	1/60sn
AE Modu	FL	1/100sn
	EI	1/60-1/100000sn
Beyaz Dengesi		ATW, PWB

Cizelge C.I : Katadioptrik Tum Yonlu Kameranin Teknik Özellikle
--

AGC	Açık	8-36dB	
	Kapalı	8dB	
Gamma Karakteristikleri		γ=0.45 (Açık) / γ=1.0 (Kapalı)	
Mercek İrisi		Video/DC (EIAJ düzenlemesi, Otom.Seçim)	
Arka Işık Kompenzasyonu		Açık / Kapalı	
Güç Kaynağı		+12V ± %10 DA	
Güç Tüketimi		1.74W (145mA)	
Çalışma Sıcaklığı		-10 +40°C (yoğunlaşma hariç)	
Çalışma Nemi		%95 RH 'den az	
Saklama Sıcaklığı		-30 +70°C (yoğunlaşma hariç)	
Saklama Nemi		%95 RH 'den az	
Mercek Bağlantısı		CS-Bağlantı	
Kamera Boyutu		36(g) x 36(b) x 64(d) mm	
Kamera Ağırlığı		Yaklaşık 90g	
Toplam Boyut		59ф x 199 mm	
Görüş Alanı		15° yukarı, 60° aşağı	
Bağlantı		BNC, RCA	

EK C.2: IMU Teknik Verileri

Model	(MicroStrain) 3DM-GX1
Yönelim Erimi (yunuslama, yalpalama, sapma)	360° tüm eksenler (matris, kuaterniyon) ±90°,±180°,±180° (Euler açıları)
Sensör Erimi	Cayrolar: ±300°/sn FS İvmeölçer: ±5 g FS Manyetikölçer: ±1.2 Gauss FS
A/D Çözünürlük	16 bit
İvmeölçer Doğrusalsızlığı	0.2%
İvmeölçer Yanlılık Dengesi	0.010g
Cayro Doğrusalsızlığı	0.2%
Cayro Yanlılık Dengesi	0.7°/sn
Manyetikölçer Doğrusalsızlığı	0.4%
Manyetikölçer Yanlılık Dengesi	0.010 Gauss
Yönelim Çözünürlüğü	<0.1° en az
Kesinlik	0.20°
Doğruluk	±0.5° statik test şartlarında ±2.0° dinamik test şartlarında
Çıkış Modları	Matris, Kuaterniyon, Euler açıları, dokuz sensör bilgisi

Çizelge C.2 : IMU Teknik Verileri

Sayısal Çıkışlar	RS232, RS485 seri
Analog Çıkışlar	4 Kanal, 0-5V tam ölçek
Sayısal Çıkış Hızları	100Hz Matris, Kuaterniyon, Euler
	350Hz sadece dokuz ortogonal sensör
Seri Veri Hızı	19.2/38.4/115.2kbaud programlanabilir
Besleme Voltajı	5.2 VDC en az, 12VDC en fazla
Besleme Akımı	65mA
Bağlantılar	Tek anahtarlı LEMO, iki RS-485
Calisma Sicakliči	-40 +70°C (kapakla)
Çanşına Sıcaklığı	-40 +85°C (kapaksız)
Boyut	64 x 90 x 25 mm
Ağırlık	75g kapakla, 30g kapaksız
Darbe Sınırı	1000g (güç yokken), 500g (güç varken)

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Metin Tarhan

Doğum Yeri ve Tarihi: Eskişehir, 26.05.1982

Lisans Üniversite: İTÜ Makina Fakültesi