



Vision based automatic control and target tracking of a quadcopter

Gürsel Deniz¹ , Harun Çelik^{1,2*} 

¹Department of Aeronautical and Astronautical Engineering, Erciyes University, 38039, Kayseri, Türkiye

²Autonomous and Intelligent Systems Laboratory (AISL), Erciyes University, 38039, Kayseri, Türkiye

Highlights:

- Vision based autonomous quadcopter control was introduced.
- A scenario was created in which the motion to be made is calculated with the image processing and control computer.
- The developed model has been tested in the simulation environment and the performance of the quadcopter maneuvers has been demonstrated.

Keywords:

- Image processing
- Target tracking
- Automatic control
- Quadcopter

Article Info:

Research Article

Received: 04.11.2022

Accepted: 27.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1198822

Correspondence:

Author: Harun Çelik

e-mail:

haruncelik@erciyes.edu.tr

phone: +90 352 207 6666 /

41204

Graphical/Tabular Abstract

Vision based control structure of the quadcopter unmanned aerial vehicle is shown in Figure A. A vision-based controller has been designed for a camera mounted quadcopter. The desired image features and the obtained image features from the camera are compared. Using the differences in the compared image features, pitch, roll and yaw angles are calculated to control the quadcopter on the planned course. The calculated angular values for the translation and angular motion control are transferred to the closed loop control system. In this way, autonomous flight control based on imaging has been realized without the need of an external position measurement.

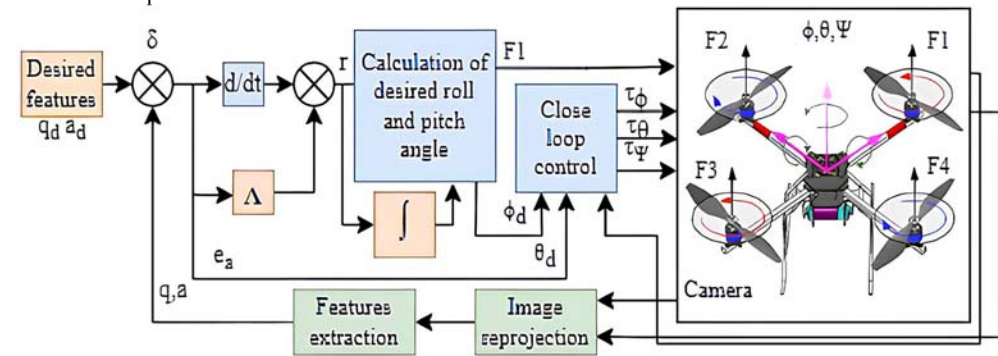


Figure A. The image based control structure of the quadcopter

Purpose: In this study, it is aimed to design vision based attitude and velocity control system, and target tracking algorithm which able the quadcopter to track a target autonomously.

Theory and Methods: Through the image based data that is taken from the camera which is mounted on the quadcopter, the target on the ground to be tracked is detected by using image processing methods. The captured images and the relative movement between the quadcopter and the target are modeled mathematically. In order to control the movement of quadcopter, attitude and velocity controllers are designed. Relative motion axes of target, camera and quadcopter are defined simultaneously. The translational and angular motions are controlled to track the trajectory of the target. The motion commands to be transferred to the quadcopter by the designed controller are obtained from the image features.

Results: To test the designed system, a simulation environment is created. Tracking the trajectory of target on the ground is achieved by using image processing techniques. The position of the quadcopter relative to the target motion is extracted from image features. All angular velocity, linear acceleration data and barometric data are calculated during the vision-based target tracking in order to estimate the reference control inputs. By analyzing the obtained data, the differences between the reference values and the actual values are revealed, and the tracking performances are measured. Due to the developed movement model, the quadcopter has the ability to instantly respond to any movement of the target.

Conclusion: In order to control the quadcopter autonomously, a system includes automatic controller and target tracking algorithm is designed based on the images taken from the camera mounted on the quadcopter. Both the relative motion of quadcopter and target and the flight environment are simulated. A scenario is created in which the tracking motion is calculated by the image processing and control computer. A motion model has been developed for the quadcopter to perform target detection and tracking. The developed model has been tested in the simulation environment, and the maneuvering performance of the quadcopter has been demonstrated. Owing to the vision-based data, the quadcopter is controlled autonomously even in the absence of external position measurement.



Dört rotorlu bir insansız hava aracının görüntü tabanlı otomatik kontrolü ve hedef takibi

Gürsel Deniz¹ , Harun Çelik^{1,2*} 

¹Uçak ve Uzay Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Erciyes Üniversitesi, 38039, Kayseri, Türkiye

²Otonom ve Zeki Sistemler Laboratuvarı, Erciyes Üniversitesi, 38039, Kayseri, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Görüntü tabanlı otonom İHA kontrolü
- Hedef takibi için hareket modelinin geliştirilmesi
- Benzetim ortamında İHA performans analizi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 04.11.2022

Kabul: 27.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1198822

Anahtar Kelimeler:

Görüntü tabanlı görsel servo,
hedef takibi,
otomatik kontrol,
İHA

ÖZ

Bu çalışmada dört rotorlu bir insansız hava aracının (DRİHA) hedef takibi için hareketi, görüntülerden elde edilen verilere dayanılarak otomatik kontrol edilmektedir. Görüntüler, DRİHA'nın ağırlık merkezine yerleştirilen monoküler kamera ile alınmıştır. Öneriler yöntemde hedefin tespiti ve takibi otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Tasarlanan otomatik kontrolcüler ilerleme ve açılma hareketi hedefin görüntüdeki hareketine göre kontrol etmektedir. Hareketin üzerindeki hata sinyallerinin etkilerini azaltmak için bir görüntü hata vektörü önerilmiştir. Görüntü düzlemindeki hedef hareketinin özniteliklerinden yararlanılarak yunuslama, yuvarlanma ve sapma açılarının kontrolü için farklı kontrolcüler tasarlanmıştır. Görüntü tabanlı görsel servo (IBVS) yaklaşımıyla tasarlanan bu kontrol sistemi, yine bu amaçla tasarlanan Gazebo simülasyon ortamında test edilmiştir. Simülasyon test sonuçları, bu çalışmayla yapılan eş zamanlı ve bütüncül tasarımların otomatik kontrol ve hedef takip performansı açısından etkinliğini göstermektedir. Bu çalışmada sunulan yöntemler küresel konumlandırma sistemlerinin kullanılmadığı ortamlarda da otonom navigasyon uygulamalarına olanak sağlamaktadır.

Vision based automatic control and target tracking of a quadcopter

H I G H L I G H T S

- Vision based autonomous UAV control
- Development of motion model for target tracking
- UAV performance analysis in simulation environment

Article Info

Research Article

Received: 04.11.2022

Accepted: 27.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1198822

Keywords:

Image based visual servo,
target tracking,
automatic control,
UAV

ABSTRACT

In this study, motion of a quadcopter (that is called DRIHA) to track a target is auto controlled based on the data acquired by images. The images are taken by the monocular camera mounted on the center of gravity of the DRIHA. The detected target is automatically tracked by proposed methods. Designed controllers control translational and rotational motion with respect to the motion occurred in images. An image error vector is proposed to reduce the effects of error signals on the motion. Controllers are designed for controlling the pitch, roll, and yaw angles using the features in the image plane. The model developed by the image-based visual servoing (IBVS) approach is tested in the Gazebo simulation environment. Simulation test results validate effectiveness of the proposed system that includes simultaneous and comprehensive designs in terms of automatic control and target tracking performance. The proposed methods enable autonomous navigation applications even in environments where global positioning systems are unavailable.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : gurseldeniz99@gmail.com, *haruncelik@erciyes.edu.tr /

Tel: +90 352 207 6666 / 41204

1. Giriş (Introduction)

Teknolojik araçların ve faaliyetlerin her geçen yıl gösterdiği gelişim havacılık ve uzay sektöründe de etkili olmuştur. Havacılık sektöründe son 30 yılında gerek askeri alanda gerekse sivil alanda kullanımları artan insansız hava araçları, yazılımsal ve donanımsal teknolojik gelişmelerle de birlikte hızlı bir şekilde yaygınlaşmıştır [1, 2]. Nitekim askeri alanda gözetleme, keşif, operasyonel faaliyetler; zirai alanda ilaçlama, sulama, mahsul tespiti; haritalama, inşaat, arama kurtarma, endüstri gibi alanlarda da ilgili sektörün ihtiyacına yönelik kullanım amacıyla tasarlanmış olmaları insansız hava araçlarının (İHA'ların) kullanım yelpazesini gün geçtikçe genişletmiştir.

İHA'ların birçok görevi başarıyla tamamlayabilmeleri açısından görüntünün alınması ve işlenmesi kritik öneme sahiptir. Görüntünün işlenmesiyle görüntüdeki bir nesnenin tespit edilmesi, nesnelerin tanımlanması ya da görüntü kalitesinin artırılması amaçlanabilmektedir [3]. Hareketli bir hedefi takip edebilmesi için DRİHA'nın ilerleme ve açılma hareketlerine karar verilmesinde de görüntü işleniminin kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır [4-6]. Konum tabanlı görsel servo yapısı ile karşılaşıldığında hem görüntü özellikleri hem de hedef geometri bilgisini içermesi bakımından görüntü tabanlı görsel servo (image-based visual servoing, IBVS) tercih edilen çalışmalar bulunmaktadır [7-9]. IBVS yaklaşımıyla insansız hava araçlarında hedef odaklı ilerleme ve açılma hareket kontrolünün gerçekleştirilmesinde nesnelere ait görüntü dinamikleri çıkarılması yönelim tahmini açısından önemlidir.

Görüntüleme özelliklerinden faydalanılarak farklı kontrol yöntemleriyle İHA kontrol sistemleri geliştirilmiştir. Bunlar arasında görüntü özelliklerden yararlanarak hava aracını otomatik hareket ettirmesi için doğrusal olmayan kontrolcü tasarımları da vardır [10]. Klasik görüntü tabanlı yöntemlerinin hareketli nesnede gerçekleşen değişimlere tepki vermede yetersiz kaldığı durumlarda görüntü özelliklerinin derinliği ve hedefin hareket hızı hakkında bilgi eksikliği açısından oluşan belirsizliklerle başa çıkmak için doğrusal olmayan görbüz kontrolcüler de kullanılmıştır [11]. Diğer taraftan görüş alanındaki kısıtlamalar nedeniyle görüntü özelliklerinde yaşanan kayıpların önüne geçebilmek için bulanık mantığa dayalı görsel servo yapısı verimliliği yüksek çözümler sunmaktadır [12, 13]. Muhakeme etme ve kümeleri ayırt edebilme özelliğine sahip bulanık mantık yapısı uyarlamalı kazanç uygulamalarında az veri seti kullanması ve yüksek performans kabiliyeti nedeniyle tercih edilmektedir. Monoküler kamera ile donatılmış İHA'larda yapay zekaya dayalı bir algoritma yapısı ile de hedeflerin konumu ve hareket yönü kontrol amacıyla tespit edilmiştir [14]. Hedef konum bilgisi ediniminin doğruluğunu artırmak için kullanılan karma yöntemler [15] hedef nesne üzerinde belirgin olan alanların yüksek skorlar ile tanımlanmasını ve nesnelerin ayırt edilebilirliğini arttırmıştır.

Nitekim pozisyon ölçümünde kullanılan sensörlerden kaynaklanan kontrol algoritmalarına bozucu girdilerinin etkilerini en aza indirmek ve hedefe ait öznitelikleri çıkartabilmek için görüntü momentlerinden yararlanılabilmektedir [16, 17]. Görüntü düzleminde öznitelik çıkarımlarıyla elde edilen veriler iç ve dış döngü kontrolcüler tarafından kullanılmaktadır [18, 19]. Hedef hareketine bağlı olarak istenen takip açıları dış döngü kontrolcüsü tarafından hesaplanırken, yönelim komutları iç döngü kontrolcüsü tarafından uygulanmaktadır. Hedef takip kontrol geometrisi içerisinde hedef konum noktasına, İHA ile hedef nokta arasında oluşan boylamsal ve yanıl konum farklarının hesaplanmasıyla ulaşılabilmektedir [20]. Görüntü tabanlı kontrol anlayışı aynı zamanda İHA'larda harici konum ölçer olmaksızın nesne tespit ve takip algoritmalarının geliştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır [21-24]. Görüntü tabanlı görsel servo yapısının kontrol mimarisi içerisinde kullanıldığı bu çalışmada da

hareketin kontrolü harici konum ölçer olmaksızın otomatik olarak yapılabilmektedir. Nasıl bir hareket gerçekleştireceği bilinmeyen hedefleri takip etmek için görüntüleme verileri kullanılmaktadır. Görüntü edinimi ve özellik çıkarımı, DRİHA ile aynı yunuslama ve yuvarlanma açılarıyla hareket eden monoküler kamera sayesinde elde edilmektedir. Önerilen yöntem kullanıcı tarafından belirlenen hedef nesne ile DRİHA arasındaki mesafeyi sabit tutarken aynı zamanda hedefin görüntü düzleminin merkezinde kalarak takip edilmesini sağlamaktadır. Görüntü dinamiklerine dayalı özellikler hedefe paralel sanal görüntüleme düzlemi oluşturulduktan sonra elde edilmektedir. Bozucu sinyallerinin etkilerini azaltmak için görüntü hata vektörü önerilmektedir. Görüntü düzlemindeki özniteliklerden yararlanılarak elde edilen referans yunuslama, yuvarlanma ve sapma açılarını gerçekleştirmesi için farklı PID kontrolcüler tasarlanmıştır.

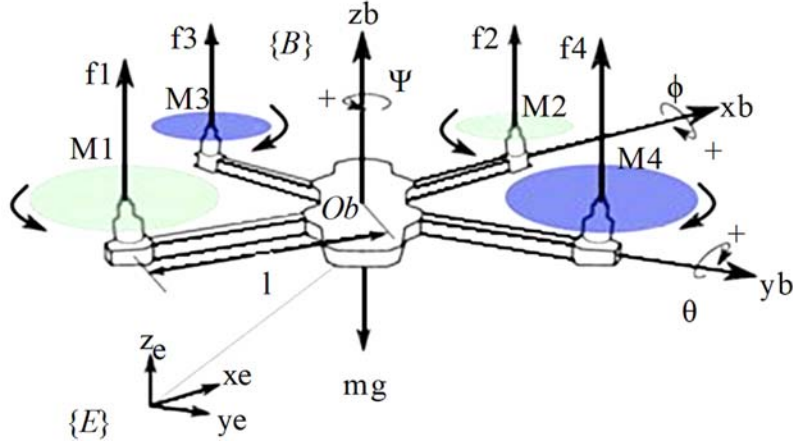
Bu çalışmada IBVS tabanlı kontrol çerçevesiyle hedefi tespit ve takip etmek için saf takip algoritması ve klasik görüntü işleme metodlarının sağladığı avantajlar birleştirilmekte, gerçekleştirilen eş zamanlı tasarım ve uygulamalarla hem kuramsal hem de kavramsal olarak bütünlüğün izlenebileceği kapsamlı ve sistematik bir çalışma ortaya konulmaktadır. IBVS yaklaşımı ile kontrol edilen sistem için geliştirilen hareket modeli SITL (Software in the Loop) simülasyonu kullanılarak Gazebo simülasyon ortamında test edilmiştir. Test sonuçlarında yönelim kontrolü, özellik çıkarımı ve takip performansı açısından önerilen çözümün geçerliliği ve etkinliği gösterilmiştir. Önerilen kontrol ve takip yapısı, küresel konumlandırma sistemlerinin mevcut olmadığı veya sınırlı olduğu ortamlarda da otonom navigasyon uygulamalarına olanak sağlamaktadır.

2. Hareketin Matematiksel Modeli (Mathematical Model of Motion)

Üç boyutlu hareketin matematiksel olarak modellenmesi için DRİHA'nın katı (rijit) bir cisim olduğu varsayımı yapılabilir. Altı serbestlik dereceli olarak x , y , z eksenleri etrafında yuvarlanma, sapma, yunuslama hareketleri gerçekleştiren DRİHA gövdesine etki eden kuvvet ve tork vektör bileşenleri bu kabuller doğrultusunda ortaya konulabilir. Bu değişkenler Şekil 1'deki gibi gösterilebilir.

Burada ϕ yuvarlanma açısını, θ yunuslama açısını ve Ψ sapma açısını ifade etmektedir. Her bir rotora ait kuvvet bileşenleri sırasıyla $F1$, $F2$, $F3$, $F4$ olarak tanımlanmıştır. Newton-Euler eşitlikleri temel alınarak DRİHA'nın kütle merkezine ait eksen referans bilgisi gövde eksen takımı olarak ve yeryüzü merkezine ait eksen referans bilgisi yer eksen takımı olarak ifade edilmiştir. DRİHA eksenleri, etki eden kuvvetler, Euler açıları ve merkez eksen tanımlamaları kullanılarak gerçekleştirilen matematiksel çözümler sonucunda üç eksene ait hava aracı hareket ivmeleri ve açılma ivme denklemleri elde edilebilir. Dört rotorlu bir insansız hava aracına ait hareket denklemlerinin çıkartılabilmesi için yer eksen takımı ve gövde eksen takımlarının tanımlanması gerekmektedir. Yer eksen takımı ($I = \{E_x, E_y, E_z\}$) ve gövde eksen takımı ($\mathcal{B} = \{E_x^b, E_y^b, E_z^b\}$) olarak tanımlanır. \mathcal{B} , DRİHA'nın merkez hattına bağlı ve durağan olduğu kabul edilen gövde çerçevesidir. Hava aracında bulunan fiziki kameranın merkez noktası ile sabit gövde çerçevesinin merkez noktasının çakışık olduğu kabul edilebilir. Görüntüleme odağı zemine dik olan kameranın hareket denklemleri aynı zamanda DRİHA'nın hareket denklemleri olarak tanımlanır. Vektör $\zeta = (x, y, z)$ yer eksen çerçevesi I 'da DRİHA'nın ağırlık merkezinin bulunduğu noktadır ve yönü $R = R_\phi R_\theta R_\Psi : \mathcal{B} \rightarrow I$ dönüş matrisi olarak ifade edilir. $R \in SO(3)$ ise rotasyon matrisi olarak adlandırılır. Euler açılarının türevi ile açılma hız (Ω) arasındaki ilişki [7]'de açıklanır. Burada $\eta = [\phi \ \theta \ \Psi]^T$ Euler açılarıdır ve $\Psi(\eta) = \phi^{-1}(\eta)$ ise $\phi(\eta)$ matrisi Eş. 1-Eş. 3'deki gibi ifade edilir.

$$\dot{\eta} = \Phi(\eta)\Omega \quad (1)$$



Şekil 1. DRİHA eksenleri, etki eden kuvvetler ve Euler açıları [25] (DRIHA axes, acting forces and Euler angles)

$$\Psi(\eta)\dot{\eta}=\Omega \quad (2)$$

$$\Phi(\eta)=\begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi\sec\theta & \cos\phi\sec\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

Simetrik matrisi $J \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ve m kütleli altı serbestlik dereceli bir cismin gövde düzlemleri ve ağırlık merkezi \mathcal{B} temel alınarak oluşturulan dinamiklere ait Newton-Euler denklemleri ise Eş. 4 şekilde yazılır.

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= RV \\ \dot{R} &= Rsk(\Omega) \\ \dot{V} &= -\Omega x V + F + F_d \\ J\dot{\Omega} &= -\Omega x J\Omega + \tau + \tau_d \end{aligned} \quad (4)$$

Bu eşitliklerde $F \in \mathbb{R}^3$ DRİHA gövdesine uygulanan kuvvetlerin toplamı ve $\Gamma \in \mathbb{R}^3$ ise bütün torkların toplamını ifade eden tork vektörüdür. Her iki vektörde \mathcal{B} eksen takımında kabul edilmiştir. Her $\bar{a} \in \mathbb{R}^3$ vektörüyle tanımlı çarpık simetrik matrisi $sk(\Omega)$ olarak tanımlanır. Her $b \in \mathbb{R}^3$ vektörü ise $sk(\bar{a})b = \bar{a} \times b$ olarak tanımlıdır. Burada x vektör olarak tanımlanmaktadır. DRİHA'ya etki eden bozucu kuvvet F_d ve bozucu moment τ_d değişkenleri ile ifade edilir. DRİHA'ya ait aktüatörler F_1 itki gücünü ve $\tau = [\tau_\phi \tau_\theta \tau_\psi]^T$ torkunu üretir.

$E_3 = e_3 = [0 \ 0 \ 1]^T$ yer eksen ve gövde eksen takımlarında gösterilmiş birim vektörlerdir. Eş. 5 bağıntısındaki giriş kuvveti ve x, y, z eksenlerindeki dönüşüm matrisleri kullanılarak gövde eksen takımının yer eksen takımına dönüşümü için rotasyon matrisi şu şekildedir (Eş. 5-Eş. 6).

$$F = -\frac{1}{m}F_1E_3 + gR^T e_3 \quad (5)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\Psi\cos\theta & \cos\Psi\sin\theta\sin\phi - \sin\Psi\cos\phi \\ \sin\Psi\cos\theta & \sin\Psi\sin\theta\sin\phi + \cos\Psi\cos\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi \\ \cos\Psi\sin\theta\cos\phi + \sin\Psi\sin\phi \\ \sin\Psi\sin\theta\cos\phi - \sin\phi\cos\Psi \\ \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (6)$$

Üç eksen de meydana gelen atalet momentleri ise Eş. 7'de ki gibi yazılır.

$$I = \begin{bmatrix} I_X & 0 & 0 \\ 0 & I_Y & 0 \\ 0 & 0 & I_Z \end{bmatrix} \quad (7)$$

DRİHA'da gövde eksen takımında meydana gelen tork (τb), zamana bağlı değişkenlik gösteren açısal momentumları temel alarak oluşur. DRİHA'nın kendi eksenini etrafındaki dönüşü sonucu oluşan tork τg 'dir. DRİHA ve yer eksen takımı arasındaki tork dengesi $\tau e = \tau g + \tau b$ olur (Eş. 8-Eş. 10).

$$\tau g = J \begin{pmatrix} \dot{\phi} & 0 \\ \dot{\theta} & x \ 0 \\ \dot{\psi} & 1 \end{pmatrix} (-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) \quad (8)$$

$$\tau b = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_X & 0 & 0 \\ 0 & I_Y & 0 \\ 0 & 0 & I_Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_X & 0 & 0 \\ 0 & I_Y & 0 \\ 0 & 0 & I_Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\tau e = J \begin{pmatrix} \dot{\phi} & 0 \\ \dot{\theta} & x \ 0 \\ \dot{\psi} & 1 \end{pmatrix} (-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) + \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_X & 0 & 0 \\ 0 & I_Y & 0 \\ 0 & 0 & I_Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Tork dengesini ifade eden denklemde $\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix}$ yalnız bırakılırsa DRİHA'ya ait açısal ivmeler Eş. 11-Eş. 13 gibi elde edilir.

$$\ddot{\phi} = \dot{\psi} \dot{\theta} \left(\frac{I_Y - I_Z}{I_X} \right) + \frac{J}{I_X} \dot{\theta} (-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) + \frac{1}{I_X} (b(\Omega_4^2 - \Omega_2^2)) \quad (11)$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\psi} \dot{\phi} \left(\frac{I_Z - I_X}{I_Y} \right) + \frac{J}{I_Y} \dot{\phi} (-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) + \frac{1}{I_Y} (b(\Omega_3^2 - \Omega_1^2)) \quad (12)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\theta} \dot{\phi} \left(\frac{I_X - I_Y}{I_Z} \right) + \frac{1}{I_Z} d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (13)$$

Giriş değişkenlerine bağlı hareket ivmeleri ve açısal ivmeler sadeleştirilirse DRİHA'ya ait hareket ivmeleri ve açısal ivmeler aşağıdaki gibi bulunabilir (Eş. 14- Eş. 16). DRİHA hareket ivmeleri;

$$\ddot{x} = (\sin\Psi\sin\phi + \cos\Psi\sin\theta\cos\phi) \frac{U_1}{m} \quad (14)$$

$$\ddot{y} = (-\cos\Psi\sin\phi + \sin\Psi\sin\theta\cos\phi) \frac{U_1}{m} \quad (15)$$

$$\ddot{z} = (-g + (\cos\theta\cos\phi) \frac{U_1}{m}) \quad (16)$$

DRİHA açısal ivme denklemleri (Eş. 17-Eş. 19);

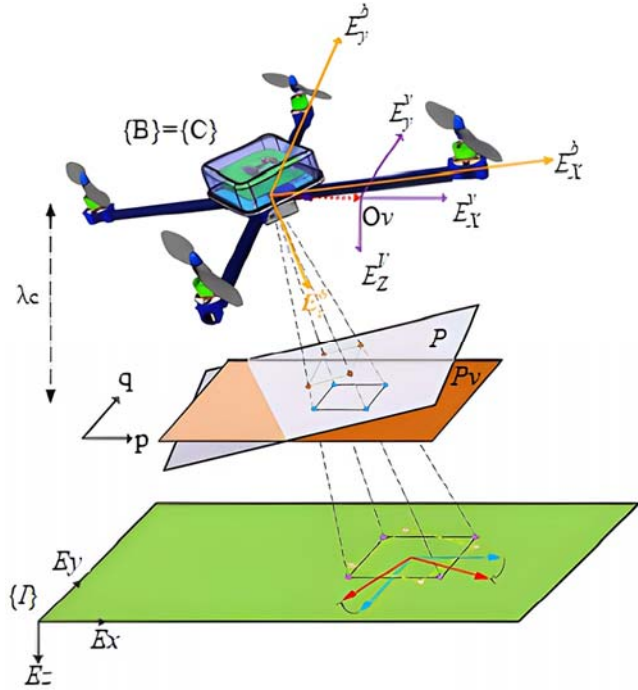
$$\ddot{\phi} = \dot{\psi} \dot{\theta} \left(\frac{I_y - I_x}{I_x} \right) + \frac{I}{I_x} \dot{\theta} \Omega r + \frac{U_2}{I_x} \quad (17)$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\psi} \dot{\phi} \left(\frac{I_z - I_x}{I_y} \right) + \frac{I}{I_y} \dot{\phi} \Omega r + \frac{U_3}{I_y} \quad (18)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\theta} \dot{\phi} \left(\frac{I_x - I_y}{I_z} \right) + \frac{1}{I_z} U_4 \quad (19)$$

3. Görüntüden Hareket Özelliklerinin Çıkarılması (Extracting motion features from an image)

DRİHA'nın görüntü işleme tabanlı görevleri gerçekleştirebilmesi için perspektif görüntü momentleri kullanılabilir [26]. DRİHA'ya ait sapma ve yuvarlanma açıları takibin sağlanacağı hedefe paralel olacak şekilde sanal görüntüleme düzleminde perspektif iz düşüm için kullanılabilir. Takibin sağlanacağı hedefe ait görüntü özelliklerinin çıkartılabilmesi için kamera, düzlemler ve eksen takımlarının tanımlanması gerekmektedir. Gerçek kameraya ait görüntü düzlemi DRİHA'dan kakonik uzaklığa (λc) ve $E_x^b - E_y^b$ düzlemine paralel olacak şekilde bir P noktası şeklinde alınarak E_z^b düzlemi P noktasına dik olarak ve kamera merceğinin merkezinden geçecek şekilde alınabilir. Kamera ağırlık merkezine yerleştirildiğinden DRİHA sapma açısının kamerayı hareket ettirmede, DRİHA'nın yuvarlanma ve yunuslama açıları ile kameranın aynı açıda hareket ettiği varsayılırsa $V = \{E_x^V, E_y^V, E_z^V\}$ ve P_V sanal çerçeve ve kameranın görüntü düzlemdir. Yerleşim yerleri gerçek kamera çerçevesi ve P düzlemine benzerdir (Şekil 2).



Şekil 2. DRİHA, görüntüleme ve hedef eksenleri [27]
(Frame of DRİHA, projection and target)

Sanal kameraya ait çerçeve $E_x - E_y$ düzlemine paraleldir ve sanal çerçevenin merkez noktası gerçek kameranın çerçeve merkezinden $D = (c_{x_d}, c_{y_d}, c_{z_d})$ uzaklıkta ve $E_x - E_y$ düzleminde. DRİHA'dan elde edilen görüntüye dayalı kontrol esnasında düzlemsel rota seçilir. Takibin sağlanacağı hedefe ait görüntü N noktadan meydana geliyorsa $i+j$ mertebesinin iki boyutlu momentleri aşağıdaki şekilde tanımlanır

[28]. (p_i, q_i) görüntüye ait i 'nci noktasının koordinatlarıdır. Görüntüden çıkarılan (p_g, q_g) görüntü merkez değerlerine göre merkezi momentler şu şekilde tanımlanır (Eş. 20-Eş. 21).

$$I_{ij} = \sum_{k=1}^N p_k^i q_k^j \quad (20)$$

$$M_{ij} = \sum_{k=1}^N (p_k - p_g)^i (q_k - q_g)^j \quad (21)$$

Burada $p_g = \frac{I_{10}}{I_{00}}$ ve $q_g = \frac{I_{01}}{I_{00}}$ dir. DRİHA'ya ait geçiş hareketlerinin kontrol edilebilmesi için görüntü özellikleri Eş. 22-Eş. 23 şeklinde tanımlanmıştır.

$$q_x = q_z \frac{p_g}{\lambda c}, q_y = q_z \frac{q_g}{\lambda c}, q_z = \sqrt{\frac{a_d}{a}} \quad (22)$$

$$a = {}^V M_{20} + {}^V M_{02} \quad (23)$$

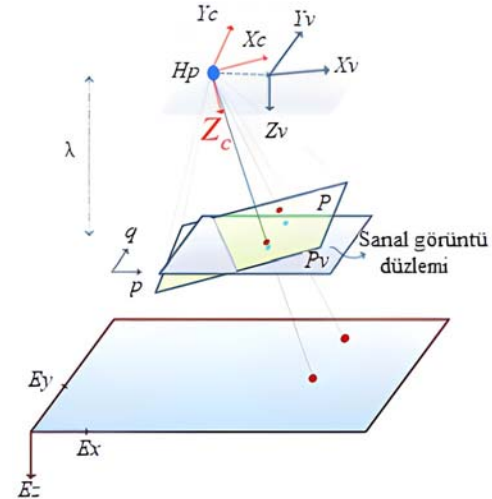
Eş. 23'ün istenen değer a_d 'dir ve bu karakteristik denklemlerde belirsizliklerin oluşmasına sebep olur. Çünkü Eş. 22'de DRİHA irtifası istenen z_d durumunda kullanılmaz. Bu sebeplerden dolayı ortaya çıkan belirsizlikler kontrolcü tarafından barometrik irtifa sensörü kullanılarak telafi edilir. Bir kameraya ait perspektif görüntü denklemleri aşağıdaki gibidir (Eş. 24) [29].

$$p = \lambda c \frac{c_x}{c_y}, q = \lambda c \frac{c_y}{c_z} \quad (24)$$

Burada görüntüye ait bir noktanın koordinatları piksel cinsinden p ve q olarak tanımlanır. Görüntüden çıkarılan özelliklere bağlı olarak açısal hareketi kontrol edebilmek için nesne yönü a tanımlanır (Eş. 25).

$$a = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2M_{11}}{M_{20} - M_{02}} \right) \quad (25)$$

H_p 'yi kamera çerçevesine göre uzayda (x, y, z) koordinatları olan bir nokta olduğunu ve H_p 'nin görüntüleme alanında $(p, q, \lambda c)$ koordinatlarına sahip bir görüntü olduğu varsayılabilir (Şekil 3).



Şekil 3. Uzayda x, y, z koordinatlarına sahip H_p noktası
(H_p point with x, y, z coordinates in space)

Atalet çerçevesine göre H_p noktasının ${}^I h_p$ ile arasındaki ilişki ve H_p noktasının kamera çerçevesine göre değişen zaman koordinatlarının ${}^C h_p(t)$ 'si [26] ve [29]' da tanımlanmıştır. Tanımdan yola çıkılarak t anında sanal çerçeve referansına göre H_p koordinatlarına sahip bir

görüntüyü ifade eden noktanın sanal düzlemi Eş. 26'da ki gibi ifade edilir. R_{ψ} , E_z çevresinde dönen bir matristir ve $O_v(t)$ sanal kameraya ait çerçevenin başlangıç noktasıdır. Görüntüyü ifade eden H_p noktasının sanal çerçeveye göre hızı Eş. 26'nın türevinden elde edilir. Sanal düzlem üzerindeki görüntüye ait bir noktanın koordinatları ile kameraya ait çerçeve hızı arasındaki ilişkinin matris formu Eş. 27'de tanımlanmıştır.

$$V_{h_p}(t) = R_{\psi}^T(t)[I_h - O_v(t)] \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} v_{\dot{p}_x} \\ v_{\dot{p}_y} \\ v_{\dot{p}_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\dot{z}_c}{v_z} & 0 & \frac{v_{\dot{p}_x}}{v_z} \\ 0 & -\frac{\dot{z}_c}{v_z} & \frac{v_{\dot{p}_y}}{v_z} \\ 0 & 0 & \frac{v_{\dot{p}_z}}{v_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{v_x} - d_x \\ v_{v_y} - d_y \\ v_{v_z} - d_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{\dot{q}} \\ -v_{\dot{p}} \end{bmatrix} \dot{\psi} \quad (27)$$

Görüntü özelliklerinin dinamiği olan Pv , Eş. 26 ve Eş. 27'nin zamana göre değişimi ile $z\sqrt{a} = z_d \sqrt{a_d}$ kullanılarak yazılabilir. $v(t) = [v_{v_x} \ v_{v_y} \ v_{v_z}]^T$ kameranın çizgisel hızı, $z = v_z = c_z$ ve $d(t) = [d_x \ d_y \ d_z]^T$ sanal eksen takımında hareketli olan noktanın hızına ait vektör olursa görüntüye ait düzlemde Pv 'nin zamana göre türevi Eş. 28'de ki gibi olur.

$$\dot{q} = -sk(\dot{\psi} e_3) \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} - \frac{1}{z_d} v + \frac{1}{z_d} d \quad (28)$$

4. Görüntü Tabanlı Kontrolcü Tasarımı (Vision based controller design)

Bu bölümde, kamera donanımlı bir DRİHA için zeminde sabit bir nesne olarak bulunan ve uzunluğu itibari ile süreklilik arz eden yol planlamasının tespit ve takibinin gerçekleştirilebilmesi için görsel tabanlı servo yaklaşımıyla kontrol edilen kontrolör tasarımı üzerinde durulmuştur. Amaç, kamera tarafından elde edilen (hareket eden DRİHA'ya bağlı) nesneye ait görüntü özellikleriyle tespit ve takip algoritması için belirlenmiş özelliklerle eşleştirmektir. Ele alınan hedef nesne, 2 boyutlu ilerleme ve açılma hareketleriyle zeminde süreklilik arz eden, kamera donanımlı DRİHA'nın görüntüleme çerçevesi içerisinde bulunan ve yuvarlanma ve yunuslama açılarında küçük değişiklikler olan yol planlaması olacaktır. Nesne için bu tür hareket, düz bir hedefi izleyen DRİHA hakkındaki varsayımları karşılar. DRİHA'nın yatay hareketini kumanda edebilmek için açılma dinamiklerinin sağlanması gereken bu tip hava araçlarının yapısı göz önüne alındığında, sıralı kontrolcülerin kullanılması özel bir önem taşımaktadır. Görüntü tabanlı görsel servo yönteminde, sanal görüntü düzleminde elde edilen özelliklerin dinamiklerinin, reaktif özelliklerinden yararlanılarak tüm sistem dinamikleri için sıralı kontrolör tasarlanabilir [26] (Şekil 4).

Tasarım prosedürlerine geçmeden önce birtakım varsayımların kabul edilmesi gerekmektedir. Bu varsayımlar;

- Kamera çerçevesi (C) ile DRİHA'nın çerçevesinin aynı noktada olması,
- Görüntü özelliğinin her zaman kameranın görüntüleme alanı içerisinde olması,
- Euler açılarının türevi ile açılma hızı (Ω) arasındaki ilişkiyi ifade eden $\dot{\eta} = \phi(\eta)\Omega$ denklemde tekilliği önlemek için θ , $-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$ aralığında olmalıdır.

DRİHA'nın görüntü tabanlı kontrol yapısı içerisinde denetleyici mimarisi iç ve dış döngüden meydana gelmektedir. Şekil 5'de dış döngü x ve y eksenlerindeki konum kontrolünü sağlarken, iç döngü ise DRİHA'nın hareket etmesi için gerekli kontrol komutlarını üretecektir. Aynı zamanda yönelim (yunuslama, yuvarlanma) kontrolü için gerekli referans değerler konum kontrolcüsü tarafından üretilmektedir. DRİHA'nın ilerleme ve açılma manevra hareketlerinin kontrolü esnasında istenilen açılma referans yörünge değerleri kamera dinamikleri göz önünde bulundurulmuş olarak hesaplanmıştır (Şekil 5).

4.1. İlerleme hareketinin kontrolü (Controlling the translational motion)

$\delta = q_d - q$ ($\delta = [e_{\delta_x} \ e_{\delta_y} \ e_{\delta_z}]^T$) şeklinde tanımlanan görüntü hata vektörünün (δ) türevi Eş. 30'da ki gibidir. Burada $p = \frac{1}{z_d}$ 'dir. Diğer taraftan sanal çerçeve üzerindeki DRİHA'nın ilerleme hareketinin dinamikleri Eş. 31 ve Eş. 32'de ki gibi bulunur.

$$\dot{\delta} = -sk(\dot{\psi} e_3)\delta + p\underline{v} - p d \quad (30)$$

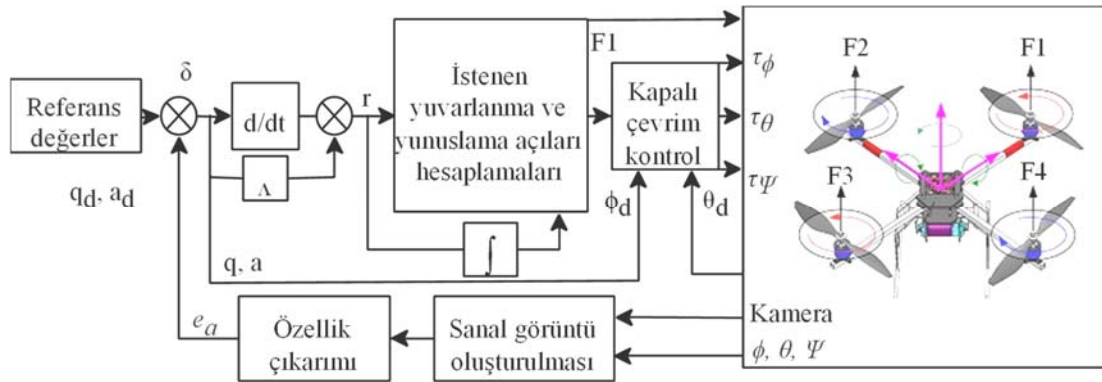
$$\underline{\dot{v}} = -sk(\dot{\psi} e_3)\underline{v} + f + f_d \quad (31)$$

$$F = -mR_{\phi\theta}^T f \quad (32)$$

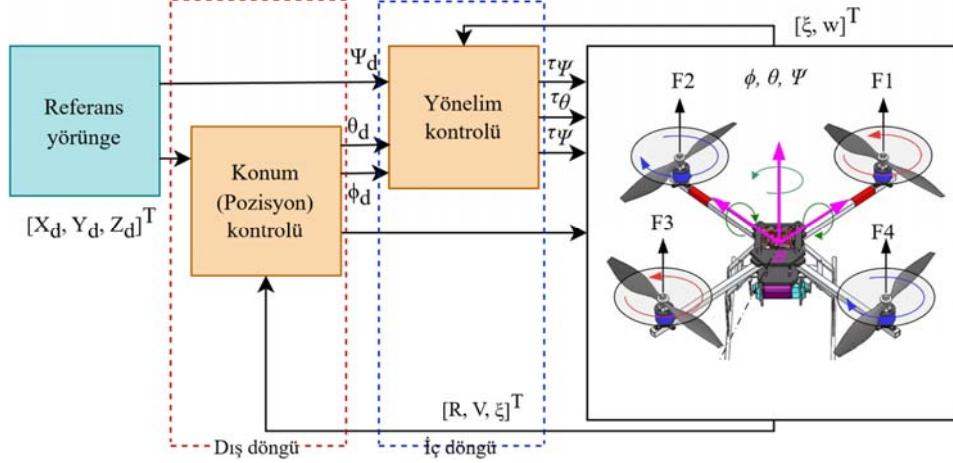
Burada f_d sanal düzleme aktarılmış Fd bozucu kuvvetin vektördür. Eş. 30'da ki eşitliğin türevi alınıp içerisine Eş. 31'de ki denklem yerleştirilirse kapalı döngü hatası aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\ddot{\delta} + 2\mu_1 \dot{\delta} + \mu_2 \delta - pf + \Delta_1 = 0 \quad (33)$$

Buradaki $f = [f_x \ f_y \ f_z]^T$ sanal düzlemdeki kuvvet vektördür ve $\Delta_1 = \mu_1 pd + p\dot{d} - pf_d$ belirsizliktir. Ayrıca $\mu_1 = sk(\dot{\psi} e_3)$ ve $\mu_2 = sk(\ddot{\psi} e_3) + sk(\dot{\psi} e_3)sk(\dot{\psi} e_3)$ 'tür. Birçok uygulamada bilgi d ve \dot{d} mevcut değildir. Öte yandan Eş. 33'de ki bir başka belirsizlik ise p parametresidir. Bu bölümde anlatılan kontrol yöntemleri bu



Şekil 4. DRİHA'nın görüntü tabanlı kontrol yapısı (DRİHA's vision-based control structure)



Şekil 5. Kontrol döngüsü (Control loop)

belirsizlikleri ortadan kaldırmak için olmuştur. Görüntü hata vektörü olan δ kullanılarak filtrelenmiş izleme hatası $r(t)$ [30] aşağıdaki eşitlikle tanımlanır.

$$r = \delta + A\delta \quad (34)$$

Burada $A = A^T$ tasarım parametre matrisidir ve normalde bir diyagonal matris olarak seçilir [31]. Eş.34'e göre ve operatör kazanç özellikleri kullanılarak aşağıdaki sonuca varılır [31, 32].

$$\|\delta\| \leq \frac{\|r\|}{\delta_{\min}(A)}, \quad \|\delta\| \leq \|r\| \quad (35)$$

$\delta_{\min}(A)$ A 'nin minimum tekil değeridir. Bundan dolayı Eş. 33'de uygun bir giriş parametresine sahip olarak hem izleme hatasının hem de türevinin sınırlandırılması sağlanabilir. Böylece filtrelenmiş hatanın da sınırlandırılması gerçekleştirilmiş olacaktır. Eş. 33'de tanımlanmış ve f girişi olan sisteme dikkat edersek; $\|\mu_1\| \leq Y_1$, $\|\mu_2\| \leq Y_2$, $\|d\| \leq D_1$, $\|d\| \leq D_2$ ve $\|f_d\| \leq D_3$ olduğunu ve ρ_{\min} ve ρ_{\max} 'in ρ 'nin sınırları olduğunu varsayılırsa;

$$f = -(A - 2\mu_1)(r - A\delta) + \mu_2\delta + \Delta_1 - K_r r - K_i \int_0^t r dt' \quad (36)$$

Eş. 34'ün türevi alınır ve bunun yerine Eş. 33 konulursa Eş. 37'de ki denklemler elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{r} &= \dot{\delta} + A\dot{\delta} \\ \dot{r} &= f - 2\mu_1\dot{\delta} - \mu_2\delta - \Delta_1 + A\dot{\delta} \\ \dot{r} &= f + (A - 2\mu_1)(r - A\delta) - \mu_2\delta - \Delta_1 \\ \dot{r} &= f - (A - 2\mu_1)(r - A\delta) + \mu_2\delta + \Delta_1 \end{aligned} \quad (37)$$

Ayrıca Eş. 37'da ki izleme hatasını dengeleyen ideal kuvvet Eş 38'de ki gibidir. $K_r > 0$ ve $K_i > 0$ matris biçimindeki kontrol kazançlarıdır. Eğer $\hat{f} = f$ ise bunu Eş. 37'de yerine koyarak kapalı çevrim hata dinamiği elde edilir. Δ_1 'in değerini yaklaşık olarak belirleyebilmek için radyal tabanlı fonksiyon kullanılmıştır.

$$\hat{f} = -(A - 2\mu_1)(r - A\delta) + \mu_2\delta + \hat{\Delta}_1 - K_r r - K_i \int_0^t r dt' \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \dot{r} &= -\left(\frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\Delta_1}\right) - K_r r - K_i \int_0^t r dt' \\ \dot{r} &= -\hat{\Delta}_1 - K_r r - K_i \int_0^t r dt' \end{aligned} \quad (39)$$

4.2. Açısal hareketin kontrolü (Controlling the angular motion)

DRİHA'nın açısal hareketine ait kontrolünün sağlanabilmesi için hava aracının sapma açısı ile kontrol sinyali (τ_ψ) arasındaki ilişki Eş.40'da belirtildiği gibidir. DRİHA'nın sapma açısıyla ilişkili özellik hatası $e_a = a - a_d$ şeklinde tanımlanır.

$$\ddot{\Psi} = g_\psi(\phi, \theta)\tau_\psi + f_\psi(\phi, \theta, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\Psi}, \tau_\theta) \quad (40)$$

DRİHA'nın sapma açısıyla ilişkili özellik hatasının ikinci dereceden türevi alınıp Eş.40'da yerine yazıldığında ve sapma yönünde meydana gelen nesnel hız göz önünde bulundurulduğunda, nesnel hızla ait ikinci dereceden türev Eş. 41'de ki gibi olur.

$$\ddot{a} = -g_\psi\tau_\psi - f_\psi + \Delta_2 \quad (41)$$

Kontrol sinyali olan τ_ψ kayma yüzeyinin türevinin alınması ile elde edilir [32]

$$s_a = \dot{e}_a + \lambda_a e_a \quad (42)$$

$$\dot{s}_a = \ddot{e}_a + \lambda_a \dot{e}_a = -g_\psi\tau_\psi - f_\psi + \Delta_2 + \lambda_a \dot{e}_a \quad (43)$$

$$\tau_\psi = \frac{1}{g_\psi} \left[-f_\psi + \lambda_a \dot{e}_a + \eta_a \left| s_a \right|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(s_a) \right] \quad (44)$$

Tasarımı yapılacak olan kontrolçüde kararlılığın istenen seviyede olmasını sağlamak için Lyapunov fonksiyonu Eş. 45'de tanımlanmıştır. Lyapunov fonksiyonunun türevi alınarak tasarlanmış olan kontrolçünün kontrol girdileri istenen seviyeye çekilmiştir.

$$L_a = \frac{1}{2} s_a^2 \quad (45)$$

$$\dot{L} = -\eta_a \left| s_a \right|^{\frac{3}{2}} + s_a \Delta_2 \quad (46)$$

Lyapunov teorisi tabanlı kontrol yapısı göz önüne alındığında DRİHA'nın kontrol algoritması ilerleme ve açısal hareket kontrolü temel alınarak geliştirilmiştir. DRİHA'nın yuvarlanma, yunuslama ve sapma açılarını kontrol etmek için kontrolçü katsayıları K_p , K_i ve K_d olan PID kontrolörler kullanılmıştır. Çoklu rotorun performansını iyileştirmek için yönelim ve konum denetleyicilerine ait kontrolör kazançları Eş. 47'de ki ifade ile hesaplanmıştır.

$$C = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i} IF(z) + \frac{T_d}{N} DF(z) \right) \quad (47)$$

Burada K_p orantılı kazancı, T_i integral zamanı, T_d türev zamanı, N birinci dereceden türev filtre bölümleri, $IF(z)$ ayrık zamanlı denetleyicide integrali hesaplamak için ve $DF(z)$ ayrık zamanlı denetleyicide türev filtresini hesaplamak için integral alma yöntemini ifade etmektedir. Eş. modeli oluşturulan kontrolcüye ait K_p , T_i , T_d ve N başlangıç parametreleri rastgele örnekleme yöntemiyle atanmıştır. Kapalı döngü PID otomatik ayarlayıcı blokları tarafından PID denetleyicinin her birinin çıkışına Tablo 1'de gösterilen sapma sinyalleri eklenmiştir. Her kontrol döngüsü için Kapalı döngü PID otomatik ayarlayıcı blokları, kontrol döngüsüne bağlı olarak farklı performans kriterleri ile tanımlanmıştır. Uçuş yörüngesinde kademeli kontrolün gerçekleştirilmesi ve kararlı olmayan manevra hareketlerinden kaçınmak için iç döngü, dış döngüden daha yüksek bir bant genişliğine sahip olacak şekilde ayarlanmıştır. Tablo 1'de önerilen yörünge takibi için geçerli PID otomatik ayarlama kriterleri verilmiştir.

Tablo 1. PID otomatik ayarlama kriterleri (PID auto-tuning criteria)

Kontrol Döngüleri	Bant Genişliği (rad/s)	Faz Marjı (derece)	Sapma Genliği
Yunuslama ve Yuvarlanma Hızı	50	60	0,001
Yunuslama ve Yuvarlanma Açısı	20	60	0,1
x ve y Hız Döngüsü	5	60	0,02
x ve y Konum Döngüsü	1	60	0,1

İHA kontrol sisteminin örnekleme süresi $T_s=0,005$ saniye alınmıştır. Kapalı döngü PID otomatik ayarlayıcı, bant genişliğinin (ω) $\omega T_s \leq 0,3$ 'ü karşılamasını gerektirdiğinden dolayı kontrol döngülerinde kullanılacak olan bant genişlikleri 60 rad/sn veya daha az olmalıdır. Mevcut şartlara göre performansı en üst düzeye çıkarmak için, yunuslama ve yuvarlanma hızları döngüleri için bant genişliği 50 rad/sn olarak ayarlanmıştır. x - y konum ve hız döngüleri için gerekli bant genişlikleri, iç döngülerde kararlılık sorunlarına yol açmadan mümkün olduğu kadar büyük olacak şekilde ayarlanmıştır. Performans ve sönümleme arasında dengeli sonuçlar oluştuğundan dolayı her döngü için faz marjı 60 dereceye ayarlanmıştır. Bozucu girdi olan sapma sinyallerinin eklenmesinden sonra otomatik ayar işlemini gerçekleştirmek için geri besleme sinyalleri kullanılarak referans yörünge ile gerçekleşen manevra hareketleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre Tablo 2'de gösterilen kontrolcü katsayılarının kullanılmasına karar verilmiştir.

Tablo 2. Kontrolcü katsayıları (Controller coefficients)

Euler Açılımları	K_p	K_i	K_d
Yuvarlanma açısı (ϕ)	6,578	1,992	3,04
Yunuslama açısı (θ)	0,537	0,2	0,274
Sapma açısı (ψ)	3,586	1,198	0,438

5. Hedef Tespiti ve Takibi (Target detection and tracking)

Görüntü işleme teknikleri sayesinde arka plandan ayrıştırılmış yol planlaması üzerinde ilerleme ve açılma hareketi ait denklemler görüntü momentleri kullanılarak elde edilir. Hedef takip kontrol sistemi içerisinde nesne üzerinde işaretlenmiş hedef noktanın koordinatları x ve y eksenlerinde oluşan pozisyon hatalarının bulunması açısından önemlidir. Merkezi momentler kullanılarak kontrol edilen manevra hareketlerine ek olarak hedef nesnenin koordinat sistemindeki eksen tanımlamalarının yapılması ve hedefin ana hatlarının belirlenebilmesi, hedef takip kontrol sisteminin performansını doğrudan etkileyecek parametrelerdir. Hedefin otonom takip algoritmasının akış şeması Şekil 6'da verilmiştir.

Hedef nesne tespitinin yapılabilmesi için görüntünün elde edilmesi, işlenerek sayısal işarete dönüştürülmesi ve görüntü özelliklerinin çıkarılması gerekmektedir. Bu bağlamda ön görüntü işleme, kamera çerçevelerinden başlamak üzere tespit ve takip için hedefin ortam özelliklerinden ayrıştırılması amacıyla kullanılmıştır. DRİHA'ya yerleşik kamera sensöründen $T_{ST}=50\mu s$ örnekleme süresinde genişlik ve yükseklik çerçeveleri alınmıştır. İşlenmemiş ham görüntü formatı, her renk kanalı için 8 bitlik RGB'dir. Kamera sensöründen alınan işlenmemiş görüntü üzerindeki hesaplama yükünü azaltmak için görüntü yeniden boyutlandırılmıştır. Görüntünün azaltılması ve yoğunluk değişikliklerinin tespit edileceği çözünürlüğü ayarlamak amacıyla filtreleme ve yumuşatma işlemi gerçekleştirilmiştir. RGB renk uzayının dış ortam görüntü işleme uygulamalarında neden olduğu sınırlılıklar sebebiyle görüntü uzayı HSV'ye dönüştürülmüştür. Renk uzayı değiştirilen görüntü üzerinde, arka plan ve hedef birbirinden ayrıştırılmıştır. Bu ön görüntü işleme yöntemleriyle hedef, Şekil 7'deki gibi tespit edilmekte ve işaretlenmektedir.

Hedef tespit edildikten sonra bu hedefin kamera görüntüsündeki yer değişimine göre takip algoritmasında hız komutları, hava aracının mevcut konumu ile hedefin konumu arasındaki bağımlı hareket kullanılarak hesaplanır. Şekil 8'de mevcut konumun $P(x_{cur}, y_{cur}, z_{cur})$ ve hedef konumunun de $P(x_{des}, y_{des}, z_{des})$ olduğu hedef takip kontrol geometrisi gösterilmektedir.

P_{lon} boylamsal konum farkı, P_{lat} yanal konum farkı ve H_e yükseklik farkı olarak tanımlanır. Bu hatalar Kartezyen koordinatta x , y ve z bileşenleri ile hesaplanır. Bağımlı uzaklık geometrisi ile ilgili denklemler Eş. 48 ve Eş. 49'da ki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} P_{lat}(t) \\ P_{lon}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\psi_{los}) & \cos(\psi_{los}) \\ \cos(\psi_{los}) & \sin(\psi_{los}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$H_e(t) = z_d - z \quad (49)$$

x ve y eksenlerinde gerçekleşen konum farklarını hesaplarken görüntüden hareket özelliklerinin çıkarılması başlığı altında verile, kamera aracılığıyla tespit edilen, görüntü momentleri kullanılır. Böylece görüş algılama algoritmasının sonucu ile referans hedef konumu Eş. 50'de ki gibi temsil edilir.

$$\begin{bmatrix} x_{des} \\ y_{des} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{cur} \\ y_{cur} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\psi_{head}) & -\sin(\psi_{head}) \\ \sin(\psi_{head}) & \cos(\psi_{head}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{img} \\ y_{img} \end{bmatrix} \quad (50)$$

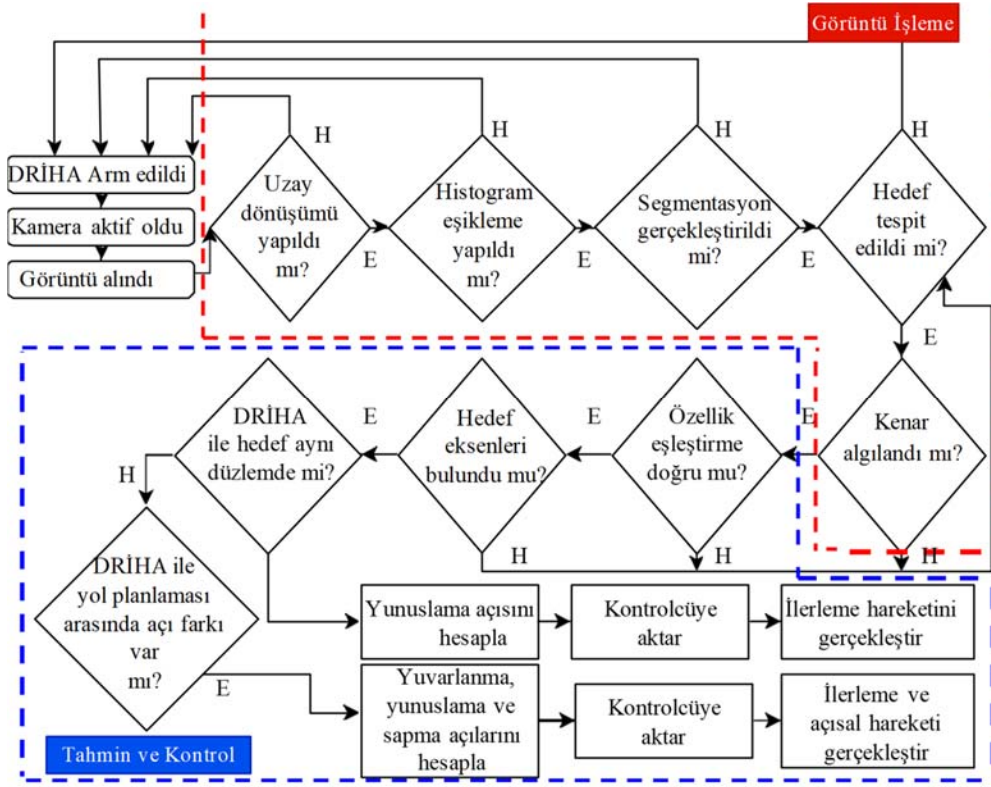
K_x ve K_y yerel NED (kuzey-doğu-aşağı) koordinatı ile görüntü düzlemi arasında geçiş yapan sabiti temsil eder. Eş.50'de ki denklemler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\psi_{head}) & -\sin(\psi_{head}) \\ \sin(\psi_{head}) & \cos(\psi_{head}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{img} \\ y_{img} \end{bmatrix} \quad (51)$$

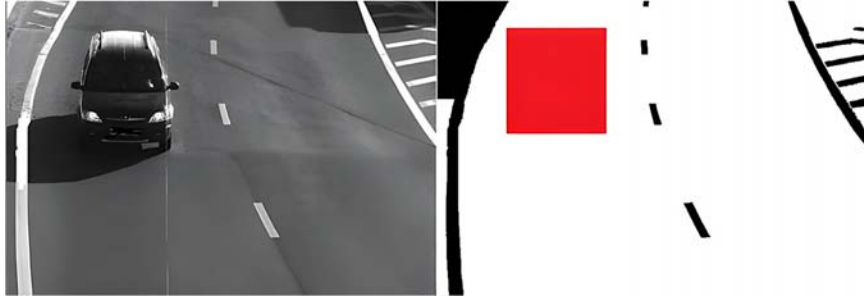
Böylece, hedefin yerel görüntü konumları kullanarak yanal ve boylamsal pozisyonlar olan P_{lat} ve P_{lon} hesaplanabilir [33]. Daha sonra, daha keskin takip yörüngesi için sönümleme terimi uygulanabilir [34]. Hedef hareketsiz olduğunda sönümleme denklemleri Eş. 52 ve Eş. 53'de ki gibi ifade edilmekle birlikte sönümleme denklemleri yalnızca hedefin hızına bağlıdır.

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_{lat}(t) \\ \dot{P}_{lon}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\psi_{los}) & \cos(\psi_{los}) \\ \cos(\psi_{los}) & \sin(\psi_{los}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \end{bmatrix} \quad (52)$$

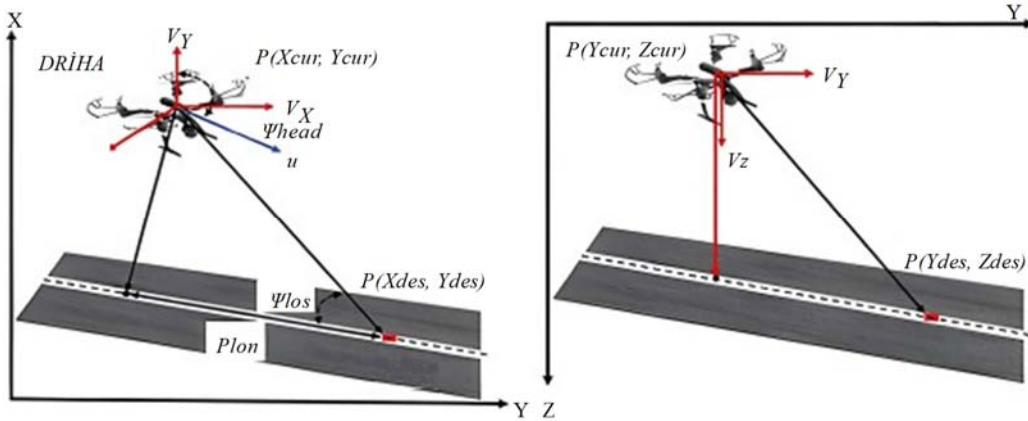
$$\dot{H}_e(t) = -\dot{z} \quad (53)$$



Şekil 6. DRİHA'nın görüntü işleme tabanlı otomatik kontrol akış şeması
(Image processing based automatic control flow chart of DRİHA)



Şekil 7. Görüntüde hedef tespiti (Target detection in image)



Şekil 8. Hedef takip kontrol geometrisi (Target tracking control geometry)

Bu denklem bağıl hız geometrisini temsil eder. Burada $\dot{x}_e = -v_x$ ve $\dot{y}_e = -v_y$ 'dir. Bununla birlikte, hareketli hedef durumunda, hedef, yörünge sönümlenme terimini azaltan hızla sahiptir. Eş. 54'de v_x ' hedef hızı ifade eder.

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= v_x' - v_x \\ \dot{y}_e &= v_y' - v_y \end{aligned} \quad (54)$$

Hedefin mevcut hızı ve görüntü düzlemindeki yerel konumların kümesi ile hedef hızı elde edilebilir. Görüntü çerçevesi üzerindeki bağıl hız, görüntü konumlarının eğimi ile hesaplanır ve daha sonra bunlar, görüntü azaltmayı sağlayan alçak geçiren filtreden geçer. Hedef hızı Eş. 55'de ki denklemle ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} v_x' \\ v_y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\Psi_{head}) & -\sin(\Psi_{head}) \\ \sin(\Psi_{head}) & \cos(\Psi_{head}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{img} \\ y_{img} \end{bmatrix} \quad (55)$$

Tüm bu çıkarımlardan sonra hedef hızın etkisi de dâhil olmak üzere yörünge sönümlenme terimi hesaplanabilir. Bu yöntemle ivmeler ikinci dereceden sistem olarak konum hatasından ve konum hata oranından türetilir. Komut ivme denklemleri Eş. 56'da ki denklemlerle ifade edilir.

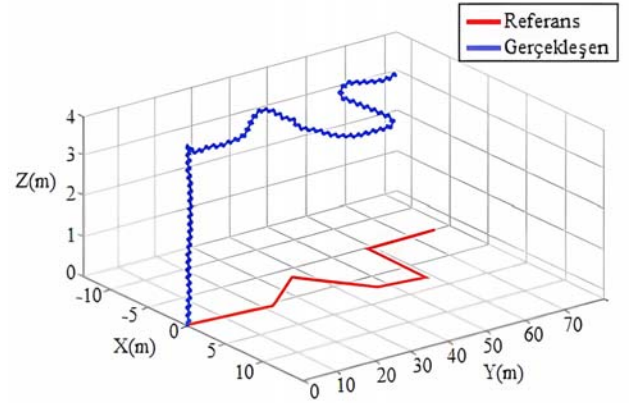
$$\begin{aligned} a_{lat}(t) &= \omega_{lat}^2 P_{lat}(t) + 2\zeta_{lat} \omega_{lat} \dot{P}_{lat}(t) \\ a_{lon}(t) &= \omega_{lon}^2 P_{lon}(t) + 2\zeta_{lon} \omega_{lon} \dot{P}_{lon}(t) \\ a_h(t) &= \omega_h^2 P_h(t) + 2\zeta_h \omega_h \dot{P}_h(t) \end{aligned} \quad (56)$$

6. Uygulama ve Tartışmalar (Application and Discussions)

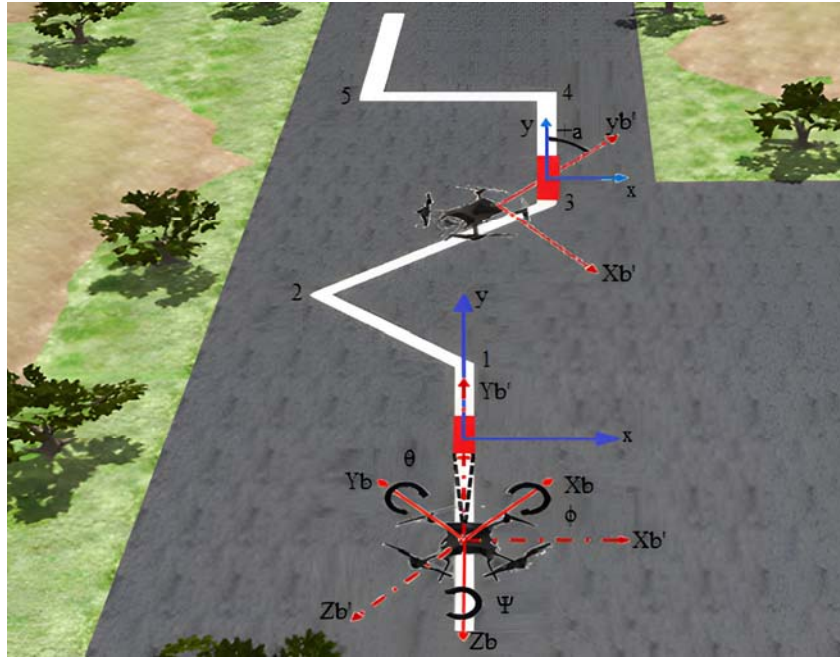
DRİHA'nın görüntü tabanlı otonom kontrolünün gerçekleştirildiği bu çalışmada rastgele belirlenmiş yol planlaması üzerinde hedefin tespiti ve takibi amacıyla otomatik kontrolcü tasarlanmış ve otonom navigasyon yeteneklerinin geliştirildiği takip algoritması oluşturulmuştur. Anlık görüntülemeye dayalı hedef takip görevini yerine getirecek olan insansız hava aracı Ardupilot/SITL simülatörü kullanılarak simüle edilmiştir. Hedef nesne ve üzerinde tanımlı hedef noktanın ayırt edilebilmesi için klasik görüntü işleme yöntemlerinden yararlanılmıştır. Simülasyon ortamında DRİHA'ya bütünlük ve görüntüleme alanı zemine paralel şekilde yerleştirilmiş monoküler

kamera, ROS (Robot Operating System) yazılımı kullanılarak temin edilmiştir. Ardupilot/SITL ve ROS simülatörü kullanılarak benzetimi yapılan DRİHA'nın hedef tespiti ve takibi, Gazebo simülasyonu ortamında oluşturulmuş sanal test parkurunda (Şekil 9) uygulanmıştır. Uygulamada hedef sabit hızla hareket etmektedir.

Benzetimi yapılan DRİHA Eş.4'te belirtilen Newton-Euler denklemlerine tabi ve $m=2,11\text{kg}$, $J=\text{diag}(0,064 \ 0,064 \ 0,075)\text{kgm}^2$, $I_x=0,488\text{m}$, $I_y=0,395\text{m}$, $l=0,22\text{m}$, $g=9,81\text{m/s}^2$ fiziksel parametrelerine sahiptir. Hedefin hareket ettiği test parkuru DRİHA tarafından izlenmesi gereken farklı dönüşlere sahiptir. Önerilen kontrol şemasının performansını görmek için bu şekilde benzetim yapılmıştır. İç ve dış döngü kontrolcülerini için otomatik PID ayarlama kriterleri belirlendikten sonra hava aracı otomatik ayar yapmak için bir süre havada asılı kalmıştır. Otomatik ayarlama işlemi tamamlandıktan sonra, DRİHA planlanan yolda hareket eden hedefi başlangıç ve bitiş noktaları arasında bulunan beş ara noktadaki dönüşleriyle takip etmiştir. Ayarlanmış PID katsayıları ile hava aracı, takibi yaklaşık 90 saniyede tamamlamıştır. Zeminde bulunan referans yörüngeye karşılık DRİHA tarafından gerçekleştirilen takip yörüngesi Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10. DRİHA'nın kartezyen uzayda 3 boyutlu yörüngesi (3D trajectory of DRİHA in cartesian space)



Şekil 9. Gazebo benzetim ortamında oluşturulmuş sanal test parkuru (Virtual test track created in gazebo simulation environment)

DRİHA'nın ağırlık merkezine sabitlemiş kameradan elde edilen görüntü çerçevesinin orijin noktası, aynı zamanda hava aracının izdüşümsel olarak bulunduğu mevcut konumu ifade eder. Hedef konum ise hava aracının yol planlaması üzerinde bir sonraki bulunması gereken noktadır. Mevcut konum ile hedef nokta arasında bulunan öncelik sonralık ilişkisi, boylamsal ve yanal konum hatalarının oluşmasını sağlar. Hedef konunun yol birleşim noktalarına daha önce ulaşıyor olması, hava aracını birleşim noktalarından önce açısal manevra hareketine başlatır. Nitekim Şekil 10'da üç boyutlu yörünge takibinde görüldüğü üzere birleşim noktalarında oluşan dönüş hareketi eğimli bir şekilde gerçekleşmiştir. Birleşim açılarının daha yüksek olduğu noktalarda ise exponansiyel bir eğri ile açısal manevra hareketi oluşumu gözlenmiştir. Hedef takibi esnasında referans yörüngede istenen ve gerçekleşen Euler açılarının sayısal değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

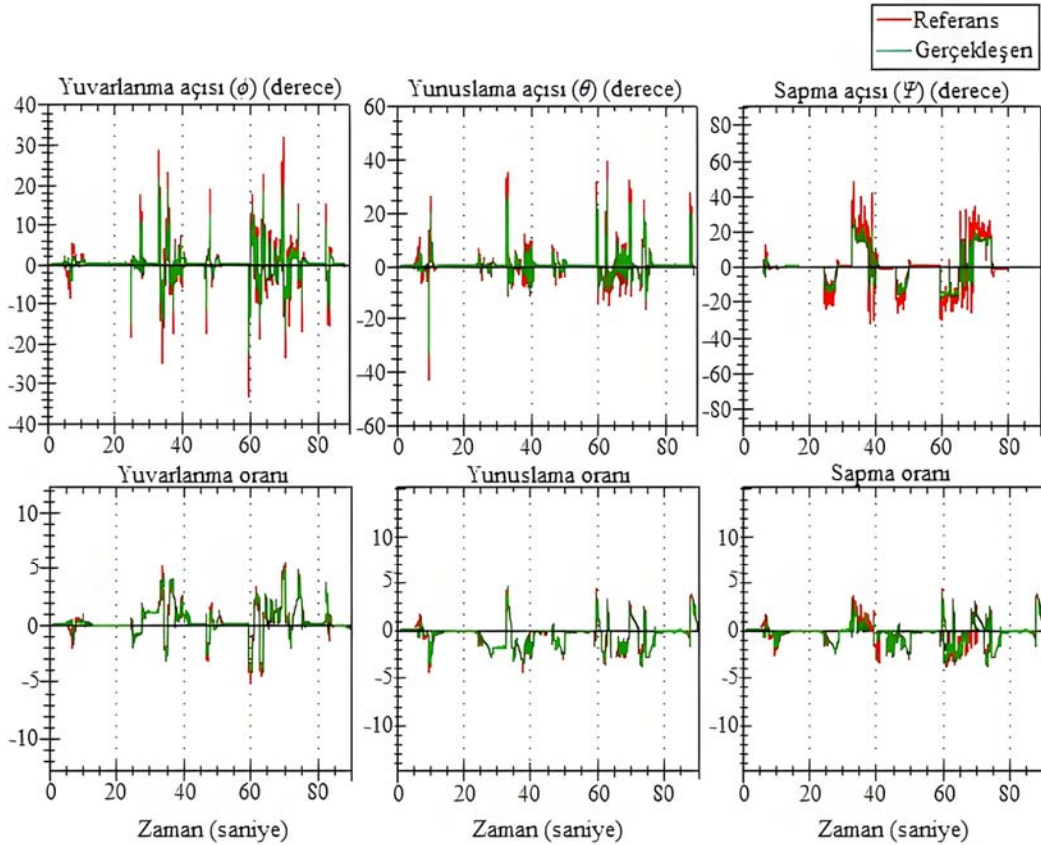
Hava aracının takip için gerçekleştirdiği açısal hareketin Euler açıları ile bunların değişim oranları Şekil 11'de, gerçekleştirdiği ilerleme hareketinin x-y doğrultusundaki çizgisel yer değiştirme ile hızı Şekil 12'de, z doğrultusundaki irtifa değişimi ise Şekil 13'de verilmiştir. Şekil 13'de z ekseninde irtifa değişirken Şekil 12'de z eksenini hedef ile

hava aracı arasındaki yükseklik olduğundan sabit kalmaktadır. Hava aracının mevcut konumu ile hedef nokta arasında oluşan açı farkı sıfır olduğu sürece DRİHA'nın öteleme hareketine boylamsal konum hatası kaynaklık eder. Nitekim Şekil 11'de görüldüğü üzere hedef konum, yol planlaması üzerindeki düz rotada hareket ettiği zaman aralıklarında gerçekleşen yunuslama, yuvarlanma ve sapma açıları ve referans değerlerle örtüşme eğilimindedir. Düz uçuşun gerçekleştiği zaman aralıklarında yuvarlanma açısında oluşan maksimum sapma hatası 19. saniyede $0,03^\circ$, yunuslama açısında oluşan maksimum sapma hatası 29,7. saniyede $0,05^\circ$ ve sapma açısında oluşan maksimum sapma hatası 56,7. saniyede $0,15^\circ$ ile gerçekleşmiştir.

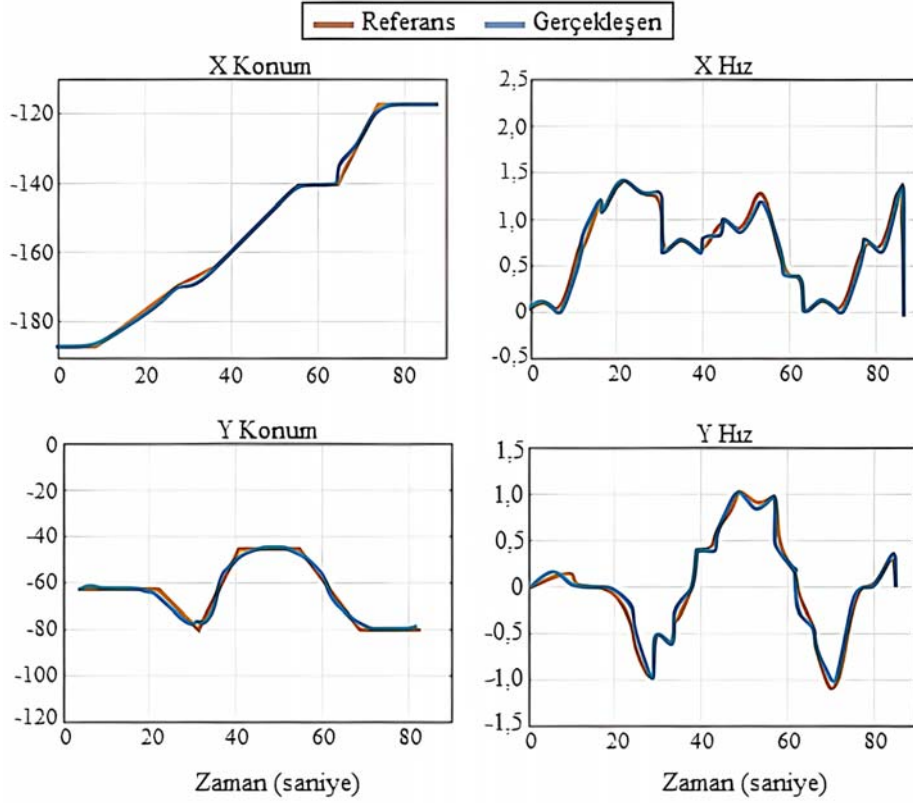
Hava aracı ile hedef konum arasında oluşan anlık açı farkının yüksek olduğu dönüş noktalarında, Euler açılarında yaşanan saptmalar düz uçuşta gerçekleşen saptmalara oranla daha fazla olmuştur. Manevra noktalarında takip noktasının anlık olarak konum değiştiriyor olmasından kaynaklı oluşan bu sorunu çözebilmek için kontrolcü katsayıları daha yumuşak dönüşlerin sağlanacağı değerlerde tutulmuştur. Aynı zamanda hedeften savrulmamak için takip hızı da manevra hareketi esnasında DRİHA ile hedef arasındaki açı farkı

Tablo 3. Euler açılarında oluşan farklar (Differences in Euler angles)

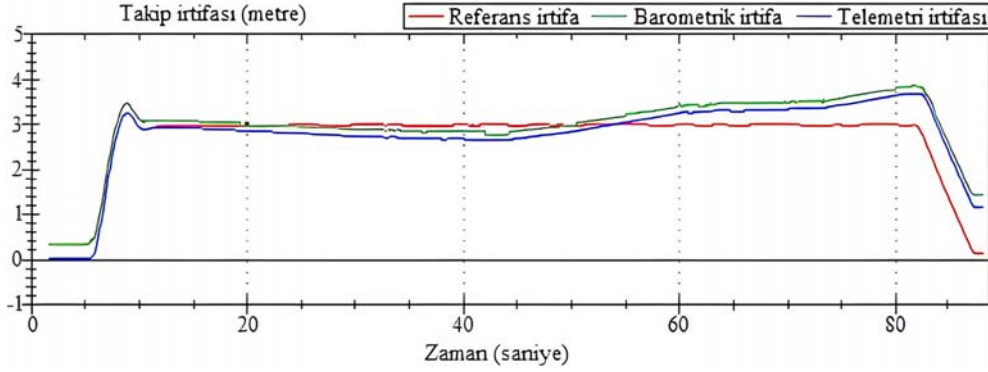
Parkur Bölümleri	Referans	Gerçekleşen	Referans	Gerçekleşen	Referans	Gerçekleşen
	Yuvarlanma (ϕ) Açısı	Yuvarlanma (ϕ) Açısı	Yunuslama (θ) Açısı	Yunuslama (θ) Açısı	Sapma (ψ) Açısı	Sapma (ψ) Açısı
1. Birleşim Noktası	17,40°	15,32°	6,22°	4,09°	24,106°	22,05°
2. Birleşim Noktası	28,26°	24,54°	34,88°	26,85°	46,75°	38,905°
3. Birleşim Noktası	18,66°	16,00°	7,73°	5,64°	24,21°	19,768°
4. Birleşim Noktası	33,21°	25,70°	39,19°	33,99°	33,7°	29,618°
5. Birleşim Noktası	31,73°	21,85°	7,73°	20,64°	29,134°	25,698°



Şekil 11. Referans ve gerçekleşen Euler açıları ve oranları (Reference and actual Euler angles)



Şekil 12. Otomatik PID ayarlayıcı x-y konum ve hız tepkileri (auto tuned PID x-y position and velocity responses)

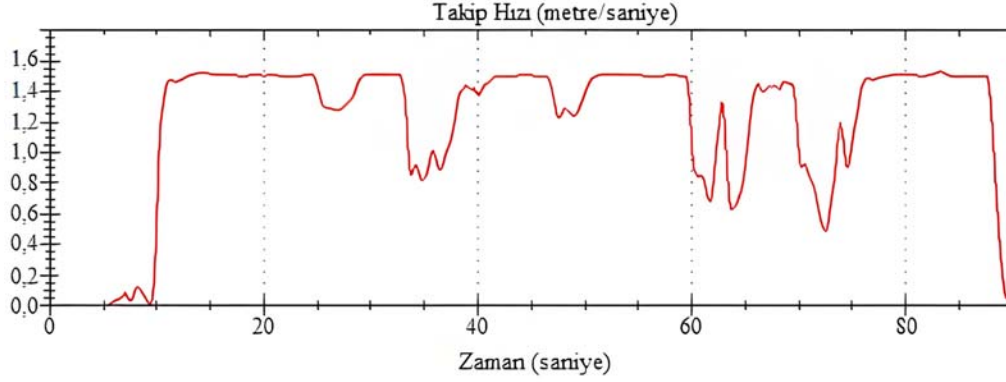


Şekil 13. Takip irtifasının değişimi (Change of tracking altitude)

dikkate alınarak kademeli olarak düşürülmüştür. Ani ivmelenmeler sonucu hava aracının savrulmasını engellemek ve hedefin boyutlarında yaşanan küçülmeler nedeniyle uçuş kararlılığında oluşacak sorunların önüne geçebilmek için hedef takibi sabit bir mesafeden (3m) gerçekleştirilmiştir. Referans takip irtifası ile uçuş anında elde edilen barometrik irtifa ve telemetri irtifasının değişimleri Şekil 13'de gösterilmiştir. Benzetim ortamında tasarlanan sanal test parkuru pist uzunluğunun yarısından itibaren giderek artan eğimli bir arazi üzerinde oluşturulmuştur. Nitekim takibin 45. saniyesinden sonra barometrik irtifanın 4m seviyelerine kadar yükseldiği gözlemlenmiştir. Pist sonu itibarı ile barometrik irtifada arazi kaynaklı yükselmeler yaşansa da takip irtifası olan 3m'lik irtifa sabit olarak korunmuştur.

DRİHA ile hedef konum aynı düzlem üzerinde bulunduğu sürece ortalama takip hızı 1,5 m/s olmuştur. Maksimum takip hızı ile

manevra noktalarında hedef takibi yapılması durumunda hız kaynaklı hedeften sapmalar yaşanmıştır. Açısal hareketin gerçekleşeceği yol birleşim noktalarında hava aracı ile hedef konum arasında oluşan açı farkını dikkate alarak otonom takip hızını belirleyen $V_{DRİHA_{\text{takip}}} = V_{DRİHA_{\text{max}}} - (\alpha * p)$ formül kullanılmıştır. Bu formülde $V_{DRİHA_{\text{max}}}$ boylamsal konum hatası anında ulaşılan maksimum takip hızını, α DRİHA ile hedef konum arasında oluşan açısal farklılığı, p ise takip hızını kademeli düşürecek olan hız değişim katsayısı olan 0,04'ü ifade etmektedir. Açısal büyüklüğü yüksek olan manevra hareketlerinde takip hızının 0 m/s'ye düşürülmemesi için otonom takip hızını düzenleyen açısal farklılık parametresi 25° ile sınırlı tutularak minimum takip hızı 0,5 m/s'ye sabitlenmiştir. Hedef takibi esnasında DRİHA'nın maksimum takip hızı 1,53 m/s, minimum takip hızı 0,5 m/s ve ortalama takip hızı ise 0,97 m/s olarak ölçülmüştür. Takip hızının değişimi Şekil 14'de gösterilmiştir.



Şekil 14. Takip hızının değişimi (Change of tracking speed)

7. Sonuçlar (Conclusions)

Teknolojide yaşanan gelişmelerden dolayı havacılık sektörü önemli kazanımlar elde etmiştir. İnsansız hava araçları, farklı disiplinlerle kurulan ilişkiler sayesinde askeri ve sivil alanda birçok görevde kullanılmaya başlamıştır. Özellikle yapay zekâ, makine öğrenmesi, görüntü işleme gibi teknikler kullanılarak hava araçlarına karar alma süreçlerinde ve görev icrası esnasında uygulama özerkliği tanınmasının önü açılmıştır. Görsel verilere dayalı gerçekleştirilen görevlerde görüntünün alınması, işlenmesi ve ilgili görev doğrultusunda özelliklerin çıkartılmasındaki başarı durumu icra edilen görevin başarıya ulaşma olasılığını önemli derecede etkilemektedir. Anlık elde edilen görüntülerin işlenmesine dayalı otonom kumanda edilebilme kabiliyetleri artırılan insansız hava araçlarının sonraki yıllarda hayatın her noktasında kullanılacağına dair düşünceler giderek artmaya başlamıştır.

DRİHA'ya bütünleşik kameradan elde edilen görüntü üzerindeki hedef nesne tespiti ve matematiksel forma dönüştürülmüş takip algoritması kullanılarak hedef takibinin yapıldığı bu çalışmada, DRİHA'nın gerçekleştireceği hareketler görüntü tabanlı kontrol sayesinde otonomlaştırılmıştır. Hava aracının ve uçuş ortamının benzetimi yapılarak DRİHA'nın otonom yapması gereken hareketlerin hesaplandığı senaryo oluşturulmuştur. Test parkuru üzerinde takibi yapılacak olan hedefin arka plandan ayrıştırılması, sınır hatlarının belirlenmesi, eksen tanımlamalarının yapılması ve DRİHA'ya göre açılma konumunun bulunması klasik görüntü işleme teknikleri kullanılarak elde edilmiştir. Geliştirilen hareket modeli sayesinde DRİHA'nın harici konum ölçer sensörleri olmadan da otonom navigasyon yeteneğine kavuşturulmuş ve hedefin konumunda meydana değişiklikleri takip edebilmesi sağlanmıştır.

Kaynaklar (References)

- Kose, O. and Oktay, T., Simultaneous quadrotor autopilot system and collective morphing system design. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 92 (7), 1093-1100, 2020.
- Şahin, H., Kose, O. and Oktay, T., Simultaneous autonomous system and powerplant design for morphing quadrotors. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 94 (8), 1228-1241, 2022.
- Oktay, T., Celik, H., Turkmen, I., Maximizing autonomous performance of fixed-wing unmanned aerial vehicle to reduce motion blur in taken images. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 232 (7), 857-868, 2018.
- Liao, S. L., Zhu, R. M., Wu, N. Q., Shaikh, T. A., Sharaf, M., Mostafa, A. M., Path planning for moving target tracking by fixed-wing UAV, *Defence Technology*, 16 (4), 811-824, 2020.
- Nabavi, Y., Asadi, D., Ahmadi, K. Automatic Landing Control of a Multi-Rotor UAV Using a Monocular Camera. *J Intell Robot Syst* 105, 64, 2022.
- Xie, N., Yu, Y., Sun, C., An image-based decoupling controller of quadrotor for moving target tracking, *Journal of Control and Decision*, 1-12, 2022.
- Jabbari, H., Oriolo, G., Bolandi, H., Dynamic IBVS control of an underactuated UAV, In: *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Guangzhou-China, 1158-1163, 11-14 December 2012.
- Yang, J., Huo, X., Xiao, B., Fu, Z., Wu, C., Wei, Y., Visual servo control of unmanned aerial vehicles: An object tracking-based approach, In *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, Chongqing-China, 3524-3528, 28-30 May 2017.
- Rafique, M. A., Lynch, A. F., Output-feedback image-based visual servoing for multirotor unmanned aerial vehicle line following, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 56 (4), 3182-3196, 2020.
- Mebarki, R., Lippiello, V., Siciliano, B., Nonlinear visual control of unmanned aerial vehicles in GPS-denied environments, *IEEE Transactions on Robotics*, 31 (4), 1004-1017, 2015.
- Zheng, D., Wang, H., Chen, W., Wang, Y., Planning and Tracking in Image Space for Image-Based Visual Servoing of a Quadrotor, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65 (4), 3376-3385, 2018.
- Fu, G., Fang, L., Liu, L., Zhu, X., Wang, Y., An image-based visual servoing control method for UAVs based on fuzzy Logic, *Advances in Mechanical Engineering*, 15 (4), 2023.
- He, S., Wang, H., Zhang, S., Vision based autonomous landing of the quadrotor using fuzzy logic control, In *2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, Nanchang-China, 1943-1948, 3-5 June 2019.
- Wang, C., Zhao, R., Yang, X., Wu, Q., Research of UAV target detection and flight control based on deep learning, In *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD)*, Chengdu-China, 170-174, 26-28 May 2018.
- Sarıbaş, H., Visual object tracking by using deep neural networks, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir, 2020.
- Zhao, G., Chen, G., Chen, J., Hua, C., Finite-time control for image-based visual servoing of a quadrotor using nonsingular fast terminal sliding mode, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 18 (9), 2337-2348, 2020.
- Zhang, K., Shi, Y., Sheng, H., Robust nonlinear model predictive control based visual servoing of quadrotor UAVs, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 26 (2), 700-708, 2021.
- Chen, J., Hua, C., Guan, X., Image based fixed time visual servoing control for the quadrotor UAV, *IET Control Theory & Applications*, 13 (18), 3117-3123, 2019.
- Bertoni, M., Michieletto, S., Oboe, R., Michieletto, G., Indoor Visual-Based Localization System for Multi-Rotor UAVs, *Sensors*, 22 (15), 5798, 2022.
- Lee, H., Jung, S., Shim, D. H., Vision-based UAV landing on the moving vehicle, In *2016 International conference on unmanned aircraft systems (ICUAS)*, Arlington-USA, 1-7, 7-10 June 2016.

21. Pestana J., Sanchez-Lopez J. L., Campoy P., Saripalli S., Vision based gps-denied object tracking and following for unmanned aerial vehicles. In 2013 IEEE international symposium on safety, security, and rescue robotics (SSRR), Linkoping-Sweden, 1-6, 21-26 October, 2013.
22. De Mel, D. H., Stol, K. A., Mills, J. A., Eastwood, B. R., Vision-based object path following on a quadcopter for GPS-denied environments, In 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Miami-USA, 456-461, 13-16 June 2017.
23. Galvez-Serna, J., Vanegas, F., Gonzalez, F., Flannery, D., Towards a probabilistic based autonomous uav mission planning for planetary exploration, In 2021 IEEE Aerospace Conference (50100), Big Sky-USA, 1-8, 6-13 March 2021.
24. Akbari, A., Chhabra, P. S., Bhandari, U., Bernardini, S., Intelligent exploration and autonomous navigation in confined spaces. In 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Las Vegas-USA, 2157-2164, 2020.
25. Ortiz-Torres, G., Reyes-Reyes, J., Garcia-Beltrán, C. D., Medina, M. A., Astorga-Zaragoza, C. M., Estabilización Robusta y Estimación de Estados de un Quadrotor mediante una representación Takagi-Sugeno, In 2015 Congreso Nacional de Control Automatico (AMCA), Cuernavaca, Morelos-México, 59-64, 14-16 October 2015.
26. Lewis F. L., Yesildirek A., Liu K., Multilayer neural net robot controller with guaranteed tracking performance, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 7 (2), 388-399, 1996.
27. Lewis, F.L., Campos, J., Selmic, R., Neuro-fuzzy Control of Industrial Systems with Actuator Nonlinearities. Philadelphia, USA, 2002.
28. Chaumette F., Image moments: a general and useful set of features for visual servoing, IEEE Transactions on Robotics, 20 (4), 713-723, 2004.
29. Shirzadeh, M., Jabbari, H., Amirkhani, A., Jalali, A.A., Vision-based control of a quadrotor utilizing artificial neural networks for tracking of moving targets, Eng. Appl. Artif. Intell., 58, 34-48, 2017.
30. Corke P., Robotics, Vision and Control Fundamental Algorithms in MATLAB, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Germany, 2011.
31. Tahri O., Chaumette F., Point-based and region-based image moments for visual servoing of planar objects, IEEE Transactions on Robotics, 21 (6), 1116-1127, 2005.
32. Xu, S.S.D., Chen, C.C., Wu, Z.L., Study of nonsingular fast terminal sliding-mode fault-tolerant control, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62 (6), 3906-3913, 2015.
33. Jung, Y., Cho, S., Shim, D. H., A trajectory-tracking controller design using L1 adaptive control for multi-rotor UAVs, In 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Colorado-USA, 132-138, 9-12 June 2015.
34. Lee, J. O., Kang, T., Lee, K. H., Im, S. K., Park, J., Vision-based indoor localization for unmanned aerial vehicles, Journal of aerospace engineering, 24 (3), 373-377, 2011.