

PID KONTROL SİSTEMİ İLE QUADROTOR'UN GÜZERGAH TAKİP PERFORMANSININ MATLAB ÜZERİNDEN İNCELENMESİ

Arda Can İREN^{1*} İzzet HOŞ^{2*} Oğulcan ERDOĞAN^{3*}

1* Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

Acan.iren@mf.karaelmas.edu.tr

2* Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

izzet.hos@mf.karaelmas.edu.tr

3* Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

ogulcan.erdogan@mf.karaelmas.edu.tr

Öz

İHA(İnsansız Hava Aracı) yük taşıma sistemi, sivil ve askeri alanlarda sık sık kullanılan otonom olarak hareket eden insansız hava araçlarıdır. İHA'ların yük taşıma sisteminde kullanılmaları sırasında bazı problemler ortaya çıkabilmektedir. Bunlardan en önemlisi coğrafi koşulların elverişsiz olmasıdır. İHA'ların coğrafi koşulların elverişsiz olduğu bölgelerde başarılı olabilmesi için belirlenen bölgeden alınan faydalı yükün, belirlenen güzergah takip edilerek hedeflenen bölgeye minimum hata ile bırakılması amaçlanır. Bu çalışma ile birlikte, dört motorlu insansız hava aracı olarak bilinen quadrotorun güzergah kontrolünü gerçekleştirmek için PID kontrolör tasarımı ve bu hareketlerin analizi için sabit bir quadrotor test düzeneği yapılması amaçlanmıştır. Faydalı yük alma, taşıma ve bırakma görevi esnasında elde edilen sonuçlar PID denetleyici performansı ile kıyaslanarak analiz edilmektedir. Yapılan bu quadrotorun boyutları, kütlesi ve eksenlerindeki atalet momenti gibi fiziksel parametreler kullanılarak sistemin hazır matematiksel modeli Matlab SIMULINK ortamına taşınmıştır. Sistemin girişlerinden yola çıkarak çıkışlarının gözlemlenmesi, sistemin çalışma mantığının anlaşılması ve PID kontrolör tasarımına ön çalışma olması amacıyla gerçek sistem dışında Matlab ortamında çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Aracı, PID, Quadrotor, Yük Taşıması Sistemi, Güzergah Takibi

INVESTIGATION OF ROUTE TRACKING PERFORMANCE OF QUADROTOR WITH PID CONTROL SYSTEM ON MATLAB

Abstract

UAV(Unmanned Aerial Vehicle) the payload system is autonomously acting unmanned aerial vehicles that are frequently used in civil and military fields. Some problems may arise during the use of UAVs in the load transportation system. The most important problem is the unfavorable geographical conditions. In order for UAVs to

be successful in regions where geographical conditions are unfavorable, it is aimed to leave the useful load from the determined region to the targeted region with minimum error by following the determined route. With this study, it is aimed to design a PID controller to perform the trajectory control of the quadrotor, known as a four-engine unmanned aerial vehicle, and to make a fixed quadrotor test setup for the analysis of these movements. The results obtained during the payload pick-up, transport and drop-off task are analyzed by comparing with the PID controller performance. By using the physical parameters such as the dimensions, mass and moment of inertia on the axes of this quadrotor, the ready-made mathematical model of the system has been transferred to the Matlab SIMULINK environment. In order to observe the outputs of the system based on the inputs, to understand the working logic of the system and to be a preliminary study for the PID controller design, it was studied in the Matlab environment outside the real system.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, PID, Quadrotor, Load Transportation System, Route Tracking

1. Giriş

İHA'lar, uçuşu için üzerinde taşıyacağı bir pilota ihtiyaç duymayan, uzaktan denetlenebilen ve belirli amaçlar için geliştirilmiş, son teknolojinin kullanıldığı sistemlerdir. [1]. İnsansız hava araçları kısaca, küçük ve taşınabilir mikro İHA'lar, düşük irtifa yüksek dayanıklılık için kullanılan insansız hava araçları ve yüksek irtifa uzun dayanıklılık için kullanılan insansız hava araçları olarak sınıflandırılabilir [2]. İHA'lar gerçekleştirecekleri görevlere göre değişiklik gösterebilen boyut ve yapıda üretilmektedir. Belirlenen görevleri yerine getirebilmelerinde aerodinamik yapıları önemli rol oynamaktadır [3]. Günümüzde gerek sivil gerekse askeri alanlarda, insan hayatı için tehlike arz eden durumlarda, insanların erişemeyeceği noktalarda kullanılmaya başlayan İHA'ların, son yıllarda bunlara ek birçok sahada etkinliği fark edilmiştir. Bu yüzden, İHA sistemlerinin denetimi akademik bilimsel çalışmalarda incelenmiş ve İHA'ların hareketi ve denetimi ile ilgili pek çok yöntem geliştirilmiştir. İHA'lar milli istihbarat ve savunma sanayisinde, arama-kurtarma faaliyetlerinde, coğrafi yapının ulaşılamaz ve zor olduğu yerlerin güvenliğinde ve günlük hayattaki sivil amaçlı projelerde (zorlu parkurlardaki sporun takip edilmesinde, trafik akış ve denetiminde, kaçak yapılanmanın tespit edilmesinde vb.) sıklıkla kullanılmaktadır. Son 10 yıldır İHA'lar, otonom veya manuel olarak hareket edebilme, üzerindeki faydalı yükleri belirlenen hedeflere bırakabilme ve otonom iniş-kalkış yapabilme kabiliyetleri ile askeri ve sivil uygulamalarda tercih edilmektedir [4]. İHA'ların belirlenen görevleri yerine getirmek için izleyecekleri yörüngelerin planlanması ve İHA'nın bu yörüngeyi takip ederek görevini tamamlaması, stratejik veya askeri bölgelerdeki İHA faaliyetleri için hayati bir önem taşımaktadır. İHA'lar, içerdikleri ekipmanlar ve çalışma şekline göre değişiklik gösteren farklı kategorilerde bulunmaktadır. İHA'lar temel olarak sınıflandırmak gerekirse döner kanatlı ve sabit kanatlı olmak üzere

ikiye ayrılmaktadır. İHA'ların döner kanatlı ve sabit kanatlı yapısı Şekil 1.1 ve Şekil 1.2'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1



Şekil 1.2

Bu çalışmada, dört pervaneye sahip çok rotorlu (ÇR) İHA kullanılmıştır. Diğer İHA çeşitleriyle kıyaslandığında, daha iyi manevra kabiliyetine sahip olan dört pervaneye sahip ÇR İHA'lar, sabit pervaneler içerdiklerinden mekanik tasarımları, bakımları ve üretimi daha basittir. En az iki adet özdeş motor ile hareket ettirilmektedirler. Normal İHA sistemlerinde olduğu gibi, pervane dönüş kuvveti, helikopterin gövdesinde sapmaya yol açan momentler oluşturup, 3 İHA'yı dengeli duruma getirmek, sağa-sola veya ileri-geri süzülmesini düzenlemek için karmaşık kontrol sistemleri kullanılmaktadır. ÇR İHA'lar, içerdikleri motor sayısına göre Tricopter, Quadcopter, Hexacopter gibi farklı isimlerle de tercih edilmektedir [5,6].

2. BENZER ÇALIŞMALAR

Uçuş güzergâhı planlamayla alakalı olarak birçok algoritma literatürde kullanılmıştır. Bunlardan bazıları potansiyel alanlar, A* algoritması ve genetik algoritmadır. Literatürde en çok yayın yapılmış genetik algoritma, kolay uygulanabilen sezgisel yönlü bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma, doğal seçim ve uygun şekilde uyarlama ilkesine göre çalışır. Diğer algoritmalarla göre kıyaslandığında daha hızlı sonuçlar üretebilmektedir. Kolay anlaşılır olması, paralel çalıştırılabilmesi, iyileştirilebilmesi ve farklı şekillerde uygulanabilmesi ve bu sayede birçok problemde kolaylıkla güncellenerek uyarlanabilmesi açısından tercih edilmektedir. Buna örnek olarak Ermiş ve Pakkan'ın 2010 yılında yapmış oldukları çalışma gösterilebilir. Bu çalışmada, Türk Hava Kuvvetleri'nin ihtiyaçları kapsamında, İHA'ların hedef noktalara çevirim dışı görev planlaması en iyileme şekilde gerçekleştiren Genetik Algoritma tabanlı bir çözüm geliştirilmiştir. İki boyutlu hedef noktalarını, harita üzerinde gösterimi ve matlab simulink ortamında modellemesi yapılmıştır. Sistem girilen noktaları alıp İHA sayısı kadar (5,10,15 vb...) rota hesaplama kapasitesine sahiptir. Farklı parametreler için deneyler yapılmış ve çıkan sonuçlar karşılaştırılmalı olarak yorumlanmıştır.

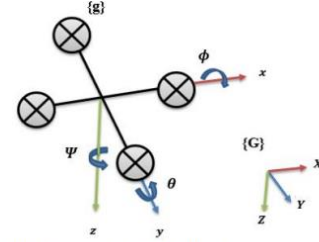
3. SİSTEM TANIMI

Quadcopter, ileri-geri-sağ-sol hareket yönlerine sahip olan dikey iniş ve kalkış yapabilen dört rotorlu araçlardır. Aracın kalkışı ve hareketi dört pervane tarafından üretilen itki kuvveti ile sağlanmaktadır. Quadcopterde bulunan pervanelerin karşılıklı bir çifti saat yönünde dönerken diğer karşılıklı pervane çifti de saat yönünde dönmektedir. Pervaneler arasındaki dönme hızlarının farklılıkları değişken kuvvete ve torka bunlar da aracın hareketine sebep olur. Motorları kontrol etmek için kullanılan PID kontrol yöntemi Oransal, İntegral ve Türev için kullanılan bir kısaltmadır. Sistemdeki hatayla çarpılan bu terimler üç temel matematiksel fonksiyonu kullanmaktadır. PID kontrol yönteminde amaç sistemin görevi ne olursa olsun hatayı en aza indirmek ve sistemin kararlı bir şekilde çalışmasını sağlamaktır. Esas olarak bu yöntemde sistem girdisi alınır, davranış ya da sonuç sapması belirlenerek çıkışın en yüksek doğruluk değeri elde edilmesi sağlanır. Quadrotorda uçuş için kullanılan temelde iki konfigürasyon vardır. Bunlar çapraz tip (x) ve artı tip (+) şeklindedir.

3.1 Sistem Modeli

Dört Pervaneli İHA'nın Sistem Modeli (System Model of UAV) Dört pervaneli İHA için, Euler yuvarlanma, yunuslama ve sapma açıları gövde {g} ve genel çerçeve {G} üzerinde durum denklemleri X, Y, Z (kuzey, doğu, aşağı) yönü, x, y, z gövde (kuzey, doğu, aşağı) yönü ve ϕ , θ , ψ (yuvarlanma,

yunuslama ve sapma) açıları Şekil 1'de gösterilmektedir[7].



Şekil 1. Dört pervaneli İHA'nın dönme hareketi (Rotational movement of quadrotor UAV)

Dört Pervaneli İHA'nın denetiminde kullanılan hareket denklemleri (1) ve (2)

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{Z} \end{bmatrix} = \frac{-1}{m} \begin{bmatrix} K_{dx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{dy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{dz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} - \frac{1}{m} \begin{bmatrix} c(\phi)s(\theta)c(\psi) + s(\phi)s(\psi) \\ c(\phi)s(\theta)s(\psi) - s(\phi)c(\psi) \\ c(\phi)c(\theta) \end{bmatrix} u_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s(\phi)t(\theta) & t(\phi)t(\theta) \\ 0 & c(\phi) & -s(\phi) \\ 0 & s(\phi)/c(\theta) & c(\phi)/c(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2)$$

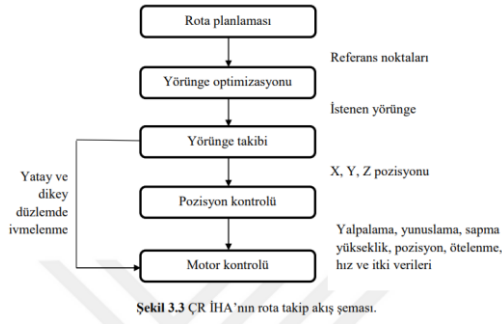
$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(I_z - I_y)}{I_x} qr \\ \frac{(I_x - I_z)}{I_y} rp \\ \frac{(I_y - I_x)}{I_z} pq \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -J_{Tp} \\ J_{Tp} \\ 0 \end{bmatrix} \Omega + \begin{bmatrix} \frac{l}{I_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l}{I_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ile ifade edilmektedir (Ryll, vd., 2014). Eşitlik (1)'de u_1 , motorların toplam itkisi; m , çok rotorlu İHA'nın kütlesine; ϕ , yalpalama açısına; θ , yunuslama açısına; ψ , sapma açısına; s , sinus fonksiyonuna; c , kosinüs fonksiyonuna ve g yerçekimi ivmesine karşılık gelmektedir. Eşitlik (2)'de p , q , r sırasıyla yalpalama, yunuslama ve sapma açısal hızlarını ifade etmekte olup t , tanjant fonksiyonunu belirtmektedir. Eşitlik (3)'de ise I_x , I_y ve I_z , her bir eksen etrafındaki eylemsizlik momentine; J_{Tp} , motorun dönmelerinden kaynaklanan eylemsizlik momentine; u_2 , yalpalama açısı girdisine; u_3 , yunuslama açısı girdisine; u_4 , sapma açısı girdisini ifade etmektedir. Bu benzetim çalışmasında, Eşitlik (1-3)'de çok rotorlu İHA'nın kütlesi (m) ile eylemsizlik moment katsayıları yük alma ve bırakma sırasında değişim göstermektedir.

3.2 Rota Takibi

ROTA TAKİBİ ÇR İHA'ların, insansız olarak hareketini sağlamak, istenen rotaya en kısa sürede gitmesini ve minimal düzeyde enerji kullanımını amaçlamak açısından, rota takibi yapması ve istenen rota üzerinde hareketini sağlaması büyük önem teşkil etmektedir. Rota takibinin yapılması için ya ÇR İHA'nın önceden belirtilen güzergâhta ilerlemesi ya da kendi rotasını belirli algoritmalarla ve yöntemlerle oluşturmaları gerekmektedir. ÇR

İHA'nın rotayı takip etmesi ile ilgili literatürde pek çok çalışma bulunmaktadır [8-10].



ÇR İHA'nın rota takibiyle ilgili akış şeması Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Buna göre, ilk olarak İHA'nın önce gideceği rota belirlenmelidir. Bahsedilen rota üzerinden referans noktaları belirlenir. Belirlenen noktalar üzerinden yörünge optimizasyonu yapılır ve yörünge takibinin yapılması için X, Y, Z pozisyonu belirlenerek, gövde koordinatı üzerinden x,y,z pozisyonuna çevrilir. Bu da, yalpalama, yunuslama, sapma açılarını oluşturarak yükseklik, pozisyon, ötelenme ve hız değerlerinin ayarlandığı motor kontrolü sağlanır ve yatay- dikey düzlemde ivmelenme sağlanır. Tüm rota takip sistemlerinde referans noktaları belirlenmekte ve İHA'nın referansı takip etme oranı incelenmektedir. Buna göre rota takibinde x_d, y_d, z_d referans rotayı belirleyecek olursa x, y, z İHA'nın rotasını göstermektedir. Bu durumda hata,

$$e = \sqrt{(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2 + (z_d - z)^2}$$

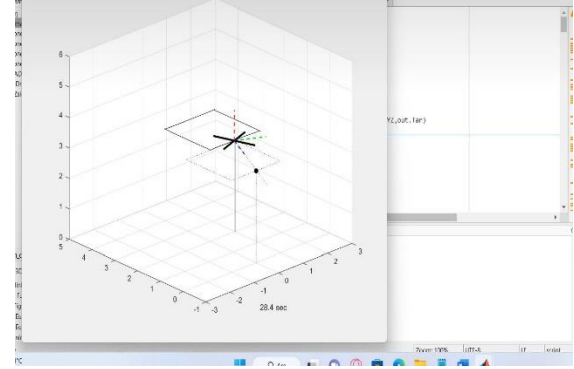
ile elde edilecektir. Ayrıca İHA hızı ve görevi tamamlama süreleri önemlidir. Bu çalışmada, PID ve uyarlamalı PID denetleyici ile ÇR İHA'nın rota takip performansı incelenmiştir. ÇR İHA'nın x, y ve z düzlemleri ve yalpalama (ϕ)-yunuslama (θ)-sapma (Ψ) açıları ve p, q ve r için P, I ve D denetleyici katsayıları sırasıyla Çizelge 5.2 'de tekrar sunulmaktadır.

Çizelge 5.2 PID denetleyici katsayıları.

PID no	$x, y; K_p, K_I, K_D$	$z; K_I$	$p, q, r; K_p, K_I, K_D$	Ψ, K_p
PID1	0.30 0.10 0.20	0	3.3 0.2 0.002	6
PID2	0.35 0.20 0.40	0	3.3 1.8 0.002	14
PID3	0.30 0.25 0.20	0	3.3 0.2 0.010	10
PID4	0.25 0.30 0.20	8	3.3 1.8 0.010	10
PID5	0.25 0.10 0.20	0	3.3 1.8 0.002	6
PID6	0.25 0.25 0.30	4	2.1 1.8 0.018	14

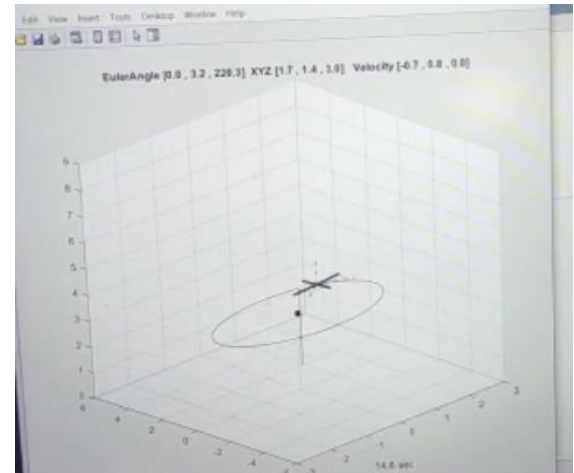
PID ile quadrotorun güzergah takibi konusunda hedeflenen olarak belirli güzergah önerileri belirlenmiştir. Bunlardan ilki quadrotorun kare yörünge çizmesi ve ihtiyaç duyulan işlemi

gerçekleştirmesidir. Bu konuda MATLAB Simulink üzerinden yapılan animasyon aşağıdaki gibidir.



Şekil 5.3

ÇR İHA'nın kare yörüngede MATLAB ortamındaki benzetimi Şekil 5.3'de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere, 0'a 0 noktası başlangıç noktası olarak kabul edilmiş ve ÇR İHA'nın üç boyutlu rota takibi gösterilmiştir. ÇR İHA'nın hareket denklemleri kullanılarak Çizelge 5.2'de verilen PID denetleyici parametrelerinden oluşturulan modeli, MATLAB ortamına aktarılmış ve benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bir başka simülasyon olarak İHA (İnsansız Hava Aracı)'nın daire yörünge etrafında hedeflenen işi yapması hedeflenmiştir. Bunun için kareden bağımsız hesaplamalar ayrı bir şekilde yapılmış ve aşağıdaki gibi bir simülasyon gözlemlenmiştir.

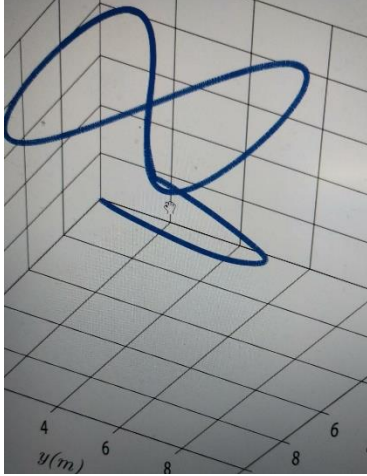


Şekil 5.4

Dairesel geometriye sahip rota takibinde İHA'nın PID1 ve Uyarlamalı PID yörünge takibi Şekil 5.4'de görülmektedir. Burada Uyarlamalı PID için kalkış durumunda PID2 kullanılırken düz yol için PID3, keskin dönüş de PID6 ve dar açı hareketinde PID5 kullanılmaktadır. Dairesel geometride ÇR İHA kalkışı yapmakta ve sonrasında x düzleminde 0 noktasından 2 noktasına hareket etmektedir. 2

noktasından yumuşak dönüşü yapıp, rotayı 360o dönerek tamamlamaktadır.

Son şekil olarak sistemde sonsuz yörünge şeklinde yörüngesini tamamlayan bir İHA tasarlanması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda elde edilen sonucumuz şekil 5.5 de gösterilmiştir.



4. İHA DENETİM SİSTEMLERİ

Bu bölümde, PID denetim ve uyarlanabilir PID denetimden genel hatlarıyla bahsedilmekte ve uyarlanabilir PID kestirim yöntemine değinilmektedir. Ayrıca ÇR İHA'nın birim basamak tepkisi incelenerek, uyarlamalı PID ve PID parametrelerinin rota takibindeki etkisi incelenmektedir.

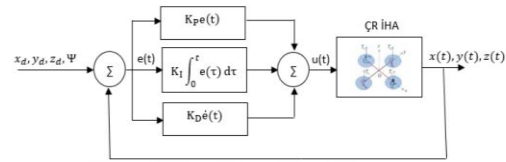
4.1 PID DENETİM

En yaygın denetim sistemi tipi Oransal-İntegral-Türev (PID) kontrol sistemidir [11]. PID denetleyicisi kapalı döngü geri bildirim sistemi olarak bilinmektedir. Kontrol sistemi, gerçek ve istenen durum arasındaki farkı hesaplar ve bir hata değeri üretir. ÇR İHA üzerinde bulunan sensörden çıkan ölçüm değerleri, bu hata sinyalini hesaplamak için geri beslenerek istenen değer ile ölçülen değer arasındaki dengeyi sağlar [12]. PID kontrol sisteminin çıkışı, sistemi istenen duruma yaklaştıracak bir kontrol değeridir. PID denetleyicisi kullanarak, ÇR İHA'nın havada süzülme, yükseklik ve istenen yöne hareketini sağlamak mümkündür [13]. PID denetleyicisi, parametre kazançlarının kolay ayarlanması, tasarımı ve dayanımı açısından avantajlıdır; ancak, matematiksel model ile ilişkilendirilen doğrusal olmayan ve kesin durumlar içermeyen ÇR İHA modellerinde, İHA'nın hareketini ve performansını sınırlandırmaktadır. PID denetleyicisiyle denetlenen İHA modellemesi Şekil

4.1'de görülmekte ve denetlenen işaret Eşitlik 4.1'deki denklikle edilmektedir. Burada, u : kontrol girişi, K_P : oransal kontrol kazancı, K_I : integral kontrol kazancı, K_D : türevsel kontrol kazancı ve t : anlık zaman değişkeni olarak ifade edilmektedir.

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \dot{e}(t)$$

Şekil 4.1'de görülen blok diyagramında, $x_d(t)$, $x(t)$: t zamanı ve x durumundaki istenen değer ve elde edilen değer, $y_d(t)$, $y(t)$: t zamanı ve y durumundaki istenen değer ve elde edilen değer, $z_d(t)$, $z(t)$: t zamanı ve z durumundaki istenen değer ve elde edilen değer, $e(t)$: t zamanındaki konum istenen değer ile elde edilen değer arasındaki fark hata değeri, $\dot{e}(t)$: t zamanındaki türevsel hata değeri ile ifade edilmektedir.



Şekil 4.1 ÇR İHA'nın PID blok şeması.

Çizelge 4.1 PID denetimde yükseltlen parametrelerin etkisi.

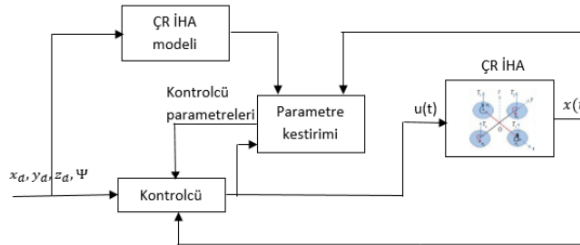
Kapalı Devre Cevabı	Yükselme Zamanı	En Yüksek Aşım	Yerleşme Zamanı	Kalıcı Durum Hatası	Kararlılık
Yükselen K_P	Azalma	Yükselme	Biraz yükselme	Azalma	Düşüş
Yükselen K_I	Biraz azalma	Yükselme	Yükselme	Çok azalma	Düşüş
Yükselen K_D	Biraz azalma	Azalma	Azalma	Çok az değişiklik	İyileşme

Şekil 4.1 ve 4.2'de ÇR İHA'nın PID denetleyici blok şeması gösterilmektedir. PID denetleyici ile başarılı sonuç elde etmek için uygun parametrelerinin seçilmesi önem arz etmektedir. Çizelge 4.1'de PID denetleyicide K_P , K_I ve K_D durum değişken parametrelerinin kapalı devre cevabına etkisi gösterilmektedir. Seçilen parametreler, sistemin kalıcı duruma geçme hızını ve kalıcı duruma geçerken yaşanan aşım miktarının büyüklüğünü etkilemektedir. Seçilen parametrelerin devre cevabına etkisi Çizelge 4.1'de görülmektedir. Bu çalışmada referans olarak belirlenen rotanın takibini sağlayabilmek için sistem kararlılığını dikkate alarak uygun PID parametreleri elde edilmekte, özellikle kalıcı durum hatasını azaltacak PID denetimi yapılmaktadır. PID parametreleri ÇR İHA'nın motor sürücü devrelerinde gömülü olarak bulunmaktadır.

4.2 UYARLAMALI PID DENETİM

Uyarlamalı PID denetimi, adından da anlaşılacağı üzere yeni durumlara uyum sağlamak için sistem davranışının değiştirilmesini öngören bir kontrol yöntemidir. Uyarlamalı PID denetimi, yeni durumlara uyum sağlayacağı için, doğası gereği

doğrusal olmayan bir yapı bulundurmaktadır. Klasik kontrol tasarımının yapılabilmesi için kontrol edilecek sistemin karakteristik ve davranışlarının bilinmesi gerekmektedir. Sabit kontrol parametrelerinin de tüm çevresel ve işletme şartları için uygun olması gerekmektedir. Buna rağmen birçok sistem, değişen çevresel ve işletme şartlarında karakteristiklerinin çıkarılabilmesi için, sistemde bulunan tespit edilemeyen kısımlar yüzünden uygun değildir. Bu sebepten dolayı bir ayarlama ve kalibrasyon mekanizmasına ihtiyaç duymaktadırlar [14]. Uyarlamalı PID denetim KP, KI ve KD parametrelerinin değişikliklerini amaçlamaktadır. ÇR İHA'nın uyarlamalı PID denetleyici blok şeması Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Sistem modeline dayalı İHA'nın konum hareketleri ile birlikte yönelme ve sapma performansının ve hızının denetleyici katsayılarını düzenleyerek belirlenmesi amaçlanmaktadır. Uyarlamalı PID denetim, genel olarak üç temel aşama içermektedir. Bunlar; sistem modelleme, kontrolcü tasarımı ve kontrolcünün sisteme uyarlanmasıdır [13]. Sistem modelleme kısmı, matematiksel gösterim kısmıdır. ÇR İHA'nın matematiksel modellemesinin sisteme uyarlanmasıyla oluşturulmaktadır. Daha sonrasında, sistem gözlemlenerek davranışlarına bakılır. Gözlemlenen sistemin giriş ve çıkış sinyali parametrelerinden bir model elde edilmektedir. Bahsedilen işleme 'parametre kestirimi' denilmektedir [14].



Şekil 4.2 ÇR İHA'nın uyarlamalı PID blok şeması.

Bu çalışmada, ÇR İHA incelenmekte olup, hareket denetimi gerekli itme denetim işaretlerinin elde edilmesi ile pervane hızları denetlenmektedir. ÇR İHA'nın dinamik modeli Eşitlik 3.21 ve 3.22'de bahsedilen sürtünme kuvvetleri, yerçekimi etkilerinin ihmal edilmesi durumunda;

$$\ddot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} c(\phi)s(\theta)c(\psi) + s(\phi)s(\psi) \\ c(\phi)s(\theta)c(\psi) - s(\phi)s(\psi) \\ c(\phi)c(\theta) \end{bmatrix} \mathbf{u}_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}$$

$$\ddot{\Phi} = \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}$$

olarak yazılır. Burada, $\mathbf{X}=[x, y, z]$ Tpozisyon vektörü, $\Phi=[\phi \ \theta \ \psi]$ T İHA'nın yalpalama, yunuslama ve sapma açılarını içeren davranış vektörüdür. Euler açılarının yavaş değişimi Eşitlik (4.2) ve (4.3) ile doğrusallaştırılırsa, elde edilen referans model, \mathbf{X}_m , Φ_m durum değişkenleri, \mathbf{X}_d , Φ_d hedef değişkenler olacak şekilde,

$$\dot{\mathbf{X}}_m = \dot{\mathbf{X}}_d + K_X 2(\mathbf{X}_d - \mathbf{X}_m) + K_X 1(\mathbf{X}_d - \mathbf{X}_m) \quad (4.4)$$

$$\dot{\Phi}_m = \dot{\Phi}_d + K_\Phi 2(\Phi_d - \Phi_m) + K_\Phi 1(\Phi_d - \Phi_m) \quad (4.5)$$

Dinamik denklemleri yazılır [30]. Burada; $K_X 2$, $K_X 1$, $K_\Phi 2$ ve $K_\Phi 1$ kazanç matrisleridir. Buna göre, pozisyon hata ve davranış hata vektörleri;

$$e\mathbf{X} = \mathbf{X} - \mathbf{X}_m, e\Phi = \Phi - \Phi_m \quad (4.6)$$

olur. Adaptasyon kuralları Lyapunov tabanlı kararlı denetim işaretlerini elde edecek şekilde,

$$\dot{\mathbf{Y}}\mathbf{X} = K_X(\dot{e}\mathbf{X} + K_X 1e\mathbf{X}) \quad (4.7) \quad \dot{\mathbf{Y}}\Phi = K_\Phi(\dot{e}\Phi + K_\Phi 1e\Phi) \quad (4.8)$$

olarak verilirse,

$$\dot{\Theta} = -[e\mathbf{X} + \varphi\mathbf{X}^T \mathbf{Y}\mathbf{X} + K_\Phi 2 + K_X 2(\dot{e}\mathbf{X} + K_X 1e\mathbf{X})] \quad (4.9)$$

$$\dot{\Theta} = -[e\Phi + \varphi\Phi^T \mathbf{Y}\Phi + K_\Phi 2(\dot{e}\Phi + K_\Phi 1e\Phi)] \quad (4.10)$$

olarak elde edilir. Burada, Θ denetim işareti, u_1 ile birlikte ϕ_d , θ_d yalpa ve yunuslama hedef işaretlerini sağlarken, u denetim işareti, u_2 , u_3 , u_4 işaretlerini verir [31]. Ayrıca,

$$K_X = \alpha\mathbf{X}\varphi\mathbf{X}, K_\Phi = -\alpha\Phi\varphi\Phi \quad (4.11)$$

için $\alpha\mathbf{X}$, $\varphi\Phi$ adaptasyon hızını belirleyen pozitif tanımlı matrisler ve

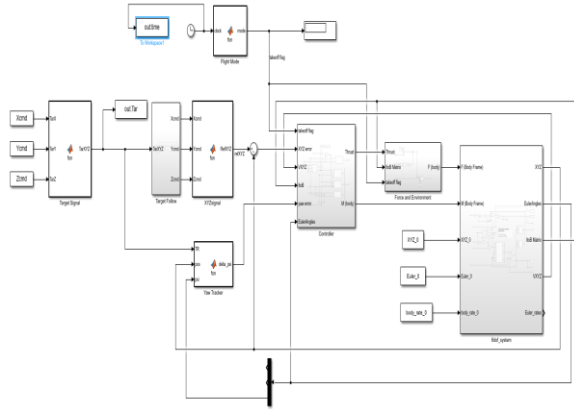
$$\varphi\mathbf{X} = \begin{bmatrix} K_{X1}\dot{e}_X - \ddot{\mathbf{X}}_m & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (4.12)$$

$$\varphi\Phi = \text{diag}(K_{\Phi 1}\dot{e}_\Phi - \ddot{\Phi}_m) \quad (4.13)$$

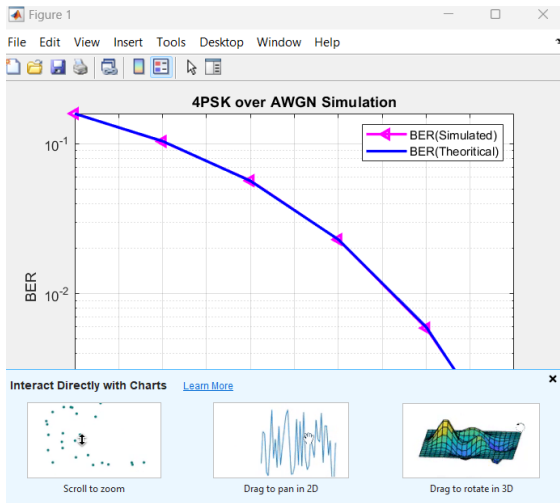
olarak tanımlanmaktadır. (4.9) ve (4.10) eşitliklerindeki denetim işaretleri uyarlamalı PID katsayılarını içermektedir.

4.3 PID Tasarımı

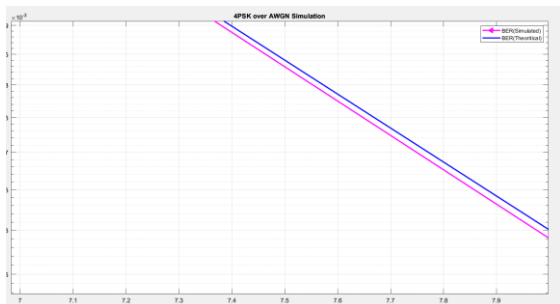
Bu hesaplamalardan yararlanarak MATLAB Simulink üzerinden yapılmış olan PID devre şeması aşağıdadır.



PID kontrolör tasarımı ile quadrotorun güzergah takip performansının hedeflenen ölçüde olup olmadığını kontrol etmek üzerinde gerekli simülasyonlar MATLAB üzerinden yapıldı. Bu bağlamda elde edilen hata verileri aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Bu proje ile hedeflenen hata payını minimize etmek konusunda hedeflenen başarıya yaklaşmamızın yanı sıra tur sayısının arttıkça aradaki hata payının bununla orantılı olarak artışı aşağıdaki resimde görülmektedir.

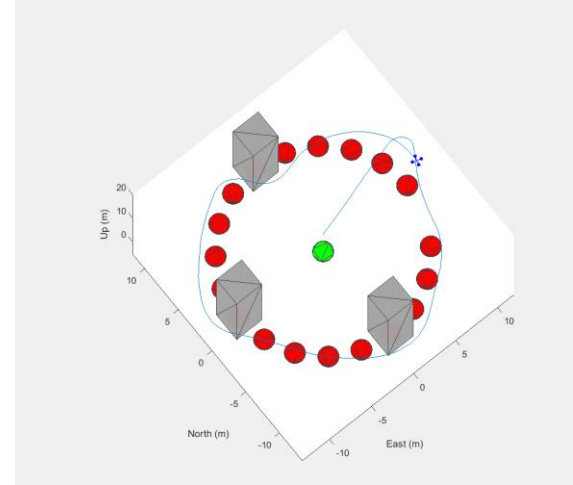


4.4 PID Kontrolörün Karşısına Engel Çıkması Durumunda Verdiği Tepkileri Gösteren Matlab Simulink Çıktıları

Bu doğrultuda elde edilen daire çizdirme sonucu aşağıda gösterilmiştir.

Bu sonuç elde edilirken İHA'mız engeli her gördüğünde önce engeli bakmış daha sonra da engeli çarpmamak adına karar verip engelin etrafından dönmüştür. Ayrıca simülasyon programımızı her açtığımızda ise karşımıza farklı bir engel kombinasyonu çıkmış ve bu doğrultuda hedeflenen sonuçlara ulaşılmıştır.

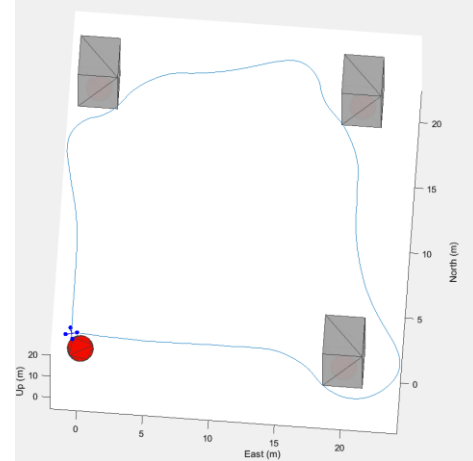
İlk olarak elde edilen dairesel yörünge çizdirme amacının çıktısı aşağıda gösterilmiştir.



Bu sonuca ulaşılmasında kullanılan waypoints bilgileri aşağıda verilmiştir.

3.09 9.51 -7; -5.88 8.09 -7; -8.09 5.88 -7; -9.51 3.09 -7; -10 0 -7; -9.51 -3.09 -7; -8.09 -5.88 -7; -5.88 -8.09 -7; -3.09 -9.51 -7; 0 -10 -7; 3.09 -9.51 -7; 5.88 -8.09 -7; 8.09 -5.88 -7; 9.51 -3.09 -7; 10 0 -7; 9.51 3.09 -7; 8.09 5.88 -7; 5.88 8.09 -7; 3.09 9.51 -7; 0 10 -7];

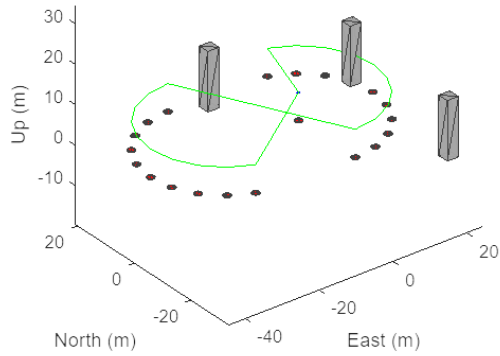
İkinci olarak elde edilen kare yörünge çizdirme amacının çıktısı aşağıda gösterilmiştir.



Bu sonuca ulaşılmasında kullanılan waypoints bilgileri aşağıda verilmiştir.

```
Waypoints = [InitialPosition; 0 20 -7; 20 20 -7; 20 0 -7; 0 0 -7;]
```

Üçüncü olarak elde edilen sonsuz yörünge çizdirme amacının çıktısı aşağıda gösterilmiştir.



Bu sonuca ulaşılmasında kullanılan waypoints bilgileri aşağıda verilmiştir.

```
Waypoints = [InitialPosition; 19.02 6.18 -7; 16.18 11.76 -7; 11.76 16.18 -7; 6.18 19.02 -7; 0 20 -7; -6.18 19.02 -7; -11.76 16.18 -7; -16.18 11.76 -7; -19.02 6.18 -7; -20 0 -7; 20 -20 -7; 19.02 -26.18 -7; 16.18 -31.76 -7; 11.76 -36.18 -7; 6.18 -39.02 -7; 0 -40 -7; -6.18 -39.02 -7; -11.76 -36.18 -7; -16.18 -31.76 -7; -19.02 -26.18 -7; InitialPosition;]
```

5. KAYNAKLAR

[1] Demiryürek A (2018) Bir Dört pervanelinin Modellenmesi ve Denetimi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 132 s.

[2] Ercan C, Gencer C (2013) İnsansız Hava Sistemleri Rota Planlaması Dinamik Çözüm Metodları ve Literatür Araştırması, Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 1 (2): 51-72.

[3] Demir B E, Bayır R and Duran F (2016) Real-time Trajectory Tracking of an Unmanned Aerial Vehicle Using a Self-tuning Fuzzy Proportional Integral Derivative Controller, International Journal of Micro Air Vehicles, 8 (4): 252-268.

[4] Altan A, Köksal K ve Hacıoğlu R (2017) Vektör Alan Kılavuzu Yöntemi ile Görsel Çizgi Takibi için İnsansız Hava Aracı Üzerindeki Yalpanın Model Öngörülü Denetimi, Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 7 (1): 218-227.

[5] Köksal K, Sürücü D, Sürücü M and Hacıoğlu R (2014) Visual Line Tracking with Vector Field Guidance for UAV. 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 22nd, ISBN: 978-1-4799-4874-1, IEEE, e-book, 646-649.

[6] Sürücü D, Sürücü M, Köksal K and Hacıoğlu R (2015) Visual Tracking and Control of Unmanned Aerial Vehicle. 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Malatya, 2015 23th, ISBN: 978-1-4673-7386-9 IEEE, e-book, 1849-1852.

[7] Belge, E. , Altan, A. & Hacıoğlu, R. (2021). UYARLAMALI BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ TABANLI İNSANSIZ HAVA ARACI (İHA)'NIN ROTA TAKİBİ VE FAYDALI YÜK TAŞIMA PERFORMANSI . Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi , 9 (1) , 116-125 . DOI: 10.21923/jesd.733266

[8] [23] Hernandez A, Murcia H, Copot C and Keyser R D (2014) Model Predictive PathFollowing Control of an AR. Drone Quadrotor, Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático, México, 618-623.

[9] Can K ve Başçı A (2016) Dört Rotorlu bir İHA'nın Geri Adımlamalı Kontrolcü ile Gerçek Zamanlı Yörünge Kontrolü, Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6 (3): 77-85.

[10] Köksal K (2017) İnsansız Hava Araçlarında Görüntü İşleme ile Rota Tespiti ve Otonom Takibi, Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Zonguldak, 45 s.

[11] John S (2013) Artificial Intelligent-Based Feedforward Optimized PID Wheel Slip Controller. AFRICON, 12 September 2013, Pointe-Aux-Piments, 1-6.

[12] Li J and Li Y (2011) Dynamic Analysis and PID Control for a Quadrotor, International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 7-10 August 2011, 573-578.

[13] Yurdakul S S ve Eker İ (2013) Kendinden Ayarlamalı PID Kontrol ve Deneysel Uygulamaları, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, Çukurova Ü.