

Bir Hava Robotu İçin Geliştirilen Genetik Ayarlı LQR Kontrolörün Performansının Değerlendirilmesi

Ali Tahir KARASHAHİN^{1,2*} 

¹ Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, Karabük, Türkiye

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

Geliş Tarihi: 26.12.2023

Kabul Tarihi: 11.06.2024

Yayın Tarihi: 31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Hava Robotu,
LQR Kontrolör,
Genetik Algoritma,
Bulanık PID,
Yörünge Takibi.

ÖZET

Hava robotları erişilebilir, basit ve üstün kabiliyetlerinden dolayı birçok uygulama alanında geniş yer bulmaktadır. Geniş bir yelpazede kullanılan hava robotlarından farklı beklentiler istenmektedir. Uygulama alanlarına özel oluşan bu beklentilere cevap verebilmek için hava robotlarında kullanılan geleneksel kontrolör tasarımlarında birtakım değişikliklere gidilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada bir hava robotunun yörünge takibi için genetik ayarlı ve integral etkisine göre çalışan doğrusal karesel regülatör (LQR) kontrolörü geliştirilmiştir. Bu kontrolörün performansını karşılaştırmak için LQR ve bulanık oransal-integral-türevsel (FPID) kullanılmıştır. Geliştirilen ve kullanılan kontrolörler model-tabanlı ve hibrit kontrolörler olarak ifade edilmektedir. Hava robotu olarak Parrot AR. Drone 2.0. kullanılmıştır. Belirtilen hava robotu MATLAB/Simulink ortamında 6 serbestlik derecesi (DOF) ile modellenmiştir. Geliştirilen kontrolörlerin performansları sekiz eğrisinin referans olarak takip edilmesi esnasında oluşan hata değerine göre değerlendirilmiştir. Hata değerleri ortalama kare hata karekökü (RMSE) kriterine göre incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre standart LQR kontrolör en yüksek RMSE hata değerini üretmiştir. Genetik ayarlı ve integral etkisine göre tasarlanan LQR kontrolör, standart LQR kontrolöre göre %43,22 FPID kontrolörüne göre %22,99 oranında daha başarılı sonuçlar elde etmiştir. MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarına göre sekiz eğrisi yörünge takibinde genetik ayarlı LQR kontrolörü daha başarılı sonuçlar elde ettiği gözlemlenmiştir.

Performance Evaluation of a Genetically Tuned LQR Controller for an Aerial Robot

Article Info

Received: 26.12.2023

Accepted: 11.06.2024

Published: 31.12.2024

Keywords:

Aerial Robot,
LQR Controller,
Genetic Algorithm,
Fuzzy PID,
Trajectory Tracking.

ABSTRACT

Aerial robots are widely used in many application areas due to their accessibility, simplicity and superior capabilities. Different expectations are required from aerial robots used in a wide range of applications. In order to meet these application-specific expectations, it is necessary to make some changes in the traditional controller designs used in aerial robots. In this study, a linear quadratic regulator (LQR) controller with genetic tuning and integral effect is developed for trajectory tracking of an aerial robot. LQR and fuzzy proportional-integral-derivative (FPID) are used to compare the performance of this controller. The developed and used controllers are referred to as model-based and hybrid controllers. Parrot AR. Drone 2.0. is used as an aerial robot. The aerial robot is modeled in MATLAB/Simulink environment with 6 degrees of freedom (DOF). The performances of the developed controllers are evaluated according to the error value during the tracking of the eight curve as a reference. The error values are analyzed according to the root mean square error (RMSE) criterion. According to the results obtained, the standard LQR controller produced the highest RMSE error value. The LQR controller designed according to genetic tuning and integral effect obtained 43.22% better results than the standard LQR controller and 22.99% better results than the FPID controller. According to the simulation results in MATLAB/Simulink environment, it is observed that the genetically tuned LQR controller achieves better results in eight curve trajectory tracking.

To cite this article:

Karashahin, A.T. (2024). Bir hava robotu için geliştirilen genetik ayarlı LQR kontrolörün performansının değerlendirilmesi. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(3), 468-482. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.59>

*Sorumlu Yazar: Ali Tahir Karashahin, alitalhir.karashahin@erbakan.edu.tr
(Yazarın mevcut kurumu Necmettin Erbakan Üniversitesi'dir.)



GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsansız hava araçları arama-kurtarmadan kargo taşımacılığına, tarımsal uygulamalardan askeri ve sivil operasyonlara kadar geniş bir yelpazede kullanılan bir robotik sistem olarak karşımıza çıkmaktadır [1-5]. Hava robotları hem basit, ekonomik, sürdürülebilir olması hem de uygulamaya göre uyarlanabilir esneklikte olmasından dolayı birçok alanda her geçen gün kullanım oranlarını artırmaktadır. Çok pervaneli hava robotları bu zorlu görevlerini yerine getirirken genellikle dört pervaneli olacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu dört pervanelinin farklı kullanım konfigürasyonlarına göre öteleme ve dönme hareketlerini elde etmektedir. Belirtilen özelliklerden dolayı yetersiz tahrikli olması ve doğrusal olmayan özellikleri barındırmasından dolayı hava robotlarında kontrolör geliştirilmesi zorlu bir problem olarak gösterilmektedir.

Hava robotları için geliştirilen kontrolörler model-tabanlı ve modelden-bağımsız olacak şekilde tasarlanmaktadır. Tasarlanan model-tabanlı kontrolörler ise doğrusal ve doğrusal olmayan olarak sınıflandırılmaktadır. Hava robotları gibi doğrusal olmayan karakteristiğe sahip sistemler için kayan kipli kontrol [6] ve geri adımlamalı kontrol [7] tekniklerine göre kontrolörler tasarlanmıştır. Fakat, hava robotları için doğrusal olmayan kontrolör geliştirmenin birtakım zorlukları bulunmaktadır. Geniş bir uygulama alanı ve operasyon çeşitliliğine sahip olan hava robotlarının çalışma ortamlarından oluşan etkilerinin modellenmesi her zaman mümkün olamamaktadır. Bu tarz uygulama esnasında oluşan ortam değişkenlerine uyum sağlaması için hava robotlarında adaptif kontrol teknikleri kullanılmaktadır [8-10]. Fakat adaptif kontrol teknikleri de yüksek oranda sistem modeline bağlı olmaları bu kontrolörlerin dezavantajı olarak ifade edilmektedir.

Pekiştirmeli öğrenme teknikleri de kontrol problemlerinde sıklıkla kullanılmaya başlayan bir diğer yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır. Pekiştirmeli öğrenme (RL), tanımlanan ajan üzerinden sadece tecrübeleri yoluyla öğrenme gerçekleştirebilir veya eylemlerinin sonuçları hakkında tahminlerde bulunarak öğrenebileceği bir yaklaşım sergilenmektedir. Hava robotları için tasarlanan RL mekanizmaları sistem modelini öğrenebilecek şekilde de kurgulanabilirken verilen görevi gerçekleştirecek politikayı modelden bağımsız şekilde öğrenebilecek potansiyele de sahiptir. Hava robotundaki itme kuvveti üreten motorlardan birisi veya birkaçının bozulması durumunda görevine devam edebilecek bir mekanizma RL tabanlı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir [11]. Otonom hava robotu yarışma senaryosun için geliştirilen pekiştirmeli öğrenme tabanlı kontrol mekanizması optimal kontrolöre göre kendisine verilen bir hedefi daha iyi optimize ederek daha başarılı sonuçlar üretmiştir [12]. Fakat pekiştirmeli öğrenme stratejisi sonucunda öğrenilen politika, her zaman kararlı sonuçlar üreteceğini garanti edememektedir.

İnsanın muhakeme yeteneğini kontrolör geliştirme sürecine dahil eden bulanık mantık kontrolörü (FLC), hava robotlarında tercih edilen bir başka yaklaşım olarak kullanılmaktadır. Aralık değerli tip-2 FLC, hava robotlarının çalışma ortamlarındaki bozucu etki veya sistem dinamiğindeki değişimlere karşı direnç gösterecek şekilde başarılı sonuçlar üretmiştir [13-15]. Hava robotları için geliştirilen FLC tabanlı kontrolörler genellikle pozisyon kontrolörü olacak şekilde geliştirilmektedir. Benzer şekilde birçok araştırmada geliştirilen kontrolör yer kontrol istasyonunda çalışmakta ve hesaplanan kontrolör çıktısı hava robotu kablosuz haberleşme ile aktarılmaktadır. Bu şekilde sistemin tasarlanması hava robotu başka bir donanıma ve iç ortamda çalışacak şekilde bağımlı hale getirmektedir. Bunun yerine geliştirilen kontrolörün hava robotunda bulunan donanım üzerinde çalışacak şekilde tasarlanması birçok açıdan avantajlı olması sağlamaktadır.

Hava robotu üzerindeki uçuş kontrol kartında çalışacak şekilde geliştirilen kontrol mekanizmasının kullanılması durumunda oransal-integral-türevsel (PID) ve LQR kontrolörü sıklıkla tercih edilmektedir. Bu kontrolörler hem işlem yüklerinin az olması hem de basit yapıda olmasından dolayı uçuş kontrol yazılımlarında kullanılmaktadır. Hava robotlarında en yaygın kullanılan uçuş

kontrol yazılımı (PX4, ArduPilot vd.) içerisinde PID kontrolörü tercih edilmektedir. Hava robotunun pozisyon kontrolünde kullanılan PID kontrolörünün katsayılarını ayarlamak için çeşitli optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır [16-24]. Fakat hava robotu için geliştirilen birçok kontrolör sadece pozisyon kontrolünü gerçekleştirecek şekilde tasarlanmaktadır. Hem pozisyon kontrolörü hem de duruş kontrolörünün donanım üzerinden gerçekleşmesi veya katsayılarının bütün olarak ele alınmasının performans iyileştirilmesine sebep olacağı düşünülmektedir.

Hava robotlarında kullanılan PX4 [25] ve ArduPilot [26] uçuş kontrol yazılımlarında iç-dış döngüsüne göre çalışan kaskad PID kontrolörü bulunmaktadır. Satın alınan uçuş kontrol kartları sabit olarak belirlenen katsayılarla beraber gelmektedir. Bu sistemlerde kullanılan kontrolör parametrelerinin belirlenmesi ciddi uzmanlık gerektiren bir husus olarak belirtilmektedir. Aynı zamanda her hava robotu da farklı operasyon koşullarında çalışacağından bu katsayıların ayarlanması hem ciddi uzmanlık gerektirmekte hem de zaman almaktadır.

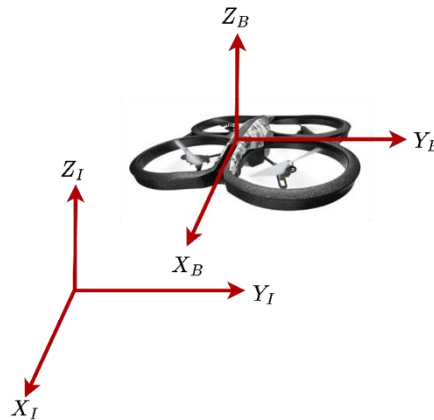
Bu çalışmada, hava robotunun yörünge takibini gerçekleştirebilmesi için genetik ayarlı ve integral etkisine göre çalışan LQR kontrolör geliştirilmiştir. Önerilen kontrolör, standart LQR ve FPID kontrolörler ile performansları karşılaştırılmıştır. MATLAB/Simulink ortamında 6 DOF ile modellenen hava robotu için geliştirilen kontrolör iç-dış döngü yapısına uygun olacak şekilde tasarlanmıştır.

Bu makalenin katkısı olarak, üç farklı kontrol prensibini benimseyen yaklaşımlar arasında performans takibi RMSE kriterine göre gerçekleştirilmiş ve yörünge takibindeki başarımları ortaya konmuştur. Performans kriterine göre bir uygulamada hava robotunu kullanacaklar için hangi kontrolörün nasıl bir davranış sergileyeceğine dair bir çıktıda bulunulmuştur. Ek olarak geliştirilen kontrolör ve sistem modeli github üzerinden paylaşılmış ve gelecekteki çalışmalar için bir zemin oluşturulmuştur.

Makale belirtildiği şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2’de hava robotu üzerine etki eden hareket denklemleri Newton-Euler yaklaşımına göre elde edilmiş, belirli kabuller altında doğrusallaştırılmış ve durum-uzay formunda sunulmuş, iç-dış döngü yapısına göre çalışacak genetik ayarlı LQR tasarımından bahsedilmiştir. Bölüm 3’te hava robotu olarak X konfigürasyonunu kullanılan Parrot Arrot AR. Drone 2.0. tasarım parametrelerine göre modellenmiş ve MATLAB/Simulink ortamında belirlenen referans yörüngenin takip edilmesine yönelik deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bölüm 4’te elde edilen deneysel sonuçlar değerlendirilmiş ve gelecekteki çalışmalardan bahsedilmiştir.

MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

Bu bölümde, Newton-Euler formüllerine göre hava robotu üzerinde oluşan dinamik hareket denklemleri elde edilecektir. Şekil 1’de hava robotunda kullanılan referans eksen takımları olarak gösterilmiştir.



Şekil 1

Hava robotu için referans eksen takımlarının tanımlanması [27]

Hava robotu gövde-sabit $\{B\}$ ve eylemsizlik referans çerçevesi $\{I\}$ şeklinde tanımlanmıştır. Eylemsizlik referans çerçevesine göre, hava robotunun ağırlık merkezinin pozisyon vektörü $p = [x \ y \ z]^T$ şeklindedir. Gövde-sabit çerçevesindeki Euler açı vektörü $n = [\varphi \ \theta \ \psi]^T$ sırasıyla yuvarlanma, yunuslama ve sapma açısı olarak gösterilmektedir. Açısal hız bileşeni ise $\omega = [p \ q \ r]^T$ şeklinde tanımlanmaktadır. Belirtilen tanımlamalara göre hava robotunun hareket denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$m\ddot{p} = -mg\vec{a}_3 + {}^I R_B F \quad (1)$$

$$I\dot{\omega} = -\omega \cdot I\omega + \tau \quad (2)$$

Eşitlik 1’de kullanılan m ifadesi hava robotunun kütesini, g ifadesi kütleçekim ivmesini, F ifadesi motorlar tarafında üretilen itme kuvvetini, gövde-sabit çerçevede birim vektör $\{\vec{b}_1, \vec{b}_2, \vec{b}_3\}$, eylemsizlik referans çerçevesinde $\{\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3\}$, ${}^I R_B$ gövde-sabit çerçevesinden eylemsizlik referans çerçevesine dönüşümde kullanılan matrisini ifade etmektedir. Eşitlik 2’de nokta ile temsil edilen işlem çapraz vektör çarpımlarını, I gövde-sabit çerçevedeki 3x3 atalet matrisini ve τ hava robotunda üretilen momentleri göstermektedir. Eksen takımları arasında dönüşümleri gerçekleştiren kullanılan dönüşüm matrisi:

$${}^I R_B = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & s\varphi s\theta c\psi - c\varphi s\psi & c\varphi s\theta c\psi + s\varphi s\psi \\ c\theta s\psi & s\varphi s\theta s\psi - c\varphi c\psi & c\varphi s\theta s\psi - s\varphi c\psi \\ -s\theta & s\varphi c\theta & c\varphi c\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

Eşitlik 3’te matris içerisinde kullanılan s ve c ifadeleri sinüsü ve kosinüsü ifade etmektedir. Açısal değişim oranları olan $\dot{n} = [\dot{\varphi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$ ifadesinden hava robotu gövdesinde meydana gelen dönme oranları aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s\varphi t\theta & c\varphi t\theta \\ 0 & c\varphi & -s\varphi \\ 0 & s\varphi s\theta & c\varphi s\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (4)$$

Eşitlik 4’te belirtilen matris içerisinde kullanılan s, c, se ve t ifadesi sırasıyla sinüs, kosinüs, sekant ve tanjantı ifade etmektedir. Hava robotuna verilen referansa ulaştıktan sonra kararlı durumdayken motorlardan elde edilen sapma momenti ve itme kuvveti arasındaki ilişki [28]:

$$T_i = c_{T_i} \Omega_i^2 \quad (5)$$

$$\tau_i = c_{\tau_i} \Omega_i^2 \quad (6)$$

Eşitlik 5’te belirtilen T_i herhangi bir motordan üretilen itme kuvvetini, c_{T_i} ifadesi açısal hız ve itme kuvveti arasındaki dönüşümü gerçekleştiren katsayı olarak kullanılmaktadır. Ω ifadesi ise motorların açısal hızlarını belirtmektedir. τ_i herhangi bir motordan üretilen sapma momentini, c_{τ_i} ifadesi açısal hız ile sapma momenti arasındaki dönüşümü gerçekleştiren katsayı olarak tanımlanmaktadır. Ek olarak bu katsayılar, pervane tipi, kanat sayısı ve hava yoğunluğuna bağlı olarak değişebileceği göz önüne alınmalıdır. Z-ekseninde oluşan sapma momenti ve itki kuvveti arasındaki ilişki incelenmesi durumunda:

$$\tau_{\psi_i} = \frac{c_{\tau_i}}{c_{T_i}} T_i = c_i T_i \quad (7)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Hava robotundaki motorlardan elde edilen itki kuvveti (T) ve x, y ve z

eksenlerinde oluşan momentler için Eşitlik 8'de gösterilmiştir. Eşitlik 8'de gösterilen ilk satır bütün motorlardan elde edilen itki kuvvetini, diğer satırlar ise x, y ve z eksenlerinde meydana gelen momentleri ifade etmektedir. Eşitlik 8'de kullanılan l ifadesi motorun hava robotunun ağırlık merkezine olan mesafesini göstermektedir.

$$\begin{bmatrix} T \\ \tau_\varphi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ l & -l & -l & l \\ -l & -l & l & l \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Hava Robotu Modelinin Doğrusallaştırılması

Eşitlik (1) ve (8) arasındaki belirtilen denklem takımları incelendiğinde doğrusal olmayan karakteristiğe sahip oldukları görülmektedir. Bu çalışmada doğrusal kontrol teknikleri kullanılacağından dolayı bu denklem takımlarının belirli yaklaşımlar altında doğrusallaştırılması gerekmektedir. Doğrusallaştırma için denge noktası hava robotunun hava durma pozisyonu ($p = [x \ y \ z]^T, n = [0 \ 0 \ 0]^T$) olarak belirlenmiştir. Bu durum basitlik açısından tercih edilmiştir. Doğrusallaştırma için küçük açı yaklaşımlarına göre kosinüs değerlerinin 1, sinüs ve tanjant değerlerini de kendileri alınacak şekilde kullanılmıştır.

Bu çalışmada geliştirilecek kontrolörler iç-dış döngü yapısına göre geliştirileceği için LQR kontrolörü de bu duruma göre tasarlanmıştır. Bundan dolayı her serbestlik derecesini dikkate alacak ayrı kontrolör geliştirilmiştir. Bu kontrolörler x, y ve z eksenlerindeki pozisyon, φ, θ ve ψ eksenlerindeki açı referanslarını takip edecek şekilde tasarlanmıştır. Bu durumdan dolayı her kontrolör durum-uzay yaklaşımına göre tasarlanmıştır. Z eksenindeki yükseklik kontrolörü geliştirilirken dikkate alınan hareket denklemi:

$$\ddot{z} \cong \frac{1}{m}(T - mg) \quad (9)$$

şeklinde Z ekseninin için elde edilen hareket denklemlerine bağlı kalarak durum-uzay formunda ifade edilebilmesi için durum değişkenleri ve sistem girdisinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu değişkenler aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

$$x_z = [z \ \dot{z}]^T, u_z = T - mg \quad (10)$$

Durum-değişkeni ve girdinin belirlenmesinin ardından z eksenindeki yükseklik kontrolörü tasarımında kullanılacak sistem dinamiği aşağıdaki gibi düzenlenmektedir:

$$\dot{x}_z = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x_z + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m \end{bmatrix} u_z \quad (11)$$

$$y_z = [1 \ 0] x_z \quad (12)$$

Hava robotunun pozisyonu ifade etmede kullanılacak x ve y eksenleri, φ, θ ve ψ şeklinde olan açılarını ifade eden sistem dinamikleri paylaşılacaktır. Belirtilen sistem dinamikleri Eşitlik (10)-(12) arasındaki benzer yaklaşımlar kullanılarak durum-uzay formunda ifade edilebilmektedir. Bu eksenlerin durum-uzay formundaki ifadeleri literatürdeki bir çalışmada gösterilmiştir [29].

Gövde-sabit referans çerçevesinde meydana gelen ivme hareket denklemi aşağıdaki gibidir:

$${}^B a = \frac{F}{m} - {}^B R_1 g \vec{a}_3 - \omega \cdot {}^B v \quad (13)$$

Eşitlik 13'te belirtilen ${}^B v = [u \ v \ w]^T$ ifadesi gövde-basit referans çerçevesindeki hız değerini, $\omega \cdot {}^B v$ ifadesi de merkezci ivmeyi göstermektedir. Aynı referans çerçevesindeki x ve y yönlerindeki sapma açısı ψ sıfır olarak kabul edilmesi durumunda:

$${}^B a_x \cong \theta g \quad (14)$$

$${}^B a_y \cong -\varphi g \quad (15)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Eşitlik 13'te belirtilen ${}^B v$ ifadesi ise aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir.

$$\dot{u} \cong \theta g \quad (16)$$

$$\dot{v} \cong -\varphi g \quad (17)$$

Hava robotunda meydana gelen açı değişimleriyle ilgili yuvarlanma ekseninde kullanılan hareket denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\ddot{\varphi} \cong \frac{\tau_\varphi}{I_x} \quad (18)$$

Yunuslama ekseninde meydana gelen değişimleri ifade eden hareket denklemi aşağıdaki gibi belirtilebilmektedir:

$$\ddot{\theta} \cong \frac{\tau_\theta}{I_y} \quad (19)$$

Hava robotunda meydana gelen sapma eksenindeki açı değişimlerini tanımlamak için aşağıdaki belirtilen hareket denklemi kullanılmaktadır:

$$\ddot{\psi} \cong \frac{\tau_\psi}{I_z} \quad (20)$$

Böylelikle, hava robotunu 6 serbestlik derecesiyle modellemek için elde edilmesi gereken hem öteleme hem de dönme hareketlerine ait denklem takımları çıkartılmıştır. Bu işlemlerden sonra kontrolör tasarımlarına geçilebilmektedir.

Kontrolör Tasarımı

Bu bölümde, tüm durumları geri besleme olarak alındıktan sonra sistem dinamikleri üzerinde optimizasyon gerçekleştiren optimal bir kontrolör tekniği olan LQR tasarımından bahsedilecektir. LQR kontrolörünü tasarlayabilmek için kontrol edilecek sistem dinamikleri durum-uzay formunda aşağıdaki gibi ifade edilmesi gerekmektedir:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (21)$$

$$y = Cx + Du \quad (22)$$

LQR kontrolöründe kullanılan optimizasyon fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Qx + u^T Ru) dt \quad (23)$$

Eşitlik 23'te kullanılan Q matrisi ağırlıkları, R ifadesi kontrolör matrisini belirtmektedir. Optimal kontrolör katsayısının belirlenmesi için:

$$K = R^{-1}B^T P \quad (24)$$

Eşitlik 24'te kullanılan P matrisinin kararlı durumu Riccati denkleminde göre belirlenmektedir:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (25)$$

LQR kontrolör tasarımı, pertürbasyonları ve kalıcı-durum hatasını ortadan kaldırmak için bir integratör eklenmiştir. Böylelikle, belirsizliklere karşı daha gürbüz ve kalıcı-durum hatasına karşı bir düzeltme gerçekleştirilmiştir. İntegral etkisinin LQR kontrolöre eklenmesi durumunda:

$$\dot{\xi} = ref - y = ref - Cx \quad (26)$$

şeklinde düzenlenebilir. Eşitlik 26'da bahsedilen ref ifadesi kontrolörden beklenen referans girdisini ifade etmektedir. İntegral etkisinin LQR kontrolöre eklenmesiyle kontrol tepkisinin de bu duruma göre düzenlenmesi gerekmektedir:

$$u(t) = -Kx(t) + k_1 \xi \quad (27)$$

İntegral etkisinin kontrolör tepkisine eklenmesiyle beraber bu değişikliğin durum-uzay formundaki ifadesi [29]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \xi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} ref \quad (28)$$

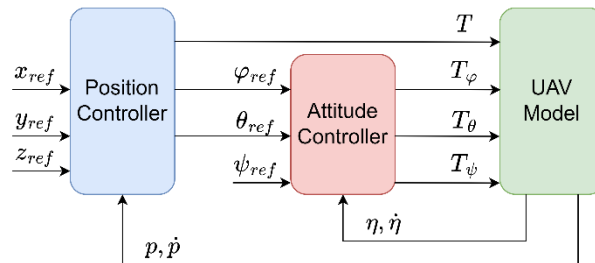
şeklinde ifade edilebilmektedir. Eşitlik 28'de kullanılan A ve B matrislerinin de integral etkisinin dahil edilmesinden sonra düzenlenmesi gerekmektedir. Bu düzenleme sonucunda elde edilen yeni sistem ve çıktı matrisi Eşitlik 29'da gösterilmiştir.

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (29)$$

İntegral LQR kontrolörün çıktısını ifade edecek K matrisi ise:

$$\bar{K} = [K \quad -k_1] \quad (30)$$

şeklinde düzenlenmelidir. Hava robotuna verilen pozisyon ve açı referanslarını takip etmesini sağlayacak iç-dış döngü yapısına göre tasarlanacak integral LQR kontrolör mekanizması Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2

İntegral LQR kontrolör için kullanılan iç-dış döngü yapısı [29]

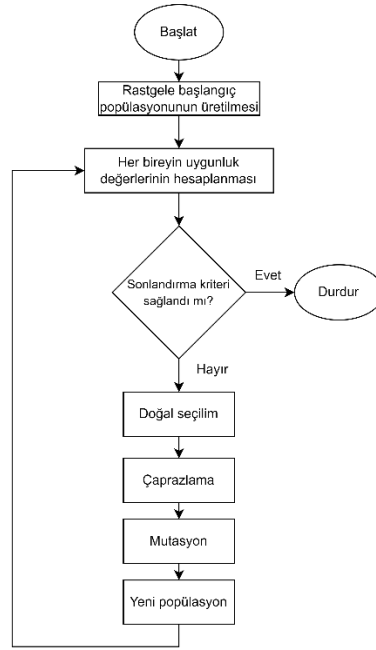
LQR kontrolöre ait katsayıları belirlemek ciddi uzmanlık gerektiren bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır. Genellikle bu durumda deneme-yanılma yöntemiyle katsayılar ayarlanmaktadır. İç-dış döngü yapısına göre geliştirilen LQR kontrolör için ayarlanması gereken 18 katsayı bulunmasından

dolayı bu ayarlama işleminin optimizasyon algoritması aracılığıyla gerçekleştirilmesi hem zaman yönetimi hem de performansta kazanılacak iyileştirmeler açısından tercih edilmiştir.

Genetik Algoritma

Genetik algoritma (GA), optimizasyona dayalı en iyi sonucu aramaya odaklanan bir yaklaşım sergilemektedir. 1975 yılında John Holland tarafından geliştirilmiştir. GA, doğal seçim, mutasyon ve çaprazlama operatörlerinden oluşmaktadır. GA kendisine verilen uygunluk fonksiyonu için en iyi sonucu üretecek değerleri aramaya yönelik çalışmaktadır. GA'nın akış şeması Şekil 3'te paylaşılmıştır.

Hava robotuna verilen pozisyon ve açı referanslarını takip edebilmesi için belirlenmesi gereken 18 katsayının tespit edilmesinde GA'dan faydalanılmıştır. GA'nın çalışabilmesi için kendisine bir amaç fonksiyonu tanımlanması gerekmektedir. Hava robotuna ait LQR kontrolör katsayılarını belirlemek için GA'ya verilen amaç fonksiyonu Eşitlik 31'de gösterilmiştir.



Şekil 3

Genetik algoritma akış şeması

Eşitlik 31'de tanımlanan amaç fonksiyonu RMSE hata kriterine göre çalışmaktadır. Hava robotuna verilen pozisyon girdisine karşı elde edilen hatayı minimize eden katsayıları arayacak şekilde kurgulanmıştır.

$$f_{min} = rmse(x) + rmse(y) + rmse(z) \quad (31)$$

GA'nın bu işlemi gerçekleştirebilmesi için birtakım katsayılarının da belirlenmesi gerekmektedir. GA'nın arama işlemini başlatabilmesi için başlangıçta belirlenen parametreler, jenerasyon sayısı:30, popülasyon sayısı: 20, çaprazlama oranı: 0,85, mutasyon oranı: 0,20 olacak şekilde kullanılmıştır. GA, AMD Ryzen 7 3700U işlemci ve 16GB RAM'e sahip bir donanım üzerinde çalıştırılmıştır. GA için belirtilen parametreler ve donanım özelliklerine göre çalışma süresi 780,32 saniye olarak tespit edilmiştir.

BULGULAR (RESULTS)

Bu çalışmada integral etkisini de içeren LQR kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen kontrolöre ait katsayıları GA yardımıyla optimize edilmiştir. Genetik ayarlı LQR kontrolörün performansı, standart LQR ve FPID kontrolöre göre karşılaştırılacak şekilde belirlenen referans

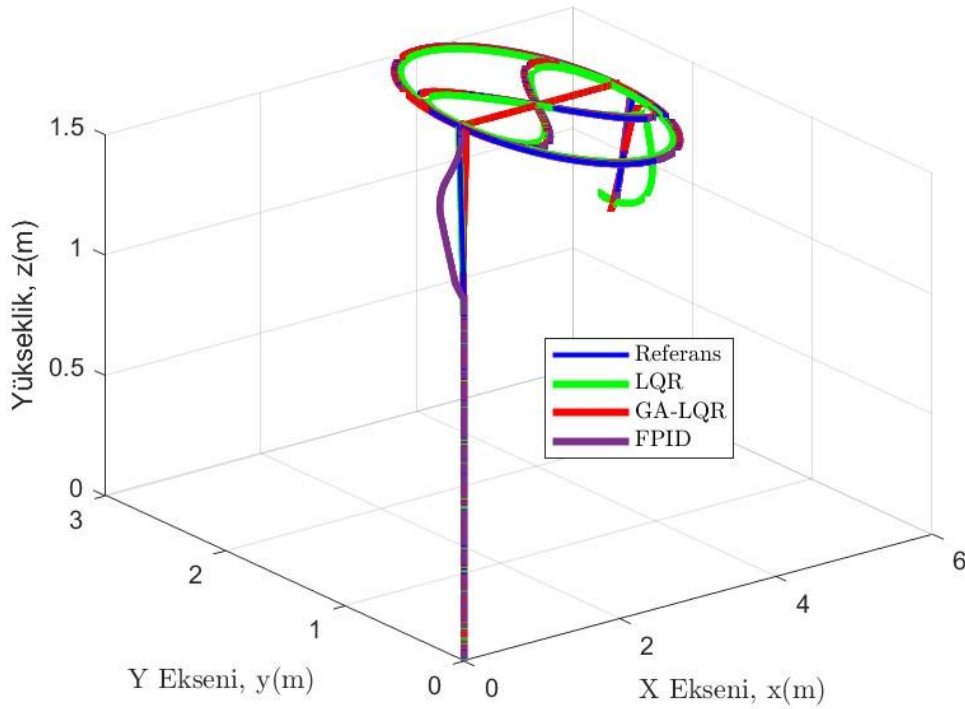
yörüngenin takip edilmesinde oluşan hataya göre değerlendirilmiştir. Oluşan bu hata değeri RMSE kriterine göre incelenmiştir. MATLAB/Simulink ortamında 6 DOF ile modellenen hava robotuna ait parametreler Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1

Parrot AR. 2.0 hava robotuna ait fiziksel parametreler

Parametreler	Değeri
Kütle (kg)	0,46
Motorun Ağırlık Merkezine Olan Mesafesi (m)	0,127
Atalet Momenti I_x (kgm^2)	2,24e-4
Atalet Momenti I_y (kgm^2)	2,90e-4
Atalet Momenti I_z (kgm^2)	5,30e-4

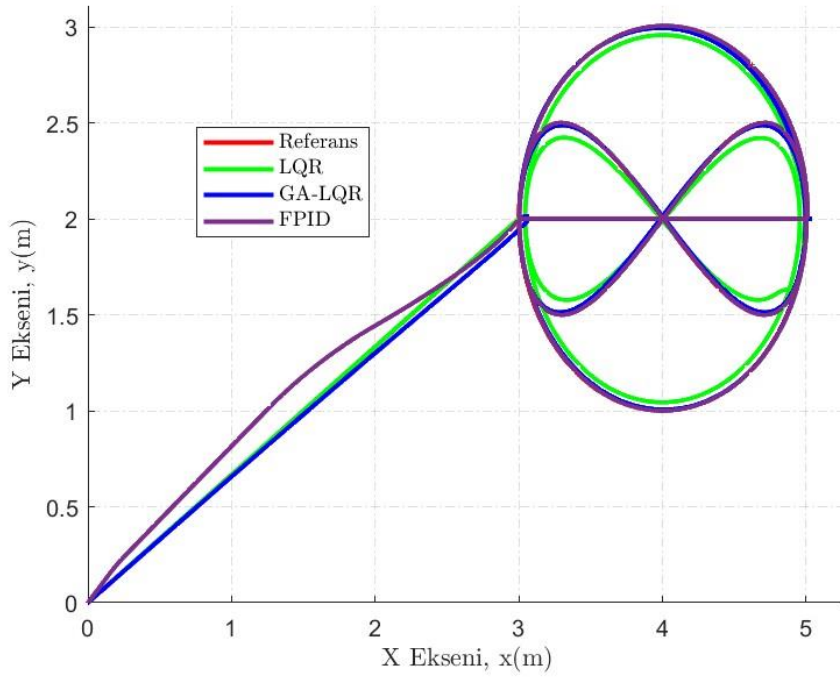
Hava robotunun performansını değerlendirmek için sekiz eğrisini takip etmesi istenmiştir. Bu yörünge takibi genetik ayarlı LQR kontrolör haricinde standart LQR ve FPID ile de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma genetik ayarlı integral etkisiyle tasarlanan LQR kontrolörün performansının incelenmesi için gerçekleştirilmiştir. Hava robotuna verilen sekiz eğrisi ve farklı kontrolörlerin takip başarımları Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 4

Hava robotunun farklı kontrolörler ile yörünge takibini gerçekleştirilmesi

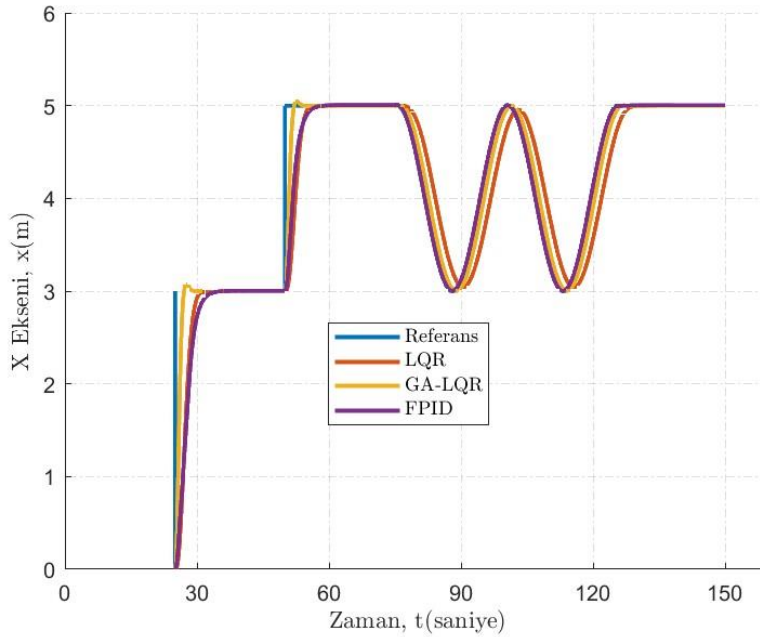
Sekiz eğrisinin (lemniscate) referans yörünge olarak kullanılması durumunda elde edilen sonuçlara göre genetik ayarlı LQR kontrolörün diğer kontrolörlere kıyasla tüm eksenlerde meydana gelen RMSE hataların toplamı 0,4815m olarak tespit edilmiştir ve diğer kontrolörlere göre en az hataya ulaştığı gözlemlenmiştir. FPID ve standart LQR kontrolörün referanstan ayrıldıkları bazı noktalar Şekil 4’te açıkça görülmektedir. Bu yörüngenin takibi esnasında elde edilen performansların farklı bir açıdan değerlendirilmesi için x ve y eksenlerinden oluşan çizim Şekil 5’te gösterilmiştir.



Şekil 5

Hava robotunun farklı kontrolörlerle yörünge takibinin X ve Y pozisyonlarına göre incelenmesi

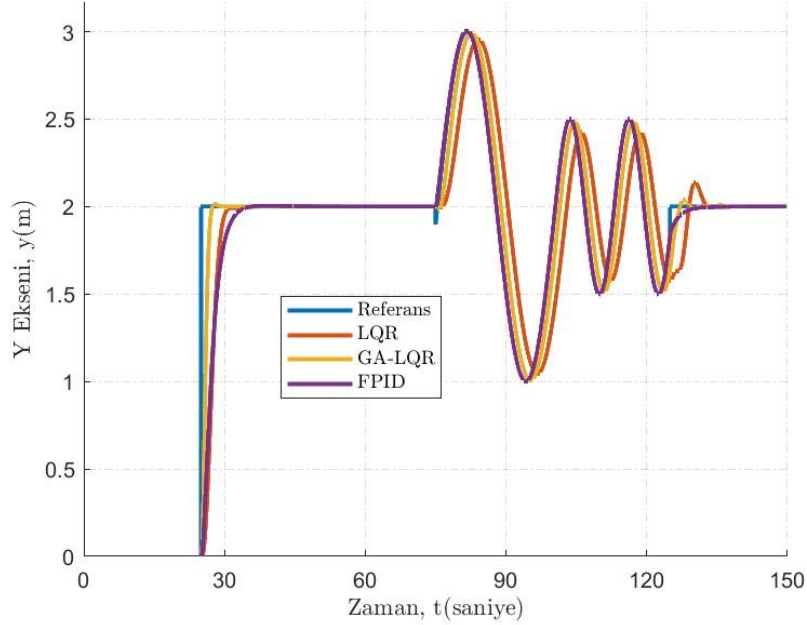
Hava robotuna verilen sekiz eğrisinin takip edilmesinde elde edilen sonuçların x ve y eksenlerine göre değerlendirilmesi durumunda en az hatanın RMSE kriterine göre 0,4276m olarak genetik ayarlı LQR kontrolör tarafından elde edildiği tespit edilmiştir. Hava robotuna verilen referans yörüngesinin sadece x ekseninde elde edilen sonuçlar Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6

Hava robotunun farklı kontrolörlerle yörünge takibinin X eksenindeki pozisyon değişimine göre incelenmesi

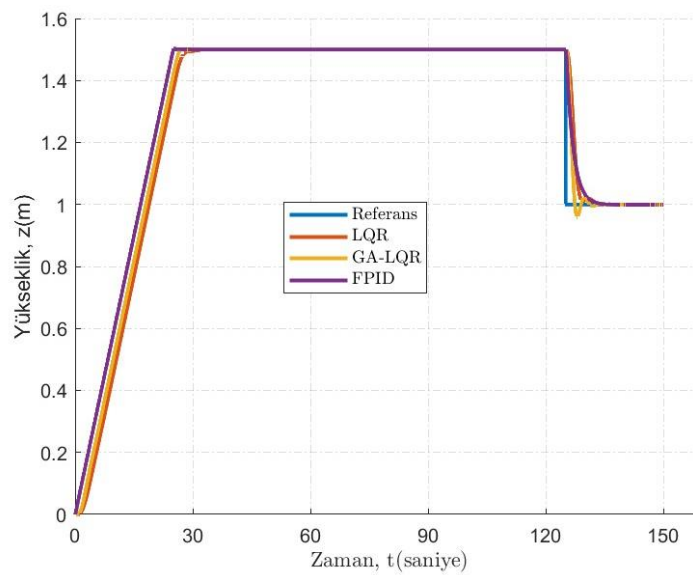
X eksenindeki referansların takip edilmesine göre yapılan değerlendirmeye göre genetik ayarlı LQR kontrolör RMSE kriterine göre FPID kontrolörüne karşı %31,3 oranında, LQR kontrolörüne karşı %43,7 oranında daha az hata değeri ürettiği tespit edilmiştir. Benzer şekilde y eksenindeki performansların incelenmesi Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7

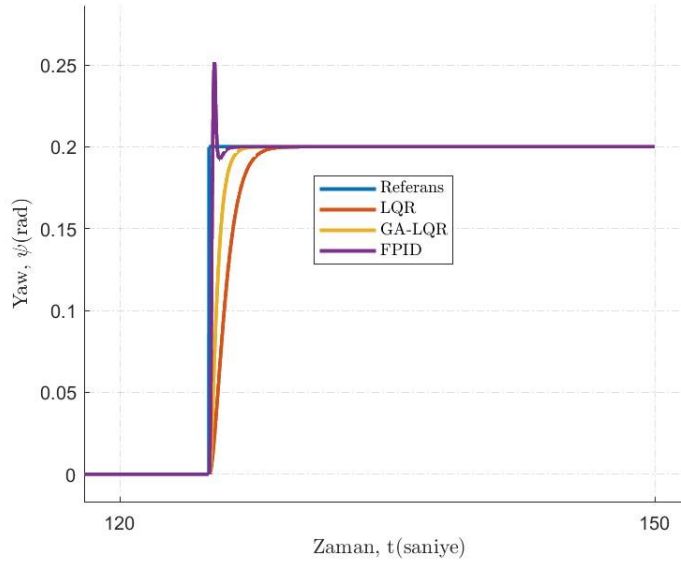
Hava robotunun farklı kontrolörler ile yörünge takibinin Y eksenindeki pozisyon değişimine göre incelenmesi

Hava robotuna verilen referansın takip edilmesi esnasında y eksenindeki değişimler incelendiğinde genetik ayarlı LQR kontrolörün FPID kontrolöre göre %18,4 ve LQR kontrolöre göre %46,8 oranında daha az bir hata değeriyle referansı takip ettiği gözlemlenmiştir. Z eksenindeki referansların takip edilmesi durumunda elde edilen sonuçlar Şekil 8’de paylaşılmıştır.



Şekil 8

Hava robotunun farklı kontrolörler ile yörünge takibinin z eksenindeki pozisyon değişimine göre incelenmesi



Şekil 9

Hava robotunun farklı kontrolörlerle yörünge takibinin sapma açısındaki değişimine göre incelenmesi

0,2 radyanlık bir açının sapma ekseninde takip edilmesinin istenmesi durumunda FPID kontrolörün yaklaşık %25 oranında aşımın meydana geldiği gözlemlenmiştir. Diğer LQR tabanlı kontrolörlerde bu aşım oluşmamıştır. Genetik ayarlı LQR kontrolörü ise yükselme süresi açısından FPID'nin gerisinde kalmasına rağmen aşım değerinin oluşmadığı tespit edilmiştir. Hava robotuna verilen referans yörünge takip edilmesi esnasında oluşan hata RMSE kriterine göre incelenmesi durumunda elde edilen sonuçlar Tablo 2'de paylaşılmıştır.

Tablo 2

Referansın Takip Edilmesi Esnasında Oluşan Hatanın RMSE Kriterine Göre İncelenmesi

Kontrolörler	X Ekseni	Y Ekseni	Z Ekseni
LQR	0,4623	0,3145	0,0728
Genetik Ayarlı LQR	0,2603	0,1673	0,0539
FPID	0,3784	0,2051	0,0418

RMSE kriterine göre gerçekleştirilen karşılaştırma sonucuna göre genetik ayarlı LQR kontrolörün referansı daha başarılı takip ettiği tespit edilmiştir. X ve y ekseninde genetik ayarlı LQR kontrolör daha az bir hatayla referansı takip ederken, z ekseninde FPID kontrolörün daha başarılı olduğu gösterilmiştir.

TARTIŞMA VE SONUÇLAR (DISCUSSION AND CONCLUSIONS)

Bu çalışmada hava robotu için genetik ayarlı ve integral etkisine göre LQR kontrolör tasarlanmıştır. Kontrolör tasarımına geçmeden önce hava robotuna ait hareket denklemleri elde edilmiş ve 6 DOF ile MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. Model-tabanlı kontrolör tasarımındaki problemlerden birisi olan katsayıların belirlenmesi noktasında GA kullanılarak belirlenen uygunluk fonksiyonunu minimize edecek kontrolör katsayıları tespit edilmiştir. Genetik ayarlı ve integral etkisine göre tasarlanan LQR kontrolörün belirlenen katsayılarıyla elde edilen sonuçları karşılaştırmak için standart LQR ve hibrit bir kontrolör olan FPID kullanılmıştır. Farklı kontrolörlerin performanslarını değerlendirmek için sekiz eğrisi referans olarak uygulanmıştır. Bu referansın takip edilmesi sırasında oluşan hata RMSE kriterine göre değerlendirilmiştir. Genetik ayarlı LQR kontrolör x, y ve z eksenlerindeki hataların toplanmasına göre gerçekleştirilen karşılaştırmaya göre, standart LQR kontrolöre göre %43,22 FPID kontrolörüne göre %22,99 oranında daha başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre genetik ayarlı ve integral etkisine göre tasarlanan LQR kontrolörün hava robotlarının performanslarında iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarın bu çalışma için beyan ettiği herhangi bir çıkar çatışması yoktur (The author has no conflict of interest to disclose for this study).

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] C.-C. Chang, J.-L. Wang, C.-Y. Chang, M.-C. Liang, M.-R. Lin, Development of a multicopter-carried whole air sampling apparatus and its applications in environmental studies, *Chemosphere*. 144 (2016), 484-492.
- [2] J.A. Paredes, J. González, C. Saito, A. Flores, Multispectral Imaging System with UAV Integration Capabilities for Crop Analysis, içinde: *2017 First IEEE International Symposium of Geoscience and Remote Sensing (GRSS-CHILE)*, 2017, 1-4.
- [3] S. Anweiler, D. Piwowarski, Multicopter platform prototype for environmental monitoring, *Journal of Cleaner Production*. 155 (2017), 204-211.
- [4] B.E. Schäfer, D. Picchi, T. Engelhardt, D. Abel, Multicopter Unmanned Aerial Vehicle for Automated Inspection of Wind Turbines, içinde: *2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 2016, 244-249.
- [5] M. Stokkeland, K. Klausen, T.A. Johansen, Autonomous Visual Navigation of Unmanned Aerial Vehicle for Wind Turbine Inspection, içinde: *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2015, 998-1007.
- [6] D. Lee, H. Jin Kim, S. Sastry, Feedback linearization vs. adaptive sliding mode control for a quadrotor helicopter, *International Journal of control, Automation and systems*. 7 (2009), 419-428.
- [7] J. Farrell, M. Sharma, M. Polycarpou, Backstepping-based flight control with adaptive function approximation, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 28 (2005), 1089-1102.
- [8] Z. Zuo, C. Wang, Adaptive trajectory tracking control of output constrained multi-rotors systems, *IET Control Theory & Applications*. 8 (2014), 1163-1174.
- [9] J. Spencer, J. Lee, J.A. Paredes, A. Goel, D. Bernstein, An Adaptive Pid Autotuner for Multicopters with Experimental Results, içinde: *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2022, 7846-7853.
- [10] Z.T. Dydek, A.M. Annaswamy, E. Lavretsky, Adaptive control of quadrotor UAVs: A design trade study with flight evaluations, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 21 (2012), 1400-1406.
- [11] A.R. Dooraki, D.-J. Lee, Reinforcement Learning Based Flight Controller Capable of Controlling a Quadcopter with Four, Three and Two Working Motors, içinde: *2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 2020, 161-166.
- [12] Y. Song, A. Romero, M. Müller, V. Koltun, D. Scaramuzza, Reaching the limit in autonomous racing: Optimal control versus reinforcement learning, *Science Robotics*. 8 (2023), 1-13.
- [13] C. Guzey, T. Kumbasar, Aggressive maneuvering of a quadcopter via differential flatness-based fuzzy controllers: From tuning to experiments, *Applied Soft Computing*. 126 (2022), 109223.
- [14] G. Unal, Integrated design of fault-tolerant control for flight control systems using observer and fuzzy logic, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 93 (2021), 723-732.
- [15] E. Kayacan, R. Maslim, Type-2 Fuzzy Logic Trajectory Tracking Control of Quadrotor VTOL Aircraft with Elliptic Membership Functions, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 22 (2017), 339-348. doi:10.1109/TMECH.2016.2614672.
- [16] E. Yazid, M. Garrat, F.Santoso, Optimal PD Tracking Control of a Quadcopter Drone Using Adaptive PSO Algorithm, içinde *The 2018 International Conference on Computer, Control, Informatics and its Application*, 2018, 146-151.
- [17] M.S. Can, H. Ercan, Real-time tuning of PID controller based on optimization algorithms for a quadrotor, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 94 (2021), 418-430.
- [18] Ş. Yıldırım, N. Çabuk, V. Bakırcıoğlu, Optimal PID controller design for trajectory tracking of a

- dodecarotor UAV based on grey wolf optimizer, *Konya Journal of Engineering Sciences*. 11 (2023), 10-20.
- [19] I. Siti, M. Mjahed, H. Ayad, A. El Kari, New trajectory tracking approach for a quadcopter using genetic algorithm and reference model methods, *Applied Sciences*. 9 (2019), 1780.
- [20] M.J. Mahmoodabadi, N.R. Babak, Robust fuzzy linear quadratic regulator control optimized by multi-objective high exploration particle swarm optimization for a 4 degree-of-freedom quadrotor, *Aerospace Science and Technology*. 97 (2020), 105598.
- [21] M.N. Shauqee, P. Rajendran, N.M. Suhadis, Proportional double derivative linear quadratic regulator controller using improvised grey wolf optimization technique to control quadcopter, *Applied Sciences*. 11 (2021), 2699.
- [22] A.O. Faouri, P. Kasap, maximum likelihood estimation for the nakagami distribution using particle swarm optimization algorithm with applications, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*. 5 (2023), 169-178.
- [23] M. Hacıbeyoglu, M. Çelik, Ö. Erdaş Çiçek, K en yakın komşu algoritması ile binalarda enerji verimliliği tahmini, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*. 5 (2023) 28-37.
- [24] M. Karakoyun, A. Özkış, transfer fonksiyonları kullanarak ikili güve-alev optimizasyonu algoritmalarının geliştirilmesi ve performanslarının karşılaştırılması, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*. 3 (2021) 1-10.
- [25] L. Meier, D. Honegger, M. Pollefeys, PX4: A Node-Based Multithreaded Open Source Robotics Framework For Deeply Embedded Platforms, içinde: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2015.
- [26] ArduPilot Documentation — ArduPilot documentation, (t.y.). <https://ardupilot.org/ardupilot/> (erişim 13 Haziran 2023).
- [27] L. Martins, C. Cardeira, P. Oliveira, Linear quadratic regulator for trajectory tracking of a quadrotor, *IFAC-PapersOnLine*. 52 (2019), 176-181.
- [28] G.J. Leishman, Principles of helicopter aerodynamics with CD extra, *Cambridge university press*, 2006.
- [29] L. Martins, Linear and nonlinear control of uavs: design and experimental validation, Master's Thesis, *Instituto Superior Técnico*, Lisbon, Portugal, 2019.