

Dört Rotorlu bir İHA'nın Geri Adımlamalı Kontrolcü ile Gerçek Zamanlı Yörünge Kontrolü

Kaan CAN¹, Abdullah BAŞÇI¹

ÖZET: Bu çalışmada, sistemin lineer olmayan yapısına bağlı olarak tasarlanan geri adımlamalı kontrol yöntemi ile dört rotorlu bir İnsansız Hava Aracı (İHA) olan Quadrotor'un gerçek zamanlı yörünge takibi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan Quadrotor, donanımsal olarak (GPS, sonar, kamera, atalet sensörleri vb.) oldukça düşük maliyetlidir. Tasarlanan geri adımlamalı kontrolcü, donanımsal açıdan zayıf bir sistem üzerinde yüksek verimle çalışmış ve gelecekte tasarlanacak donanımsal açıdan yüksek hassasiyette ölçüm yapabilen sistemler için iyi bir kontrolcü referansı olmuştur. Quadrotor'un kapalı ortamda eğik çember ve zigzag formunda iki ayrı yörüngeyi takibi ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, kontrolcünün meydana gelen hataları istenilen düzeyde elimine ettiği ve sistemdeki sapmaları minimumda tuttuğu görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Geri adımlamalı kontrol, İHA, quadrotor, yörünge takibi.

Real Time Trajectory Tracking Control of a Four Rotor UAV with Backstepping Controller

ABSTRACT: In this study, real-time trajectory tracking control of a four rotor UAV, called Quadrotor, is realized by using backstepping controller which is designed depending on the nonlinearity of the system. Quadrotor used in experiment is a low-cost system and is equipped with GPS, sonar, camera and inertial sensors. Since the designed backstepping controller is worked in a high efficiency on Quadrotor, the controller will be a good reference for the systems, have highly sensitive sensors to do more accurate measurements. When analyzing the indoor experiment results of Quadrotor for tracking oblique circle and zigzag routes, errors are eliminated in desired level and deviations are minimized by backstepping controller for a stable flight.

Key words: Backstepping control, quadrotor, trajectory tracking, UAV.

¹ Ataturk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Erzurum, Türkiye
Sorumlu yazar/Corresponding Author: Kaan CAN, kaan.can@atauni.edu.tr

GİRİŞ

Günümüzde İHA olarak adlandırılan sistemlerin birçok çeşidi bulunmaktadır. Bunlardan biri de dört adet rotora sahip olan Quadrotor'lardır. Serbest uzayda 6 serbestlik derecesine sahip bir cismin hareketi incelenerek tasvir edilen Quadrotor'lar, bulunduğu noktadan dikey iniş-kalkış yapabilen, yüksek hareket ve manevra kabiliyetine sahip olan araçlardır. Dar alanda hassas hareketler yapabilmek, insanlı sistemler için tehlike arz eden durumlarda kullanılabilmesi ve insan gücüne olan bağımlılığı azaltması bu sistemlerin sağladığı avantajlardan birkaçıdır. Bunun yanında Quadrotor'ların 6 serbestlik derecesine sahip olmasına rağmen 4 kontrolcü girdisi ile kontrol edilmeleri, eksik girdili sistem olarak tanımlanmalarına neden olmuştur. Bu tip sistemler yapısal olarak lineer olmadıkları için kontrolleri de oldukça zordur. Ayrıca Quadrotor'ların uçuş stabilizasyonları ve havada dengede durabilmeleri gövde ağırlığı (batarya, harici koruma gövdesi vb.), zemin, sensör hassasiyeti ve diğer etkilere bağlı olarak değiştiğinden gerçek zamanlı uygulamalarda kullanımları oldukça güçtür. Belirtilen bu zorlukları aşabilmek adına Quadrotor'lar sistematik bir şekilde incelenmekte ve model yapısına uygun olarak tasarlanan kontrolcülerle yörünge takibi gerçekleştirilmektedir.

Son yıllarda Quadrotor'ların yörünge kontrolü üzerine farklı çalışmalar yapılmış ve çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir. H. Ergezer ve arkadaşları, birden fazla Quadrotor kullanımı durumunda çevrimiçi rota planlamasında meydana gelen problemlerin çözümü için karışık tam sayılı doğrusal programlama (mixed integer linear programming-MILP) ve azalan ufuk kontrolü (receding horizon control) metodlarını incelemiştir (Ergazer ve ark., 2014). Gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında çevrim-içi olarak anlık alınan veriler sayesinde Quadrotor'ların belirtilen yörünge boyunca gösterdikleri performanslar analiz edilmiştir. N. S. Özbek ve arkadaşları, Quadrotor sistemi için PID, kayan kipli kontrol, geri adımlamalı, geri beslemeli doğrusallaştırma ve bulanık mantık kontrol tekniklerini ele almıştır (Özbek ve ark., 2014). Yapılan çalışmada belirtilen kontrol yöntemleriyle Quadrotor'un yörünge takip performansı, kararlılık analizi, kontrol algoritmalarının ve kontrolcülerin performansı analiz edilmiş ve gürültülere karşı dayanıklılıkları incelenmiştir. Bouabdallah ve arkadaşları, Quadrotor'u kapalı bir ortamda havada stabil tutmak için PD, PID ve lineer kuadratik kontrol

yöntemlerini uygulamışlardır (Bouabdallah et al., 2004). Yapılan çalışma incelendiğinde Quadrotor'un sapma, yunuslama ve yalpalama açılarının istenilen denge noktasında kararlı bir şekilde tutulması amaçlandığı görülmüştür. Bouadi ve arkadaşları, Quadrotor için adaptif kayan kipli kontrolcüyle duruş stabilizasyonu ve rota takibi yapmayı amaçlamıştır (Bouadi et al., 2011). Sistemde meydana gelen anlık hataları çevrimiçi olarak aldıkları sinyaller yardımıyla parametre tahmini yaparak hataları elimine etmişlerdir.

Mohammadi ve arkadaşları, Quadrotor'u modelleyerek ve merkezî olmayan yöntemle adaptif kontrol uygulayarak rota takibinin gerçekleştirilmesini sağlamıştır (Mohammadi et al., 2013). Tomas Krajnik ve arkadaşları, Quadrotor'un dinamik modelini ayrıştırılmış model olarak ele almış ve sistemin dinamik modeli için iç-dış kontrolcü tasarımını deneysel olarak gerçekleştirmiştir (Krajnik et al., 2011). Bo Zhao ve arkadaşları, Quadrotor'un yörünge kontrolünü lineer olmayan gürbüz adaptif kontrolcü ile simülasyon ortamında gerçekleştirmiş ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir (Zhao et al., 2015). Emre Can Suiçmez, simülasyon ortamında Quadrotor'u detaylı olarak analiz etmiş ve geri adımlamalı kontrol, doğrusal kuadratik regülatör (linear quadratic regulator-LQR) ve doğrusal kuadratik takip (linear quadratic tracking-LQT) gibi kontrol yöntemlerini incelemiştir (Suiçmez, 2014). Çalışmada ayrıca geri adımlamalı kontrol metodu incelenmiş ve kontrolcünün sistemde meydana gelen hataları elimine ettiği görülmüştür.

Bara J. Emran ve arkadaşları, Quadrotor'un kompozit gürbüz adaptif kontrolünü incelemiş ve simülasyon ortamında test etmişlerdir. Tasarlanan gürbüz adaptif kontrolcünün gürbüz olmayan adaptif kontrolcüye oranla verilen referans işaretini daha iyi takip ettiği belirtmiştir (Emran et al., 2014). Matthias Schreier, Quadrotor'un dinamik yapısını modelleyerek sürekli ve ayrık adaptif kontrolcülerin simülasyon ortamında performansını incelemiş ve adaptif ve lineer olmayan kontrolcüler ile kıyaslamıştır. Elde edilen sonuçlar adaptif kontrolcülerin, adaptif olmayan kontrolcüye göre daha iyi sonuç verdiği ve sisteme verilen referans işaretlerini daha iyi takip ettiğini göstermiştir (Schreier, 2012). Abdul-Wahid A. Saif ve arkadaşları, Quadrotor için modifiye edilmiş geri adımlamalı kontrolcü ile klasik geri adımlamalı kontrolcü arasındaki farkı incelemiş ve tasarlanan kontrolcülerini simülasyon ortamında test etmişlerdir.

Yapılan simülasyon çalışmaları incelendiğinde modifiye edilmiş geri adımlamalı kontrolcünün sistemin kontrolcü parametrelerini azaltarak karmaşık denklem takımlarını klasik geri adımlamalı kontrolcüye göre basitleştirdiği ve sistem cevabını hızlandırarak daha iyi performans gösterdiği görülmüştür (Saif et al., 2012).

Castillo ve arkadaşları, dört Quadrotor'u matematiksel olarak modellemiş daha sonra basit uygulamalar için (dikey iniş-kalkış vb.) test etmişlerdir (Castillo et al., 2004). Madani ve arkadaşları, Quadrotor'un lineer olmayan yapısına uygun olarak tasarladıkları geri adımlamalı kontrolcü ile simülasyon ortamında konum kontrolü yapmış referans rota takibinde meydana gelen hataların tasarlanan kontrolcü tarafından elimine edildiği görülmüştür (Madani et al., 2008).

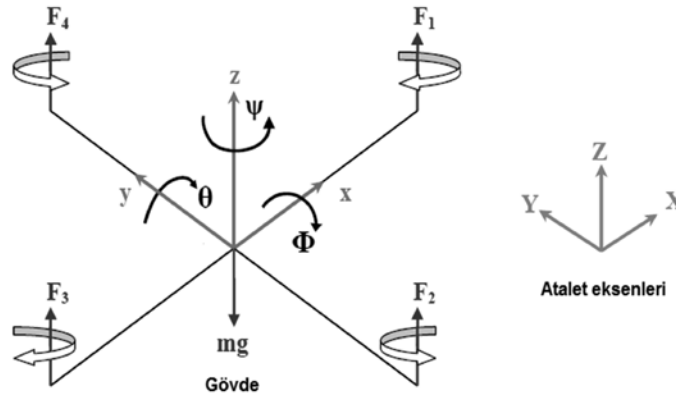
Bu çalışmada, geri adımlamalı kontrol yöntemi incelenmiş ve Quadrotor üzerinde gerçek zamanlı yörünge takibi ve konum kontrolü için test edilmiştir. Uygulama sonuçları, kontrolcünün Quadrotor'u

istenilen konuma az bir hata ile ulaştırdığı ve küçük salınımlar ile aracı stabil tuttuğunu ve farklı referanslar altında yörünge takibi için iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

MATERYAL VE METOD

Quadrotor'un Dinamik Modeli

Quadrotor'un sistem dinamikleri, katı bir cismin uzaydaki altı serbestlik dereceli hareketine benzetilerek tasvir edilmektedir. Bu altı serbestlik derecesi; açısal hızların oluşmasını sağlayan Euler açıları olarak tanımlanan yalpa (Φ), yunuslama (θ) ve sapma (ψ) eksenleri ile 3 boyutlu uzayda doğrusal hareketi tanımlayan x, y ve z eksenleri tarafından temsil edilmektedir. Şekil 1'de Quadrotor'un gövde ve atalet eksenleri ile birlikte Quadrotor'a etkiyen ana kuvvetler F_1, F_2, F_3, F_4, mg ve dört adet pervanenin dönme yönleri gösterilmektedir.



Şekil 1. Quadrotor eksenleri

Quadrotor'un hareketini gerçekleştirebilmesi için pervanelerin dönüş hız ve yönleri değiştirilerek sistemde torklar ve momentler oluşturulur. Ω_i , pervanelerin açısal hızları ($i: 1, 2, 3, 4$) olmak üzere, pervanelerin dönüşlerinden dolayı meydana gelen kaldırma kuvvetleri F_i ,

$$F_i = k_n \Omega_i^2 \quad (1)$$

ifadesiyle tanımlanmakta ve denklemde k_n itme faktörü sabit bir değerdir. Quadrotor'a pervanelerden uygulanan toplam kaldırma kuvveti ise,

$$F_T = k_n \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2 \quad (2)$$

denklemi ile belirtilir. Her bir pervane tarafından üretilen tork ifadesi,

$$T_i = k_m F_i \quad [N.m] \quad (3)$$

denklemi ile tanımlanır. Denklemde k_m birimi metre olan sabit bir sayıdır ve kuvvet ile tork arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Sistemin dört adet kontrol girişi bulunmakta ve bu girişler U_1, U_2, U_3, U_4 ile gösterilmektedir.

$$U_1 = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (4)$$

olmak üzere kuvvetlerin toplamıdır. Eşitlik 4'de belirtildiği üzere U_1 z eksenindeki hareket ile doğrudan

ilişkilidir.

$$U_2 = F_4 - F_2 \quad (5)$$

denklemleri ile ifade edilir. U_2 , sağ ve sol pervaneler arasındaki diferansiyel farktan meydana gelen kuvvettir. Bu yüzden 2 ve 4 numaralı pervaneler kullanılarak sistemde yalpa (Φ) momenti oluşturulmaktadır. Aynı şekilde U_3 , ön ve arka pervaneler arasındaki diferansiyel farktan meydana gelen kuvvettir. Bu sayede 1 ve 3 numaralı pervaneler kullanılarak sistemde yunuslama (θ) momenti oluşturulmaktadır.

$$U_3 = F_3 - F_1 \quad (6)$$

Tek numaralı (1,3) ya da çift numaralı (2,4) pervaneler kullanılarak sapma (ψ) momenti oluşturulmaktadır.

$$U_4 = T_2 + T_4 - T_1 - T_3 \quad (7)$$

Denklemleri ile belirlenir. U_4 dört pervanelerin ürettiği net tork ifadesidir. Bu nedenle U_4 sapma açısının oluşmasında doğrudan etkilidir. $U_{1,2,3,4}$ aynı zamanda kontrol işaretleridir. Sonuç olarak yapının tamamen katı (rigid) ve simetrik olduğu, kütle merkezi ile cismin gövde merkezinin aynı ekseninde olduğu varsayımı ve Newton-Euler yaklaşımı ile sistemin tam matematiksel model denklemleri şu şekilde elde edilmektedir (Suiçmez, 2014);

$$\ddot{\phi} = \psi \dot{\theta} \left(\frac{I_y - I_z}{I_x} \right) + \frac{d}{I_x} U_2 \quad (8)$$

$$\ddot{\theta} = \psi \dot{\phi} \left(\frac{I_x - I_z}{I_y} \right) + \frac{d}{I_y} U_3 \quad (9)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\theta} \dot{\phi} \left(\frac{I_x - I_y}{I_z} \right) + \frac{1}{I_y} U_4 \quad (10)$$

$$\ddot{x} = (\cos\psi \sin\theta \sin\phi + \sin\psi \cos\phi) \frac{1}{m} U_1 - \frac{K_x \dot{x}}{m} \quad (11)$$

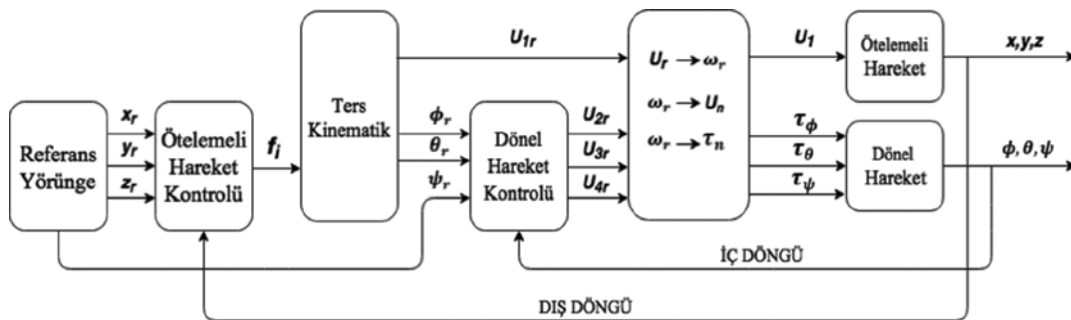
$$\ddot{y} = (\sin\psi \sin\theta \cos\phi - \cos\psi \sin\phi) \frac{1}{m} U_1 - \frac{K_y \dot{y}}{m} \quad (12)$$

$$\ddot{z} = -g + (\cos\theta \cos\phi) \frac{1}{m} U_1 - \frac{K_z \dot{z}}{m} \quad (13)$$

Burada, $I_{x,y,z}$ Quadrotor gövdesinin x,y,z eksenlerindeki ataletini, g yerçekimi ivmesini, d rotorun kütle merkezine olan uzaklığını ve m ise Quadrotor'un toplam kütleini ifade etmektedir.

Quadrotor'un Kontrolü

Quadrotor lineer olmayan yapısı, karmaşık dinamik denklemleri ve gürültülerden kolay etkilenmesi nedeniyle kontrolü oldukça zordur. Sistemin kontrolünü kolaylaştırmak ve stabil bir uçuş gerçekleştirmesini sağlamak için kontrol yapısı iç ve dış kontrol birimleri olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Şekil 2' de belirtilen kontrol bloğu incelendiğinde ötelemeli hareketin kontrolü dış kontrolcü tarafından gerçekleştirilmektedir. Dış kontrolcü, referans olarak gönderilen konum bilgilerini kullanarak ileri ve yan açı referanslarını (ϕ_r, θ_r) ve dikey yöndeki gerekli olan hız referansını (U_{1r}) üretmektedir. İç kontrolcü ise referans olarak üretilen açıları ($(\phi_r, \theta_r, \psi_r)$) kullanarak, sistem çıkışından elde edilen açı bilgilerini kapalı çevrim olarak alarak meydana gelen hataları PID kontrolcünde işlemektedir. Bu sayede iç kontrolcü Quadrotor'un stabil uçuşu için gerekli torkları üretmektedir ($\tau_\phi, \tau_\theta, \tau_\psi$). Sistem çıkışından elde edilen konum ve açı bilgileri sırasıyla tekrar kapalı çevrim olarak dış ve iç kontrolcülere iletilerek sistemde meydana gelen hatalar elimine edilmekte ve Quadrotor'un ihtiyacı olan açı referansları üretilmektedir.



Şekil 2. Quadrotor kontrol bloğu

Geri Adımlamalı Kontrol Tasarımı

Quadrotor'a ileri yöndeki hızını sağlayan etkinin (diğer etkileri ihmal ederek) yunuslama hareketi olduğunu düşünebiliriz. Yine benzer şekilde sadeleştirme yapılarak, diğer yörüngelerde meydana gelen hızlar da benzer şekilde belirlenebilir. Quadrotor üzerinde gerçekleştirilen bu ayrıştırılmış dinamik sistem modeli ile durum denklemleri ayrı ayrı kontrol edebilir ve her bir durum değişkeninde meydana gelen hataları elimine etmek için, ayrı kontrolcüler tasarlayabiliriz (Krajnic et al., 2011). Sistemimiz yapısal olarak lineer olmadığı için daha doğru bir sonuç elde etmek amacıyla sistemin sürtünme etkisi ve rotorun denklemlerinden gelen ikinci dereceden türevler ihmal edilmeyip kontrol kuralına eklenmiştir (Suiçmez, 2011). Sistem dinamiklerini durum değişkenleri cinsinden ifade edersek;

$$\dot{x}_1 = \dot{\phi} = x_2 \quad (14)$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{\phi} = x_4 x_6 a_1 + b_1 U_2 \quad (15)$$

$$\dot{x}_3 = \dot{\theta} = x_4 \quad (16)$$

$$\dot{x}_4 = \ddot{\theta} = x_2 x_6 a_3 + b_2 U_3 \quad (17)$$

$$\dot{x}_5 = \dot{\psi} = x_6 \quad (18)$$

$$\dot{x}_6 = \ddot{\psi} = x_4 x_2 a_5 + b_3 U_4 \quad (19)$$

$$\dot{x}_7 = \dot{x} = x_8 \quad (20)$$

$$\dot{x}_8 = \ddot{x} = \frac{u_x U_1}{m} - \frac{K_x x_8}{m} \quad (21)$$

$$\dot{x}_9 = \dot{y} = x_{10} \quad (22)$$

$$\dot{x}_{10} = \ddot{y} = \frac{u_y U_1}{m} - \frac{K_y x_{10}}{m} \quad (23)$$

$$\dot{x}_{11} = \dot{z} = x_{12} \quad (24)$$

$$\dot{x}_{12} = \ddot{z} = -g + \frac{\cos(x_1) \cos(x_3) U_1}{m} - \frac{K_z x_{12}}{m} \quad (25)$$

Denklemlerde;

$$a_1 = \frac{I_y - I_z}{I_x} \quad (26)$$

$$a_3 = \frac{I_x - I_z}{I_y} \quad (27)$$

$$a_5 = \frac{I_x - I_y}{I_z} \quad (28)$$

$$b_1 = \frac{d}{I_x} \quad (29)$$

$$b_2 = \frac{d}{I_y} \quad (30)$$

$$b_3 = \frac{1}{I_z} \quad (31)$$

$$u_x = \cos(x_1) \sin(x_3) \cos(x_5) + \sin(x_1) \sin(x_5) \quad (32)$$

$$u_y = \cos(x_1) \sin(x_3) \sin(x_5) - \sin(x_1) \cos(x_5) \quad (33)$$

ile ifade edilmektedir. Durum değişkenleri geri adımlamalı kontrolcü tasarımında uygun yöntem olan alt üçgen formunda yazılmalıdır. Bu sayede her bir durum değişkeni kendinden sonraki (zamana göre değişim) değişime etki ederek kararlı bir yapıya ulaşmasını sağlamaktadır.

Pozisyon Kontrolü

Bu bölümde, ilk olarak dört pervane tarafından üretilen U_1 kontrol işareti elde edilecektir. Quadrotor'un dinamik modeli incelendiğinde, U_1 x,y,z 'de meydana gelen hareketle doğrudan ilişkilidir. Ayrıca x ve y yönündeki hareketler, yunuslama ve yalpalama açısına bağlı olduğu için u_x ve u_y 'den etkilenmektedir. Bu nedenle z ekseninde meydana gelen ötelemeli hareket U_1 'e ve x ve y'de meydana gelen hareketleri de u_x ve u_y 'ye bağlı olarak elde edeceğiz. Sistemde z ekseninde meydana gelen hatadan başlayarak kontrolcü tasarımına geçilmiştir. z ekseninde meydana gelen hata (Suiçmez, 2011);

$$z_{11} = x_{11r} - x_{11} \quad (34)$$

olur. Uygun Lyapunov fonksiyonu seçilirse,

$$V(z_{11}) = \frac{1}{2}(z_{11})^2 \quad (35)$$

elde edilir.

Eşitlik 36'nın zamana göre türevi alınır,

$$\dot{V}(z_{11}) = z_{11}\dot{z}_{11} \quad (36)$$

denklemini elde edilir. Eşitlik 37'de Eşitlik 34'ün zamana göre türevi alınmış ifadesi konularsa,

$$\dot{V}(z_{11}) = z_{11}(\dot{x}_{11r} - \dot{x}_{11}) = z_{11}(\dot{x}_{11r} - x_{12}) \quad (37)$$

ifadesi elde edilir. Eğer Eşitlik 38'de elde edilen ifade zamanla azalıyor hata da zamanla sifıra yakınsayacaktır. Eğer

$$x_{12} = \dot{x}_{11r} + a_1 z_{11} ; a_1 > 0 \text{ için} \quad (38)$$

seçilirse z_{11} sifıra yakınsayacaktır. Diğer durum denklemlerinden gelen hata olarak,

$$z_{12} = x_{12r} - x_{12} = \dot{x}_{11r} + a_1 z_{11} - x_{12} \quad (39)$$

elde edilir. Uygun bir Lyapunov fonksiyonu seçilmesi durumunda,

$$V(z_{11}, z_{12}) = \frac{1}{2}(z_{11})^2 + \frac{1}{2}(z_{12})^2 \quad (40)$$

yazılabilir. Eğer seçilen Lyapunov fonksiyonunun zamana göre türevi alındığında negatife gittiği ve azaldığı görülüyorsa, z_{11} ve z_{12} de zamanla azalacaktır.

$$\dot{V}(z_{11}, z_{12}) = z_{11}\dot{z}_{11} + z_{12}\dot{z}_{12} \quad (41)$$

Türev ifadesi elde edilir. Denkleminde bulunan hataların türevlerini yerine yazıp denklemleri tekrar düzenlersek,

$$\dot{z}_{11} = z_{12} - a_1 z_{11} \quad (42)$$

$$\dot{z}_{12} = \ddot{x}_{11r} + a_1 z_{11} - \dot{x}_{12} \quad (43)$$

Eşitlik 42 ve eşitlik 43'ü Eşitlik 41'de yerine yazarsak,

$$\dot{V}(z_{11}, z_{12}) = z_{11}(z_{12} - a_1 z_{11}) + z_{12}(\ddot{x}_{11r} + a_1 z_{11} - \dot{x}_{12}) \quad (44)$$

denklemini elde edilir. \dot{x}_{12} ifadesi durum denklemlerinden geldiği için Eşitlik 44'de yerine yazılırsa,

$$\begin{aligned} \dot{V}(z_{11}, z_{12}) = & z_{11}z_{12} - a_1 z_{11}^2 + z_{12}\ddot{x}_{11r} + a_1 z_{12}^2 - a_1^2 z_{11}z_{12} + g z_{12} \\ & - z_{12}(\cos(x_1) \cos(x_3)) \frac{U_1}{m} + z_{12} \frac{K_z x_{12}}{m} \end{aligned} \quad (45)$$

Türev ifadesi bu şekilde elde edilir. Buradan $\dot{V}(z_{11}, z_{12})$ negatife götürecekt uygun bir U_1 kuralı seçilirse,

$$U_1 = (m/(\cos(x_1) \cos(x_3)))(z_{11} + \ddot{x}_{11r} + a_1 z_{12} - a_1^2 z_{11} + g + \frac{K_z x_{12}}{m} + a_2 z_{12}) \quad (46)$$

denkleminde $a_1, a_2 > 0$ 'dır. U_1 'i Eşitlik 46. daki gibi seçersek,

$$\dot{V}(z_{11}, z_{12}) = -a_1^2 z_{11}^2 - a_2^2 z_{12}^2 \quad (47)$$

denklemini elde edilir. Eşitlikte $z_{11}, z_{12} \neq 0$ 'dır. Lyapunov teorisine göre hatalar (z_{11} ve z_{12}) sifıra yakınsamakta ve sistem kararlı hale gelmektedir.

Aynı yöntem kullanılarak x ve y yönünde meydana gelen hareketlerin kontrolcü işaretleri olan u_x ve u_y Eşitlik 48 ve Eşitlik 49'daki gibi elde edilebilir,

Eşitlik 48 ve Eşitlik 49'da bulunan $a_7, a_8, a_9, a_{10} > 0$ 'dır. Ayrıca,

$$u_x = \left(\frac{m}{U_1}\right) \left(z_7 + \ddot{x}_{7r} + a_7 z_8 - a_7^2 z_7 + \frac{K_z x_8}{m} + a_8 z_8\right) \quad (48)$$

$$u_y = \left(\frac{m}{U_1}\right) \left(z_9 + \ddot{x}_{9r} + a_9 z_{10} - a_9^2 z_9 + \frac{K_y x_{10}}{m} + a_{10} z_{10}\right) \quad (49)$$

$$z_7 = x_{7r} - x_7 \quad (50)$$

$$z_8 = x_{8r} - x_8 \quad (51)$$

$$z_9 = x_{9r} - x_9 \quad (52)$$

$$z_{10} = x_{10r} - x_{10} \quad (53)$$

olarak ifade edilmektedir. Pozisyon kontrolünde referans olarak gönderilen x_{11r}, x_{9r}, x_{7r} , sırasıyla z, y

BULGULAR VE TARTIŞMA

Quadrotor'un yörünge kontrolü gerçek zamanlı olarak geri adımlamalı kontrolcünün performansını göstermek için eğik çember ve zigzag formunda iki ayrı yörünge için gerçekleştirilmiştir. İlk uygulamada eğik çember rota referansı kullanılmıştır. Rota yerden 1 metre yükseklikten başlamakta, x ekseninde boyunca 0 metre ile 2 metre aralığında, y ekseninde boyunca -1 metre ile 1 metre aralığında ve z ekseninde boyunca 1 metre ile 3 metre arasında değişmektedir. Bu rota Quadrotor'un x, y ve z eksenlerinde aynı anda kontrolünü sağlamak için oluşturulmuştur.

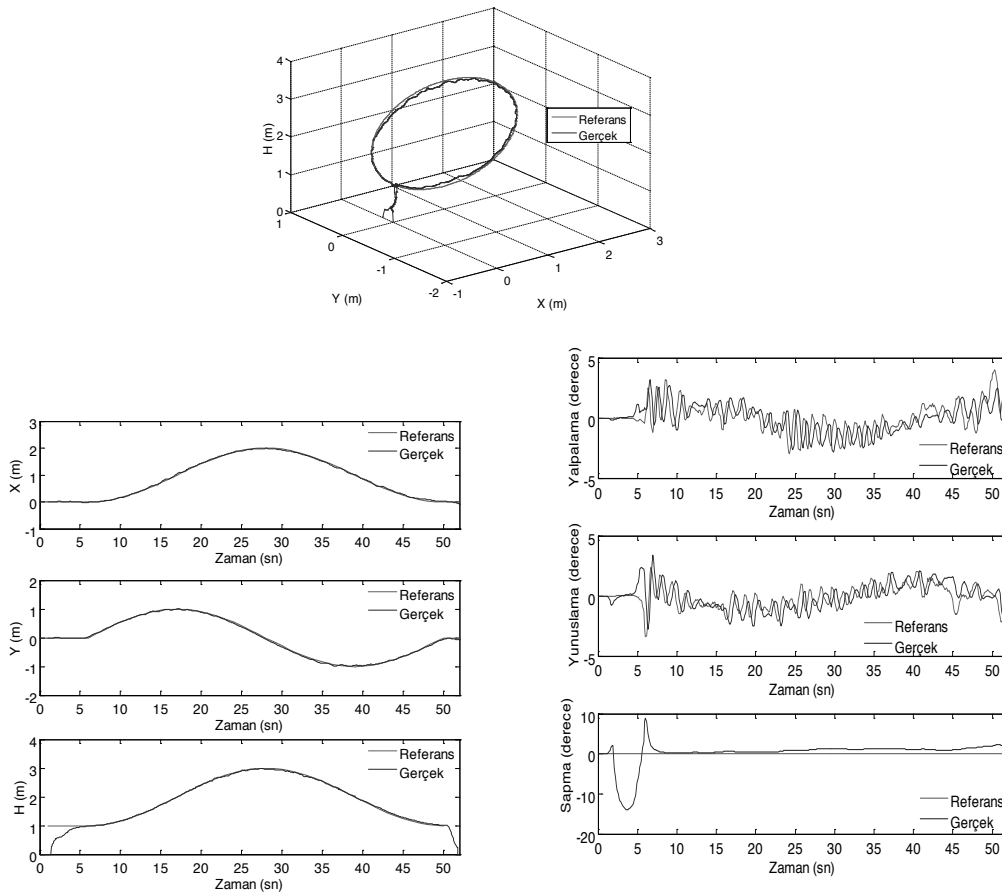
ve x için verilen referans işaretlerini temsil etmektedir. Eşitlik 51 ve Eşitlik 53'teki bulunan referans değerleri ise,

$$x_{8r} = \dot{x}_{7r} + a_7 z_7 \quad (54)$$

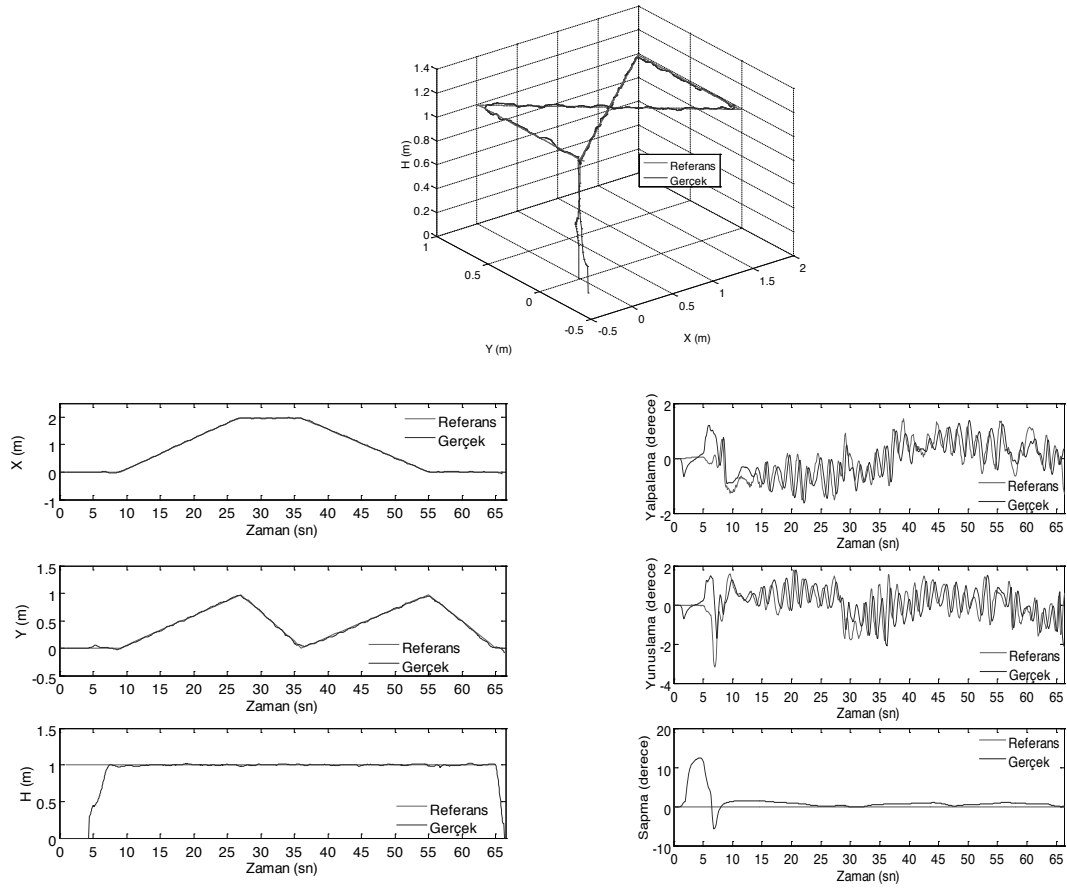
$$x_{10r} = \dot{x}_{9r} + a_9 z_9 \quad (55)$$

Eğik çember rotanın deneysel sonuçları Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde Quadrotor'un x, y, z yönünde sürekli değişim içeren referansı iyi takip ettiği ve rotadan çok az bir sapma gerçekleştirdiği görülmektedir.

Yörünge takibinde meydana gelen titreşimler ve hafif sapmalar Quadrotor'da kullanılan sensörlerin hassasiyetine, deneysel sonuçların alındığı ortama da bağlı olmasına rağmen geri adımlamalı kontrolcünün sistemdeki hataları azalttığı ve Quadrotor'un stabil bir uçuş gerçekleştirmesini sağladığı görülmektedir.



Şekil 3. Quadrotor'un eğik çember yörünge referansı için deney sonucu.



Şekil 4. Quadrotor'un Zigzag yörünge referansı için deney sonucu.

Zigzag rota referansı ise; yerden 1 metre yükseklikten başlayıp x ekseninde 2 metre, y ekseninde ise 1 metre uzunluğa sahiptir. Referans rotanın dar açılı keskin dönüş manevraları içermesi gerçek zamanlı olarak takibini zorlaştırmaktadır. Zigzag rotanın deneysel sonucu Şekil 4'de verilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, Quadrotor'un keskin dönüş noktalarını az sapma ile takip ettiği görülmektedir. Değişimin x-y ekseninde doğrusal olduğu değerlerde hata oranının azaldığı ve kontrolcünün sensör hassasiyeti ve deneysel sonuçların alındığı ortama bağlı olarak oluşan titreşim ve salınımları önleme adına hızlı değişen referans açılı işaretleri ürettiği görülmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada Quadrotor'un gerçek zamanlı yörünge takibi kontrolü geri adımlı kontrolcü ile gerçekleştirilmiştir. Kontrolcünün, meydana gelen hataları istenilen düzeyde elimine ettiği ve

sistemdeki sapsmaları minimumda tutmayı başararak lineer olmayan bir sistem üzerinde yüksek performans gösterdiği görülmüştür. Ayrıca kontrolcü tarafından üretilen kontrol işaretlerinin, sensör hassasiyeti ve deneysel sonuçların alındığı ortama bağlı olarak oluşan titreşim ve salınımları azalttığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Amlashi N J S, Rezaei M, Bolandi H, Sedigh A K, 2014. Robust Second Order Sliding Mode Control for A Quadrotor Considering Motor Dynamics. *International Journal of Control Theory and Modelling*, 4(1):9-25.
- Bouabdallah S, Noth A, Siegwart R, 2004. PID vs LQ Control Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor. *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, September 28 – October 2 2004, Sendai, JAPAN.
- Bouadi H, Cunha SS, Drouin A, Mora-Camino F, 2011. Adaptive Sliding Mode Control for Quadrotor Attitude Stabilization and Altitude Tracking. *12th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics*, 21-22 November 2011, Budapest, Hungary.

- Castillo P, Dzul A, Lozano R, 2004. Real-Time Stabilization and Tracking of a Four-Rotor Mini Rotorcraft. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 12(4): 510-516.
- Emran J. B, Yesildirek A, 2014. Robust Nonlinear Composite Adaptive Control of Quadrotor. *International Journal of Digital Information and Wireless Communications*, 4(2): 213-225.
- Ergezer H, Leblebicioğlu M K, 2014. İnsansız Hava Araçları için Çevrimiçi Rota Planlama. *Otomatik Kontrol Toplantısı*, 11-13 Eylül 2014, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Gong X, Hou Z C, Zhao C J, Bai Y and Tian Y T, 2012. Adaptive backstepping sliding mode trajectory tracking control for a quad-rotor. *International Journal of Automation and Computing*, 9(5):555-560.
- Krajnik T, Vonasek V, Fiser D, Faigl J, 2011. AR-Drone as a Platform for Robotic Research and Education. In: *Research and Education in Robotics: EUROBOT*, Heidelberg, Springer.
- Madani T, Benallegue A, 2006. Backstepping Control for a Quadrotor Helicopter. *Proceedings of IEEE/RSJ. International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 9-15 October 2006, Beijing, China.
- Mohammadi M, Shahri A M, 2013. Modelling and Decentralized Adaptive Tracking Control of a Quadrotor UAV. *RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics*, 13-15 February 2013, Tehran, Iran.
- Özbek N S, Önkol M, Efe M Ö, 2014. Döner kanat Tipinde Bir İnsansız Hava Aracının Farklı Yöntemlerle Kontrolü ve Performans Analizi. *Otomatik kontrol Toplantısı*, 11-13 Eylül 2014, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Saif A-W A., Dhaifullah M, Al-Malki M, El Shafie M, 2012. Modified Backstepping Control of Quadrotor. *The 9th International Multi-Conference on Systems, Signal and Devices*, 20-23 March 2012, Chemnitz, Germany.
- Schreier M, 2012. Modelling and Adaptive Control of a Quadrotor. *Proceedings of IEEE. International Conference on Mechatronics and Automation*, 5-8 August 2012, Chengdu, China.
- Suiçmez E, 2014. Trajectory Tracking of a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Via Attitude and Position Control. A Thesis Submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 131s.
- Tong S, Li H X, 2003. Fuzzy adaptive sliding-mode control for MIMO nonlinear systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 11(3):354-360.
- Zhao B, Xian B, Zhan Y, Zhang X, 2015. Nonlinear Robust Adaptive Tracking Control of a Quadrotor UAV Via Immersion and Invariance Methodology. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 62(5):2891-2902.

