



Tip-2 Nöro-Bulanık Denetleyiciler ile Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının Yörünge Takibi

Yeşim ÖNİZ*

İstanbul Bilgi Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/06/2023
Düzeltilme: 14/10/2023
Kabul: 24/11/2023

Anahtar Kelimeler

Döner Kanatlı İnsansız
Hava Aracı
Tip-2 Nöro-Bulanık
Denetleyici
Kayma Kipli Kontrol

Article Info

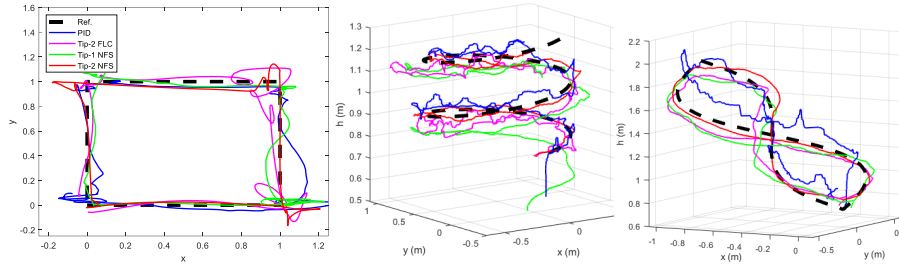
Research article
Received: 08/06/2023
Revision: 14/10/2023
Accepted: 24/11/2023

Keywords

Quadrotor
Type-2 Neuro-fuzzy
Controller
Sliding Mode Control

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, tip-2 nöro-bulanık denetleyiciler kullanılarak bir döner kanatlı insansız hava aracının yörünge takibi gerçekleştirilmiştir. Özellikle deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, tip-2 nöro-bulanık denetleyiciler için geliştirilen kayma kipli kontrol tabanlı öğrenme algoritmalarının hedef yörüngeden daha az sapma ve daha gürbüz sistem cevabı sağladığını göstermektedir. / In this study, the trajectory tracking problem of a rotary wing unmanned aerial vehicle has been addressed by the use of type-2 neuro-fuzzy controllers. Especially the results recorded in the real-time experiments indicate that the proposed type-2 controllers with sliding mode control theory-based learning algorithm provide less deviation from the target trajectory and more robust system response.



Şekil A: Hedefyörünge takibi için deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar /
Figure A: Trajectory tracking results obtained from experimental studies

Önemli noktalar (Highlights)

- Üç farklı yörünge için benzetim ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. / Simulation and experimental studies were carried out for three different trajectories.
- Parametre güncelleme kurallarının çıkarımında değişken yapıli sistemler kuramı kullanılmıştır. / Sliding mode control theory has been used in the derivation of the parameter update rules.
- Deneysel ve benzetim çalışmaları orantılı-integral-türev (PID) denetleyici, tip-2 bulanık mantık denetleyici ve tip-1 nöro-bulanık denetleyici ile tekrarlanmış olup denetleyicilerin cevapları karşılaştırılmıştır. / Experimental and simulation studies were repeated with proportional-integral-derivative (PID) controller, type-2 fuzzy logic controller and type-1 neuro-fuzzy controller and the responses of the controllers were compared.

Amaç (Aim): Bu çalışmada İHA'ların yörünge takibi pronlemi için daha gürbüz sistem cevabı sağlayan tip-2 nöro-bulanık denetleyicinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. / In this study, it is aimed to develop a type-2 neuro-fuzzy controller that provides a robust system response for the trajectory tracking problem of UAVs.

Özgünlük (Originality): Parametre güncelleme kurallarının çıkarımında benzer çalışmalarda yoğunlukla kullanılan eğim düşümü yöntemi yerine değişken yapıli sistemler kuramı kullanılmıştır. / In the derivation of the parameter update rules, the theory of variable structure systems is used instead of the gradient-descent method, which is widely used in similar studies.)

Bulgular (Results): Benzetim ve deneysel çalışmalarda önerilen denetleyici ile çalışmada kullanılan diğer denetleyicilere göre daha küçük hata değerleri elde edilebildiği ve bozucu etkenlerin etkisinin denetleyici başarımı üzerinde daha sınırlı olduğu gözlemlenmiştir/ In simulation and experimental studies, it is observed that the proposed controller can achieve smaller error values than the other controllers used in the study and the effect of disturbance is limited on the controller performance.

Sonuç (Conclusion): Değişken yapıli sistemler tabanlı öğrenme algoritmaları tip-2 nöro-bulanık denetleyicilerde kullanıldığında, hedef yörüngeden daha az sapma ve daha gürbüz sistem cevabı elde edilebilir./ Use of variable structure systems-based learning algorithms in type-2 neuro-fuzzy controllers can provide less deviation from the target trajectory and more robust system response.



Tip-2 Nöro-Bulanık Denetleyiciler ile Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının Yörünge Takibi

Yeşim ÖNİZ*

İstanbul Bilgi Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi
Başvuru: 08/06/2023
Düzeltilme: 14/10/2023
Kabul: 24/11/2023*

Anahtar Kelimeler

*Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracı
Tip-2 Nöro-Bulanık Denetleyici
Kayma Kipli Kontrol*

Öz

Bu çalışmada, tip-2 nöro-bulanık denetleyiciler kullanılarak bir döner kanatlı insansız hava aracının yörünge takibi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen kontrol sisteminin etkinliğini belirlemek amacıyla, oluşturulan üç farklı yörünge için benzetim ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Her bir eksen için ayrı bir denetleyici tasarlanmış olup hava aracının yörünge takibi sırasında ilgili eksen için gerçek ve hedef konumları arasındaki fark ve bu değerın zamana göre türevi denetleyicilerin giriş sinyalleri olarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçları daha iyi değerlendirebilmek amacıyla aynı yörüngeler için deneysel ve benzetim çalışmaları orantılı-integral-türev (PID) denetleyici, tip-2 bulanık mantık denetleyici ve tip-1 nöro-bulanık denetleyici ile tekrarlanmış olup denetleyicilerin cevapları karşılaştırılmıştır. Gerçek zamanlı deneysel çalışmalar, Parrot firması tarafından üretilen Ar.Drone 2.0 ile iç mekanda kontrollü bir ortamda gerçekleştirilmiştir. Özellikle deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, tip-2 nöro-bulanık denetleyiciler için geliştirilen kayma kipli kontrol tabanlı öğrenme algoritmalarının hedef yörüngeden daha az sapma ve daha gürbüz sistem cevabı sağladığını göstermektedir.

Trajectory Tracking of a Quadrotor Using Type-2 Neuro-Fuzzy Controllers

Article Info

*Research article
Received: 08/06/2023
Revision: 14/10/2023
Accepted: 24/11/2023*

Keywords

*Quadrotor
Type-2 Neuro-fuzzy
Controller
Sliding Mode Control*

Abstract

In this study, the trajectory tracking problem of a rotary wing unmanned aerial vehicle has been addressed by the use of type-2 neuro-fuzzy controllers. In order to determine the effectiveness of the developed control system, simulation and experimental studies have been performed for three different trajectories. The movement of the quadrotor in each direction has been controlled by a separate controller, and the difference between the actual and target positions for the relevant axis during the trajectory tracking along with the time derivative of this value has been fed to the controllers as the input signals. In order to better evaluate the results obtained, experimental and simulation studies for the same trajectories have been repeated with proportional-integral-derivative (PID) controllers, type-2 fuzzy logic controllers and type-1 neuro-fuzzy controllers, and the responses of these controllers have been compared. Real-time experimental studies have been carried out indoors in a controlled environment with the Ar.Drone 2.0 produced by Parrot company. Especially the results recorded in the real-time experiments indicate that the proposed type-2 controllers with sliding mode control theory-based learning algorithm provide less deviation from the target trajectory and more robust system response.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yüzyıl, uçak teknolojisinde çok büyük gelişmelere sahne olmuştur. 1903 yılındaki ilk insanlı uçuştan bu yana uçak tasarımları gitgide gelişerek bugün büyük kargo taşıyabilen, yüksek manevra kabiliyetine sahip, yüksek hız ve irtifalara ulaşabilen uçakların tasarımlarını mümkün hale getirmiştir. 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren ise insansız hava araçlarının (İHA) çeşitli askeri amaçlarla geliştirilip kullanılmaya başlandığını ve bu hava araçlarına olan ilginin karmaşık ve

belirsizlikler içeren ortamlarda sağladıkları avantajlar nedeniyle gün geçtikçe artmakta olduğunu gözlemleyebiliriz. Özellikle fiziksel koşulların zorlu veya tehlikeli olduğu görevler ele alındığında, İHA'ların tam ölçekli insanlı bir hava aracına kıyasla neden yoğun olarak tercih edildiğini daha rahat anlayabiliriz. Son yirmi yıl içerisinde uygun fiyatlı, kararlı ve yüksek performansa sahip elektronik bileşen ve sistemlerin geliştirilmesi ve gerekli malzemelerin kolayca ulaşılabilir olması sayesinde de insansız hava araçlarının araştırma ve üretimi daha yaygın hale gelmiş ve askeri

alanlardaki kullanımlarının yanı sıra akademik araştırmalar, arama kurtarma, havadan görüntüleme, sınır güvenliği, haritalama, topografya, yangın takibi gibi farklı uygulamalarda da tercih edilmeleri söz konusu olmuştur [1-3].

Bu çalışma kapsamında dört rotorlu döner kanat tipi bir İHA kullanılmıştır. Genel olarak bu tür İHA'lar gövde, elektronik sistemler ve rotorlar olmak üzere 3 ana bölümden oluşmaktadır. Gövde temel olarak birbirine bağlanmış iki bardan oluşmakta olup bu yapı genellikle simetrik bir özellik taşımakta ve enerji tasarrufu sağlamak amacıyla mümkün olduğunca hafif ve dayanıklı bir malzemeden üretilmektedir. İki barın da her iki ucunda rotorlar yer almaktadır. Bu tür hava araçlarında tüm uçuş ve manevralar için sadece bu dört motor kullanılmakta ve motorlara iletilen sinyaller ile İHA'nın hareketleri belirlenmektedir. Bu nedenle çeşitli algılayıcılardan (basınç ölçer, jiroskop, pusula, GPS, ultrasonik, vb.) toplanan verileri alacak ve irtifa, konum gibi arzu edilen çıktılara ulaşmak için ulaşmak için gereken sinyalleri tahrik elemanlarına iletecek elektronik elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Döner kanatlı İHA'nın istenilen şekilde ve yörüngede hareket edebilmesi için uçuş parametrelerinin yüksek doğruluk derecesi ile hassas bir şekilde uçuş öncesinde ayarlanması gerekmektedir. Aksi durumlarda istenilen yörünge hareketleri elde edilemeyebilir ve çeşitli kaza riskleri ortaya çıkabilir. Ancak bu tür İHA'ların hareket denetimi, ayrışmayan doğrusal olmayan dinamiklere, çalışma ortamlarında pek çok belirsizliği ve bozan etkenlere sahip olmaları nedeniyle kontrol mühendisliği açısından pek çok zorluğu içinde barındırmaktadır [4]. Ayrıca birden fazla motorun aynı anda kontrol edilmesi, algılayıcılardan gelen verilerin içerdikleri hata payları ve gürültü, üç eksene ait açı değerlerinin elde edilmesindeki hatalar ve olumsuz hava koşulları İHA'ların denetimini zorlaştırmaktadır. Bu faktörlerin tümü, döner kanatlı bir İHA'nın hareket denetiminin oldukça zorlayıcı bir görev olmasına ve bu alanda çok sayıda araştırma faaliyetinin yürütülmesine yol açmaktadır. Bu çalışmalarda araştırmacılar tarafından genellikle iki farklı yaklaşım izlenmektedir. Model tabanlı denetleyicilerin kullanıldığı ilk yaklaşımda sistemin yüksek derecede doğruluk oranına sahip bir matematiksel modeli gerekli olurken ikinci yaklaşımda bu gereklilik modelden bağımsız denetleyicilerin kullanımı ile bertaraf edilmektedir.

Orantılı-integral-türev (PID) ve doğrusal kuadratik regülatör (LQR) gibi doğrusal, model tabanlı denetleyiciler, İHA'ların kontrolü için bir dereceye kadar başarı sağlamıştır. [5]'te, yükseklik ve konum denetimi için PID denetleyiciler kullanılarak döner kanatlı İHA'nın performansı, sert manevralar gerektiren farklı yörüngeler için test edilmiştir. [6]'da hem LQR hem de PID kontrol teknikleri kullanılmış ve yazarlar "ortalama" sonuçların elde edildiğini bildirmiştir. [7]'de LQR, optimal bir yörünge üretici ile birlikte kullanılmıştır. Görev sırasında referans yörüngede değişiklik gerektiren bir dizi benzetim çalışması yapılmıştır. Model öngörülü kontrol (MPC), İHA'ların yörünge izleme problemini ele alan başka bir model tabanlı denetim yaklaşımıdır. Yakın zamana kadar yüksek hesaplama gereksinimleri nedeniyle MPC'nin gerçek zamanlı uygulamaları sınırlı kalmaktayken yüksek performanslı işlemcilerin ortaya çıkması, bu tür denetleyicilerin sistemin örnekleme süresinin yeterince hızlı olması gereken havacılık mühendisliğinde kullanımına olanak sağlamıştır. [8]'de öncelikle döner kanatlı bir İHA için çeşitli çalışma noktaları belirlenmiş ve sistemin dinamikleri bu noktalarda için doğrusallaştırılarak bir dizi doğrusal denklem elde edilmiştir. Her bir doğrusal bölge için MPC en uygun denetim sinyalini sağlarken aynı zamanda bir doğrusal bölgeden diğerlerine geçişlerin yumuşak şekilde gerçekleşmesini mümkün kılmıştır. [9]'da, MPC denetleyicisinin hesaplama yükünü azaltmak amacıyla sistemin gelecekteki değerlerini tahmin edecek doğrusal bir öngörücü kullanılmıştır.

Uçak mühendisliğinde, sistemin yüksek derecede doğruluk oranına sahip matematiksel modelinin oluşturulması, bir dizi uçuş testi gerçekleştirerek rüzgar tüneli verilerinin toplanmasını ve sonrasında bu verilere uygun modelin uyarlanmasını gerektirmektedir. Bu süreç zaman alıcı olduğu kadar zahmetli de olup elde edilen model, kullanılan varsayım ve sadeleştirmelerden kaynaklanan tahmin hataları, malzeme özellikleri ve imalat toleransından kaynaklanan performans belirsizliği nedeniyle sınırlıdır [10-13]. Döner kanatlı İHA'lar için de geçerli olan bu belirsizlikler, tasarlanan kapalı döngü denetim sisteminin başarımında ciddi sapmalara neden olabilmektedir [14]. Bunun yanı sıra yukarıda da belirtildiği gibi algılayıcı sinyalleri genellikle yüksek oranda belirsizlik ve gürültü içermektedir. Belirlenimci modellerin, süreci uygun bir şekilde tanımlamakta yetersiz kaldığı böyle durumlarda bulanık mantık sistemleri, yapay sinir ağları gibi akıllı kontrol sistemlerinin kullanımı uygun bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu

tür modelden bağımsız denetleyici yapılarında, algılayıcılardan elde edilen verileri ve deneylerin sonuçlarını kullanarak fiziksel sistemin matematiksel denklemini belirlemek yerine, bu veriler doğrudan bir denetleyicinin tasarımı amacıyla kullanılmaktadır. Böylece sistemin yüksek derecede doğruluk içeren bir modeline olan ihtiyaç ortadan kaldırılarak belirsizlikler ve doğrusal olmayan etmenler içeren durumlarda denetleyici tasarımı kolaylaştırılmaktadır.

Yapay sinir ağlarında (ANN) insan beyninin öğrenme mekanizması yapay nöronlardan oluşan bir ağ tarafından taklit edilmektedir. Ağ, nöronlar arasındaki etkileşimleri kullanarak, istenen çıktıyı üretmek için ağırlıklarını uyarlamaktadır. [15]'te, döner kanatlı İHA'nın doğrusal ve açısal hızlarının ölçülemediği ve sistemin dinamik modelinin tam olarak bilinemediği varsayılmıştır. ANN ile İHA'nın hız vektörü tahmin edilmiş ve bu bilgi sistemin konumunu ve yönünü kontrol edip optimal bir yörünge yanıtı elde edilmesi amacıyla kullanılmıştır. [16]'da radyal tabanlı yapay sinir ağları kullanılarak sistemdeki bilinmeyen dinamikleri ve belirsizlikleri modellemek amacıyla öncelikle bir tanımlayıcı geliştirilmiş olup sonrasında bu model için sinir ağı tabanlı bir denetleyici oluşturulmuştur.

Modelden bağımsız denetim için yaygın olarak kullanılan bir başka yaklaşım, bulanık mantık denetleyicileridir. Bulanık mantık, üyelik fonksiyonları ve bulanık kurallar şeklinde ifade edilen uzman bilgisine dayanmaktadır. Üyelik fonksiyonlarının da bulanık olduğu ve bu sayede tip-1 bulanık mantık denetleyicilere göre belirsizlikleri modelleyip etkisini azaltabilme konusunda daha etkin olan tip-2 bulanık mantık denetleyicileri, belirsizlikler ve kesin olmayan bilgilerle karşı karşıya kalınan çoğu gerçek dünya uygulamasında tercih edilmektedir.

Literatürde bulanık mantık denetleyicileri sistemi kontrol etmek için tek başlarına kullanılabilecekleri gibi [17-19] yapay sinir ağları ile bulanık mantık sistemlerini birleştiren nöro-bulanık olarak adlandırabileceğimiz hibrit yapılarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu hibrit yapılar, sinir ağlarının öğrenme kabiliyetine ve bulanık sistemlerin uzman bilgisi ile belirsizliklerle başa çıkabilme yeteneğine sahip olmaları nedeniyle tercih edilmektedir. [20]'de nöro-bulanık denetleyici, İHA'nın yüksekliğini kontrol etmek amacıyla kullanılan PID denetleyicinin katsayılarını uyarlamak amacıyla kullanılmıştır. [21]'de ANFIS (Adaptive Neuro

Fuzzy Inference System) yapısı kullanılarak tip-2 bulanık mantık denetleyicisinin üyelik fonksiyonlarının ve kurallarının sayısı azaltılmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmada, döner kanatlı insansız hava aracının yörünge izleme problemi için tip-2 nöro-bulanık denetleyici geliştirilmiştir. Parametre güncelleme kurallarının çıkarımında benzer çalışmalarda yoğunlukla kullanılan eğim düşümü yöntemi yerine değişken yapılı sistemler kuramı kullanılmıştır. Geliştirilen özgün denetleyicinin başarımı çalışmada kullanılan diğer denetleyicilerle karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmalarının yanı sıra Parrot firması tarafından üretilen AR.Drone 2.0 Elite model İHA üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan döner kanatlı İHA'nın kinematik ve dinamik modeli Bölüm 2'de sunulmuştur. Sırasıyla Bölüm 3 ve Bölüm 4'te tip-2 nöro-bulanık denetleyicinin yapısı ve parametrelerinin uyarlama kuralları paylaşılmıştır. Bölüm 5'te benzetim çalışmalarının sonuçları, Bölüm 6'da ise deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar verilmiştir. Son bölüm, sonuç açıklamalarına ayrılmıştır.

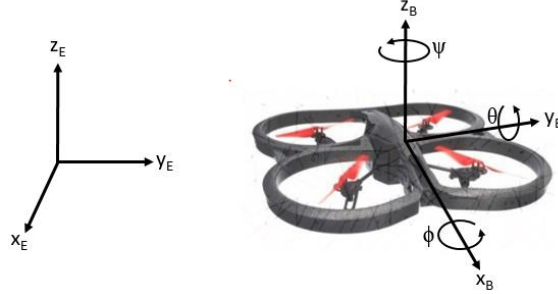
2. DÖNER KANATLI İHA'NIN MATEMATİKSEL MODELİ (MATHEMATICAL MODEL OF THE QUADROTOR)

Parrot firması tarafından üretilen AR.Drone 2.0 model İHA, düşük maliyeti ve kolay erişilebilirliği nedeniyle, benzetim çalışmaları ve gerçek zamanlı uygulamalar için test platformu olarak tercih edilmiştir. Matlab, Labview gibi çeşitli programlar üzerinden programlama imkanı sunan bu İHA pek çok araştırma projesinde aktif olarak kullanılmaktadır [22-23]. Bu İHA modelinde merkezi gövdenin etrafına, dört adet pervane simetrik olarak yerleştirilmiştir. Bu konfigürasyonda bitişik pervaneler ters yönde dönerek merkezi eksen etrafında sıfır net tork elde edilmesini ve böylece İHA'nın kontrolsüz şekilde dönmesinin önlenmesini sağlamaktadır. Her motora uygulanan enerji, belirlenen hareket yörüngesine ve istenilen hıza göre değiştirilmektedir.

Çalışmada kullanılan İHA, azami 18 km/h hıza ulaşabilmektedir. Toplam 436g ağırlığa sahip İHA 51.5 cm x 51.5 cm boyutlara sahiptir. İHA'nın güç gereksinimi 3 hücreli, 11.1 V ve 1000 mAh sağlayan bir lityum polimer pil ile karşılanmaktadır. İHA üzerinde gömülü bilgisayar sistemi CMAP 3630 1GHz ARM cortex A8 işlemciye sahip olup Linux OS işletim sistemini kullanmaktadır. DDR SDRAM 128MB hafızaya sahiptir.

Şekil 1'de gösterildiği üzere döner kanatlı İHA'lar, uçuş öteleme ve uçuş dönme olmak üzere toplam altı serbestlik derecesine sahiptir. Uçaklara benzer şekilde, x-ekseni ve y-ekseni boyunca dönme hareketlerini tanımlamak için sırasıyla yuvarlanma (ϕ) ve yunuslama (θ) terimleri kullanılırken sapma

açısı (ψ) z-ekseni boyunca dönme hareketine karşılık gelmektedir. Ayrıca döner kanatlı İHA'larda, x-ekseni boyunca öteleme hareketi, yunuslama değeri ayarlanarak üretilebilirken y-ekseni boyunca öteleme hareketi, yuvarlanma hareketinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan İHA için serbestlik dereceleri (Degrees of freedom for the UAV used in this study)

Altı serbestlik derecesine sahip döner kanatlı İHA'nın konumunu ve yönelimini belirleyebilmek amacıyla biri İHA'nın merkezine iliştilmiş ve $B = \{X_B, Y_B, Z_B\}$ şeklinde tanımlanmış, diğeri ise yerde belirlenen bir noktaya göre sabitlenen ve $E =$

$\{X_E, Y_E, Z_E\}$ şeklinde ifade edilen dünya koordinat sistemleri kullanılmaktadır. Denklem 1'de verilen dönüşüm matrisi R kullanılarak, B koordinat sistemine göre verilen konum ve doğrusal hız bilgileri E koordinat sistemine göre tanımlanabilir

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

Newton ve Euler'in hareket yasaları kullanılarak döner kanatlı İHA için sistemin dinamik modeli Denklem 2'deki gibi elde edilebilir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan İHA için parametreler (Parameters for the UAV used in this study)

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{1}{m} ((\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi)F_z + D_x) \\ \ddot{y} &= \frac{1}{m} ((\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi)F_z + D_y) \\ \ddot{z} &= \frac{1}{m} ((\cos \phi \cos \theta)F_z + D_z) - g \\ \ddot{\phi} &= \frac{(I_{yy} - I_{zz})\dot{\theta}\dot{\psi} - J\dot{\theta}(-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) + lK_t(\Omega_4^2 - \Omega_2^2)}{I_{xx}} \\ \ddot{\theta} &= \frac{(I_{zz} - I_{xx})\dot{\phi}\dot{\psi} - J\dot{\phi}(-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) + lK_t(\Omega_3^2 - \Omega_1^2)}{I_{yy}} \\ \ddot{\psi} &= \frac{(I_{xx} - I_{yy})\dot{\phi}\dot{\psi} + K_d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2)}{I_{zz}} \end{aligned} \quad (2)$$

Parametre	Değeri
m	0.445 kg
l	0.125 m
I_{xx}	$2.7 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
I_{yy}	$2.9 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
I_{zz}	$5.3 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
J	$2.03 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
K_d	$2.38 \cdot 10^{-9} \text{ N} \cdot \text{s}^2$
K_t	$9.14 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$

Bu denklemde m İHA'nın ağırlığını, I_{xx} , I_{yy} ve I_{zz} sırasıyla İHA'nın x , y ve z doğrultularındaki atalet momentini ifade etmektedir. F_z terimi, z eksenini boyunca dikey itmeyi temsil eder. D_x , D_y ve D_z terimleri, x , y ve z doğrultularındaki hızlar için sürüklenme kuvvetleridir. J , rotorun atalet momentini ifade eder. Ω_i ($i=1,2,3,4$) motorların açısal hızlarını, l İHA'nın bar uzunluğunu, K_d hava sürtünme katsayısını, K_t ise itme kuvveti katsayısını göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan Ar.Drone 2.0 Elite modeli için parametreler aşağıdaki tabloda verilmiştir [24-26]:

Kullanılan Ar.Drone 2.0, IEEE 802.11 kablosuz bağlantısı olan bir bilgisayar tarafından kontrol edilebilmektedir. İHA, bağlı olduğu istemciye iki veri akışı sağlamaktadır. Bunlardan ilki seyir verileri (navdata) diğeri ise video yayımıdır. Seyir verileri, atalet ölçüm sisteminden açı değerlerini, ultrasonik sensörden basınç ve irtifa değerlerini ve hız verilerini içerir. Ultrasonik sensörün menzili 6 m olup çalışma frekansı 25 Hz'dir. AR.Drone 2.0'ın ağırlık merkezine 3 eksenli bir dijital MEMS ivmeölçer yerleştirilmiştir. $\pm 2g$ aralığında kullanılabilen ivmeölçer 10 bit ADC ile

çalışmaktadır. Atalet ölçüm birimi 500 °/s'ye kadar ölçüm yapabilen iki analog sensörden oluşmaktadır. IMU sensöründe yer alan 3 eksenli jiroskopun hassasiyeti 2000°/s, 3 eksenli ivmeölçerin hassasiyeti ±50mg, 3 eksenli manyetometrenin hassasiyeti ise 6°'dir. Basınç sensörü ise ±10 Pa hassasiyete sahiptir.

Elde edilen bu verilerden aşağıdaki parametre grubu çeşitli denetleyicilerin tasarımında kullanılabilir.

z : dronun yerden yüksekliği, [m]
 v_x : x eksenindeki öteleme hareketinin hızı, [m/s]
 v_y : y eksenindeki öteleme hareketinin hızı, [m/s]
 ϕ : yuvarlanma açısı, [rad]
 θ : yunuslama açısı, [rad]
 ψ : sapma açısı, [rad]

İHA'nın hareket denetimini sağlamak amacıyla aşağıdaki $[-1, 1]$ aralığıyla sınırlandırılmış hareket kontrol komutları kullanılabilir:

u_z : z yönünde doğrusal hız komutu
 u_ψ : yalpalama eksenini etrafındaki açısal hız
 u_ϕ : yuvarlanma açısı komutu (Bu komut sola/sağa doğru eğilme açısı oluşturmak için kullanılmaktadır. Negatif değerler sola doğru eğilmeyi sağlayarak İHA'nın y(-) yönünde hareket etmesini sağlar.)
 u_θ : yunuslama açısı komutu (Bu komut öne/arkaya doğru eğilme açısı oluşturmak için kullanılmaktadır. Negatif değerler öne doğru eğilmeyi sağlayarak İHA'nın x(+) yönünde hareket etmesini sağlar.)

3. TİP-2 NÖRO-BULANIK DENETLEYİCİ (TYPE-2 NEURO-FUZZY CONTROLLER)

Lotfi Zadeh [27] tarafından tip-1 bulanık kümelerin bir uzantısı olarak ortaya konan tip-2 bulanık kümeler, bulanık bir küme için kesin üyelik fonksiyonlarının tanımlanamadığı, dilsel belirsizliklerin bulunduğu durumlarda yoğunlukla kullanılmaktadır. Bu tip bulanık kümelerde üyelik fonksiyonlarının kendisi de bulanıktır. Tip-2 bulanık sistemler, bulanık EĞER-O ZAMAN kuralları ile karakterize edilmekte olup kuralların öncül ve sonuç bölümlerindeki parametreler, tip-2 bulanık değerleri içermektedir. Bu çalışmada, her kuralın öncül ve sonuç bölümlerindeki bilinmeyen katsayıların uygun değerlerinin belirlenmesi amacıyla nöro-bulanık sistem (NFS) mimarisi kullanılmıştır. Kural sayısının eşit olduğu durumda, tip-2 NFS için tasarım parametrelerinin sayısı tip-1 NFS'ye göre daha fazladır. Bu durum da hesaplama

yükünün artmasına neden olduğundan tip-2 NFS'nin gerçek zamanlı uygulamalarını kısıtlamaktadır. Hesaplama yükünü azaltmak amacıyla çoğu araştırmacı, tip-2 bulanık sistemlerin tasarımında aralık değerli tip-2 bulanık kümeleri kullanmayı tercih etmektedir. Bu tür bulanık kümelerde ikincil üyelik değerleri bire eşit olduğundan ilgili hesaplamalar nispeten daha kolay gerçekleştirilebilmektedir [28]. Bu yaklaşımda, aralık değerli tip-2 bulanık kümeye ait en yüksek üst ve alt üyelik fonksiyonları tip-2 bulanık kümeyi karakterize etmek için kullanılmakta olup bu alt ve üst üyelik fonksiyonları tip-1 üyelik fonksiyonlarıdır.

Bu çalışmada kullanılan iki girişli tek çıkışlı tip-2 nöro-bulanık mantık denetleyicinin yapısı Şekil 2'de verilmiştir. Bu yapıda kuralların öncül kısmında aralık değerli tip-2 bulanık mantık üyelik fonksiyonları kullanılırken sonuç kısımlarında Takagi-Sugeno-Kang (TSK) yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yaklaşımda bulanık kuralların sonuç kısmı Denklem 3'te belirtildiği gibi giriş sinyallerinin bir polinomu şeklinde olup tip indirgeme işlemine olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır.

R_j : EĞER x_1, \tilde{A}_{j1} ve x_2, \tilde{A}_{j2} İSE,

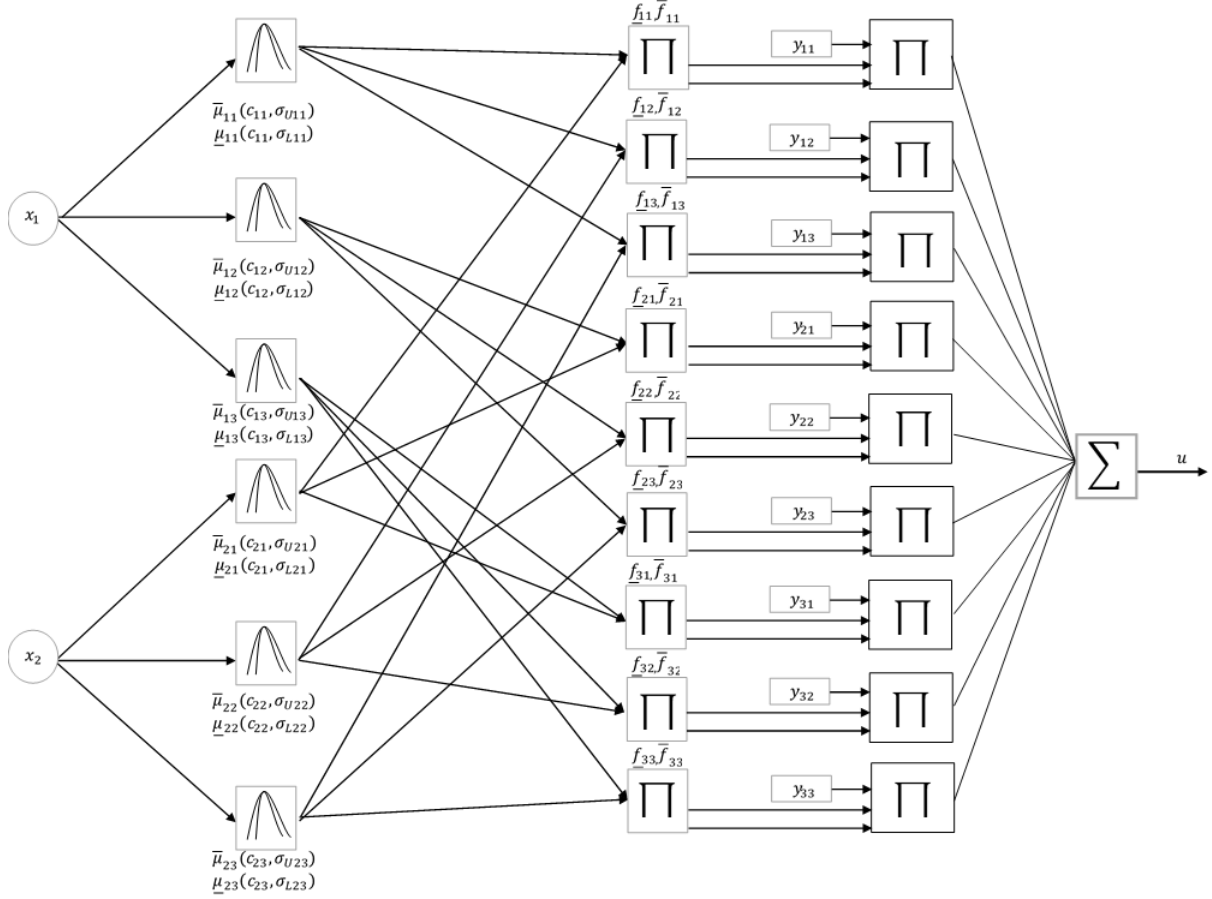
$$\text{O HALDE } y_j = \sum_{i=1}^m w_{ij} x_i + b_j \quad (3)$$

Burada x_1, x_2 giriş sinyallerini, y_j ($j=1, \dots, n$) bulanık kuralların çıkış sinyallerini, \tilde{A}_{jm} ise j numaralı kuralda i girişi için tanımlanan Gauss tip-2 üyelik fonksiyonlarını ifade etmektedir. w_{ij} ve b_j ($i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$) kuralların sonuç kısımlarının parametreleridir. Bu çalışmada kuralların sonuç kısmında sıfır dereceli bir polinom kullanılmıştır, yani Denklem 3'te uygulanan TSK doğrusal fonksiyonu sadece b_j parametresini içermektedir.

Şekil 2'de gösterilen tip-2 nöro-bulanık denetleyicinin ilk katmanı sistemin giriş sinyallerinden oluşmaktadır. İkinci katmanda yer alan her bir düğüm bulanık mantığın dilsel bir terimine karşılık gelmektedir. Kuralların öncül kısımlarındaki her bir üyelik fonksiyonu, bir üst ve bir alt üyelik fonksiyonu ile temsil edilir. Her bir giriş sinyali için n sayıda tip-2 üyelik fonksiyonları kullanıldığı varsayıldığında, giriş sinyali i ($i = 1, \dots, m$) için üyelik fonksiyonları ($j = 1, \dots, n$) aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\mu_{ij}(x_i) = [\underline{\mu}_{ij}(x_i), \bar{\mu}_{ij}(x_i)] \quad (4)$$

Bu ifadeye alt üyelik fonksiyonları $\underline{\mu}_{ij}(x_i)$ şeklinde gösterilirken üst üyelik fonksiyonları $\bar{\mu}_{ij}(x_i)$ şeklinde belirtilmiştir.



Şekil 2. Tip-2 nöro-bulanık denetleyicinin yapısı (Structure of a type-2 neuro-fuzzy controller)

Önerilen yapıda giriş sinyallerini bulanıklaştırma amacıyla Gauss tip-2 bulanık kümeler kullanılmıştır. Bu tip kümelerde belirsizlikler ortalama veya standart sapma (STD) ile ilişkilendirilebilir. Şekil 3(a) ve Şekil 3(b)'de belirsiz standart sapma ve belirsiz ortalamaya sahip Gauss tip-2 bulanık kümeler gösterilmektedir. Bu çalışmada belirsiz standart sapmaya sahip tip-2 bulanık kümeler kullanılmış olup üyelik fonksiyonlarının matematiksel ifadesi Denklem 5'te verilmiştir.

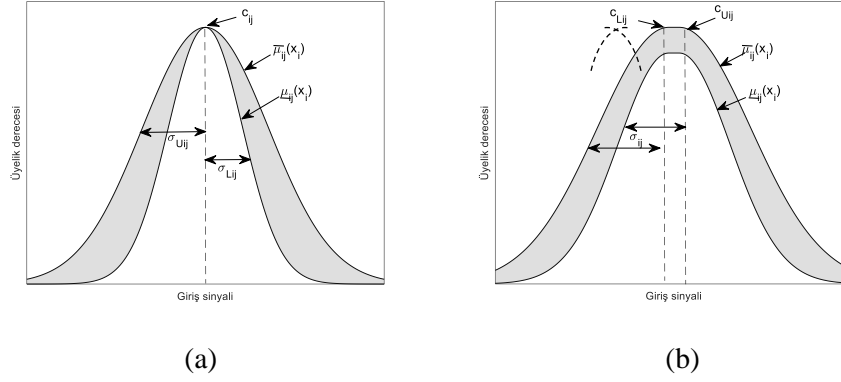
$$\underline{\mu}_{ij}(x_i) = \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x_i - c_{ij})^2}{\sigma_{Lij}^2}\right)$$

$$\bar{\mu}_{ij}(x_i) = \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x_i - c_{ij})^2}{\sigma_{Lij}^2}\right) \quad (5)$$

Üçüncü katmanda, çarpım t-norm operatörü kullanılarak ateşleme kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\underline{f}_{ij} = \underline{\mu}_{1i} \times \underline{\mu}_{2j}$$

$$\bar{f}_{ij} = \bar{\mu}_{1i} \times \bar{\mu}_{2j} \quad (6)$$



Şekil 3. (a) Belirsiz standart sapmaya sahip tip-2 bulanık küme, (b) Belirsiz ortalamaya sahip tip-2 bulanık küme ((a) Type-2 fuzzy set with uncertain standard deviation, (b) Type-2 fuzzy set with uncertain mean).

Kuralların ateşleme kuvvetlerini belirledikten sonra, bir sonraki katmanda tip-2 TSK bulanık mantık sisteminin durulaştırılmış çıkışı belirlenir. Durulaştırma işlemi için genellikle yinelemeli Karnik-Mendel algoritması kullanılmakla beraber bu algoritma hesaplama yükü nedeniyle gerçek zamanlı uygulamalara pek elverişli değildir. Bu amaçla denetleyicinin çıkışı u sinyalini belirlemek için [29]'daki yaklaşım bu çalışmada da Denklem 7'de gösterildiği gibi kullanılmıştır.

$$u = p \left(\sum_i \sum_j \underline{f}_{ij} y_{ij} \right) + q \left(\sum_i \sum_j \bar{f}_{ij} y_{ij} \right) \quad (7)$$

Bu denklemdaki p ve q ateşlenen her bir kuralın alt ve üst ateşleme seviyelerinin paylaşımını ağırlıklandıran tasarım parametreleridir.

4. PARAMETRE GÜNCELLEME KURALLARI (PARAMETER UPDATE RULES)

Tip-2 nöro-bulanık denetleyicinin istenilen başarıma ulaşabilmesi için bulanık kuralların öncül kısımlarında yer alan üyelik fonksiyonu parametrelerinin ve kuralların sonuç bölümlerinin uygun değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Nöro-bulanık ağların eğitimi için genellikle eğitim düşünme tabanlı öğrenme algoritmaları kullanılmaktadır. Bu algoritmalarda ağı parametrelerinin hata fonksiyonuna göre gradyanları belirlendikten sonra parametreler belirlenen gradyanın ters yönünde güncellenerek hata fonksiyonun en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Literatürde pek çok başarılı sonuç bildirilmiş olmasına rağmen [30,31] oluşturulan hata yüzeyinin düzgün olmaması bu öğrenme yönteminin başarımını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu çalışmada, eğitim düşünme tabanlı öğrenme algoritmalarında karşılaşılan yakınsama ve kararlılık sorunlarının üstesinden gelebilmek amacıyla değişken yapıli sistemler tabanlı öğrenme

algoritmaları geliştirilerek denetim sistemine uyarlanmıştır. Güncelleme kurallarının türetilmesinde öncül kısımdaki tip-2 üyelik fonksiyonlarının sabit ortalamalı ve belirsiz standart sapmalı oldukları varsayılmıştır.

Kayma kipli denetim (KKD), değişken yapıli sistemler kuramının bir alt sınıfı olarak ortaya çıkmıştır [32]. KKD, bozanetkenler, parametre değişiklikleri ve belirsizlikler gibi sistem performansını olumsuz etkileyebilecek etmenlere karşı gösterdiği gürbüzlük nedeniyle pek çok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Bu yaklaşımın altında yatan temel fikir, sistemin hareketini hatanın önceden tanımlanmış belirli bir fonksiyonunun sıfır olduğu bir düzlemde kısıtlamaktır. Örneğin tek girişli aşağıdaki dinamik sistemi ele alalım.

$$y^{(n)} = f(x(t)) + g(x(t))u(t) \quad (8)$$

Burada $x(t)$ sistemin durum vektörüne, $u(t)$ kontrol girişine, y ise sistemin çıkışına karşılık gelmektedir. Türevin derecesi (n) ile ifade edilirken $f(x(t))$ and $g(x(t))$ ise zamana ve sistemin durum değişkenlerine bağlı doğrusal olmayan fonksiyonlardır. KKD kuramında sistemden elde edilen çıkış ile istenilen çıkış değeri arasındaki fark yaygın olarak kayma yüzeyinin belirlenmesi için aşağıdaki ifadedeki gibi kullanılmaktadır.

$$s(x(t)) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{(n-1)} (y^d - y) = 0 \quad (9)$$

Bu ifadede λ pozitif bir sabittir ve kayma yüzeyinin eğimine karşılık gelmektedir. Denklem 9'da tanımlanan kayma yüzeyi aşağıdaki koşulları sağlamalıdır:

- Kayma yüzeyinin üstünde başlayan herhangi bir yörünge bu yüzey üstünde hareket etmelidir. Bu koşulu sağlamak için eğer $s(x(t)) = 0$ ise

bu fonksiyonun türevinin de sıfır olması – yani $\dot{s}(x(t)) = 0$ – gerekmektedir.

- Kayma yüzeyinin dışında başlayan yörüngeler kayma yüzeyine yakınsamalıdır. Bu koşul aşağıdaki durumlarda karşılanabilir:

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{s} < 0 \text{ ve } \lim_{s \rightarrow 0^-} \dot{s} > 0 \quad (10)$$

Bu özellikleri sağlayan bir kayma yüzeyinin belirlenebilmesi amacıyla Lyapunov'un kararlılık teoreminden faydalanmak amacıyla Lyapunov fonksiyon adayı aşağıdaki şekilde belirlenebilir:

$$V(x, t) = \frac{1}{2} s^2 \geq 0 \quad (11)$$

Denklem 11'deki eşitlik yalnızca $s = 0$ durumunda geçerli olacaktır. Lyapunov kararlılık teoremine göre sistemin kararlılığını garantileyebilmek için verilen aday fonksiyonun türevinin sıfır ya da sıfırdan küçük olması gerekmektedir. Ayrıca eşitlik yalnızca $s = 0$ durumunda sağlanmalıdır.

$$\dot{V}(x, t, s) = s \frac{\partial s}{\partial t} \leq 0 \quad (12)$$

Dolayısıyla Denklem 11 ve Denklem 12'deki koşulları sağlayacak bir fonksiyon belirlenebilirse, sistemin yörüngeleri nereden başlarsa başlasın kayma yüzeyine yakınsayacağı ve bu yüzeye

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & \sum_i \sum_j \frac{\partial u}{\partial y_{ij}} \frac{\partial y_{ij}}{\partial t} + \sum_i \left(\frac{\partial u}{\partial c_{1i}} \frac{\partial c_{1i}}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial \sigma_{L1i}} \frac{\partial \sigma_{L1i}}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial \sigma_{U1i}} \frac{\partial \sigma_{U1i}}{\partial t} \right) \\ & + \sum_j \left(\frac{\partial u}{\partial c_{2j}} \frac{\partial c_{2j}}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial \sigma_{L2j}} \frac{\partial \sigma_{L2j}}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial \sigma_{U2j}} \frac{\partial \sigma_{U2j}}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

Sistemin çıkışının y_{ij} parametresine göre türevi aşağıdaki şekilde bulunabilir:

$$\frac{\partial u}{\partial y_{ij}} = (p \underline{f}_{ij} + q \bar{f}_{ij}) \quad (17)$$

Ağın çıkışının tip-2 üyelik fonksiyonlarının parametrelerine göre türevleri ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial c_{1i}} = & \sum_j \left(\frac{\partial u}{\partial \underline{f}_{ij}} \frac{\partial \underline{f}_{ij}}{\partial \mu_{1i}} \frac{\partial \mu_{1i}}{\partial c_{1i}} + \frac{\partial u}{\partial \bar{f}_{ij}} \frac{\partial \bar{f}_{ij}}{\partial \bar{\mu}_{1i}} \frac{\partial \bar{\mu}_{1i}}{\partial c_{1i}} \right) \\ = & \sum_j \left(p y_{ij} \underline{f}_{ij} \left(\frac{x_1 - c_{1i}}{\sigma_{L1i}^2} \right) + q y_{ij} \bar{f}_{ij} \left(\frac{x_1 - c_{1i}}{\sigma_{U1i}^2} \right) \right) \end{aligned} \quad (18)$$

ulaştıktan sonra da ayrılamayacakları garantilenmiş olur.

Bu çalışmada, bulanık kurallarda yer yer alan y_{ij} , c_{ij} , σ_{Lij} ve σ_{Uij} parametrelerini güncellemek için kayma kipli kontrol kuramı kullanılmıştır. Bu amaçla öncelikle Denklem 13'te verilen kayma yüzeyi oluşturulmuş olup kayma yüzeyine ulaşıldıktan sonraki tüm zamanlar için nöro-bulanık denetleyicinin çıkışının hedef çıktı sinyali ile çakışması amaçlanmaktadır. Bu denklemde u^d denetleyici için istenilen çıkış değerini ifade etmekte olup sabit olduğu varsayılmıştır.

$$s = e = (u^d - u) = 0 \quad (13)$$

Oluşturulan kayma yüzeyini kullanarak Lyapunov fonksiyon adayı ve bu fonksiyonun türevi aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$V = \frac{1}{2} s^2 = \frac{1}{2} e^2 = \frac{1}{2} (u^d - u)^2 \geq 0 \quad (14)$$

$$\dot{V} = e \dot{e} = e(u^d - \dot{u}) \leq 0 \quad (15)$$

Denklem 15'te verilen eşitsizlik $e \dot{u} \geq 0$ gerektirmektedir. Nöro-bulanık ağın çıkış sinyalinin türevini belirlemek amacıyla zincir kuralı aşağıdaki gibi kullanılabilir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial c_{2j}} = & \sum_i \left(\frac{\partial u}{\partial \underline{f}_{ij}} \frac{\partial \underline{f}_{ij}}{\partial \mu_{2j}} \frac{\partial \mu_{2j}}{\partial c_{2j}} + \frac{\partial u}{\partial \bar{f}_{ij}} \frac{\partial \bar{f}_{ij}}{\partial \bar{\mu}_{2j}} \frac{\partial \bar{\mu}_{2j}}{\partial c_{2j}} \right) \\ = & \sum_i \left(p y_{ij} \underline{f}_{ij} \left(\frac{x_2 - c_{2j}}{\sigma_{L2j}^2} \right) + q y_{ij} \bar{f}_{ij} \left(\frac{x_2 - c_{2j}}{\sigma_{U2j}^2} \right) \right) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial \sigma_{L1i}} = & \sum_j \left(\frac{\partial u}{\partial \underline{f}_{ij}} \frac{\partial \underline{f}_{ij}}{\partial \mu_{1i}} \frac{\partial \mu_{1i}}{\partial \sigma_{L1i}} \right) \\ = & \sum_j p y_{ij} \underline{f}_{ij} \left(\frac{(x_1 - c_{1i})^2}{\sigma_{L1i}^3} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial \sigma_{L2j}} = & \sum_i \left(\frac{\partial u}{\partial \underline{f}_{ij}} \frac{\partial \underline{f}_{ij}}{\partial \mu_{2j}} \frac{\partial \mu_{2j}}{\partial \sigma_{L2j}} \right) \\ = & \sum_i q y_{ij} \bar{f}_{ij} \left(\frac{(x_2 - c_{2j})^2}{\sigma_{L2j}^3} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial \sigma_{U1i}} &= \sum_j \frac{\partial u}{\partial \bar{f}_{ij}} \frac{\partial \bar{f}_{ij}}{\partial \bar{\mu}_{1i}} \frac{\partial \bar{\mu}_{1i}}{\partial \sigma_{U1i}} \\ &= \sum_j p y_{ij} \bar{f}_{ij} \left(\frac{(x_1 - c_{1i})^2}{\sigma_{L1i}^3} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \sigma_{U2j}} &= \sum_i \frac{\partial u}{\partial \bar{f}_{ij}} \frac{\partial \bar{f}_{ij}}{\partial \bar{\mu}_{2j}} \frac{\partial \bar{\mu}_{2j}}{\partial \sigma_{U2j}} \\ &= \sum_i q y_{ij} \bar{f}_{ij} \left(\frac{(x_2 - c_{2j})^2}{\sigma_{L2j}^3} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

Güncelleme kurallarının aşağıdaki gibi seçilmesi durumunda:

$$\frac{\partial y_{ij}}{\partial t} = \alpha \operatorname{sgn}(e) \quad (24)$$

$$\frac{\partial c_{1i}}{\partial t} = \alpha \operatorname{sgn}(e) (x_1 - c_{1i}) \sum_j y_{ij} (\underline{f}_{ij} + \bar{f}_{ij}) \quad (25)$$

$$\frac{\partial c_{1i}}{\partial t} = \alpha \operatorname{sgn}(e) (x_1 - c_{1i}) \sum_j y_{ij} (\underline{f}_{ij} + \bar{f}_{ij}) \quad (26)$$

$$\frac{\partial \sigma_{L1i}}{\partial t} = \alpha \operatorname{sgn}(e) \sigma_{L1i} \sum_j y_{ij} \underline{f}_{ij} \quad (27)$$

$$\frac{\partial \sigma_{L2j}}{\partial t} = \alpha \operatorname{sgn}(e) \sigma_{L2j} \sum_i y_{ij} \underline{f}_{ij} \quad (28)$$

$$\frac{\partial \sigma_{U1i}}{\partial t} = \alpha \operatorname{sgn}(e) \sigma_{U1i} \sum_j y_{ij} \bar{f}_{ij} \quad (29)$$

$$\frac{\partial \sigma_{U2j}}{\partial t} = \alpha \operatorname{sgn}(e) \sigma_{U2j} \sum_i y_{ij} \bar{f}_{ij} \quad (30)$$

kayma yüzeyinin ve bu yüzeyin türevinin çarpımlarının tüm durumlar için $\dot{V} = s\dot{s} = -e\dot{u} \leq 0$ eşitsizliğini sağlaması temin olmuş olur. Bu denklemlerde α öğrenme katsayısını belirtmekte olup pozitif bir sabittir. Önerilen bu yöntemin literatürdeki diğer yöntemlere göre en önemli faydası yakınsamayı garantileyerek istikrarlı bir öğrenme sağlıyor olmasıdır.

5. BENZETİM ÇALIŞMALARI (SIMULATED STUDIES)

Önerilen öğrenme algoritmasının etkinliğini belirleyebilmek amacıyla, gerçek zamanlı deneysel çalışmalara başlamadan önce, MATLAB/Simulink ortamında benzetim çalışmaları yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında AR.Drone 2.0 modeli esas alınarak x, y ve z yönlerindeki her bir eksen için ayrı bir denetleyici tasarlanmıştır. Her bir denetleyicinin iki giriş sinyali ve tek çıkışı bulunmaktadır. Yuvarlanma açısı komutunu belirlemek için kullanılan denetleyicinin giriş sinyallerini İHA'nın y-eksenindeki istenen yörünge ile mevcut konumu arasındaki fark, e_y , ve bu farkın zaman göre değişimi, \dot{e}_y oluşturmaktadır. Benzer şekilde yunuslama açısı komutunu belirlemek için kullanılan denetleyicinin giriş sinyallerini ise x-ekseninde gerçek konum ve istenen konum arasındaki fark, e_x , ile bu hatanın zamana göre

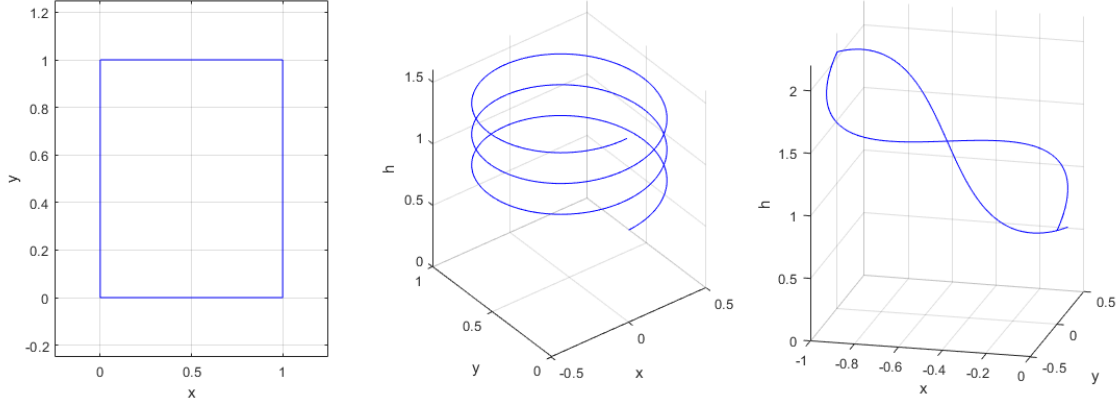
türevi, \dot{e}_x , oluşturmaktadır. İHA'nın yüksekliğini belirlemek için kullanılan denetleyicide ise gerçek ve istenen yükseklikler arasındaki fark, e_z , ile bu farkın türevi, \dot{e}_z , kullanılmıştır.

Benzetim çalışmalarında üç farklı hedef yörünge kullanılmıştır. Bu yörüngelerden ilki, Yörünge 1, iki boyutlu olarak xy-düzleminde tanımlanmış olup ani yön değişimleri gerektirmektedir. Diğer hedef yörüngeler ise her üç eksen de eş zamanlı olarak kontrol sinyallerinin üretilmesini gerektirmektedir. İlgili yörüngeler Şekil 4'te paylaşılmıştır.

Önerilen tip-2 nöro-bulanık denetleyicinin ilk katmanında giriş sinyallerini bulanık kümelere dönüştürmek amacıyla beş adet Gauss tip-2 üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Üyelik fonksiyonu sayısını belirlemek amacıyla benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda üyelik fonksiyonlarından bir tanesi hatanın (ya da türevinin) neredeyse sıfır olacağı durumu gösterebilmesi amacıyla merkeze, diğer üyelik fonksiyonları ise pozitif ve negatif hata (ya da türevi) durumlarına karşılık gelecek şekilde bu üyelik fonksiyonuna göre simetrik olarak yerleştirilmiştir. Üyelik fonksiyonu sayısının artması pozitif ve negatif hata (ya da türevi) için farklı derecelendirmelerin yapılabilmesini sağlamakla beraber hesaplama yükünü artırmaktadır.

Benzetim çalışmaları, tip-2 nöro bulanık denetleyicide her bir giriş sinyali için üç, beş ve yedi Gauss tip-2 üyelik fonksiyonu kullanılması durumları için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2'de paylaşılmıştır.

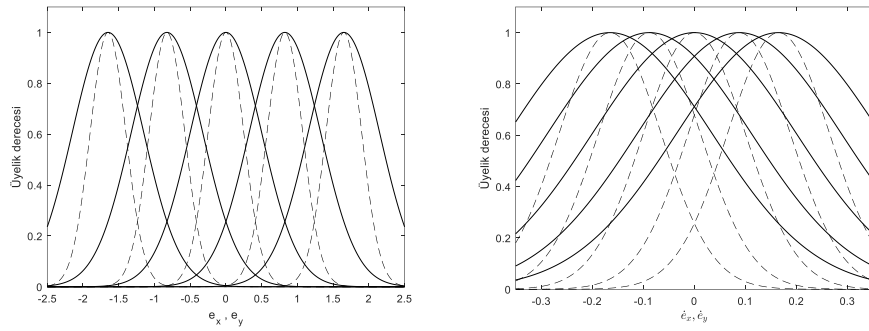
Tablo 2 incelendiğinde yedi üyelik fonksiyonu kullanıldığında beş üyelik fonksiyonu kullanılan duruma göre farklı eksenlerde ani değişimler gerektiren Yörünge 1 için daha iyi sonuçlar elde edilebileceği görülse de Yörünge 2 ve Yörünge 3 için üyelik fonksiyonu sayısının artmasının sistem cevabında etkisinin daha az olduğu gözlemlenebilir. Üyelik fonksiyonu sayısını beşten yediye çıkarmanın hesaplama yükünü önemli ölçüde artıracak olması ve deneysel çalışmalardaki zaman kısıtları nedeniyle denetleyicilerde beş üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Şekil 5 ve Şekil 6 bulanıklaştırma işlemi için kullanılan üyelik fonksiyonlarını göstermektedir. Bulanık kuralların sonuç kısmında yer alan parametreler ise rastgele bir şekilde seçilmiştir. Benzetim çalışmalarında örnekleme zamanı 0.02 s olarak belirlenmiştir.



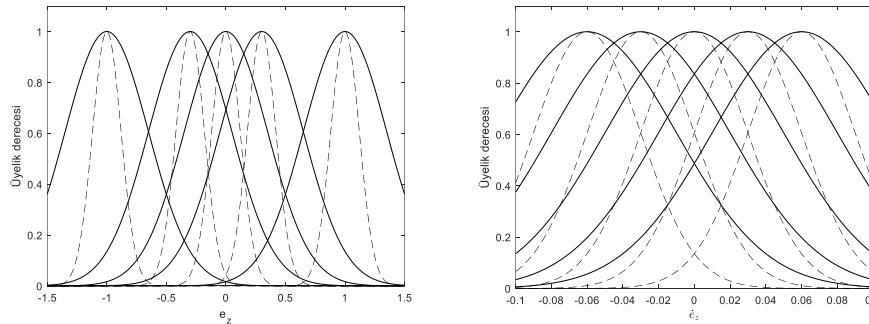
Şekil 4. (a) Hedef Yörünge 1, (b) Hedef Yörünge 2, (c) Hedef Yörünge 3. ((a) Target Trajectory 1, (b) Target Trajectory 2, (c) Target Trajectory 3.)

Tablo 2. Farklı üyelik fonksiyonu sayıları için ele edilen RMSE değerleri (RMSE values for different membership function numbers)

		Yörünge 1		Yörünge 2			Yörünge 3		
		\bar{X}_{RMSE}	\bar{Y}_{RMSE}	\bar{X}_{RMSE}	\bar{Y}_{RMSE}	\bar{H}_{RMSE}	\bar{X}_{RMSE}	\bar{Y}_{RMSE}	\bar{H}_{RMSE}
Üyelik Fonksiyonu Sayısı	3	0.117	0.112	0.005	0.009	0.056	0.003	0.029	0.008
	5	0.098	0.096	0.004	0.006	0.045	0.003	0.019	0.006
	7	0.076	0.090	0.004	0.004	0.044	0.002	0.014	0.005



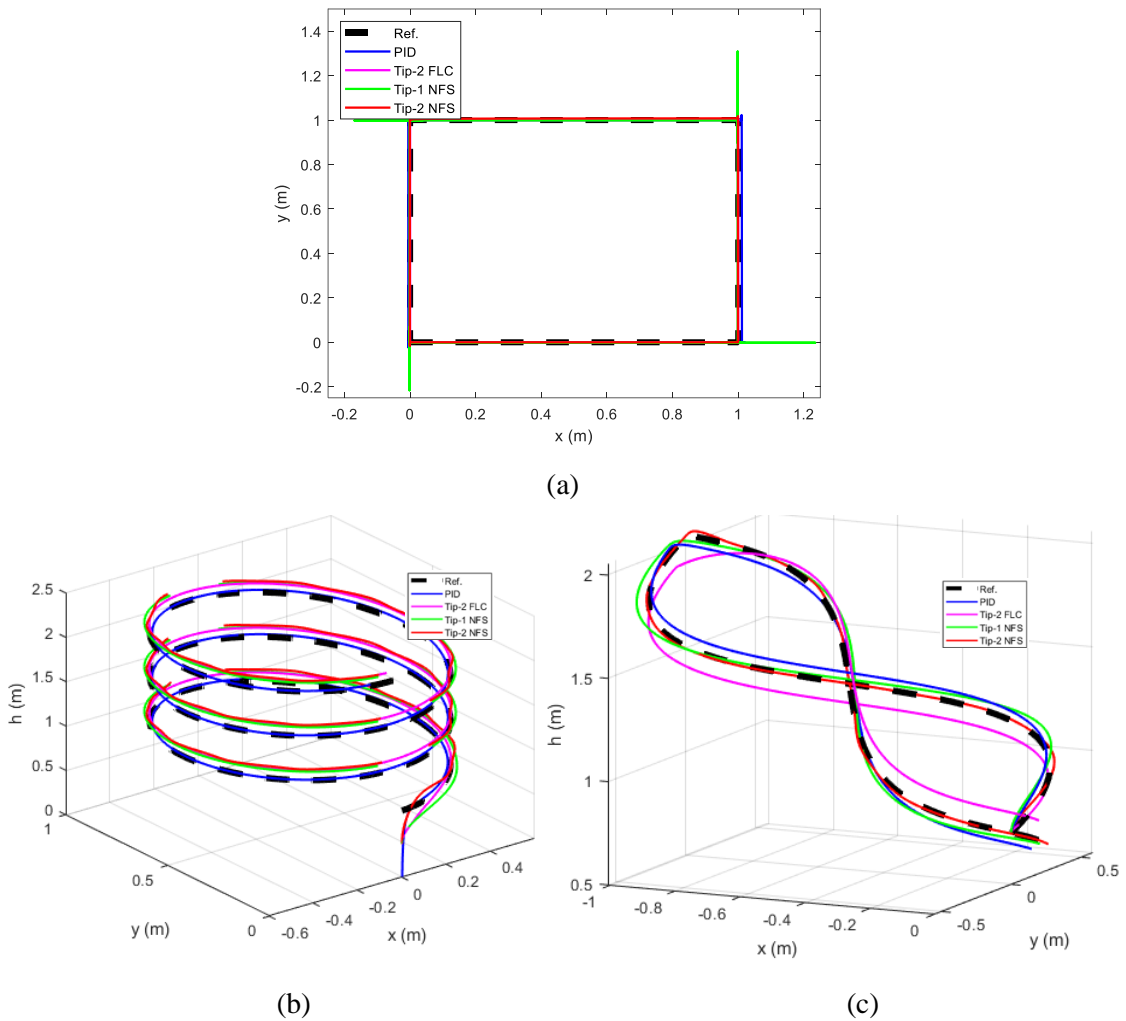
Şekil 5. x ve y eksenlerinde girişleri bulanıklaştırmak için kullanılan üyelik fonksiyonları (Membership functions used for inputs on the x and y axes)



Şekil 6. z ekseninde girişleri bulanıklaştırmak için kullanılan üyelik fonksiyonları (Membership functions used for inputs on the z axes)

Önerilen denetleyici yapısının etkinliğini belirlemek amacıyla benzetim çalışmaları PID denetleyici, tip-2 bulanık mantık denetleyici ve tip-1 nöro-bulanık denetleyici için de gerçekleştirilmiştir. Bu yapılarda da her bir eksen için ayrı bir denetleyici tasarlanmış olup ilgili eksendeki hedef yörüngeden sapma ve bu değerın türevi her bir denetleyici için giriş sinyallerini oluşturmaktadır. Tip-2 bulanık mantık ve tip-1 nöro-bulanık denetleyicilerde her bir giriş sinyalini bulanıklaştırmak amacıyla beş adet Gauss üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. PID denetleyicinin katsayılarının belirlenmesinde öncelikle MATLAB/Simulink'in "PID Tuner" özelliği

kullanılmıştır. Bu bloktan elde edilen değerler, gerçek sistem ve sistemin matematiksel modeli ile arasındaki olası farklar (sadeleştirme ve varsayımlar nedeniyle oluşan farklar, parametre belirsizlikleri, vb.) göz önünde sonrasında ampirik olarak benzetim ve deneysel çalışmalarda en iyi cevabı sağlayacak şekilde ayarlanarak kullanılmıştır. Literatürde de döner kanatlı İHA'ların denetiminde kullanılan PID denetleyicilerde genellikle ampirik yaklaşımlarının benimsendiği görülmektedir [33]. PID denetleyicilerin katsayıları x ve y eksenleri için $K_P=0.6$, $K_I=0.01$, $K_D=0.02$ ve z eksenı için $K_P=2$, $K_I=0.01$, $K_D=0.35$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 7. Benzetim çalışmalarının sonuçları: (a) Hedef yörünge 1 için, (b) hedef yörünge 2 için, (c) hedef yörünge 3 için (Simulation results for (a) Target trajectory 1, (b) Target trajectory 2, (c) Target trajectory 3)

Hedef yörünge 1, hedef yörünge 2 ve hedef yörünge 3 için alınan sistem cevapları Şekil 7'de, gösterilmiştir. Benzetim çalışmalarından alınan sonuçlar incelendiğinde, çalışma ortamında bozan etkenler bulunmadığı durumda tüm denetleyicilerin

hedef yörüngeleri yüksek doğruluk derecesiyle takip edebildiği sonucuna ulaşılabilir. Geliştirilen denetleyicilerin başarımını değerlendirmek için hata kareler ortalaması (RMSE) yöntemi kullanılmıştır. Denetleyiciler için elde edilen RMSE

değerleri Tablo 3'te paylaşılmıştır. Bu tabloya göre tip-2 nöro-bulanık denetleyici için en büyük hata değerleri ani manevralar gerektiren hedef yörünge 1 için elde edilmiştir. Bu duruma ani referans

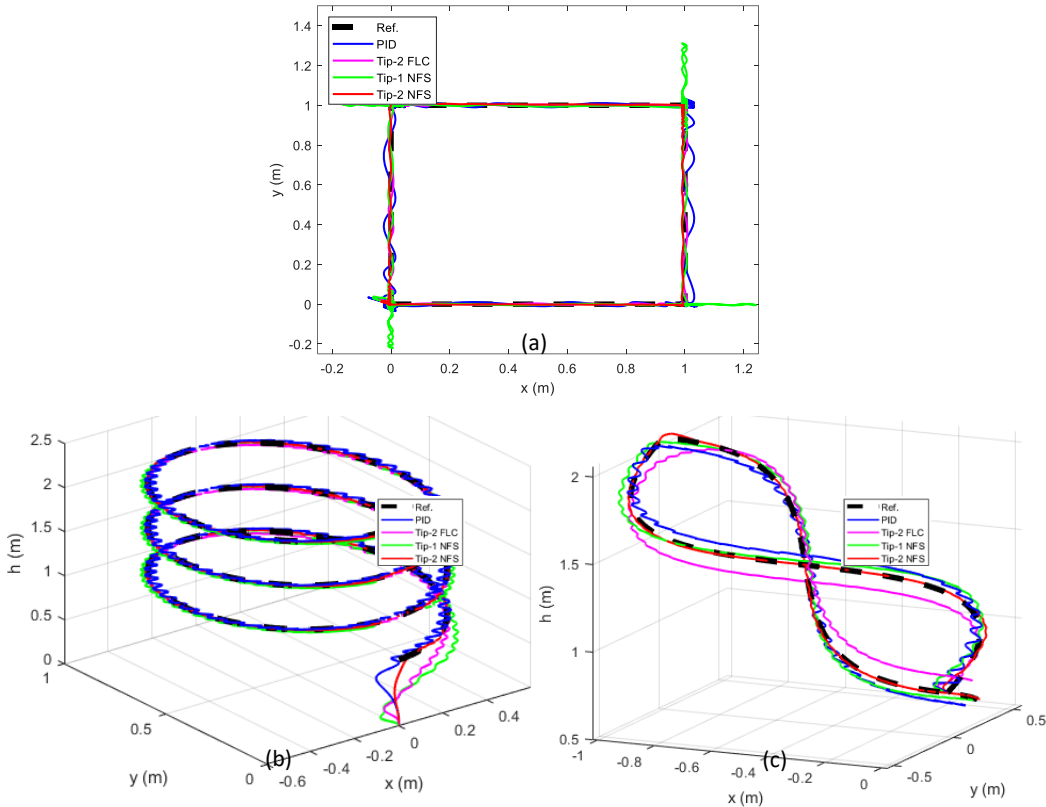
değişikliği durumlarında parametrelerin uyarlanması için gereken süre neden olabilmektedir.

Tablo 3. Benzetim çalışmalarında elde edilen RMSE değerleri (RMSE values obtained in the simulations)

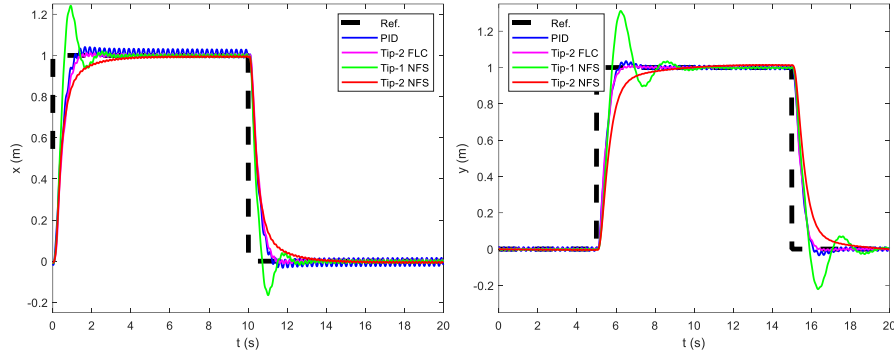
		Yörünge 1		Yörünge 2			Yörünge 3		
		X_{RMSE}	Y_{RMSE}	X_{RMSE}	Y_{RMSE}	H_{RMSE}	X_{RMSE}	Y_{RMSE}	H_{RMSE}
Denetleyici	PID	0.118	0.116	0.082	0.070	0.048	0.059	0.136	0.028
	Tip-2 FLC	0.097	0.112	0.037	0.040	0.088	0.034	0.078	0.122
	Tip-1 NFS	0.089	0.106	0.037	0.049	0.100	0.034	0.116	0.032
	Tip-2 NFS	0.098	0.096	0.004	0.006	0.045	0.003	0.019	0.006

Önerilen denetleyicinin, sistemi etkileyecek rüzgar gibi bozucu etkenler altındaki başarımını değerlendirmek amacıyla, sisteme x- ve y-eksenleri doğrultularında $d(t) = 0.2\sin(2.5\pi t)$ büyüklüğünde bozucu giriş sinyalleri eklenerek benzetim çalışmaları aynı hedef yörüngeler tekrarlanmıştır. Elde edilen sistem cevapları Şekil 8'de paylaşılmış olup x- ve y eksenleri için denetleyicilerin yörünge takip performansları Şekil 9'da gösterilmiştir. Verilen grafikler incelendiğinde tip-2 nöro-bulanık denetleyicinin bozucu etkenlerin

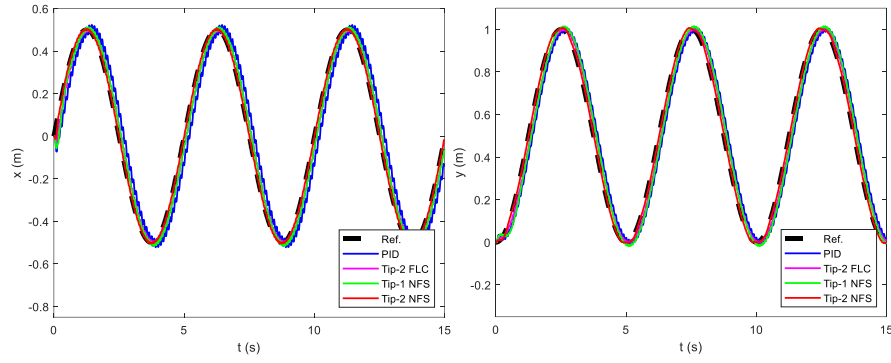
sistemi etkilediği durumda hedef yörüngeyi daha az sapma ile takip edebildiği görülebilmektedir. Benzetim çalışması için elde edilen ve hedef yörünge ile gerçek yörünge arasındaki farkın bir ifadesi olarak değerlendirilebilecek RMSE değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde önerilen denetleyici ile çalışmada kullanılan diğer denetleyicilere göre daha küçük hata değerleri elde edilebildiği ve bozucu etkenlerin etkisinin denetleyici başarımı üzerinde daha sınırlı olduğu görülebilir.



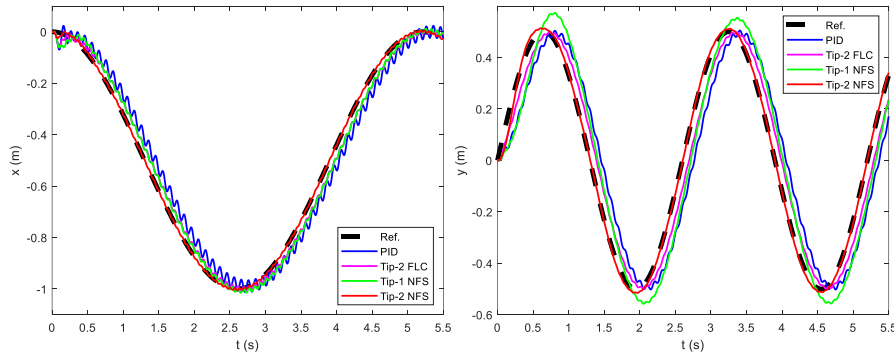
Şekil 8. Dış bozucu etkenlerin varlığında benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar (a) Hedef yörünge 1, (b) hedef yörünge 2, (c) hedef yörünge 3. (Results obtained from the simulation studies in the presence of external disturbances (a) Target trajectory 1, (b) Target trajectory 2, (c) Target trajectory 3)



(a)



(b)



(c)

Şekil 9. Dış bozucu etkenlerin varlığında yörünge takip performansları: (a) Hedef yörünge 1, (b) hedef yörünge 2, (c) hedef yörünge 3. (Trajectory tracking performance in the presence of external disturbances: (a) target trajectory 1, (b) target trajectory 2, (c) target trajectory 3.)

Tablo 4. Dış bozucu etkenlerin varlığında benzetim çalışmalarında elde edilen RMSE değerleri (RMSE values obtained in simulation studies in the presence of external disturbances)

		Yörünge 1		Yörünge 2		Yörünge 3	
		\bar{X}_{RMSE}	\bar{Y}_{RMSE}	\bar{X}_{RMSE}	\bar{Y}_{RMSE}	\bar{X}_{RMSE}	\bar{Y}_{RMSE}
Denetleyici	PID	0.161	0.164	0.093	0.087	0.063	0.143
	Tip-2 FLC	0.152	0.146	0.040	0.042	0.037	0.081
	Tip-1 NFS	0.154	0.164	0.039	0.052	0.036	0.118
	Tip-2 NFS	0.149	0.153	0.013	0.017	0.013	0.051

6. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Önerilen denetleyici yapısı için benzetim çalışmalarının ardından aynı yörüngeler için gerçek zamanlı deneyler yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda döner kanatlı İHA ile veri transferi 802.11n erişim noktası tabanlı kablosuz ağ üzerinden Wi-Fi sağlanmıştır. İstikrarlı bir iletişim sağlamak amacıyla örnekleme zamanı 0.02 s olarak seçilmiştir. Önerilen denetleyicileri gerçekleştirmek için MATLAB ortamında Simulink Desktop Real-Time kullanılmıştır. İHA'nın konum bilgisi sensör kartı tarafından sağlanan uzunlamasına ve yanal eksenler boyunca hız değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Hız sensörlerinden gelen sinyallerdeki sinyal-gürültü oranını (SNR), MATLAB'ın snr fonksiyonu ile x-ekseni doğrultusundaki öteleme hareketine ait hız verilerinde 10.4 dB, y-ekseni doğrultusundaki öteleme hareketine ait hız verilerinde 13.3 dB ve irtifa ölçümlerinde 6.2 dB olarak belirlenmiştir. İHA'nın yerden yüksekliğini belirlemek amacıyla merkez gövdenin alt yüzeyinde yer alan altimetre kullanılmıştır. Tüm deneyler kontrollü bir ortamda iç mekanda gerçekleştirilmiştir.

Deneylerin ilk setinde, referans yönlerinde ani değişikliklerin varlığında denetleyicinin davranışını

araştırmak için kare şeklindeki hedef yörünge 1 kullanılmıştır. Deney, İHA havalandıktan ve 75 cm yüksekliğe ulaştıktan sonra başlatılmıştır. Kare biçimindeki hedef yörünge için elde edilen deney sonuçları, Şekil 11(a)'da sunulmuştur. Bu sonuçlardan önerilen tip-2 nöro bulanık denetleyicinin, her iki yönde de referans değerden daha az sapmaya neden olduğu gözlemlenmektedir.

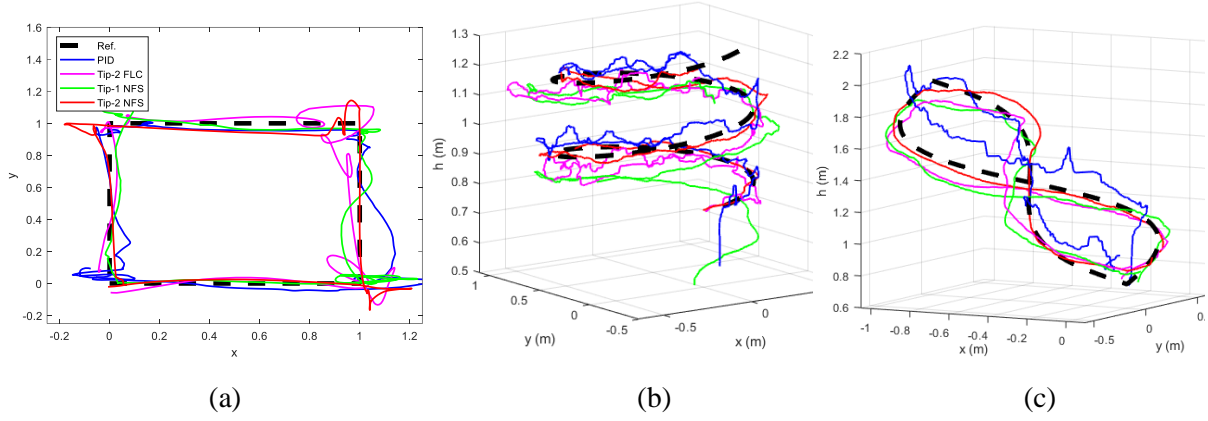
Deneysel çalışmaların ikinci bölümünde ise x- ve y-doğrultularında sinüzoidal fonksiyonların, z ekseninde ise doğrusal fonksiyonların kullanıldığı hedef yörüngeler kullanılmıştır. Deney başlangıcında önceki deneye benzer şekilde İHA 75 cm irtifaya ulaştıktan sonra referans yörünge kablosuz ağ üzerinden İHA'ya iletilmiştir. Şekil 11(b) ve 11(c)'de paylaşılan sistem cevapları incelendiğinde tip-2 nöro bulanık denetleyici ile hedef yörüngeden daha az sapma değerleri elde edilebildiği görülmektedir. Her üç yörünge cevabı için elde edilen RMSE değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Sistemin gürbüzlüğünü ve kararlılığını göstermek amacıyla deneysel çalışmalarda oluşturulan 2 ve 3 boyutlu hedef yörüngeler için hata vektörünün faz uzayında izlediği yörüngeler Şekil 12'de gösterilmiştir. Bu şekilde z eksenini için alınan ölçümlerdeki gürültü ve parametre güncelleme kurallarında kullanılan *signum* fonksiyonunun etkileri görülebilmektedir.



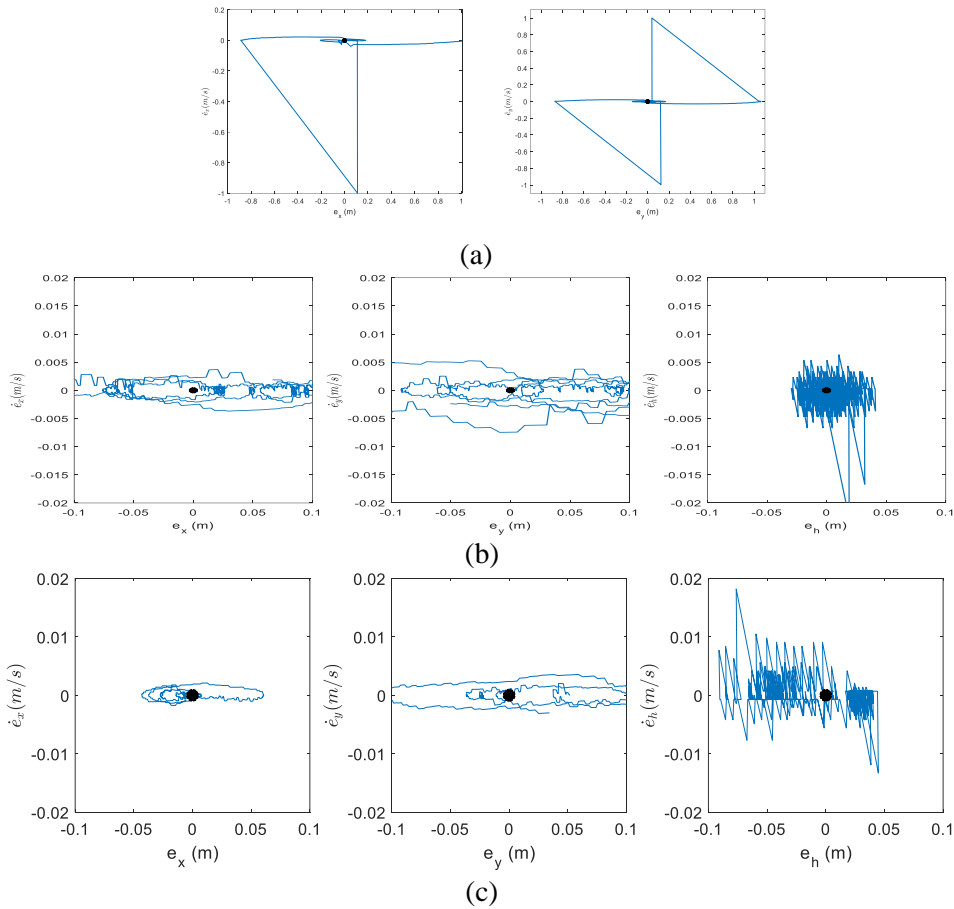
Şekil 10. Laboratuvarında yapılan deneylerden bir görüntü (An image of the experiments performed in the laboratory)

Tablo 5. Deneysel çalışmalarda elde edilen RMSE değerleri (RMSE values obtained in experimental studies)

		Yörünge 1		Yörünge 2			Yörünge 3		
		X_{RMSE}	Y_{RMSE}	X_{RMSE}	Y_{RMSE}	H_{RMSE}	X_{RMSE}	Y_{RMSE}	H_{RMSE}
Denetleyici	PID	0.313	0.287	0.151	0.194	0.028	0.152	0.256	0.143
	Tip-2 FLC	0.292	0.356	0.081	0.060	0.049	0.067	0.096	0.093
	Tip-1 NFS	0.307	0.317	0.080	0.093	0.055	0.085	0.091	0.098
	Tip-2 NFS	0.280	0.298	0.0765	0.055	0.015	0.032	0.072	0.079



Şekil 11. Deney sonuçları: (a) Hedef yörünge 1 için, (b) hedef yörünge 2 için, (c) hedef yörünge 3 için. (Experiment results: (a) for target trajectory 1, (b) for target trajectory 2, (c) for target trajectory 3.)



Şekil 12. Hata vektörünün faz uzayında izlediği yörüngeler: (a) Hedef yörünge 1 için, (b) hedef yörünge 2 için, (c) hedef yörünge 3 için. (Trajectories of the error vector in phase space: (a) for target trajectory 1, (b) for target trajectory 2, (c) for target trajectory 3)

7. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada döner kanatlı yapıdaki bir insansız hava aracının yörünge takibi problemi için tip-2 nöro-bulanık denetleyiciler geliştirilmiştir. Önerilen yapıda öğrenme algoritmasının tasarımında, benzer çalışmalarda yoğunlukla kullanılan eğim düşümü yöntemi yerine kayma kipli kontrol kuramı

kullanılmıştır. Bu sayede sistemin çalışma ortamında bulunan bozanetkenlere karşı daha gürbüz cevap verebilmesi ve öğrenme algoritmasının küresel minimuma yakınsamasının sağlanması hedeflenmiştir. Parametre güncelleme kurallarının çıkarımında Lyapunov kararlılık teoreminden faydalanılmıştır. Geliştirilen denetim sisteminin etkinliğini belirlemek amacıyla üç farklı

yörünge için hem benzetim hem de deneysel çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçları daha iyi değerlendirebilmek amacıyla aynı çalışmalar PID denetleyici, tip-2 bulanık mantık denetleyici ve tip-1 nöro-bulanık denetleyici ile için tekrarlanmış olup sonuçlar tip-2 nöro-bulanık denetleyiciler için geliştirilen değişken yapılı sistemler tabanlı öğrenme algoritmalarının hedef yörüngeden daha az sapma ve daha gürbüz sistem cevabı sağladığını göstermiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, İstanbul Bilgi Üniversitesi BİLGİ Bilimsel Araştırma Fonu tarafından desteklenmiştir (Proje Kodu AK 85 089). Mali destekleri için İstanbul Bilgi Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan eder.

The author of this article declares that the materials and methods used in this work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Yeşim ÖNİZ: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Mishra, Balmukund, et al. "Drone-surveillance for search and rescue in natural disaster." *Computer Communications* 156 (2020): 1-10.
- [2] Elmas, Elif Ece, and Mustafa ALKAN. "İnsansız Hava Araçlarıyla Hareketli Nesnelerin Tespit ve Takibi." *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology* 10.4 (2022): 1111-1126.
- [3] Sarkar, Sayani, Michael W. Totaro, and Khalid Elgazzar. "Intelligent drone-based surveillance: application to parking lot monitoring and

detection." In *Unmanned Systems Technology XXI*, vol. 11021, p. 1102104. International Society for Optics and Photonics, 2019.

- [4] Yazid, Edwar, Matthew Garratt, and Fendy Santoso. "Position control of a quadcopter drone using evolutionary algorithms-based self-tuning for first-order Takagi–Sugeno–Kang fuzzy logic autopilots." *Applied Soft Computing* 78 (2019): 373-392.
- [5] Mellinger D, Michael N, Kumar V. "Trajectory generation and control for precise aggressive maneuvers with quadrotors". *The International Journal of Robotics Research* 2012; 31(5):664-74.
- [6] Bouabdallah S, Noth A, Siegwart R. "PID vs LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor". In: 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS); Sendai, Japan; 2004. pp. 2451-2456.
- [7] Cowling ID, Yakimenko OA, Whidborne JF, Cooke AK. "Direct method based control system for an autonomous quadrotor". *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 2010; 60(2):285-316.
- [8] Alexis K, Papachristos C, Nikolakopoulos G, Tzes A. "Model predictive quadrotor indoor position control". In 2011 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED) 2011 Jun 20 (pp. 1247-1252). IEEE.
- [9] Abdolhosseini M, Zhang YM, Rabbath CA. "An efficient model predictive control scheme for an unmanned quadrotor helicopter". *Journal of intelligent & robotic systems*. 2013 Apr 1;70(1-4):27-38.
- [10] Stevens, Brian L., Frank L. Lewis, and Eric N. Johnson. *Aircraft control and simulation: dynamics, controls design, and autonomous systems*. John Wiley & Sons, 2015.
- [11] J. A. Meda, "Estimation of complex systems with parametric uncertainties using a JSSF heuristically adjusted.," *IEEE Latin Amer. Trans.*, vol. 16, no. 2, pp. 350–357, Feb. 2018.
- [12] J. A. Meda-Campana, "On the estimation and control of nonlinear systems with parametric uncertainties and noisy outputs," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 31968–31973, 2018.
- [13] Mehndiratta, Mohit, Erkan Kayacan, Mahmut Reyhanoglu, and Erdal Kayacan. "Robust tracking control of aerial robots via a simple learning strategy-based feedback linearization." *Ieee Access* 8 (2019): 1653-1669.

- [14] Yao, Wen, Xiaoqian Chen, Wencai Luo, Michel Van Tooren, and Jian Guo. "Review of uncertainty-based multidisciplinary design optimization methods for aerospace vehicles." *Progress in Aerospace Sciences* 47, no. 6 (2011): 450-479.
- [15] T. Dierks and S. Jagannathan, "Output feedback control of a quadrotor UAV using neural networks," *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 21, no. 1, pp. 50–66, Jan. 2009.
- [16] M. Jafari and H. Xu, "Intelligent control for unmanned aerial systems with system uncertainties and disturbances using artificial neural network," *Drones*, vol. 2, no. 3, 2018, Art. no. 30.
- [17] Al-Mahturi A, Santoso F, Garratt MA, Anavatti SG. "Nonlinear altitude control of a quadcopter drone using interval type-2 fuzzy logic". In 2018 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI) 2018 Nov 18 (pp. 236-241). IEEE.
- [18] Prayitno A, Indrawati V, Utomo G. "Trajectory tracking of AR. Drone quadrotor using fuzzy logic controller". *Telekomnika*. 2014;12(4):819-28.
- [19] Indrawati V, Prayitno A, Utomo G. "Comparison of two fuzzy logic controller schemes for position control of AR. Drone". In 2015 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE) 2015 Oct 29 (pp. 360-363). IEEE.
- [20] Dorzhigulov A., Bissengaliuly B., Spencer B. F. Jr, Kim J., James A. P. (2018). "ANFIS based quadrotor drone altitude control implementation on Raspberry Pi platform." *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 95(3), 435–445.
- [21] Ponce P., Molina A., Cayetano I., Gallardo J., Salcedo H., Rodriguez J., Carrera I. (2016). "Fuzzy logic sugeno controller type-2 for quadrotors based on anfis". In *Nature-Inspired Computing for Control Systems* (2016): 195-230.
- [22] Krajnik T, Vonasek V, Fiser D, Faigl J. "AR-drone as a platform for robotic research and education". In *International conference on research and education in robotics* 2011 Jun 15 (pp. 172-186). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [23] Bristeau PJ, Callou F, Vissiere D, Petit N. "The navigation and control technology inside the ar. drone micro uav". *IFAC Proceedings Volumes*. 2011 Jan 1;44(1):1477-84.
- [24] Jeurgens N. "Identification and control implementation of an AR. Drone 2.0". Masters Thesis, Eindhoven University of Technology. 2017.
- [25] Y. Sun, "Modeling, identification and control of a quad-rotor drone using low-resolution sensing," 2012.
- [26] Q. Li, "Grey-box system identification of a quadrotor unmanned aerial vehicle". PhD thesis, Citeseer, 2014.
- [27] L. A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I," *Inf. Sci. (Ny)*., vol. 8, no. 3, pp. 199–249, Jan. 1975.
- [28] J.M Mendel, "Uncertain Rule-based Fuzzy Logic System: Introduction and New Directions", Prentice Hall, Upper Saddle River, 2001.
- [29] M. Biglarbegian, W. Melek, J. Mendel, "On the stability of interval type-2 TSK fuzzy logic control systems", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics* 40 (3) (2010) 798–818.
- [30] Li, Long, Zuqiang Long, Hao Ying, and Zhijun Qiao. "An online gradient-based parameter identification algorithm for the neuro-fuzzy systems." *Fuzzy Sets and Systems* 426 (2022): 27-45.
- [31] Anshori, Mohamad Yusak, Dinita Rahmalia, Teguh Herlambang, and Denis Fidita Karya. "Optimizing Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) parameters using Cuckoo Search (Case study of world crude oil price estimation)." In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1836, no. 1, p. 012041. IOP Publishing, 2021.
- [32] Edwards, Christopher, and Sarah Spurgeon. "Sliding mode control: theory and applications". Crc Press, 1998.
- [33] Lopez-Sanchez, Ivan, and Javier Moreno-Valenzuela. "PID control of quadrotor UAVs: A survey." *Annual Reviews in Control* 56 (2023): 100900.