

Dört Motorlu Bir Dönerkanat Sisteminin Dinamik Modeli ve PD Kontrolör İle Yörünge Kontrolü

Mehmet Önder Efe

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara

onderefe@etu.edu.tr

Özetçe

Bu bildiri DraganFly firmasının ürettiği *dört motorlu dönerkanat*¹ sisteminin tam dinamik modelini vererek bu model üzerinde uygulanan nonlinear bir kontrolörün performansı ve davranış testleri üzerinde durur. Özellikle kontrol teorisi ve uygulamaları konusunda çalışan araştırmacılar için modeli mümkün olduğunca tam sunulan bu dönerkanat sistemi, benzetimlerde kontrol girdilerine sınır koymaksızın çalışılmış, geribeslemeli nonlinear kontrolörün performansı gürültülü gözlemler için de tatmin edici bulunmuştur.

1. İnsansız Hava Araçları (İHA)

İnsansız hava aracı, kendi elektriksel güç sistemine sahip, insan taşımayan ve aerodinamik kaldırma mekanizmasıyla kendini havada tutan, otonom uçuş yapabilen ya da uzaktan kumanda edilebilen, benzer araçlarla eşgüdüm içinde olabilen, radardan gizlenebilen, gerekli görüldüğü hallerde gözden çıkarılabilecek derecede ucuz, çeşitli algılama sistemlerini ve/veya silahları taşıyabilen ve bir pilotun yorgunluk sınırlarını aşabilecek süreler boyunca uçabilen hava aracıdır. Genellikle bilgi toplama (görüntüleme, takip, arama, tarama, video edinimi, keşif), güvenlik, gözetim, denetim, hedef tespiti, meteorolojik ve zirai uygulamalar, havadan trafik kontrol ve yönlendirme (kaçakçılığı önleme), telemetri (uzaktan boyutlandırma) ve yangın söndürme, doğal afet sonrası hasar tespiti amaçları için kullanılır.

Uygulama alanları bu denli geniş olan insansız araçlar teknolojisinde araç davranışının, ve yukarıda verilen örnekler cinsinden üst düzey misyon tanımlarının yapılabilmesi alt düzey kontrol ve kumanda bileşenlerinin performansına doğrudan bağımlılık gösterir. Bu nedenle otopilot sistemlerinin tasarımı ve uygulanması başlı başına bir araştırma konusudur. Bu bildiride ele alınan dönerkanat sistemi yukarıda zikredilen görevlerden bazılarının içinde yer alabilecek konfigürasyondadır ve geribeslemeli kontrolörün amacı araca istenen bir yörüngeyi izletebilmektir.

Literatürde bu bildiriye konu dönerkanat sistemi başka bazı yazarlarca da ele alınmıştır. Örneğin Castillo vd. [1, 2] dönerkanat sistemi için gerçek zamanlı deneyler yapmış, bir nonlinear kontrolörün performansını irdelemiştir. [3] kaynağında klasik oransal integral türevsel² kontrolörü üzerinde

durulmuş, model dayanaklı tasarım gerçek zamanlı deneylerle ele alınmıştır. Hanford vd. [4] ise PI tipi bir kontrolör ile dönerkanat sistemine PIC tabanlı işlem birimi ve MEMS³ tabanlı açışal hız sensörleri kullanarak basit bir kontrol çevrimi içerisinde kumanda etmiştir. Hoffman vd. [5] kayma kipli denetim yöntemi ile dönerkanat sistemlerinde oluşum denetimi, çarpışma ve engel kaçınımı⁴ konularını incelemiş, durum değişkenlerinin edinilmesinde Kalman filtresi kullanılmıştır. Dönerkanat sisteminin görsel geribesleme ile denetimine dair bir tasarım [6, 7] kaynaklarında bulunabilir. Tournier [6] Moiré örüntülerinden faydalanırken Altuğ [7] ise çift kamera sistemi kullanmaktadır. Çamlıca, [8] kaynağında doğrusal kuadratik kontrolör tasarımı üzerinde durmakta, [9] ise klasik kontrol yöntemlerinin başarısızlığına vurgu yaparak integral kayma kipli denetim ve pekiştirici öğrenme⁵ yöntemi ile doğrusal olmayan bozucuların olumsuz etkilerinin bertaraf edilebildiğini ve çok erkinli denetimin başarılılabildiğini rapor etmektedir. Hamel vd. [10] ise geriadım⁶ tekniği ile benzer bir dönerkanat sisteminin stabilizasyonunu göstermektedir. Klauske vd. ise bir sayısal işaret işleyici ile kontrol sistemini incelemektedir, [11]. Bu bildiride ise doğrusal olan (PD tipinde) ve olmayan (doğrusallaştırıcı tipte) kontrol teknikleri birarada kullanılmakta, istenen dönerkanat davranışı elde edilmektedir.

Bu bildirinin temel motivasyonu giderek önem kazanan İHA sistemlerine örnek bir dönerkanat sisteminde yörünge kontrolünün yapılması, sistem dinamiğindeki doğrusal olmayan terimlere rağmen iyi bir izleme performansının elde edilmesidir. Sistem dinamiğinin çok değişkenli oluşu, değişkenlerin birbirleri ile sıkı biçimde kuple olmuş olmaları, sıfırdan farklı başlangıç koşulları ve gözlemlerdeki gürültü problemin çözümünü güçleştiren etmenlerdir. Bunlara rağmen önerilen kontrolör nispeten basit bir yapıya sahip olup bahsi geçen güçlükler bertaraf edilebilmiştir.

Bildiri şu şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölümde dönerkanat sisteminin dinamik modeli, takip eden bölümde kartezyen uzayda pozisyonun ve oriyantasyonun kontrolü anlatılmakta, dördüncü bölümde benzetimler ve tartışma, son bölümde ise sonuçlar sunulmaktadır.

³İng. *Microelectromechanical Systems*

⁴İng. *Collision and Obstacle Avoidance*

⁵İng. *Reinforcement learning*

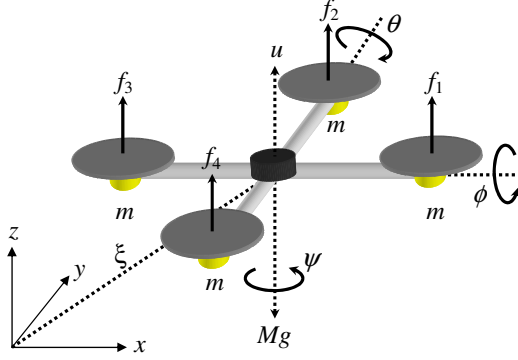
⁶İng. *Backstepping*

¹İng. *Quadrotor Rotorcraft*

²İng. *Proportional Integral Derivative (PID)*

2. Dönerkanat Modeli

Bu çalışmada ele alınan dönerkanat sisteminin genel görünüşü ve sistem dinamiğine esas değişken seçimleri Şekil 1'de gösterilen biçimdedir. Sistemin davranışını betimleyen dinamik denklem kümesi (1)'de, denklemlerde görülen bazı büyüklüklerin değerleri ve tanımları ise Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1: Dönerkanat sisteminin genel görünüşü

$$\begin{aligned}
 M\ddot{x} &= -us_\theta \\
 M\ddot{y} &= uc_\theta s_\phi \\
 M\ddot{z} &= uc_\theta c_\phi - Mg \\
 \ddot{\psi} &= \tilde{\tau}_\psi \\
 \ddot{\theta} &= \tilde{\tau}_\theta \\
 \ddot{\phi} &= \tilde{\tau}_\phi
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\tilde{\tau} = \begin{pmatrix} \tilde{\tau}_\psi \\ \tilde{\tau}_\theta \\ \tilde{\tau}_\phi \end{pmatrix} = \mathbb{J}^{-1}(\tau - C(\eta, \dot{\eta})\dot{\eta}) \quad (2)$$

Burada $\eta = (\psi \ \theta \ \phi)^T$, $\mathbb{J}(\eta) = T_\eta^T \mathbf{I} T_\eta$ ve

$$T_\eta = \begin{pmatrix} -s_\theta & 0 & 1 \\ c_\theta s_\phi & c_\phi & 0 \\ c_\theta c_\phi & -s_\phi & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & 2I_{xx} \end{pmatrix} \quad (4)$$

ile verilmektedir. $C(\eta, \dot{\eta})$ ile gösterilen Coriolis ve merkezkaç terimleri aşağıdaki gibi tanımlanmakta ve detayları (8) ile verilen biçimde hesaplanmaktadır.

$$C(\eta, \dot{\eta}) = \mathbb{J} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \eta} (\dot{\eta}^T \mathbb{J}) \quad (5)$$

$$\mathbb{J} = I_{xx} \begin{pmatrix} 1 + c_\theta^2 c_\phi^2 & -c_\theta s_\phi c_\phi & -s_\theta \\ -c_\theta s_\phi c_\phi & 2 - c_\phi^2 & 0 \\ -s_\theta & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbb{J} = I_{xx} \begin{pmatrix} \dot{\theta} s_{2\theta} c_\phi^2 + \dot{\phi} s_{2\phi} c_\theta^2 & \dot{\theta} s_\theta s_\phi c_\phi - \dot{\phi} c_{2\phi} c_\theta & \dot{\theta} c_\theta \\ \dot{\theta} s_\theta s_\phi c_\phi - \dot{\phi} c_{2\phi} c_\theta & \dot{\phi} s_{2\phi} & 0 \\ \dot{\theta} c_\theta & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
 C_{1,1} &= C_{1,2} = C_{1,3} = 0 \\
 C_{2,1} &= I_{xx}(\dot{\psi} c_\phi^2 s_{2\theta} + \dot{\theta} s_\theta c_\phi s_\theta - \dot{\phi} c_\theta) \\
 C_{2,2} &= I_{xx} \dot{\psi} s_\phi c_\phi s_\theta \\
 C_{2,3} &= -I_{xx} \dot{\psi} c_\theta \\
 C_{3,1} &= -I_{xx}(\dot{\psi} c_\theta^2 s_{2\phi} + \dot{\theta} c_\theta c_{2\phi}) \\
 C_{3,2} &= -I_{xx}(\dot{\psi} c_\theta c_{2\phi} - \dot{\theta} s_{2\phi}) \\
 C_{3,3} &= 0
 \end{aligned} \quad (8)$$

$I_{xx} = I_{yy} = m\ell^2$, $I_{zz} = 2m\ell^2$. Model değişkenleri ile her bir iticinin⁷ sağladığı itme kuvveti arasında aşağıdaki ilişkiler mevcuttur.

$$\tau_\psi = \sum_{i=1}^4 \tau_{m_i} \quad (9a)$$

$$\tau_\theta = (f_3 - f_1)\ell \quad (9b)$$

$$\tau_\phi = (f_2 - f_4)\ell \quad (9c)$$

$$u = \sum_{i=1}^4 f_i \quad (9d)$$

Yukarıda $f_i = k\omega_i^2$ ile verilir ve $k > 0$ motor ile ilgili bir kazancı, ω_i ise i . motorun açısal hızını gösterir, (Detaylı bilgi için bkz. [1, 2]).

Tablo 1: Dönerkanat Fiziksel Parametreleri

m	Motor ağırlığı	0.08 kg
m_b	Batarya ağırlığı	0.20 kg
M	Toplam dönerkanat ağırlığı	0.52 kg
ℓ	Motorların ağırlık merkezine uzaklığı	0.205 m
g	Yerçekimi ivmesi	9.81 m/s ²

3. Araç Davranışının Kontrolü

Araç davranışının kontrolü üç alt başlık altında verilmiştir. Öncelikle aracı istenen yüksekliğe çıkararak sapma açısının⁸ kontrolü sağlanacak, bunu takiben dönme açısı⁹ ve y konumu istenen değerlere sürülecek, son olarak da yunuslama açısı¹⁰ ve x konumu istenen değerlere yönlendirilecektir.

3.1. Sapma Açısının (ψ) ve Yüksekliğin (z) Kontrolü

İstenen yükseklik z_r ile gösterilsin. Buna göre, aşağıdaki kontrolör, aracı istenen yükseklikte tutacaktır.

⁷İng. Propeller

⁸İng. Yaw Angle

⁹İng. Roll Angle

¹⁰İng. Pitch Angle

$$u = M \frac{-4\dot{z} - 4(z - z_r) + g}{c_\theta c_\phi} \quad (10)$$

$$\frac{Z(s)}{Z_r(s)} := H(s) = \frac{4}{s^2 + 4s + 4} \quad (11)$$

Böylelikle s değişkeni Laplace değişkenini göstermek üzere araç yüksekliği değişkeninden ($Z(s)$) referans yükseklik girişine ($Z_r(s)$) kadar olan transfer fonksiyonu kritik sönümlü bir transfer fonksiyonuna dönüşmektedir. Sapma açısının sıfır olması, yani aracın z eksenine etrafındaki dönmelerinin asgari düzeyde olması istenmektedir. Bu nedenle $\psi_r = 0$ referans sinyali ile aşağıdaki kontrolör de sapma açısından referans girişine kadar olan transfer fonksiyonu da yukarıda verilen $H(s)$ gibi olacaktır.

$$\tilde{\tau}_\psi = -4\dot{\psi} - 4(\psi - \psi_r) \quad (12)$$

Bu iki kontrolör ile araç istenen yükseklikte seyredecek, sapma açısı da sıfır etrafında olacaktır.

3.2. Dönme Açısının (ϕ) ve y -Konumunun Kontrolü

Denklem (10) ile verilen u değeri ile y konumunun davranışı aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\ddot{y} = (-4\dot{z} - 4(z - z_r) + g) \tan \phi \quad (13)$$

Açıktır ki u girişi sistemin yerden yüksekliğini istenen değere getirirken kısa sürede $z \rightarrow z_r$ ve $\dot{z} \rightarrow 0$ davranışı gözlenecektir. Yukarıda verilen kapalı çevrim transfer fonksiyonunun kararlı olması buna açık bir delil teşkil eder. Geçici rejimin sona ermesi ve değişkenlerin kalıcı değerlerine ulaşmasıyla yukarıda verilen \ddot{y} ifadesi de (14) ile verilen ifadeye dönüşecektir.

$$\ddot{y} \approx g \tan \phi \quad (14)$$

Yukarıdaki ifadeye göre araca y yönünde kumanda edebilmek için ϕ açısının istenen bazı değerleri olması gereklidir. Dönerkanat sisteminin y yönünde göstereceği davranış ϕ açısındaki değişimlerden kaynaklandığı için istenen yörüngenin y bileşeni için gerekli ϕ açısı hesap edilerek bu değere ϕ_r denecek ve aşağıda görüldüğü gibi $\tilde{\tau}_\phi$ ifadesi de ϕ açısının istenen değeri takip etmesini sağlayacak şekilde düzenlenecektir.

$$\phi_r = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{y} + 0.25(y - y_r)}{g} \right) \quad (15)$$

$$\tilde{\tau}_\phi = -4\dot{\phi} - 4(\phi - \phi_r) \quad (16)$$

Böylelikle araç, istenen y konumuna yönelimi gerektiren dönme açısında ($\phi \rightarrow \phi_r$) olacaktır. Unutulmamalıdır ki araç istenen yüksekliğe eriştikten sonra istenen y pozisyonunu alacaktır.

3.3. Yunuslama Açısının (θ) ve x -Konumunun Kontrolü

Yukardaki tartışmaya benzer şekilde aracın yunuslama açısı da (10) ile verilen kontrol sinyali altında aşağıdaki ifadeye dönüşecektir. Aracın istenen yüksekliğe erişmesi ve istenen y pozisyonunu alması ile ifade daha da basitleşecek ve x yönünde (18) ile verilen rejime geçilecektir.

$$\ddot{x} = (-4\dot{z} - 4(z - z_r) + g) \frac{\tan \theta}{\cos \phi} \quad (17)$$

$$\ddot{x} \approx g \tan \theta \quad (18)$$

Yunuslama açısının (19) ile verilen referans açısına yönlendirilmesi ile x yönünde istenen pozisyona erişilebilecektir. Bunun için $\tilde{\tau}_\theta$ girdisini (20) ifadesinde görülen biçimde seçmek kafi olacaktır.

$$\theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{x} + 0.25(x - x_r)}{g} \right) \quad (19)$$

$$\tilde{\tau}_\theta = -4\dot{\theta} - 4(\theta - \theta_r) \quad (20)$$

Özetle ele alınırsa, sunulan kontrol yöntemi aracı kartezyen uzayda önce istenen yüksekliğe çıkaracak, ardından istenen y pozisyonuna ve bunu müteakip istenen x pozisyonuna getirecektir. Özünde bu işlem adımlarını başarabilmek için lüzumlu referans açılarının hesabı ve Euler açılarının bu değerlere yönlendirilmesi olan yaklaşım, benzetimlerde hem bu türde bir referans yörüngesi için hem de koordinatların tümünün birlikte değiştiği bir yörünge için ele alınacaktır.

4. Benzetim Çalışmaları

Benzetimlerde iki farklı durum üzerinde durulmuştur. Bunlardan ilki, sunulan kontrol hiyerarşisine uygun biçimde komut işaretini değiştiren türde, diğeri ise her üç kartezyen yönde de aynı anda değişimlerin gerçekleştiği bir yörüngedir.

Tablo 2: Benzetim Parametreleri

Δt	Benzetim adım aralığı	1 sn.
T	Benzetim süresi (Uçuş süresi)	1300 sn.
σ_p	Pozisyon gürültüsü varyansı	0.001
σ_v	Hız gürültüsü varyansı	0.001

Tablo 1'de benzetim parametreleri verilmiştir. İlk tipte referans işareti ve gürültülü gözlemler için elde edilen sonuçlar Şekil 2'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere dönerkanat sistemi referans yörüngeyi yakından takip etmektedir. Bu benzetimlerle ilgili kontrol sinyalleri de Şekil 3'te verilmiştir. Gürültü işaretinin yoğun biçimde görüldüğü bu kontrol girdilerine sınır konmamış, eyleyicilerin de yeterince hızlı olduğu varsayılmıştır.

Benzetimde başlangıç anında tüm durum değişkenlerinin türevleri (hızlar) ve kartezyen pozisyonlar sıfırdır. Açısal pozisyonlar ise $\psi(0) = 0.1$ rad., $\theta(0) = 0.2$ rad. ve $\phi(0) = -0.1$ rad. alınmış, sıfırdan farklı başlangıç koşullarının bertaraf edilmesindeki başarı tatmin edici bulunmuştur.

Aynı başlangıç koşulları ve benzetim parametreleri için referans yörünge aşağıdaki gibi seçilmiş ve Şekil 4'te gösterilen sonuçlar elde edilmiştir.

$$x_r(t) = 50 \cos\left(\frac{2\pi t}{750}\right) \tanh\left(\frac{t}{200}\right) \quad (21a)$$

$$y_r(t) = 50 \sin\left(\frac{2\pi t}{750}\right) \tanh\left(\frac{t}{200}\right) \quad (21b)$$

$$z_r(t) = 50 \tanh\left(\frac{t}{200}\right) \quad (21c)$$

Seçilen referans yörüngeye bakılırsa aracın yavaşça 50m yüksekliğe çıkması ve bu yükseklikte 50m yarıçapında dairesel bir yörüngeyi dönmesi istenmekte, araç da öngörülen şekilde bu yörüngeyi takip etmektedir. Şekil 5'te bu sonuca ilişkin kontrol sinyalleri gösterilmiştir.

5. Sonuçlar ve Tartışma

Bu bildiriye dört motorlu bir dönerkanat sistemi için yükseklik kontrolü lineerleştirilen bir denetleyici ile gerçekleştirilmiş, kartezyen uzaydaki konumlamayı sağlayan açılar istenen değerlerine getirilmesi ise PD tipinde kontrolörlerle gerçekleştirilmiştir. Ana fikir olarak araç önce istenen z yüksekliğine, ardından istenen y konumuna ve son olarak da istenen x konumuna verilen kontrol kuralları ile sürülebilmektedir. Kontrolörün her üç yönde de yörünge değişkenlerinin zamanla değişen değerler alması durumu için de yapılan denemeler benzetim ortamında umut verici bulunmuştur.

Bu çalışmanın literatüre katkısı basit bir kontrolör ile dönerkanat sisteminin davranış kontrolünün başarılması, diğer bir deyişle üst düzey misyonun yerine getirilmesidir. Kontrolörün gürültülü bir gözlem ortamında bu sonuçları vermesi olumlu bir bulgu iken sonuçların benzetim ortamında elde edilmesi gerçek zamanda bu sistemin önerilen kontrolör ile nasıl davranacağı hakkında net bir fikir verememektedir. Bu nedenle bu çalışmanın gelecekteki amacı bulguları deneysel olarak doğrulamak olacaktır.

Öte yandan, dikkat edilmelidir ki kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistemi için de kararlılık analizi sunulmamıştır. Açılımlar istenen değerlere hızla sürüldüğü, bunu müteakip istenen kartezyen pozisyona erişilebildiği gösterilmiştir. Bu konuda yazarın ileriye dönük diğer bir amacı da kararlılık analizine dayandırılarak kontrolörün kapalı çevrimde uygulanabilirliğinin garantisini verebilmektir.

6. Teşekkür

Bu çalışmanın hayata geçirilmesi esnasındaki yardım ve tavsiyelerinden ötürü Dr. Pedro Castillo'ya ve TOBB ETÜ kütüphanesi çalışanlarına teşekkür ederim.

Bu çalışma TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu tarafından (Kontrat No ETÜ-BAP-2006/04) desteklenmiştir.

7. Kaynakça

[1] P. Castillo, R. Lozano ve A.E. Dzul, "Stabilization of a Mini Rotorcraft with Four Rotors", IEEE Control Systems Magazine, pp.45-55, Aralık 2005.

[2] P. Castillo, R. Lozano ve A.E. Dzul, Modelling and Control of Mini Flying Machines, Springer Verlag, 2005.

[3] S. Bouabdallah, A. Noth ve R. Siegwart, "PID vs LQ Control Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor," Proc. of 2004 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, September 28 - October 2, Sendai, Japonya, 2004.

[4] S.D. Hanford, L.N. Long ve J.F. Horn, "A Small Semi-Autonomous Rotary-Wing Unmanned Air Vehicle (UAV)," AIAA2005-7077.

[5] G. Hoffmann, D.G. Rajnarayan, S.L. Waslander, D. Dostal, J.S. Jang, C.J. Tomlin, "The Stanford testbed of Autonomous Rotorcraft for Multi Agent Control (STARMAC)," Proc. of The 23rd Digital Avionics Systems Conference (DASC'04), Ekim 24-28, Salt Lake City, Utah, ABD, 2004.

[6] G.P. Tournier, M. Valentiy ve J.P. Howz, "Estimation and Control of a Quadrotor Vehicle Using Monocular Vision and Moiré Patterns," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Ağustos 21-24, Keystone, Colorado, ABD, AIAA2006-6711, 2006.

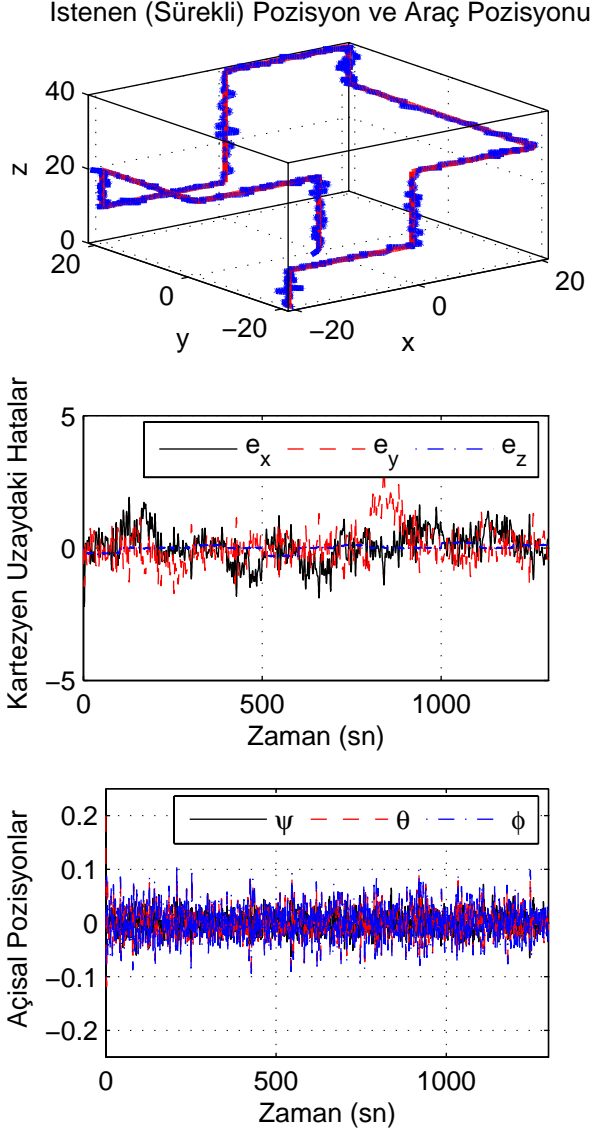
[7] E. Altuğ, J.P. Ostrowski, C.J. Taylor, "Quadrotor Control Using Dual Camera Visual Feedback," Proc. of the 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, September 14-19, Taipei, Tayvan, s.4294-4299, 2003.

[8] F.B. Çamlıca, "Demonstration of a Stabilized Hovering Platform for Undergraduate Laboratory," Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2004.

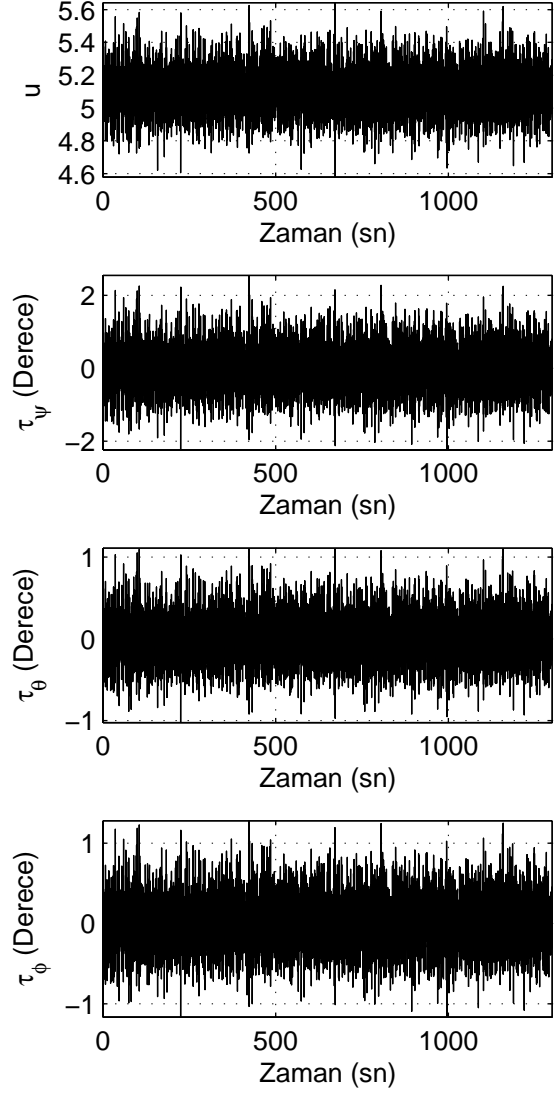
[9] S.L. Waslander, G.M. Hoffmann, J.S. Jang ve C.J. Tomlin, "Multi-Agent Quadrotor Testbed Control Design: Integral Sliding Mode vs. Reinforcement Learning," 2005 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, August 2-6, Edmonton, Alberta, Kanada, s.468-473, 2005.

[10] T. Hamel, R. Mahony, R. Lozano ve J. Ostrowski, "Dynamic Modelling and Configuration Stibilization for an X4-Flyer," 15th IFAC Triennial World Congress, Barcelona, İspanya, 2002.

[11] L. Klauske, T. Lorenz, N. Colberg, M. Janke, U. Mönich, N. Nothing, L. Thiele, F. Venzke, T. Wernicke S. Zeiler ve R. Kusch, "DSP-Copter - A Quadrotor Helicopter Controlled by a Digital Signal Processor," ELITE Project Report, Berlin University of Technology, Almanya, 2004.

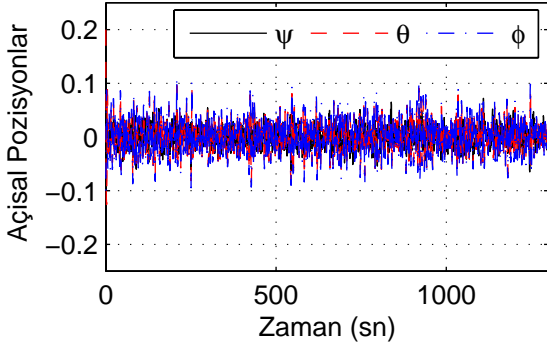
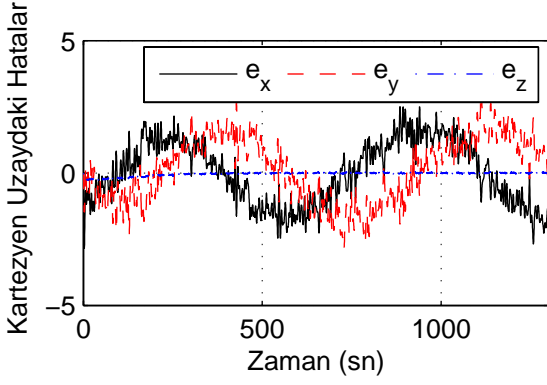
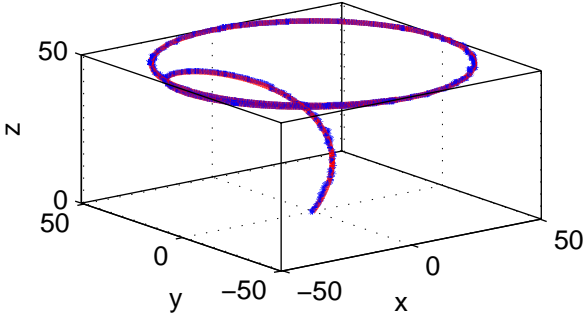


Şekil 2: Kesikli yörünge benzetimleri

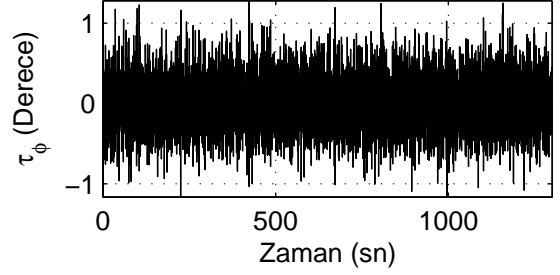
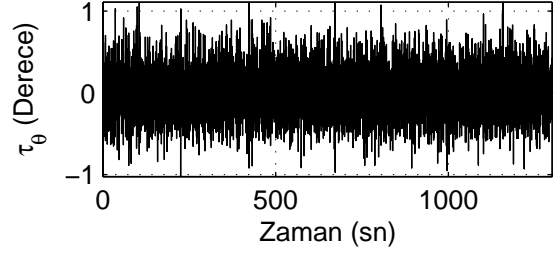
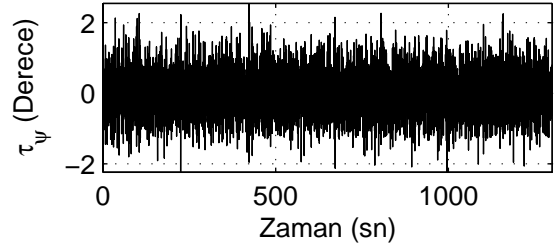
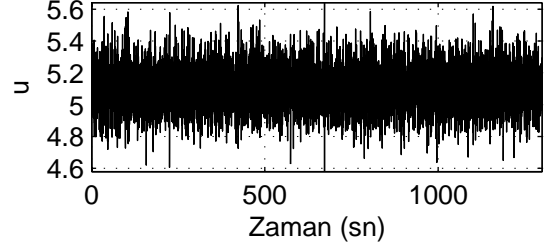


Şekil 3: Kesikli yörünge benzetimlerinde giriş sinyalleri

Istenen (Sürekli) Pozisyon ve Araç Pozisyonu



Şekil 4: Sürekli yörünge benzetimleri



Şekil 5: Sürekli yörünge benzetimlerinde giriş sinyalleri