

İki Serbestlik Dereceli Dört Rotor Sisteminin Tasarımı, Modellenmesi ve Kontrolü

^{*1}Ethem Kelekci, ¹Selcuk Kizir, ¹Zafer Bingul

¹ Faculty of Engineering, Department of Mechatronics Engineering Kocaeli University, Turkey

Abstract

In this study, the design, modeling and control of four rotor systems with two degrees of freedom (2DOF) developed to study the behavior of nonlinear aerodynamic systems have been carried out. System dynamics have been derived in accordance with the laws of Newton's dynamic equations. Moreover, computationally difficult parameters such as system friction and moments of inertia have been estimated in the Matlab environment using real system data and verification of the model has been provided. Pulse width modulation (PWM) - velocity and velocity-force curves of the nonlinear brushless direct current (BLDC) motors providing motion to the system have been obtained by the motor tests. The 2DOF four rotor system has been modeled in Matlab / Simulink environment using Newton equations and the motor equations obtained from test results. Type-2 fuzzy logic controllers have been used for the pitch and yaw control of the system.

Keywords: BLDC Motor, Four rotor, Type-2 Fuzzy Logic, Type-2 Membership Functions

Özet

Bu çalışmada, doğrusal olmayan aerodinamik sistemlerin davranışlarını incelemek için geliştirilmiş iki serbestlik dereceli (2SD) dört rotor sisteminin tasarımı, modellenmesi ve kontrolü işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sistem dinamikleri Newton'un dinamik denklem yasası doğrultusunda çıkartılmıştır. Bunun yanında sistem sürtünmeleri ve eylemsizlik momentleri gibi hesaplanması güç parametreler Matlab ortamında gerçek sistem verileri kullanılarak tahmin edilmiş ve modelin doğrulanması sağlanmıştır. Sisteme hareket sağlayan doğrusal çalışma yapısına sahip olmayan fırçasız doğru akım (BLDC) motorlarının PWM sinyali (pulse width modulation-sinyal genişlik modülasyonu)-hız ve hız-kuvvet ilişki eğrileri yapılan motor testleri sonucu çıkartılmıştır. Newton denklemleri ve test sonuçlarından elde edilen motor denklemleri kullanılarak 2SD dört rotor sistemi Matlab/Simulink ortamında modellenmiştir. Sistemin yunuslama ve sapma hareketlerinin kontrolü için tip-2 bulanık mantık denetleyicileri kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: BLDC Motor, Dört rotor, Tip-2 Bulanık Mantık, Tip-2 Üyelik Fonksiyonu

1. Giriş

Aerodinamik kuvvetler etkisinde çalışan çok giriş/çok çıkış (multi input/multi output-MIMO) yapısına sahip çift rotor (twin rotor) sistemi literatürde çok sayıda çalışmaya konu olmuş doğrusal olmayan benchmark prosesleri arasında yer almaktadır. Çift rotor sistemi yunuslama (pitch) ve sapma (yaw) hareketi kabiliyetlerine sahip iki serbestlik dereceli bir sistemdir. Doğrusal olmayan dinamiklere sahip çift rotor sistemi yunuslama hareketi esnasında sapma açısını, sapma hareketi esnasında ise yunuslama açısını değiştiren etkileşimli hareket yapısına sahiptir. Bu etkileşim ise pervanelerin dikey kuvvetler yanında yanıl kuvvetler üretmesi ve tüm ekipmanların bağılı olduğı çubuk mekanizmasının bir yönde normal hareketini yaparken diğler yönde merkezkaç kuvveti üretmesinden kaynaklanmaktadır. Literatürde çift rotor sistemi üzerinde modele bağımlı PID, LQR, durum geri besleme gibi geleneksel denetleyicilerin uygulandıkları çalışmalar yer almaktadır. Cajo R. ve Agila W [1] çalışmalarında çift-rotor sisteminin doğrusal modelini kullanarak doğrusal ve doğrusal olmayan PID algoritması geliştirmişlerdir. Çalışmalarında elde ettikleri sonuçlara göre sistemin doğrusal olmayan yapısından dolayı sabit katsayılı PID denetleyicisinin oturma zamanı, titreşim ve aşım dikkate alındığında ideal sınırlar içerisinde performans göstermediğı görülmüştür. Ates ve arkadaşları [2] sabit değişkenli normal PID denetleyicisinden farklı olarak değişken katsayılı (sigmoid) PID denetleyicisi kullanarak çift rotor sistemini kontrol etmişler ve denetleyicilerin performanslarını karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında değişken katsayılı PID'nin normal PID'ye göre daha iyi performans gösterdiği sonuçlar almışlardır. Phillips A ve Sahin F. [3] kalıcı durum hatası olma durumunun önüne geçmek için integral etkili LQR (I+LQR) yöntemini kullanarak çift rotor sistemini kontrol etmişlerdir. Gerçekleştirdikleri kontrol yapısı ile literatürde yer alan modele bağılı kontrol yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir. Modele bağılı kontrol çalışmalarının yanında literatürde çift rotor kontrolü için modelden bağımsız kontrol yöntemlerinin yer aldığı çalışmalar da bulunmaktadır. Khanesar ve arkadaşları [4] optimal kayma kipli (sliding mode) tip-2 bulanık mantık denetleyicisi kullanırken, Zeghlache ve arkadaşları [5] pür tip-2 bulanık mantık denetleyicisi kullanarak çift rotor sistemi üzerinde çalışmalar yapmışlardır.

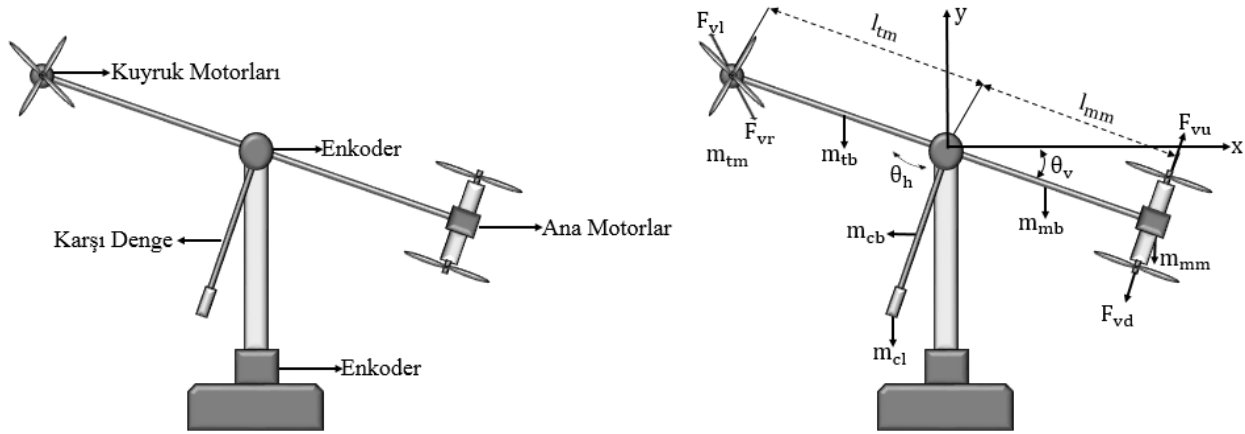
Bu çalışmada çift rotor sistemi ile aynı hareket kabiliyetine sahip iki serbestlik dereceli dört rotor sistemi önerilmiştir. Literatüre yenilik kazandıracak bu sistem literatürde bulunan çift rotor sistemlerine göre kontrol kabiliyeti ve hızlı davranışlar göstermesi yönlerinden avantaj sağlamaktadır. Literatürde yer alan çift rotor sistemlerinde yunuslama ve sapma hareketleri için ayrı ayrı tek motor ve pervane kullanılmaktadır. Tek motor ve pervane ile çift yönlü hareket saplanması (yukarı-aşağı, sağ-sol) DC motorun saat yönü veya saat yönünün tersinde çalıştırılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Fakat sisteme hareket kazandıran pervaneler tek bir yönde dönmeye elverişli olduklarından dolayı sistemin her iki yönde de aynı performansı göstererek çalışması sağlanamamaktadır. Ayrıca DC motor bir yönde yüksek hızda dönerken anlık olarak ters yönde hareket etmesini istemek tepki süresinden dolayı gecikmeye neden

olurken, motora da zarar verebilmektedir. Bu kapsamda sistemin çift yönlü kontrollerini aynı performansta sağlayabilmek için dört rotor, yunuslama ve sapma yönelimlerini yüksek hızlarda kontrol edebilmek için ise DC motor yerine BLDC motorlar kullanılmıştır. BLDC motor hem yüksek hızlarda çalışması hem de DC motorlara göre daha küçük boyutta ve ağırlıkta olması yönlerinden tasarımda tercih sebebi olmuştur.

2. 2SD DÖRT ROTOR SİSTEMİ

2.1. Sistem Tasarımı

Sistemde, yunuslama hareketi için iki, sapma hareketi için iki olmak üzere toplamda dört adet BLDC motor ve pervane, sistemin yunuslama hareketine etkisi olan karşı denge ve sistemin yunuslama ve sapma açı bilgilerinin alındığı iki adet enkoder bulunmaktadır. Sistem modeli ve sistem parametreleri Şekil 1’de gösterilmiştir.

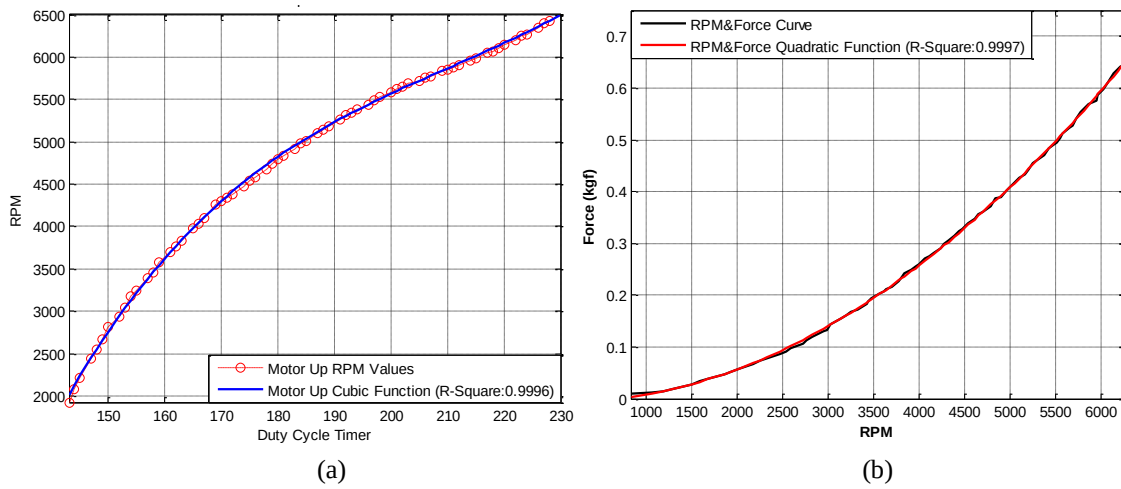


Şekil 1. 2SD Dört rotor sistem modeli ve sistem parametreleri

Kontrolünün Googol endüstriyel bilgisayar tarafından sağlandığı çift rotor sistemi çalışma düzeneği Şekil 2.2’de yer almaktadır. Sistem üzerinde bulunan BLDC motorların sürülmesi için gerekli ESC’lere (electronic speed control), PWM sinyali doğrudan endüstriyel bilgisayar üzerinden gönderilemediği için ara birim kartı tasarlanmıştır. Bu kart üzerinden sisteme PWM sinyalleri gönderilirken aynı zamanda yunuslama ve sapma açısı enkoder bilgileri okunup bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Sistemde yunuslama hareketi için iki, sapma hareketi için iki toplamda dört adet BLDC motor bulunmaktadır. BLDC motorlar normal DC motorlara göre doğrusal olmayan davranışlar göstermesinden ve kullanılan ESC’nin yapısına göre farklı çalışma performansları ortaya koymasından dolayı standart BLDC motor modeli bulunmamaktadır. Bu nedenle motor davranışları test edilerek Şekil 3-a’da yer alan PWM sinyali-hız ilişki eğrisi elde edilmiştir. Motor denkleminin elde edilmesinin yanında hız-kuvvet ilişkisinin bilinmesi hem sistem modeli hem de denetleyicinin performansı açısından son derece önemlidir. Bu nedenle yapılan motor testine ek olarak kuvvet testi yapılmış ve hız-kuvvet ilişki eğrisi çıkartılmıştır (Şekil 3-b).



Şekil 2. 2SD dört rotor sistemi çalışma düzeneği



Şekil 3. BLDC motor a) PWM sinyali - hız eğrisi b) hız – kuvvet eğrisi

2.2. Sistem Dinamiklerinin Hesaplanması

Sistemin yunuslama hareketinde etkili olan torklar sırasıyla motorların, karşı dengenin ve kirişin ağırlıklarından oluşan yerçekimi torku, yunuslama hareketini sağlayan motorların oluşturduğu pervane torkları, sistemin hareketi sırasında maruz kaldığı sürtünme torku, sistemin yatay hareketinde meydana gelen bozucu etki oluşturan kirişten kaynaklı jiroskobik tork ve yatay pervanelerden kaynaklı merkezkaç torklarıdır. Belirtilen tork eşitlikleri Denklem 1-5'te sırasıyla yer almaktadır [6-7].

$$\tau_g = g \left\{ \left[\left(\frac{m_{tm}}{2} + m_r \right) l_t - \left(\frac{m_{mm}}{2} + m_{mr} \right) l_m \right] \cos \theta_v - \left(\frac{m_{tb}}{2} l_b + m_{cl} l_{cl} \right) \sin \theta_v \right\} \quad (1)$$

$$\tau_{mu} = l_{mm} F_{vu}(\omega_{vu}), \quad \tau_{md} = l_{mm} F_{vd}(\omega_{vd}) \quad (2)$$

$$\tau_{vfriiction} = k_{vf} \dot{\theta}_v \quad (3)$$

$$\tau_{gyr} = k_g (F_{vu}(\omega_{mu}) - F_{vd}(\omega_{md})) \dot{\theta}_h \cos \theta_v \quad (4)$$

$$\tau_c = -\frac{1}{2}\dot{\theta}_h^2 \left(\left(\frac{m_{tm}}{2} + m_r \right) l_t l_{tm} + \left(\frac{m_{mm}}{2} + m_{mr} \right) l_m l_{mm} - \left(\frac{m_{tb}}{2} l_b + m_{cl} l_{cl} \right) l_{cb} \right) \sin 2\theta_v \quad (5)$$

Sistemin sapma hareketine etkiyen yatay torklar ise, motorların oluşturduğu pervane torkları, yatay sürtünme torku ve yunuslama hareketini sağlayan motor pervanelerinin oluşturduğu yatay torklardır. Denklem 6-7’de belirtilen tork değerleri sırasıyla verilmiştir.

$$\tau_{mr} = l_{tm} F_{hr}(\omega_{hr}) \cos \theta_v, \tau_{ml} = l_{tm} F_{hl}(\omega_{hl}) \cos \theta_v \quad (6)$$

$$\tau_{hfriktion} = k_{hf} \dot{\theta}_h, \tau_{vEffect} = F_{efct}(\omega_{tr} - \omega_{tl}) l_{tm} \cos \theta_v \quad (7)$$

Newton’un dinamik denklemine göre bir cisme etkiyen moment, cismin eylemsizlik momenti ile açısal ivmesinin çarpımına eşittir. Bu prensip kapsamında Denklem 8 ve 9’daki eylemsizlik momenti ve toplam tork değerleri kullanılarak sistemin yunuslama ve sapma hareketi için ayrı ayrı açısal ivme değerleri Denklem 11’de görüldüğü gibi bulunmuştur.

$$J_v = m_{mr} J_m^2 + m_m \frac{l_m^2}{3} + m_{cb} l_{cb}^2 + m_b \frac{l_b^2}{3} + m_{tr} l_t^2 + m_t \frac{l_t^2}{3}, \tau_v = \tau_{mu} - \tau_{md} + \tau_g + \tau_{gyr} + \tau_c - \tau_{vfriktion} \quad (8)$$

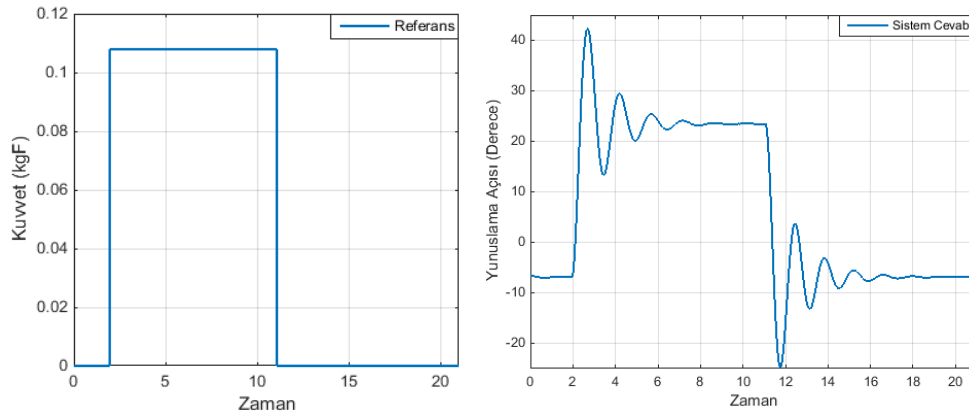
$$J_h = D \cos^2(\theta_v) + E \sin^2(\theta_v), \tau_h = \tau_{mr} - \tau_{ml} + \tau_{vEffect} - \tau_{hfriktion} \quad (9)$$

$$D = \left(\frac{m_{mb}}{3} + m_{mm} \right) l_{mm}^2 + \left(\frac{m_{tb}}{3} + m_{tm} \right) l_{mm}^2, E = \left(\frac{m_{cb}}{3} l_{cb}^2 + m_{cl} l_{cl}^2 \right) \quad (10)$$

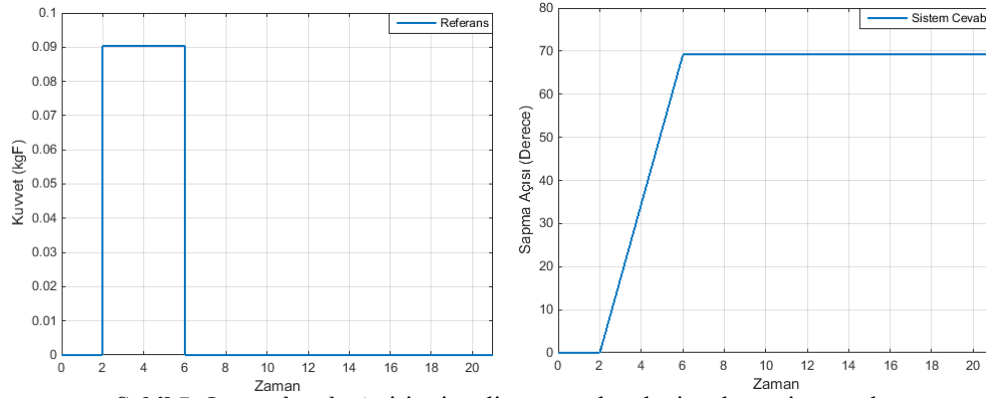
$$\ddot{\theta}_v = \frac{\tau_v}{J_v}, \ddot{\theta}_h = \frac{\tau_h}{J_h} \quad (11)$$

2.3. Sistemin Modellenmesi ve Doğrulanması

2SD dört rotor sisteminin Newton denklemleri kullanılarak Matlab-Simulink (The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts) ortamında sistem modellenmiştir. Sistem modelinin gerçek sistem davranışlarını göstermesi için motor pervanelerinin oluşturduğu tork değerleri, test sonucu elde edilen Şekil 3-a ve b’de yer alan eğri denklemlerinden alınmıştır. Şekil 4 ve 5’te yunuslama ve sapma hareketi için uygulanan giriş sinyallerine karşı alınan açık çevrim cevapları yer almaktadır.

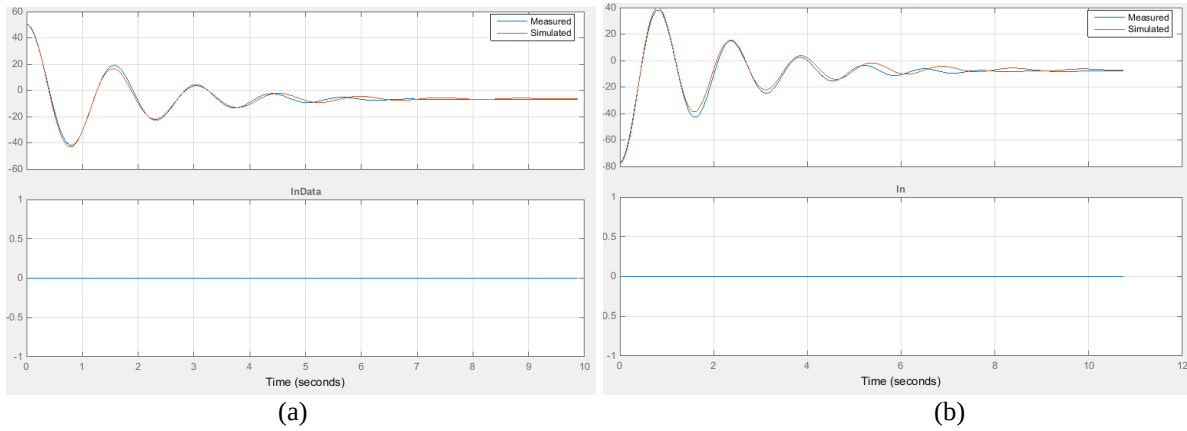


Şekil 4. Yunuslama hareketi giriş sinyali - yunuslama hareketi açık çevrim cevabı



Şekil 5. Sapma hareketi giriş sinyali - sapma hareketi açık çevrim cevabı

Newton yöntemine göre elde edilen sistemin matematik modelinde kullanılan sürtünme ve eylemsizlik momentleri değerlerinin hesaplanmasında bazı varsayımlar yapılmaktadır. Bu nedenle bulunan parametre değerleri gerçek sistemdeki parametre değerlerinden farklılık göstermektedir. Bu farklılık ise sistem modelinin gerçek sistemden farklı davranışlar göstermesine neden olmaktadır.



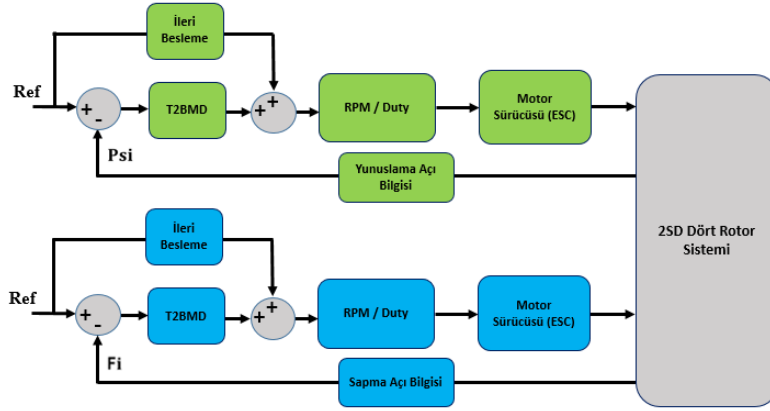
Şekil 6. Parametre tahmini sonrası sistem cevapları a) 55° serbest düşüş b) -80° serbest düşüş

Bu kapsamda, sistem modelinin gerçek sisteme benzetilmesi için Matlab ortamında gerçek sistem parametrelerinin tahmin edilmesi işlemi yapılmıştır. Gerçek sistemden alınan serbest düşüş verileri kullanılarak eylemsizlik momenti ve sürtünme katsayıları güncellenmiş ve model cevabı gerçek sistem cevabıyla örtüştürülmüştür. Bu örtüştürme sonrası elde edilen sonuçlar Şekil 6'da gösterilmiştir. Grafiklerde mavi eğri gerçek sistemden alınan verileri gösterirken, kırmızı eğri ise model cevabını göstermektedir.

3. 2SD Dört Rotor Sistem Kontrolü

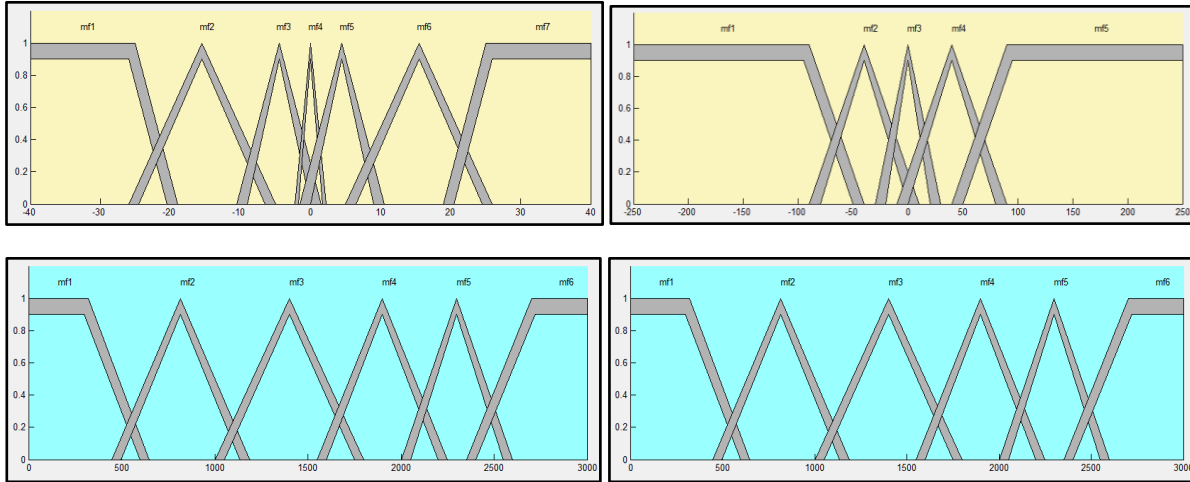
Bu çalışma kapsamında tasarlanan dört rotor sisteminin yunuslama ve sapma hareketi için iki farklı kontrol sistemi oluşturulmuştur. Yunuslama kontrolü için, yunuslama açısı hatası ve açısı hata değişiminin giriş olarak alındığı ilk denetleyicide çıkış olarak iki motor için RPM değerleri üretilmektedir. Sapma kontrolünde ise yunuslama kontrolüne benzer giriş çıkış yapısı

oluşturulmuştur. Fakat üyelik fonksiyonlarının yeri ve denetleyici kuralları farklılık göstermektedir.



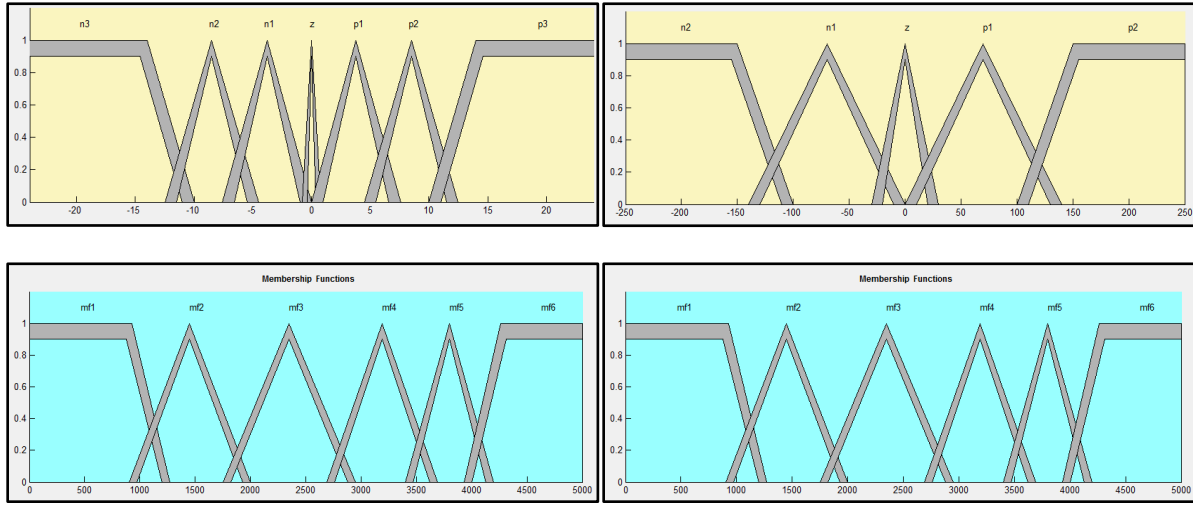
Şekil 7. 2SD dört rotor sistemi kontrol yapısı

Dört rotor sistemi doğrusal olmayan dinamikler ve hava akımından kaynaklı belirsizlikler içermesinden dolayı sistem kontrolünde belirsizlikleri aralıklı üyelik fonksiyonları ile ifade edebilen tip-2 bulanık mantık denetleyicisi tercih edilmiştir. Denetleyici kuralları açık çevrim cevapları analiz edilerek oluşturulmuştur. Şekil 8’de tip-2 bulanık mantık editöründe [8] oluşturulan dikey yön kontrolü için kullanılmış iki giriş (yunuslama açısı hatası ve yunuslama açısının türevi) ve iki çıkışa (yukarı hareket motoru, aşağı hareket motoru) ait üyelik fonksiyonları verilmiştir. Yunuslama açısı hatası için yedi üyelik fonksiyonu, hatanın türevi için beş üyelik fonksiyonu, yunuslama hareketini sağlayan motorlar için ise altışar üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur.



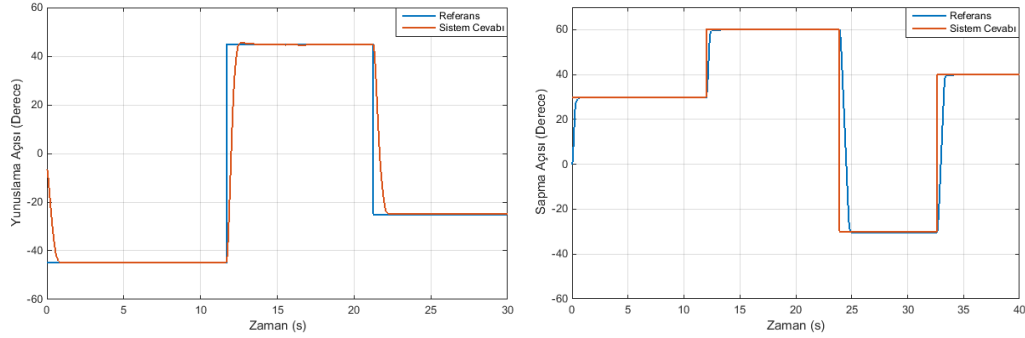
Şekil 8. Dikey yön (yunuslama) kontrolü tip-2 üyelik fonksiyonları (2 giriş – 2 çıkış)

Şekil 9’da ise yatay yön kontrolü için kullanılmış iki giriş (sapma açısı hatası ve hatanın türevi) ve iki çıkışa (sağa hareket motoru, sola hareket motoru) ait üyelik fonksiyonları verilmiştir. Sapma açısı hatası için yedi üyelik fonksiyonu, hatanın türevi için beş üyelik fonksiyonu, yatay yönde hareket sağlayan motorlar için ise altışar üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. Tasarlanan denetleyicilere ilişkin bulanık mantık kuralları Tablo B.1 ve B.2’de verilmiştir.



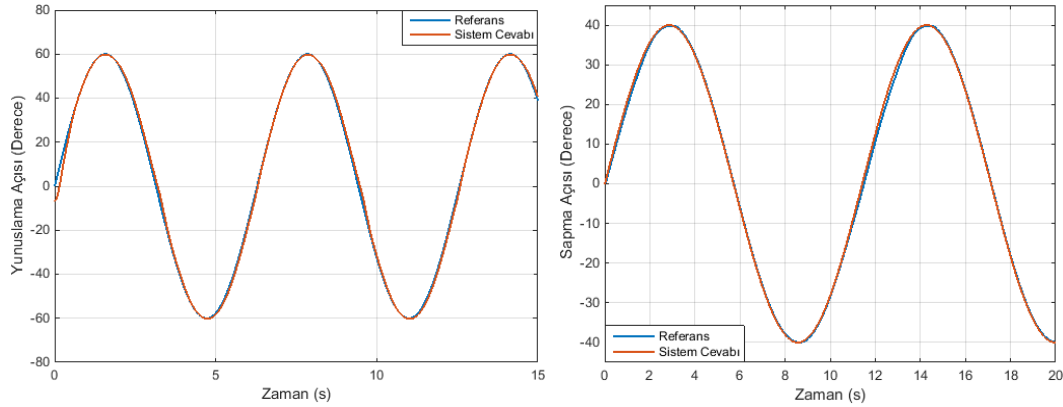
Şekil 9. Yatay yön (sapma) kontrolü tip-2 üyelik fonksiyonları (2 giriş – 2 çıkış)

Her iki yön kontrolü için tasarlanan tip-2 bulanık mantık denetleyicilerinin performansları, Matlab ortamında gerçek sisteme benzetilen model üzerinde test edilmiştir. Sisteme birim basamak ve sinüzoidal girişleri uygulanarak sistem cevapları incelenmiştir.



Şekil 10. Yunuslama hareketi birim basamak yörünge takibi - sapma hareketi birim basamak yörünge takibi

Elde edilen sonuçlara göre birim basamak yörünge takibi deneylerinde sistemin yunuslama ve sapma hareketlerini literatürdeki çift rotor sistemlerine göre aşırı ve daha hızlı yaptığı görülmüştür. Bunun yanında pozitif veya negatif hedef noktalarına, literatürde yer alan çalışmaların [5, 7] aksine aynı kontrol performansı ile ulaştığı Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 11. Yunuslama hareketi sinüzoidal yörünge takibi - sapma hareketi sinüzoidal yörünge takibi

Birim basamak yörünge takibi deneylerine ek olarak sinüzoidal yörünge girişleri uygulanarak sistem cevapları incelenmiştir. Literatürde çift rotor sistemi üzerinde yapılan kontrol çalışmalarında [4-5, 7] sinüzoidal giriş uygulanmış deneyler yer almaktadır. Şekil 11'deki yunuslama ve sapma yörünge takibi deneylerine ilişkin grafikler, dört rotor sisteminin literatürde yer alan çift rotor sistemlerine göre yüksek frekans ve genlikte daha iyi performansta çalışabildiğini göstermektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, doğrusal olmayan aerodinamik sistemlerin davranışlarını incelemek için geliştirilmiş iki serbestlik dereceli dört rotor sisteminin tasarımı, modellenmesi ve kontrolü işlemleri gerçekleştirilmiştir. Literatürde aynı hareket kabiliyetine sahip çift rotor sistemlerine hem esnek kontrol uygulanabilmesi hem de hızlı davranışlar göstermesi hedeflenerek tasarlanmış dört rotor sisteminin kontrolü tip-2 bulanık mantık denetleyicileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistemin matematiksel modeli Newton yöntemiyle elde edilmiştir. Newton denklemleri için gerekli olan eylemsizlik momenti ve sürtünme parametrelerinin hesaplanması güç olduğu için Matlab ortamında belirtilen parametreler tahmin edilerek sistemin doğrulanması işlemi yapılmıştır. Sistemin hızlı davranışlar gösterebilmesi için kullanılan BLDC motorlar doğrusal çalışmadıkları için motor fonksiyonları yapılan testlerle belirlenmiştir. Test sonuçlarından elde edilen sonuçlar sistem modelinde bire bir kullanılarak sistem modelinin gerçeğe uygun davranışlar göstermesi sağlanmıştır. Tip-2 bulanık mantık denetleyicileri sistemde ölçümden veya gürültüden oluşabilecek belirsizlikleri aralıklı üyelik fonksiyonları ile ifade edebilmektedir. Dört rotor sistemi ise doğrusal olmayan dinamikler ve hesaplanamayan belirsizlikler içermesinden dolayı sistem kontrolü için tip-2 bulanık mantık denetleyicisi tasarlanmıştır. Gerçek sisteme benzer olarak çıkartılan sistem modelinde, tasarlanan tip-2 bulanık mantık denetleyicilerinin performansları birim basamak ve sinüzoidal yörünge girişleri uygulanarak gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre dört rotor sisteminin ve tasarlanan denetleyicinin, çalışmanın hedefi olarak belirlenmiş çift yönlü ve hızlı kontrol doğrultusunda performans gösterdiği gözlenmiştir.

Ekler

A)

Tablo A.1. 2SD dört rotor sistem parametreleri

Parametre	Değer	Açıklama	Parametre	Değer	Açıklama
l_{cb}	0.21 (m)	Karşı denge kol uzunluğu	m_{cl}	0.09 (kg)	Karşı denge ağırlığı
l_{mm}	0.285 (m)	Ana kiriş uzunluğu	m_{cb}	0.042 (kg)	Karşı denge yük ağırlığı
l_{tm}	0.225 (m)	Kuyruk kiriş uzunluğu	m_{mb}	0.158 (kg)	Kuyruk kiriş ağırlığı
l_{cl}	0.18 (m)	Karşı denge ağırlık uzunluğu	J_v	0.015	Tahmin edilen eylemsizlik momenti
m_{mm}	0.2 (kg)	Ana motorlar toplam ağırlık	J_h	0.089	Tahmin edilen eylemsizlik momenti
m_{tm}	0.184 (kg)	Kuyruk motorları toplam ağırlık	k_{vf}	0.01	Tahmin edilen sürtünme katsayısı
m_{tb}	0.125 (kg)	Ana kiriş ağırlığı	k_{hf}	0.0361	Tahmin edilen sürtünme katsayısı

B)

Tablo B.1. Yunuslama hareketi tip-2 bulanık mantık kuralları

YunuslamaHata /	Motor 1	Motor 2	Motor 1	Motor 2	Motor 1	Motor 2	Motor 1	Motor 2	Motor 1	Motor 2
YunuslamaHataDeğişimi	n2		n1		z		p1		p2	
n3	mf1	mf5	mf1	mf4	mf1	mf3	mf2	mf2	mf3	mf2
n2	mf1	mf4	mf1	mf3	mf1	mf2	mf2	mf2	mf4	mf1
n1	mf1	mf4	mf1	mf3	mf1	mf2	mf3	mf1	mf6	mf1
z	mf1	mf6	mf1	mf5	mf1	mf1	mf5	mf1	mf6	mf1
p1	mf1	mf6	mf1	mf3	mf2	mf1	mf3	mf1	mf4	mf1
p2	mf1	mf4	mf2	mf2	mf2	mf1	mf3	mf1	mf4	mf1
p3	mf2	mf3	mf2	mf2	mf3	mf1	mf4	mf1	mf5	mf1

Tablo B.2. Sapma hareketi tip-2 bulanık mantık kuralları

SapmaHata /	Motor 3	Motor 4	Motor 3	Motor 4	Motor 3	Motor 4	Motor 3	Motor 4	Motor 3	Motor 4
SapmaHataDeğişimi	n2		n1		z		p1		p2	
n3	mf1	mf6	mf1	mf5	mf1	mf5	mf1	mf4	mf1	mf3
n2	mf1	mf5	mf1	mf4	mf1	mf4	mf1	mf3	mf1	mf2
n1	mf1	mf4	mf1	mf3	mf1	mf2	mf3	mf1	mf4	mf1
z	mf1	mf3	mf1	mf2	mf1	mf1	mf2	mf1	mf3	mf1
p1	mf1	mf4	mf1	mf3	mf2	mf1	mf3	mf1	mf4	mf1
p2	mf2	mf1	mf3	mf1	mf4	mf1	mf4	mf1	mf5	mf1
p3	mf3	mf1	mf4	mf1	mf5	mf1	mf5	mf1	mf6	mf1

Kaynaklar

- [1] Cajo R., Agila W., Evaluation of algorithms for linear and nonlinear PID control for Twin Rotor MIMO System, Asia-Pacific Conference on Computer Aided System Engineering, 2015.
- [2] Ates A., Alagoz B. B., Yeroglu C., Alisoy H., “Sigmoid Based PID Controller Implementation for Rotor Control”, European Control Conference (ECC), Linz, Austria, July 15-17, 2015.
- [3] Phillips A., Sahin F., Optimal Control of a Twin Rotor MIMO System Using LQR with Integral Action, World Automation Congress (WAC), Waikoloa, HI, USA, 3-7 Aug., 2014.
- [4] Khanesar, M. A., Kayacan E., Kaynak O., Optimal Sliding Mode Type-2 TSK Fuzzy Control of a 2-DOF Helicopter, IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Istanbul, Turkey, 2-5 Aug., 2015.
- [5] Zeghlache S., Kara K., Saigaa D., Type-2 Fuzzy Logic Control of a 2-DOF Helicopter (TRMS system), Central European Journal of Engineering, 4(3), 303-315, 2014.
- [6] Ocal Z., Bingül Z., İki Serbestlik Dereceli Helikopter Sisteminin Modellenmesi ve Parametrelerin Genetik Algoritma Yardımıyla Belirlenmesi, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Malatya 26-28 Eylül, 2013.
- [7] Ocal Z., Bingül Z., İki Serbestlik Dereceli Helikopter Sisteminin Ters Model Tabanlı Kontrolü”, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Malatya, Türkiye, 26-28 Eylül, 2013.
- [8] Kelekci E., Kizir S., Matlab GUI ile Tip 2 Bulanık Mantık Editör Tasarımı, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK2015, Denizli, Türkiye, 10-12 Ekim, 2015.