

FDAM Tahrikli Dört Çeker Mobil Robot için Elektronik Diferansiyel Tasarımı ve Kontrolü

Zehra AKSOY ve Hakan ÇELİK Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü Fırat Üniversitesi, Elazığ Türkiye

Özet

Mobil robotların kullanımı, tarihte çok öncelere dayanmaktadır. Mobil robotlar, gelişen teknoloji ile birlikte savunma sanayi, tarım ve lojistik alanları başta olmak üzere birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada Fırçasız Doğru Akım Motoru (FDAM) tahrikli dört tekerden çekişli bir mobil robot için Elektronik Diferansiyel Sistemi (EDS) tasarlanmış ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Günümüzde FDAM, yüksek verim, yüksek güç/hacim oranı, geniş bir hız aralığında kararlı çalışma ve bakım gerektirmeme gibi avantajları nedeniyle birçok alanda tahrik elemanı olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada da mobil robot tekerlerini hareket ettirmek için FDAM kullanılmıştır. Bu çalışmada mobil robot için EDS tasarımında Ackermann Geometrisinden yararlanılmıştır. FDAM ve EDS; MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve daha sonra birleştirilerek FDAM tahrikli dört çeker mobil robot için FDAM'lar PID kontrolör ile kontrol edilmiştir. Kullanılan PID kontrolör parametreleri, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile belirlenmiştir. Elde edilen benzetim sonuçları incelendiğinde, FDAM tahrikli dört çeker mobil robot için EDS kontrolür bir şekilde gerçekleştirildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Dört Çeker Mobil Robot, FDAM, Elektronik Diferansiyel Sistemi, PSO

Abstract

The use of mobile robots dates back to very early times in history. Mobile robots are widely used in many areas, especially in defense industry, agriculture and logistics, with the developing technology. In this study, an Electronic Differential System (EDS) was designed and controlled for a Brushless Direct Current Motor (BLDCM) driven four-wheel drive mobile robot. Today, BLDCM is used as a drive element in many areas due to its advantages such as high efficiency, high power/volume ratio, stable operation in a wide speed range and maintenance-free. Therefore, BLDCM was used to move the wheels of the mobile robot in this study. In this study, Ackermann Geometry was used in the EDS design for the mobile robot. BLDCM and EDS were modeled in the MATLAB/Simulink environment and then combined to create the EDS model for the BLDCM driven four-wheel drive mobile robot in the MATLAB/Simulink environment. In the created model, BLDCMs were controlled with a PID controller for EDS control. The PID controller parameters used were determined by Particle Swarm Optimization (PSO). When the obtained simulation results were examined, it was seen that the EDS control for the BLDCM driven four-wheel drive mobile robot for the BLDCM driven four-wheel drive four-black control for the BLDCM driven four-wheel drive mobile control for the BLDCM driven four-wheel drive four-wheel drive four-wheel drive mobile control for the BLDCM driven four-wheel drive mobile control for the BLDCM driven four-wheel drive mobile robot was successfully achieved.

Key words: Four Wheel Drive Mobile Robot, BLDC Motor, Electronic Differential System, PSO

*Sorumlu Yazar: Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, 23200, Elazığ TÜRKIYE, Telefon: +90452838023, E_mail: hakancelik@firat.edu.tr

1. Giriş

Mobil robot; tekerlek veya ray üzerinde hareket edebilen, uçabilen, yüzebilen, uzaktan veya otonom şekilde kumanda edilebilen yapıya sahip mekanizmaların bütünüdür. Mobil robotlar, günümüzde savunma sanayi, lojistik ve tarım başta olmak üzere birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1].

Fırçasız Doğru Akım Motoru (FDAM), senkron grubundan olan elektrikli makinelerdir. Verimi ve momenti yüksek, bakımının kolay olması, yüksek devirlerde sessiz ve sorunsuz çalışması gibi avantajlarından dolayı sıkça tercih edilen motorlardır. Ayrıca fırça ve kollektör yapısı bulunmadığı için diğer motorlara göre daha hafiftir [2]. FDAM kontrolü için PID, 2-DOF PID, Fuzzy, Yapay Sinir Ağı (YSA) tabanlı kontrolörler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [3].

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), sürü halinde yaşayan kuş ve balıklardan yola çıkılarak geliştirilmiştir. Günümüzde kontrolör parametrelerinin belirlenmesi için PSO yaygın bir şekilde kullanılmatadır [4].

Elektronik Diferansiyel Sistemi (EDS); araç viraja girdiğinde tekerleklerin devir farkını dönme açısına göre ayarlayabilen, ayarlanan bu devir farklarını tolere edebilen, taşıt düz giderken doğrultusunu koruyabilen, bozuk yolda aracın varacağı noktaya sapma yapmadan gitmesini sağlayabilen sistemlerdir [5,6].

Bu çalışmada, tahrik elemanı olarak FDAM kullanılan dört çeker bir mobil robot için EDS tasarlanmıştır. EDS'nin ve FDAM'ın MATLAB/Simulink modeli oluşturulmuş ve bu modeller birleştirilerek FDAM tahrikli dört çeker mobil robotun EDS modeli MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Bu modelde EDS kontrolü için FDAM'lar, parametreleri PSO ile belirlenen PID kontrolör ile kapalı çevrimli olarak kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, FDAM tahrikli dört çeker mobil robotun EDS kontrolünün başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği görülmüştür.

2. Materyal ve Metod

2.1. Fırçasız Doğru Akım Motoru (FDAM)

FDAM; yüksek verim, yüksek güç/hacim oranı, bakım gerektirmemesi gibi üstün özelliklerinden dolayı günümüzde robotik çalışmalarda yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. FDAM'da geleneksel fırça kollektör yapısı bulunmamakta ve komütasyon işlemi uygun bir elektronik devre ile gerçekleştirilmektedir [7, 8].

Şekil 1'de FDAM'ın üç fazlı yıldız bağlı eşdeğer devresi verilmiştir. FDAM'ın matematiksel ifadeleri, bu devreden yola çıkılarak elde edilmiştir.



Şekil 1. Üç fazlı yıldız bağlı FDAM'ın eşdeğer modeli

Denklem 1, Denklem 2 ve Denklem 3 te faz gerilimleri verilmiştir.

$$V_{\rm a} = L_{\rm a} \frac{dI_{\rm a}}{dt} + R_{\rm a} I_{\rm a} + E_{\rm a} \tag{1}$$

$$V_{b} = L_{b} \frac{dI_{b}}{dt} + R_{b} \cdot I_{b} + E_{b}$$

$$\tag{2}$$

$$V_c = L \frac{dI_c}{c} + R I_c + E_c$$
(3)

Denklem 4, Denklem 5 ve Denklem 6'da fazlar arası gerilimler verilmiştir.

$$V_{ab} = R_{a} \cdot (I_{a} - I_{b}) + L_{a} \frac{d(I_{a} - I_{b})}{dt} + E_{a} - E_{b}$$
(4)

$$V_{bc} = R_{b} \cdot (I_{b} - I_{c}) + L_{b} \frac{d(I_{b} - I_{c})}{dt} + E_{b} - E_{c}$$
(5)

$$V_{ca} = R_{c} \cdot (I_{c} - I_{a}) + L_{c} \frac{d(I_{c} - I_{a})}{dt} + E_{c} - E_{a}$$
(6)

Denklem 7, Denklem 8 ve Denklem 9'da zıt EMK gerilimleri verilmiştir.

$$E_a = F(\theta \mathbf{e}) \cdot \frac{K_{\mathbf{e}}}{2} \cdot \omega_{\mathbf{r}} \tag{7}$$

$$E_{b} = F\left(\theta e - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \frac{Ke}{2} \cdot \omega_{r}$$
(8)

$$E_{c} = F\left(\theta e - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \frac{Ke}{2} \cdot \omega_{r}$$
(9)

Denklem 10, Denklem 11 ve Denklem 12'de elektromanyetik momentler verilmiştir.

$$T_a = F(\theta \mathbf{e}). K_{\mathbf{t}}. \omega_{\mathbf{r}} \tag{10}$$

$$T_b = F\left(\theta e - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot K_t \cdot \omega_r \tag{11}$$

$$T_c = F\left(\theta e - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot K_t \cdot \omega_r \tag{12}$$

Denklem 13'te toplam elektromanyetik moment, Denklem 14'de elektriksel yer değiştirme ile mekaniksel açısı arasındaki ilişki ve Newton'un ikinci yasasından hareketle motorun hareket denklemi ise Denklem 15'te verilmiştir.

$$T_{e} = K_{t} \left[F(\theta e) I_{a} + F(\theta e - \frac{2\pi}{3}) I_{b} + F(\theta e - \frac{4\pi}{3}) I_{c} \right]$$
(13)

$$\theta \mathsf{e} = \frac{p}{2} \theta_{\mathsf{m}} \tag{14}$$

$$T_e - T_y = J \frac{d\omega_r}{dt} + B.\,\omega_r \tag{15}$$

Rotorun mekaniksel yer değiştirmesiyle açısal hız arasındaki ilişki Denklem 16'da ve devir sayısı ile açısal hız arasındaki ilişki ise Denklem 17'de verilmiştir. Denklem 18'de verilen F Fonksiyonu, zıt EMK'nın trapezoidal dalga formunu veren rotor pozisyonunun bir fonksiyonudur.

$$\omega_{\rm r} = \frac{d\theta_{\rm m}}{dt} \tag{16}$$

$$n_r = \frac{60}{2\pi} \omega_r \tag{17}$$

$$F(\theta e) = \begin{cases} 1 , & 0 \le \theta e < \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi} (\theta e - \frac{2\pi}{3}) , & \frac{2\pi}{3} \le \theta e < \pi \\ -1 , & \pi \le \theta e < \frac{5\pi}{3} \\ \{ & 1 + \frac{6}{\pi} (\theta e - \frac{2\pi}{3}) , & \frac{5\pi}{3} \le \theta e < 2\pi \end{cases}$$
(18)

Benzetim sonuçlarında kullanılan FDAM parametreleri aşağıda Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. FDAM	parametreleri	[9]
---------------	---------------	-----

Parametre Adı	Değeri
V _d	24 V
n	4860 rpm
R _a	0.304 Ω
$\mathbf{L}_{\mathbf{a}}$	0.2135x10 ⁻³ H
Р	16
J	181x10 ⁻⁷ kg.m ²
В	0 N.m.s/rad
Kt	36.9x10 ⁻³ N.m/A
Ke	36.9x10 ⁻³ V/rad/s

FDAM'ın matematiksel ifadelerinden yararlanılarak, MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan modeli Şekil 2(a)'de verilmiştir.

Modeli elde edilen FDAM'ın sürücü sistemi için Hall Sensörü, anahtarlama ve üç fazlı inverter blokları oluşturulmuştur. Oluşturulan modele parametreleri PSO ile belirlenen geleneksel PID kontrolör de eklenerek kapalı çevrim kontrollü FDAM sürücü sistemi Şekil 2(b)'te elde edilmiştir.



Şekil 2. a) FDAM'ın MATLAB/Simulinkb) FDAM sürücü sisteminin MATLAB/Simulinkmodelimodeli

2.2. Parçasız Sürü Optimizasyonu (PSO)

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), kuş ve balık gibi sürü halinde yaşayan hayvan türlerinden esinlenerek geliştirilmiştir. Bu algoritmada her bir birey bir parçacıklır ve bu parçacıklar bir araya gelerek sürüyü meydana getirmektedir. Sürü içinde parçacıklar, birbirleri ile haberleşmektedir. Bu haberleşme sonucunda parçacıklar, konumunu en iyi konumda olan parçacığa yaklaştırmaya çalışmaktadırlar [6,10]. PSO'da parçacıkların yeni hızlarının belirlenmesine ait ifade Denklem 19'de verilmiştir.

$$v_{n+1} = w. v_n + c_1. rand_1. (pbest_n - x_n) + c_2. rand_2. (gbest_n - x_n)$$
(19)

Parçacıkların yeni konumunun denklemi ise Denklem (20)'de verilmiştir.

$$x_{n+1} = x_n + v_{n+1} \tag{20}$$

Kontrol edilen sistemin PID parametrelerinin optimizasyon eğrisi Şekil 3(a)'da ve belirlenen parametre değerleri ise Şekil 3(b)'de verilmiştir.





Main Control	PID Advanced ler parameters	Data Types	State Attribu
Source	: [internal	
Proport	tional (P):	6.390063e+00	
Integral (I): 5.00		5.000000e+01	
Derivative (D):		1.503207e-02	
Filter c	oefficient (N):	100	

b) PSO ile belirlenen PID parametreleri

2.3. Elektronik Diferansiyel Sistemi (EDS)

Diferansiyel sistemlerinde, motorun ürettiği gücü tekerleklere aktaran bir organ mevcuttur. EDS'de motorlar tekerleklere direkt olarak bağlıdır. Bu yüzden tekerlekler direkt olarak motordan tahrik edilirler. Araç dönme esnasında, dönme yönüne göre iç tekerleklerin hızı dış tekerleklerin hızından düşük, dönme açısına göre iç tekerleklerin açısı dış tekerleklerin açısına göre daha yüksektir [11,12].



Şekil 4. Ackermann geometrisi

Şekil 4'de verilen Ackermann geometrisinden denklemler elde edilmiş ve EDS bu modele göre tasarlanmıştır.

Ackermann modeline göre ön tekerleklerin dönüş açıları Denklem 21 ve Denklem 22'e göre hesaplanmıştır.

$$\delta_1 = \arctan\left[\frac{\frac{L\tan(\delta)}{K}}{\frac{L-(\overline{z})\tan(\delta)}{2}}\right]$$
(21)

$$\delta_2 = \arctan\left[\frac{L\tan(\delta)}{K}\right]_{L+(\frac{1}{2})\tan(\delta)}$$
(22)

Tekerleklerin dönme merkezine uzaklıkları Denklem 23, Denklem 24, Denklem 25 ve Denklem 26'da verilmiştir.

$$R_1 = \frac{L}{\sin(\delta_1)} \tag{23}$$

$$R_2 = \frac{L}{\sin(\delta_2)} \tag{24}$$

$$R_3 = \frac{L}{\tan(\delta)} - \frac{d_r}{2} \tag{25}$$

$$R_4 = \frac{L}{\tan(\delta)} + \frac{d_r}{2} \tag{26}$$

Araç ağırlık merkezinin dönme merkezine uzaklığı ise Denklem 27'de verilmiştir.

$$R_{\rm rr} = \sqrt{(R_3 + (d_{\rm r}/2))^2 + (l_{\rm r})^2}$$
(27)

Tekerleklerin açısal hızları; Denklem 28, Denklem 29, Denklem 30 ve Denklem 31'da verilmiştir.

$$\omega_1 = \frac{V.R_1}{(R_{\rm rr}).r} \tag{28}$$

$$\omega_2 = \frac{V.R_2}{(R_{\rm rr}).r} \tag{29}$$

$$\omega_3 = \frac{V.R_3}{(R_{\rm rr})r} \tag{30}$$

$$\omega_4 = \frac{V.R_4}{(R_{\rm rr}).r} \tag{31}$$

EDS'ye girilen parametreler, Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Mobil robot için elektronik d	diferansiyel parametreleri [13]
--	---------------------------------

Parametre	Parametre	
Adı	Değeri	
К	0.119 m	
L	0.133 m	
I,	0.0665 m	
d,	0.14 m	
r	0.36 m	



Ackermann matematiksel diferansiyel modeli, Rudolf Ackermann tarafından keşfedilmiştir [14]. Bu modelden yola çıkılarak Şekil 5'deki MATLAB/Simulink modeli oluşturulmuştur.

Şekil 5. EDS'nin MATLAB/Simulink modeli

3. Benzetim Sonuçları

Benzetim çalışmasında, V=20 km/saat ve δ =10° alınarak model çalıştırılmış ve Şekil 6 ve Şekil 7'de verilen tekerlek hızları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sol tekerlek hızlarının sağ tekerlek hızlarından düşük olduğu ve aracın sola doğru 10°lik dönüş yaptığı gözlemlenmektedir.





Şekil 8. V_{ref} ile V_{ger} arasındaki hız değişimi

Sonuçlar incelendiğinde FDAM hızlarının PID kontrolör ile kararlı bir şekilde kontrol edildiği ve EDS'nin referans hız ve lamda açısını başarılı bir şekilde kontrol ettiği görülmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, FDAM ile tahrik edilen dört çeker bir mobil robot için EDS tasarımı ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. EDS'in MATLAB/Simulink modeli Ackermann geometrisinden elde edilen matematiksel ifadeler ile oluşturulmuştur. FDAM'ın MATLAB/Simulink modeli ise FDAM'ın eşdeğer devresi kullanılarak oluşturulmuştur. Daha sonra bu iki model MATLAB/Simulink ortamında birleştirilerek FDAM tahrikli dört çeker mobil robotun EDS modeli elde edilmiştir. Elde edilen bu sistem, parametreleri PSO ile belirlenen PID kontrolör ile kontrol edilmiştir.

Benzetim sonuçları incelendiğinde EDS kontrolü için kullanılan dört adet FDAM'ın hızlarının PID kontrolör ile başarılı bir şekilde kapalı çevrim olarak kontrol edildiği dolayısıyla EDS kontrolünün de başarılı bir şekilde gerçekteştirildiği görülmektedir.

Referanslar

[1] Kazmacı, A. (2021). Dört Tekerlekli Mobil Robotun Tasarımı ve Kurt Optimizasyon

Algoritması Tabanlı Akıllı Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

- [2] Tabak, A. (2020). Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Hız Kontrolünü Gerçekleştirmek İçin PID/PI Kontrolcü Tasarımı ve Performans Analizi, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Sayı 19, ss. 145-155.
- [3] Taşkıran, A. (2022). Fırçasız Doğru Akım Motorunun Yapay Sinir Ağı Kullanılarak Sensörsüz Hız Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, KTO Karatay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- [4] Al-Jodah, A., Abbas S. J., Hasan, A.F. (2023). PSO-based Optimized Neural Network PID Control Approach for a Four Wheeled Omnidirectional Mobil Robot, International Review of Applied Sciences and Engineering, Vol 14:1, ss. 58-67.
- [5] Yavuz, İ., Özek, A. (2020). Elektronik Diferansiyel için Farklı Viraj Çaplarındaki Sürtünme Katsayısının Tekerlek Hızlarındaki Etkisi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Sayı 20, ss. 1138-1146.
- [6] Çelik, İ. (2019). Elektrikli Bir Araç İçin Elektronik Diferansiyel Simülatörünün Modellenmesi ve Gerçek Zamanlı Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [7] Çelikel, R. (2017). Yüksek Hızlı Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Moment Dalgalanmalarını Azaltan Bir Yöntem, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, Cilt 8, Sayı 3, ss. 485-493.
- [8] Günay, B. (2021). FDAM ile Tahrik Edilen Quadrotor'un MATLAB/Simulink Ortamında Modellenmesi ve Kontrolü, Yüksek Lisans Semineri, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [9] Çukdar, İ. (2023). Fırçasız Doğru Akım Motoru Tahrikli İki Rotorlu İnsansız Hava Aracının Adaptif Bulanık 2-DOf PID Kontrolör İle Denge Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [10] Ekrem, Ö. (2023). Parçacık Sürü Optimizasyonu ile 6 Eksenli Robot Kol için Yörünge Planlaması, Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- [11] Güler, H., Çelik, H. (2024). PSO ile Optimize Edilen Bulanık Mantık Kontrolörü ile LabVIEW Platformunda DA Motor Kontrolü, DÜMF Mühendislik Dergisi, Salan ayı 15:2, ss. 355-362.
- [12] Yıldırım, M., Öksüztepe, E., Tanyeri, B. ve Kürüm, H. (2015, Kasım). *Electronic Differential System for an Electric Vehicle with In-Wheel Motor*, IEEE International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa Sunulan Bildiri.
- [13] Çelik, H., Gölen, M.B., Yiğit, T. (2018). *Mobile Robot Control With FPGA*, International Engineering and Natural Sciences Conference (INESEG), ss. 1575-1583.
- [14] Gürmeriç, M. (2015). *Elektrikli Taşıtlar için Elektronik Diferansiyel Tasarımı ve Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.