

İki Linkli Robot Manipülatörün Modellenmesi ve Bozucu Etki Altında Yörünge Kontrolü

Sinan İlgen
Mekatronik Mühendisliği
KTO Karatay Üniversitesi
Konya, Türkiye
sinan.ilgen@karatay.edu.tr

Abdullah Çakan
Makine Mühendisliği
Konya Teknik Üniversitesi
Konya, Türkiye
acakan@ktun.edu.tr

Akif Durdu
Elektrik Elektronik Mühendisliği
Konya Teknik Üniversitesi
Konya, Türkiye
adurdu@ktun.edu.tr

Erdi Gülbahçe
Mekatronik Mühendisliği
KTO Karatay Üniversitesi
Konya, Türkiye
erdi.gulbahce@karatay.edu.tr

Özet—Bu çalışmada, iki linkli düzlemsel bir robot manipülatörün bozucu etki altında yörünge kontrolü yapılmıştır. ADAMS yazılımı vasıtasıyla manipülatörün sanal bir prototipi oluşturulmuştur. Ayrıca, sistem için gerekli olan kontrolcü tasarımı MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Sistemin simülasyonu ise MATLAB ve ADAMS yazılımlarının eş zamanlı olarak çalıştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Robot manipülatör iki giriş ve dört çıkışa sahiptir. Girişler, her iki eklemin tahriki için gerekli olan motor torkları, çıkışlar ise her iki eklemin açıları ve uç elemanın konumunun x-y bileşenleridir. Robot manipülatörün yük etkisi altındaki kontrolü için Kayan Kipli Kontrol (KKK) yapısı tasarlanmış ve sisteme uygulanmıştır. Simülasyon sonuçlarında, KKK yapısının istenilen yörüngeye göre iki linkli düzlemsel robot manipülatörün yörünge izlemesini harici bozucu etkilere rağmen başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler—kayan kipli kontrol, robot manipülatör, modelleme, simülasyon, yörünge takibi

Abstract—This study presents the trajectory control of a two-link planar robot manipulator under disturbance effect. A virtual prototype of the manipulator is built by using ADAMS. Also, the controller design required for the system is performed in MATLAB/Simulink environment. The simulation of the system is done by simultaneous execution (co-simulation) of MATLAB and ADAMS software. The robot manipulator system has two inputs and four outputs. The inputs are the motor torques required to drive both joints, and the outputs are the angles of the two joints and x-y components of end effector position. The Sliding Mode Control (SMC) structure is designed and applied to the system for the control of the robot manipulator under load effect. In the simulation results, it is observed that the SMC structure successfully performed the trajectory tracking of the two-link planar robot manipulator according to the desired trajectory, despite the disturbance effect.

Keywords—sliding mode control, robot manipulator, modeling, simulation, trajectory tracking.

I. GİRİŞ

Robot manipülatörler, malzeme taşıma işleri, sürekli üretim sistemleri, montaj hatları, kaynak işlemleri vb. endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Manipülatörler, genellikle sert bağlantılardan oluşurlar ve komşu bağlantıların hareketine izin veren eklemler ile birbirlerine bağlanırlar. Düzlemsel robot manipülatörlerin, diğer robot manipülatör yapılarına göre yüksek mobilite ve

daha geniş çalışma alanı gibi avantajları bulunmaktadır [1]. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde iki veya üç serbestlik derecesine sahip robot manipülatörlerin çoğunlukla kullanıldığı görülmektedir [2, 3]. Ayrıca, dört veya daha fazla serbestlik derecesine sahip manipülatörlerle ilgili çalışmalar da literatürde bulunmaktadır [4]. Ancak, karmaşık dinamik yapıları ve kinematik hesaplamaları sebebiyle çok az kullanım alanları bulunmaktadır. Ayrıca, eski araştırmamız, dinamik platformların modellenmesi ve analizini sağlayan Adams yazılımı kullanılarak çok gövdeli bir simülasyon modelinin geliştirilmesini sunmaktadır [5, 6].

Robot manipülatörlerin yörünge izleme kontrolü problemi uzun yıllar boyunca araştırmacılar tarafından tartışılmıştır [7]. Yörünge takibi problemini çözüme kavuşturabilmek amacıyla araştırmacılar, bulanık sinir ağı [8], yapay sinir ağları [9], PID [10, 11], kayan kipli kontrol [12], uyarlamalı kontrol [13, 14] ve zaman gecikmeli kontrol [15] gibi farklı kontrolör tasarımlarına yönelik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

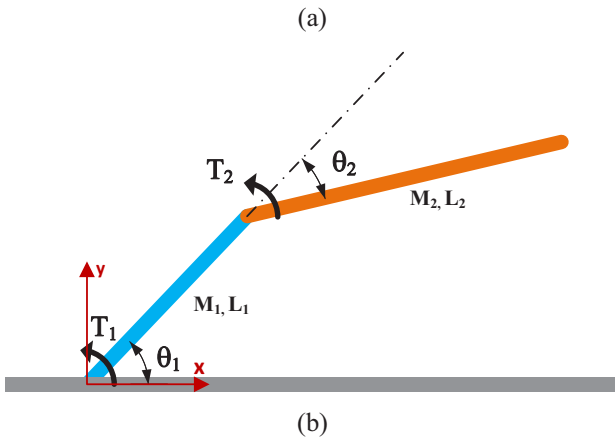
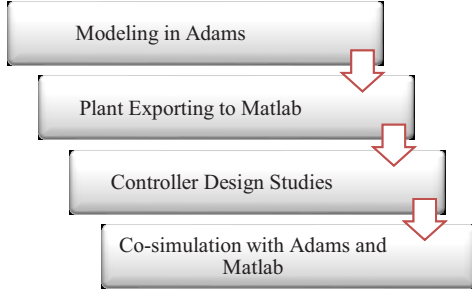
Bu makalede, iki linkli düzlemsel bir robot manipülatörün bozucu etkisi altında iken yörünge izleme problemi için bir Kayan Kipli Kontrol (KKK) yapısı tasarlanması amaçlanmıştır. Sistemin modeli, ADAMS yazılımında istenen kontrol döngüsüne göre modellenmiştir. ADAMS modelinde sistemin iki girişi (motorların torkları) ve dört çıkışı (1. eklemin açısı, 2. eklemin açısı ve uç elemanın konumunun x-y bileşenleri) bulunmaktadır. Robot manipülatörün ters kinematik denklemleri manuel olarak hesaplanmıştır. Ters kinematik sonucu elde edilen eklemlerin referans açıları, kontrol döngüsünde referans değerler olarak kullanılmıştır. KKK yapısı, uç elemanın pozisyonunun yörünge takibi için tasarlanmış ve uygulanmıştır. Kontrolcü performansı grafiklerle gösterilmiştir. Çalışma sonucunda, iki linkli düzlemsel robot manipülatörün, ADAMS ve MATLAB yazılımlarının eş zamanlı olarak çalıştırılması suretiyle simüle edilip bozucu etki faktörüne rağmen başarıyla kontrol edilebileceği gözlemlenmiştir.

Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde; Bölüm II’de iki linkli manipülatörün modellenmesi ve kontrolü, Bölüm III’te elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Son olarak Bölüm IV’te ise sonuç kısmı verilmiştir.

II. MODELLEME VE KONTROL

Sistemin modellenmesi ve kontrolüne ilişkin strateji ile manipülatör modeli Şekil 1’de verilmiştir. İki linkli düzlemsel robot manipülatörün dinamik modelini elde etmek için

ADAMS yazılımı kullanılmıştır. Tablo 1’de robot manipülatöre ait parametreler belirtilmiş ve bu parametreler ADAMS ortamında tanımlanmıştır. Böylece daha gerçekçi bir model elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, ADAMS’ın MATLAB/Simulink ile eşzamanlı olarak çalışması bu çalışmanın önemli noktalarından biridir.



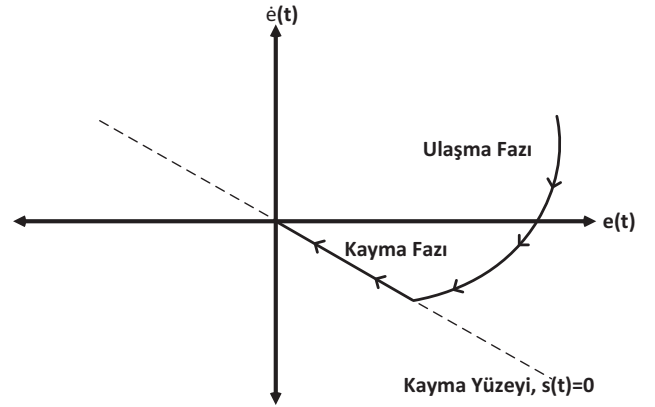
Şekil 1. (a) Çalışma stratejisi ve (b) manipülatör modeli

İki linkli düzlemsel robot manipülatör x-y düzleminde hareket edebilmektedir. Öncelikle, manipülatör sistemi ADAMS ortamında modellenmiştir. ADAMS modelinde sistemin iki girişi (motorların torkları) ve dört çıkışı (1. eklem açısı, 2. eklem açısı ve uç elemanın konumunun x-y bileşenleri) bulunmaktadır. Sistem parametreleri Tablo 1’de görölmektedir. Daha sonra, ADAMS’da oluşturulan bu model kontrolör tasarımı çalışmalarını gerçekleştirmek için MATLAB/Simulink ortamına aktarılmıştır.

TABLE I. ROBOT MANİPÜLATÖR PARAMETRELERİ

Parametre	Açıklama	Değer
M_1	Birinci linkin kütlesi	1.2 kg
M_2	İkinci linkin kütlesi	1.5 kg
L_1	Birinci linkin uzunluęu	0.15 m
L_2	İkinci linkin uzunluęu	0.2 m
I_{1zz}	Birinci linkin kütle atalet momenti	1.8 kg.m ²
I_{2zz}	İkinci linkin kütle atalet momenti	2.3 kg.m ²
T_1	Birinci linke uygulanan tork	N.m
T_2	İkinci linke uygulanan tork	N.m
θ_1	Birinci eklem açısı	Derece
θ_2	İkinci eklem açısı	Derece

Robot manipülatörün kontrolcü tasarımı KKK yapısı kullanılarak oluşturulmuştur. KKK, sistemdeki modelleme hatalarına, harici bozucu etkilere ve parametrik değişimlere karşı duyarsız davranış gösteren, gürbüz ve doğrusal olmayan bir kontrol yöntemidir. KKK yöntemi, ulaşma fazı ve kayma fazı olmak üzere iki temel aşamadan oluşmaktadır. Şekil 2’de KKK’nin temel aşamaları gösterilmiştir. Öncelikle sistemin kontrol edileceği kayma yüzeyi tasarlanır. Daha sonra, yüksek frekanslarla anahtarlanan kontrol sinyali sistem durumlarının ulaşma fazı boyunca hareketlerini sağlayarak kayma yüzeyine çekmeye çalışır. Kayma yüzeyi boyunca sistem durumlarının hareketi sistemin çıkış tepkisini gösterir. Kayma yüzeyi üzerinde, sistem durumları orijine doğru kaydırılmaya çalışılmasından ve sistem durumlarının kaydırılıyor gibi görünmesinden ötürü bu yüzeye kayma fazı adı verilir. Sistem kayma yüzeyi üzerinde iken, parametrelerde meydana gelen değişikliklere ve harici bozucu etkilere karşı duyarsız hale gelmiş olur [16].



Şekil 2. Kayan kipli kontrolün faz yörüngesi [16]

KKK’nin uygulanması sırasında, motor torkları (T_1 ve T_2) ile eklem açıları ($\theta_1(t)$ ve $\theta_2(t)$) arasında önemli bir ilişki bulunmaktadır. Bu ilişki, sistemin girişine uygulanan kontrol sinyalini ($u(t)$) elde etmede önemli bir role sahiptir. KKK’nin temel amacı, kontrol edilen sistem çıkışı olan $\theta(t)$ ’nin arzu edilen çıkış $\theta_d(t)$ ’yi izlemesini sağlamaktır. Ayrıca izleme hatasını minimize eden kontrol sinyali ($u(t)$) elde edilmektedir. Böylece sistem kayan yüzeye ulaşır ve kayan yüzeyde hata sıfıra yaklaşır.

Manipülatörün birinci eklem açısı için izleme hatası (1)’deki gibi tanımlanmıştır.

$$e(t) = \theta_{1d}(t) - \theta_1(t) \quad (1)$$

İzleme hatasına göre, sistem için belirlenen kayma yüzeyi (2)’de tanımlanmıştır.

$$s = \dot{e}(t) + \lambda \cdot e(t) \quad (2)$$

KKK yapısının ulaşma fazı için sabit varyasyonlu ulaşma kuralı kullanılmıştır. Bu kural (3)’de ifade edilmiştir.

$$\dot{s} = -K \cdot \text{sign}(s) \quad (3)$$

(3)’deki K değeri pozitifdir ve $\text{sign}()$ fonksiyonu ise (4)’deki gibi tanımlanmıştır.

$$\text{sign}(s(t)) = \begin{cases} -1, & \text{if } s(t) < 0 \\ 0, & \text{if } s(t) = 0 \\ +1, & \text{if } s(t) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

Kayma yüzeyi ifadesi (5)'deki gibi yeniden yazılmıştır. Böylelikle kayma yüzeyinin türevi (6) olarak yazılabilir.

$$s = \dot{e}(t) + \lambda e(t) = \dot{\theta}_{1d}(t) - \dot{\theta}_1(t) + \lambda(\theta_{1d}(t) - \theta_1(t)) \quad (5)$$

$$\dot{s} = \ddot{\theta}_{1d}(t) - \ddot{\theta}_1(t) + \lambda(\dot{\theta}_{1d}(t) - \dot{\theta}_1(t)) \quad (6)$$

$\theta_{1d}(t)$ ifadesi sabit değer olarak kabul edilirse, bu ifadenin birinci ve ikinci türevi sıfır olur. Bundan dolayı, (6) ifadesi düzenlenerek (7)'deki gibi yeniden yazılabilir.

$$\dot{s} = -\ddot{\theta}_1(t) + \lambda(-\dot{\theta}_1(t)) = -K \cdot \text{sign}(s) \quad (7)$$

Daha sonra bu denklemler sentezlenerek robot manipülâtörün birinci eklem açısını kontrol edecek olan $u_1(t)$ kontrol sinyali (8)'de gösterilmiş olduğu şekilde yazılabilir.

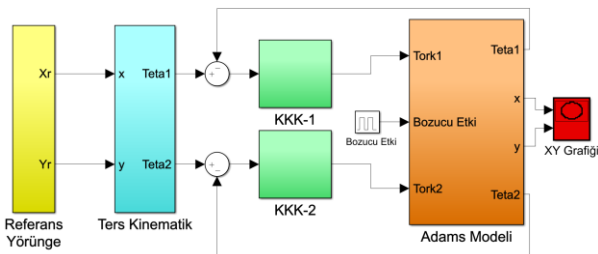
$$u_1(t) = -\frac{m_1}{a_1} \left[\left(\frac{f_1}{m_1} - \lambda_1 \right) \dot{\theta}_1(t) + \left(\frac{h_1}{m_1} \right) \theta_1(t) + K_1 \text{sign}(s) \right] \quad (8)$$

Manipülâtörün ikinci eklem açısına da aynı prosedürler uygulanırsa, ikinci eklem açısını kontrol edecek olan $u_2(t)$ kontrol sinyali (9)'daki gibi elde edilir.

$$u_2(t) = -\frac{m_2}{a_2} \left[\left(\frac{f_2}{m_2} - \lambda_2 \right) \dot{\theta}_2(t) + \left(\frac{h_2}{m_2} \right) \theta_2(t) + K_2 \text{sign}(s) \right] \quad (9)$$

Denklem (8) ve (9), teoride yaygın olarak kullanılan kütle-yay-damper sistemi simüle edilerek elde edilmiştir. Bu iki denklemdeki katsayılar ($m_1, m_2, a_1, a_2, f_1, f_2, h_1, h_2$) sistemin dinamikleri ile ilişkilidir. Diğer katsayılar ($K_1, K_2, \lambda_1, \lambda_2$) ise denetleyici ile ilgili katsayılardır. Tüm bu katsayılar, MATLAB/System Identification Toolbox kullanılarak ikinci dereceden transfer fonksiyonu elde edilerek belirlenir.

Sisteme ait genel blok diyagram Şekil 3'te gösterilmiştir. Sistem, önceden tanımlanmış iki giriş ve dört çıkıştan oluşan çoklu giriş - çoklu çıkış (MIMO) yapısındadır. Girişler motorların torkları (N.m) olarak tanımlanırken, çıkışlar eklemlerin açıları (derece) ve uç elemanın konumunun x-y bileşenleri olarak tanımlanmıştır. Bunlara ek olarak, robota etki edecek olan bozucu etki ise ayrı bir giriş olarak sisteme tanımlanmış ve blok diyagramda da gösterilmiştir.



Şekil 3. Robot manipülâtörün blok diyagramı

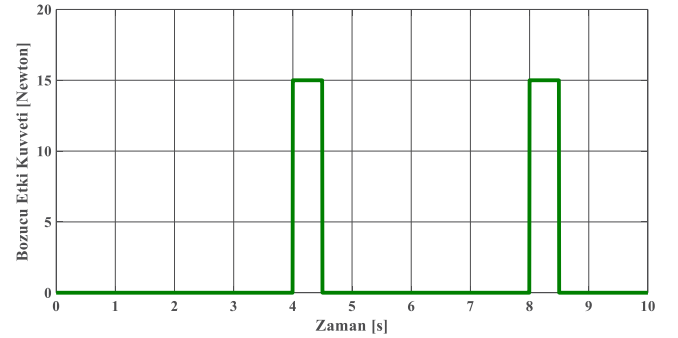
Sistemde, başlangıç noktasının koordinatları (0,350) olarak belirlenmiştir. Robot manipülâtörün, başlangıç noktasından başlayarak ilk 6 saniye boyunca (200,50) noktasına, daha sonra 4 saniye boyunca ise (50,200) noktasına

ulaşacak şekilde planlanan yörüngeyi takip etmesi beklenmektedir. Öncelikle, sisteme ait ters kinematik denklemler kullanılarak istenilen referans noktalarına uygun robot manipülâtörün ilgili eklem açıları manuel olarak hesaplanır. Daha sonra bu açıları sistemin girişine uygulanarak çıkışta elde edilen açı değerleri ile kıyaslanmak suretiyle kontrol altında tutulmaya çalışılır. Kontrolör simülasyon süresi boyunca her zaman etkin olarak çalışmaktadır.

III. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

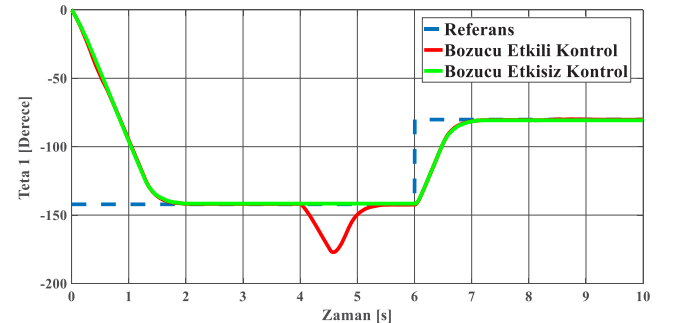
Bu kısımda, tasarlanan kontrolcünün çalışması simülasyon üzerinde incelenmiştir. Kontrolcünün performansını gözlemlemek için sistemin kontrolcü etkisi altındaki verdiği yanıtlar ve simülasyon sonuçları irdelenmiştir. Simülasyon sonuçları incelenirken sistemin kontrolcüye verdiği yanıt hem bozucu etki altında iken hem de bozucu etkinin olmadığı durumlarda ayrı ayrı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur.

Robot manipülâtörün planlanan yörüngesindeki hareketi süresince 4. ve 8. saniyelerde olmak üzere iki adet bozucu etki robot manipülâtöre uygulanmıştır. Uygulanan bozucu etkiler sonrasında da robot manipülâtörün hareketine kaldığı yerden devam etmesi sağlanmıştır. Sisteme uygulanan bozucu etki Şekil 4'te gösterilmiştir.

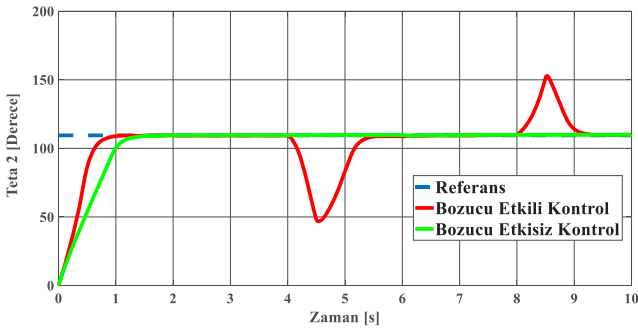


Şekil 4. Sisteme uygulanan bozucu etkiler

Kontrolcü uygulandıktan sonra eklem açlarına (Teta 1 ve Teta 2) ait elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir. Manipülâtörün izleme performansının her iki eklem açısı için de tatmin edici olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca tasarlanan kontrolcü yapısının, bozucu etkinin etkilerini hızlı bir şekilde giderdiği de gözlemlenmiştir.

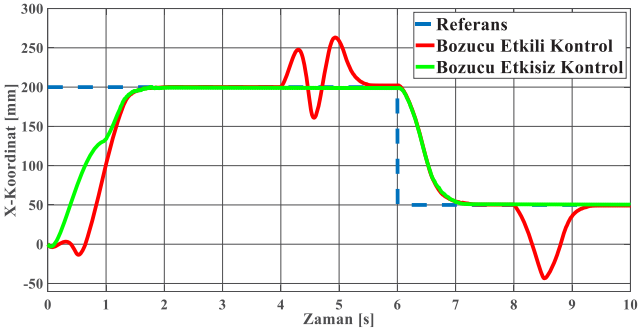


Şekil 5. Teta 1 açısı için sistem yanıtları

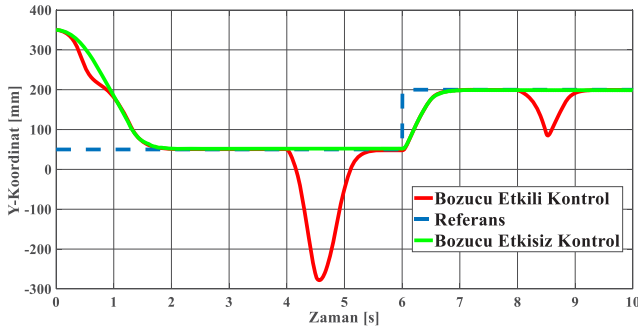


Şekil 6. Teta 2 açısı için sistem yanıtları

Şekil 7 ve Şekil 8'de ise robot manipülâtörün uç elemanının x-y düzlemindeki yörünge izleme yanıtları ayrı ayrı verilmiştir. Bozucu etkinin olmadığı durumda kontrolcünün başarılı bir şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde bozucu etki sisteme etki ettiği anda ise tasarlanan kontrolcünün hızlı bir şekilde bu etkiye cevap vererek robot manipülâtörün istenilen yörüngeyi takip etmesini sağladığı saptanmıştır.



Şekil 7. X-Koordinatı için sistemin izleme yanıtları



Şekil 8. Y-Koordinatı için sistemin izleme yanıtları

IV. SONUÇ

Literatür çalışmalarına bakıldığı zaman iki linkli düzlemsel bir robot manipülâtörün ADAMS ve MATLAB yazılımları birlikte kullanılarak kontrol ve simüle edilmesi konusunda çalışmaların az olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, iki linkli robot manipülâtör sisteminin, ADAMS ve MATLAB yazılımları vasıtasıyla yörünge kontrolünün başarıyla gerçekleştirildiği gösterilmiştir. Ayrıca, gelecekteki çalışmalar için, bu çalışma robot manipülâtör sistemlerinin simülasyonu ve kontrolü için temel olma özelliği taşımaktadır.

Robot manipülâtör sistemleri doğrusal olmayan özelliklere sahiptirler. Böyle bir sisteme gerçekçi yaklaşımlar geliştirmek için etkili bir yazılım sunmak çok önemlidir. Bu çalışmada, MATLAB ve ADAMS yazılımlarının robot

manipülâtörler gibi doğrusal olmayan sistemlerin simülasyonunda ve kontrol edilmesinde etkili oldukları gösterilmiştir.

Bu çalışmada, iki linkli bir robot manipülâtörün eklemleri arasındaki açılar kontrol edilmiştir. Tasarlanan kontrolcü yapısı, sisteme uygulanan bozucu etki olmadan ve bozucu etki altındaki şartlarda test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bozucu etkilerden etkilenmeyen bir kontrolcü türü olan KKK yapısının başarılı bir performans sergilediği görülmüştür. Ayrıca kontrol tasarım aşamaları ve kontrolcünün performansı denklemler ve grafiklerle gösterilmiştir. Böylece gelecekteki çalışmalar ve deneysel çalışmalar için gerekli tasarım parametreleri ve donanımlar belirlenebilecektir.

BİLGİLENDİRME

Bu çalışma, Sinan İlgen'in Yüksek Lisans tezinin bir bölümünü oluşturmaktadır. Yazarlar ayrıca Konya Teknik Üniversitesi RAC-LAB Araştırma Laboratuvarı ve KTO Karatay Üniversitesi Mühendislik Fakültesine de teşekkür ederler.

REFERENCES

- [1] J. J. Craig, "Introduction to Robotics," 2005.
- [2] H. Arai, K. Tanie, N. Shiroma, "Nonholonomic control of a three-DOF planar underactuated manipulator," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 5, pp. 681-695, 1998.
- [3] F. Duarte and C. Bohn, "Modeling and centralized sliding mode control of a two-flexible-link robot," in 2016 UKACC 11th International Conference on Control (CONTROL), 2016, pp. 1-6: IEEE.
- [4] K. Chen, L. Zhang, and Y. Zhang, "Cyclic motion generation of multi-link planar robot performing square end-effector trajectory analyzed via gradient-descent and Zhang et al's neural-dynamic methods," in 2008 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics, 2008, pp. 1-6: IEEE.
- [5] S. İlgen, A. Durdu, E. Gülbağçe, and A. Çakan, "Sliding Mode Control of a Two-link Robot Manipulator Using Adams & Matlab Software," in 2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT), 2018, pp. 1-4: IEEE.
- [6] S. İlgen, E. Ofraz, E. Gülbağçe, and A. Çakan, "Modelling and Control of a Single-Wheel Inverted Pendulum by Using Adams and Matlab" *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers*, vol. 4, no. Special Issue-1, pp. 326-328, 2016.
- [7] B. Özçelikyıldız, "Design and Motion Control of An Industrial Robot," *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, 2006.
- [8] Ş. Arslan and M. Korkmaz, "Bulanık Yapay Sinir Ağıyla Dört Serbestlik Dereceli bir Robot Kolunun Kontrolü," *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 17, no. 1, pp. 131-138, 2013.
- [9] M. SÖNMEZ, M. NİL, and U. İ. KANDİLLİ, "ÜÇ SERBEST DERECELİ ENDÜSTRİYEL BİR ROBOTUN YAPAY SINIR AĞLARI İLE DENETİMİ."
- [10] M. A. Duran and A. ANKARALI, "Üç serbestlik dereceli Puma tipi bir manipülâtörün PID kontrolü," *Selçuk-Teknik Dergisi*, vol. 9, no. 1, pp. 79-98, 2010.
- [11] V. Parra-Vega, S. Arimoto, Y.-H. Liu, G. Hirzinger, and P. Akella, "Dynamic sliding PID control for tracking of robot manipulators: Theory and experiments," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 19, no. 6, pp. 967-976, 2003.
- [12] J. Baek, M. Jin, and S. Han, "A new adaptive sliding-mode control scheme for application to robot manipulators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 6, pp. 3628-3637, 2016.
- [13] R. Colbaugh and K. Glass, "Adaptive tracking control of rigid manipulators using only position measurements," *Journal of Robotic Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 9-26, 1997.
- [14] R. Ortega and M. W. J. A. Spong, "Adaptive motion control of rigid robots: A tutorial," vol. 25, no. 6, pp. 877-888, 1989.
- [15] T. C. Hsia and L. Gao, "Robot manipulator control using decentralized linear time-invariant time-delayed joint controllers," in *Proceedings..*

IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1990,
pp. 2070-2075: IEEE.

- [16] V. Utkin, "Variable structure systems with sliding modes," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 22, no. 2, pp. 212-222, 1977.