



## İki tekerlekli ve tek kollu robotik platformun kayan kipli denetimi ve parametre optimizasyonu

**Sertaç Emre KARA \***

Fırat Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
[sekara@firat.edu.tr](mailto:sekara@firat.edu.tr) ORCID: 0000-0001-7463-5867, Tel: (424) 237 00 00 (5338)

**Kutluk Bilge ARIKAN**

TED Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara  
[kutluk.arikan@tedu.edu.tr](mailto:kutluk.arikan@tedu.edu.tr) ORCID: 0000-0003-2093-1577. Tel: (312) 585 0236

Geliş: 24.04.2018, Kabul Tarihi: 12.06.2018

### Öz

*Bu çalışmada, tek bir basit kol ile desteklenmiş iki tekerlekli robotik bir platformun denetim sistemi tasarımı için Kayan Kipli Denetim (KKD) önerilmiştir. En iyi KKD parametreleri doğrusal model temel alınarak Kaos Optimizasyon Algoritması (KOA) kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler, Çok-Girişli-Çok-Çıkışlı (ÇGÇÇ) doğrusal olmayan dinamik bir model ile ifade edilen sistem yardımıyla benzetim yapılarak test edilmiştir. Belirli başlangıç şartları altında, referans giriş ve bozucu giriş ile benzetim çalışmaları tekrarlanmıştır. Doğrusal model ile elde edilen parametrelerin doğrusal olmayan modelde belirli frekans aralıklarında kullanılabildiği gözlemlenmiştir. Bu tip platformlar medikal alanında ve insanın yardıma ihtiyaç duyduğu alanlarda kullanılabilecektir. Özellikle rehabilitasyon, yardımcı robotlar ve benzeri platformlar üzerine basit kol ve manipülör eklenerek belirli işleri gerçekleştirmesi beklenmektedir. Elde edilen sonuçların bilişsel robotik alanında yapılacak çalışmalarda kullanılması hedeflenmektedir.*

**Anahtar Kelimeler:** Kayan kipli denetim; Kaos optimizasyon algoritması; Yardımcı robotlar; Rehabilitasyon robotları

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Ters sarkaç sistemi ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar, yürüyen robotlar ve kendini dengeleyen sistemler üzerinde yapılan çalışmalara destekleyici bilgiler vermektedir (Grasser vd, 2002). Bu tip iki tekerlekli mobil taşıtlar robotik sistemler olarak da geliştirilmektedir (Nguyen vd., 2004; Linn vd., 2011). Dolayısıyla, dengelemeye yardımcı olmak veya farklı işlevleri (tutma, destek alma, eğilme vb.) yapmak için üzerinde bir veya birden fazla eyleyici veya robotik manipülatör eklenebilmektedir. Böylece bu tip robotlar sanayi robotlarının yapabileceği türden işleri yapabilme yetenekleri kazanmaktadır. Son yıllarda robotik manipülatörlerle ilgili çalışmalar ivme kazanmaktadır (Stilman vd. 2010). Bu tip manipülatörlerin gelecekte asistan robot olarak insanlığın hizmetine sunulması öngörülmektedir.

Ters sarkaç platformlarında PID, Yapay Sinir Ağları, Kayan Kipli Denetim (KDD), Bulanık Mantık, Uyarlamalı Denetim Metotları ve bu denetim metotlarının birlikte kullanılarak hibrid denetim yapılarının oluşturulduğu çalışmalar mevcuttur. Gövdeye eklenen fazladan serbestlik derecesiyle sistem ÇGÇÇ doğrusal olmayan bir yapı oluşturmaktadır. Bu tip sistemin denetim parametrelerinin en iyisinin seçilmesi, yerel uç noktalara takılmamasına bağlıdır. Bu sorunların çözümü için sezgisel veya olasılıksal optimizasyon (en iyileme) yöntemleri kullanılmaktadır (Pathak vd., 2005; Chen vd., 1998; Prasad vd., 2011; Park vd. 2009).

Bu bildiride, KKD parametrelerinin en iyi değerleri olasılıksal optimizasyon yöntemi olan KOA ile elde edilmektedir. KOA rastgele sayı üretmek yerine kaotik serileri kullanmaktadır (Liu ve Hou, 2002; Tavazoei ve Haeri, 2006;).

Sonraki bölümlerde KKD tasarımı, KOA, ele alınan robotik platforma ait matematiksel modelin elde edilmesi ve benzetim çalışmaları sırasıyla ele alınacaktır.

## Materyal ve Yöntem

### Kayan Kipli Denetim Tasarımı

Bu bölümde amaç referans sinyali ve sistem çıkışından elde edilen durum sinyalleri arasında oluşan hatayı sonlu zaman aralığında sıfıra indirmektedir. Bunun için bu bölümde belirlenecek kontrol kuralına ait katsayılar bir sonraki adımda KOA yöntemiyle elde edilecektir. Böylece sistem kararlılığı garanti edilmiş olacaktır.

Bu çalışmada en iyi KKD parametreleri doğrusal sistem modeli kullanılarak KOA ile elde edilecektir. Elde edilecek kontrol katsayıları ile iki tekerlekli mobil platformun gövde duruş davranışı incelenecektir. Daha sonra doğrusal sistem için en iyi olan katsayılar kullanılarak, doğrusal olmayan sistem ile benzetim çalışması yapılacaktır. Sistemin dinamik modelinin elde edilmesi sonraki bölümlerde verilecektir.

Öncelikle izleme hatası  $e(t)$  ve kayma yüzeyi fonksiyonu  $s(t)$  ve türevi  $\dot{s}(t)$  olmak üzere

$$s = \dot{e} + Ce \quad (1)$$

$$\dot{s} = \ddot{e} + \dot{C}e \quad (2)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada  $C$  kayma yüzeyinin eğimini ifade etmektedir ve  $e_x = x_r - x$  'dir.  $x_r$  istenilen durumu (istenilen  $x$  pozisyonunu) ve  $x$  ölçülen yani benzetim sonucu çıkıştan elde edilen  $x$  pozisyonunu ifade etmektedir. Benzer şekilde  $\theta_r$ , istenilen gövde açısı ve  $\theta$  çıkıştan toplanan gövde açısı olmak üzere, izleme hatası  $e_\theta = \theta_r - \theta$  olarak ifade edilebilir. Bu çalışmada  $x_r$  için farklı sinyaller uygulanmıştır. Gövde açısının olabildiğince denge noktası etrafında sabit kalması arzu edilmektedir; dolayısıyla  $\theta_r = 0$  alınacaktır. Erişme evresinin tamamlanabilmesi için kayma fonksiyonu tanımlayan fonksiyonun

$$s(x)\dot{s}(x) \leq 0 \quad (3)$$

ile verilen eşitsizliği sağlaması gerekmektedir. Kayma evresi kayma yüzeyini tanımlayan fonksiyonun (4) ile verilen koşulları sağladığı durumdur.

$$s(x) = 0 \text{ ve } \dot{s}(x) = 0 \quad (4)$$

Erişme evresine yaklaşım kuralı doğrudan anahtar fonksiyonunun dinamiğini belirler. Bu çalışmada, bu kurallardan biri olan sabit değişimli erişme kuralı uygulanacaktır. Bu kontrol kuralı (5) ile ifade edilmektedir.

$$u(t) = -K \text{sign}(s) \quad (5)$$

Sonsuz frekansta anahtarlama uygulanabilir bir yöntem değildir. Çatırtı probleminin üstesinden gelebilmek için en basit ve popüler bir yöntem olan doyum (saturasyon) fonksiyonu ile işaret fonksiyonunun yer değişmesidir. Burada bir sınır tabaka tanımlanır. Bu durumda kontrol kuralı (6) ile ifade edilmektedir.

$$u(t) = \begin{cases} -K \text{sign}(s) & \text{EĞER } |e| > \varepsilon \\ -s/\beta & \text{EĞER } |e| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (6)$$

Nihayet  $e_x$  ve  $e_\theta$  izleme hatalarını bertaraf etmek için sırasıyla,  $u_1(t)$  tekerlek motoru voltaj girişi ve  $u_2(t)$  kol servo motoru tork girişi olmak üzere iki tane giriş elde edilmektedir. Dolayısıyla  $e_x$  için  $C_1$  ve  $K_1$ ,  $e_\theta$  için  $C_2$  ve  $K_2$  katsayıları tanımlanması gerekmektedir. Bu katsayıların en iyi değerlerini elde etmek bir sonraki bölümde KOA ele alınacaktır.

### Kaos Optimizasyon Algoritması

Bir çok gerçek zamanlı doğrusal olmayan uygulamada optimizasyon problemi  $L \leq x \leq U$  aralığında  $\min(f_x)$  olarak tanımlanmaktadır. Burada  $x$ ,  $L$  ve  $U$   $n \times 1$  boyutlu vektörler,  $f(\cdot)$  doğrusal olmayan fonksiyon öyle ki  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ . Genellikle  $f(\cdot)$ , gradyent temelli yöntemlerde yerel minimumlara takılmaktadır.  $f(\cdot)$ 'yi minimum yapmak için aday noktalar ( $x_c$ ) kaotik seri vektörü ile oluşturulur.

Optimum nokta ( $x_i$ ), aday noktalardan en küçük  $f(x_c)$ 'yi veren noktadır. Her iterasyonda kaotik bir harita kullanılarak yeni bir kaotik seri oluşturulmaktadır. Bu çalışmada optimizasyon problemi için KOA kaotik harita yöntemlerinden lojistik harita kullanılmıştır (Yıldırım vd., 2016).

$$\gamma_{n+1} = \lambda \gamma_n (1 - \gamma_n) \quad (7)$$

(7) ile ifade edilen denklemde  $\lambda = 4$  olduğunda tam bir kaos durumu söz konusudur.  $\gamma_n$  başlangıçta 0-1 arasında oluşturulan rasgele sayı üretici ile meydana getirilmektedir. Sonraki iterasyonlar bir önceki iterasyondaki değeri almaktadır. Böylece her iterasyonda kaotik seri güncellenmektedir.  $x_c$  ise (8) ile ifade edilen birincil taşıyıcı dalga algoritması ile elde edilmektedir.

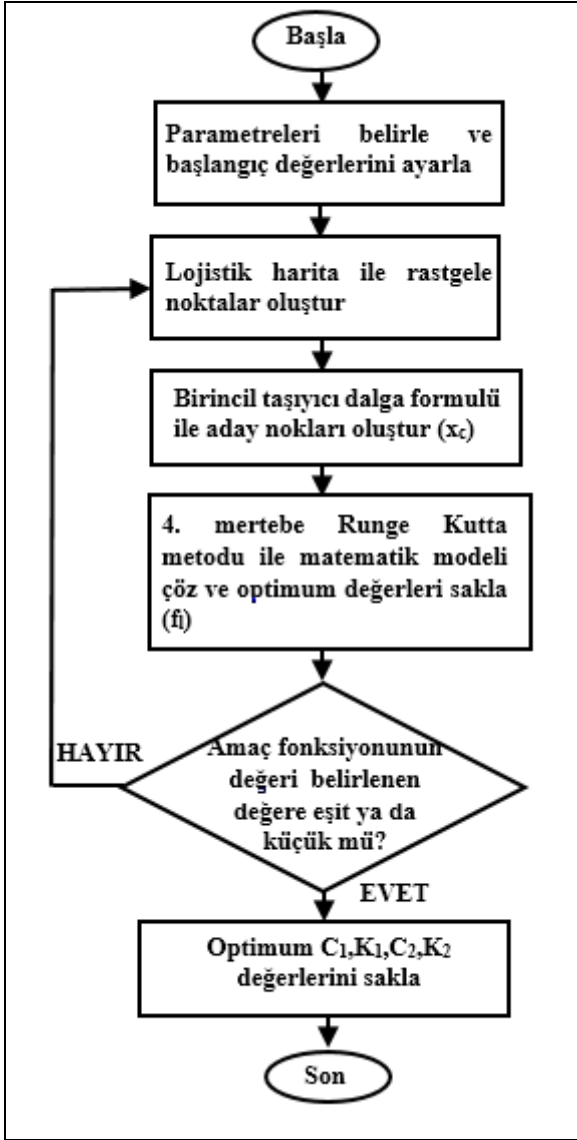
$$x_c = L + \gamma_{n+1}(U - L) \quad (8)$$

Oluşturulan aday noktalar  $x_c$  vektöründe saklı tutulmakta ve  $f(x_c)$  değerleri elde edilmektedir. Her iterasyonda elde edilen optimum değerler  $f_i$  olarak saklanmaktadır. İterasyon sonunda veya amaç fonksiyonunun istenilen değerinin altında algoritma sonlandırılmakta ve optimum  $f$  değeri elde edilmektedir.

Bu aşamada aday noktalar ( $x_c$ ), KKD katsayıları  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $K_1$  ve  $K_2$ 'yi temsil etmektedir. Optimizasyonun her iterasyonunda yeni kaotik seriler ve aday noktalar belirlenmekte ve sistemin dinamik modeli 4. dereceden Runge-Kutta metoduyla koşturularak sistemin çıkış değerleri elde edilmektedir. Optimizasyon için aday nokta sayısı 200 ve iterasyon sayısı,  $j=100$  olarak belirlenmiştir. Amaç fonksiyonu olarak hata sinyallerinin ( $e_x$  ve  $e_\theta$ ) kareleri toplamı kullanılmıştır.

$$\sum_{1}^j e_x^2 + e_\theta^2 \quad (9)$$

Şekil 1' de uygulanan algoritmaya ait akış şeması verilmiştir.

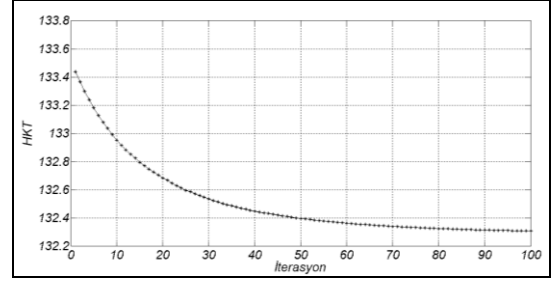


Şekil 1. Kaos optimizasyonu akış şeması

Parametrelerin belirlenmesi için dinamik modelde platformun doğrusal başlangıç konumu 0.1 m ve diğer durum değişkenleri sıfır olarak seçilmiştir. Buna göre  $x$  pozisyonunun denge noktası etrafında kararlılık göstermesi beklenmektedir. Kol açısı gövde açısının dengelenmesi için konum değiştirmektedir.

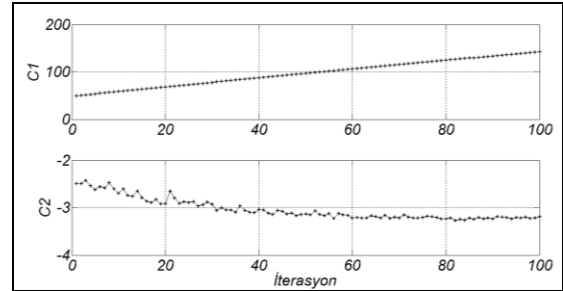
Elde edilen parametreler referans giriş ve bozucu giriş uygulanarak benzetimde kullanılmıştır. Aynı parametreler daha sonra doğrusal olmayan sistem modeline uygulanmıştır ve sonuçlar grafikler üzerinde karşılaştırılmıştır.

Şekil 2’de amaç fonksiyonunun aldığı değerlerin asimptotik olarak belirli bir değere yakınsadığı görülmektedir.

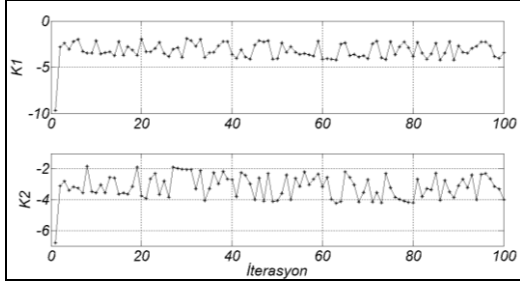


Şekil 2. Hataların kareleri toplamının iterasyon ile değişimi

Şekil 3’de  $C_1$  ve  $C_2$  katsayılarının optimizasyon ile aldığı değerler görülmektedir.  $C_1$  ve  $C_2$  değerlerinin son değerleri en iyi değerler olarak seçilmiştir. Birinci kayma yüzeyi  $C_1$  katsayısının ilerleyen iterasyonlarda aldığı değerlerde kontrol performansında iyileştirme yapmadığı tespit edilmiştir.

Şekil 3.  $C_1$  ve  $C_2$  katsayılarının iterasyon ile değişimi

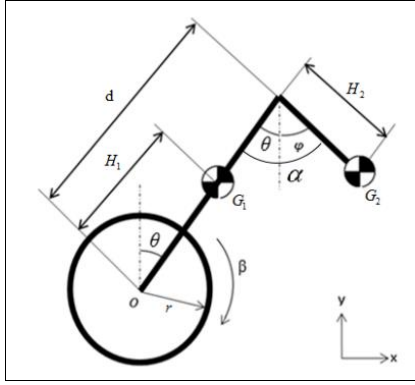
Şekil 4’de kontrol kuralına ait  $K_1$  ve  $K_2$  katsayılarının değişimi verilmiştir.  $K_1$  katsayısının -5 civarında ve  $K_2$  katsayısının -4 civarında sabitlendiği görülmektedir.



Şekil 4.  $K_1$  ve  $K_2$  katsayılarının iterasyon ile değişimi

### Sistemin Matematiksel Modeli

Şekil 5’ de sistemin serbest cisim diyagramı verilmiştir.



Şekil 5. Sisteme ait serbest cisim diyagramı

Gövdenin ağırlık merkezinin  $x$  ve  $y$  doğrultusundaki doğrusal yer değiştirmesi (10) ve (11) ile verilmiştir.

$$x_b = x + H_1 \sin\theta \quad (10)$$

$$y_b = H_1 \cos\theta \quad (11)$$

Yer değiştirmelerin türevi (12) ve (13) ile verilmiştir.

$$\dot{x}_b = \dot{x} + H_1 \dot{\theta} \cos\theta \quad (12)$$

$$\dot{y}_b = -H_1 \dot{\theta} \sin\theta \quad (13)$$

Kolların ağırlık merkezinin  $x$  ve  $y$  doğrultusundaki yer değiştirmeleri (14) ve 15 ile verilmiştir.  $x$  ve  $y'$  ye ait türevler (16) ve (17) ile verilmiştir.

$$x_a = x + d \sin\theta + H_2 \sin(\alpha - \theta) \quad (14)$$

$$y_a = d \cos\theta - H_2 \cos(\alpha - \theta) \quad (15)$$

$$\dot{x}_a = \dot{x} + d \dot{\theta} \cos\theta + H_2 (\dot{\alpha} - \dot{\theta}) \cos(\alpha - \theta) \quad (16)$$

$$\dot{y}_a = -d \dot{\theta} \sin\theta + H_2 (\dot{\alpha} - \dot{\theta}) \sin(\alpha - \theta) \quad (17)$$

Lagrange Denklemi (18) ile verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial q_i} = F \quad (18)$$

Genelleştirilmiş koordinatlar  $q_1, q_2$  ve  $q_3$  sırasıyla  $\beta, \theta$  ve  $\alpha$  olarak belirlenmiştir.

$b_0, b_1$  ve  $b_2$  sırasıyla tekerlek-yer, kol-gövde ve gövde kol arasındaki vizkoz sönüm katsayılarıdır.

$$K = M_w (\dot{\beta} r)^2 + \frac{1}{2} M_b (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2} M_a (\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2) + \frac{1}{2} J_a (\dot{\alpha} - \dot{\theta})^2 + \frac{1}{2} J_b \dot{\theta}^2 + J_w \dot{\beta}^2 \quad (19)$$

$$P = -M_a g ((d \cos\theta) - H_2 \cos(\alpha - \theta)) - M_b g H_1 \cos\theta \quad (20)$$

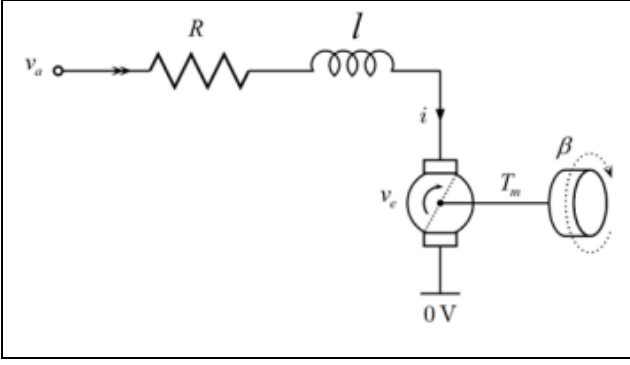
$$D = b_0 \dot{x}^2 + b_1 (\dot{\beta} - \dot{\theta})^2 + \frac{1}{2} b_2 (\dot{\alpha} - \dot{\theta})^2 \quad (21)$$

Lagrange fonksiyonu  $L$  (22) ile verilmiştir.

$$L = K - P \quad (22)$$

$$L = M_w (\dot{\beta} r)^2 + \frac{1}{2} M_b (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2} M_a (\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2) + \frac{1}{2} J_a (\dot{\alpha} - \dot{\theta})^2 + \frac{1}{2} J_b \dot{\theta}^2 + J_w \dot{\beta}^2 - M_a g ((d \cos\theta) - H_2 \cos(\alpha - \theta)) - M_b g H_1 \cos\theta \quad (23)$$

Şekil 6’ da DC motor modeli verilmiştir.



Şekil 6. DC motor modeli

Motor torku,  $\tau = f(V)$  olarak ifade edilecek olup motor torku armatür akımı ve voltaj armatür akımı arasındaki ifade (24) ve (25) ile verilmiştir.

$$\tau_m = K_t i \quad (24)$$

$$V_a - Ri - L \frac{di}{dt} - V_e = 0 \quad (25)$$

Ters elektro motor kuvveti (EMF),  $V_e$  aşağıda ifade edilmiştir.

$$V_e = K_e \dot{\beta}_m \quad (26)$$

$L$ 'nin çok küçük olduğu kabulü ile denklem yeniden düzenlenirse akım aşağıdaki gibi elde edilir.

$$i = \frac{V - K_e \dot{\beta}_m}{R} \quad (27)$$

Denklem yerine koyarak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\tau_m = K_t \left( \frac{V}{R} - \frac{K_e}{R} \dot{\beta}_m \right) \quad (28)$$

İfade edilen  $\dot{\theta}_m$  terimi motor şaftına göre hızı temsil etmektedir. Bu ifadeyi tekerlek ve gövde açısı cinsinden aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

$$\beta_m = n\beta - \theta \quad (29)$$

$$\dot{\beta}_m = n\dot{\beta} - \dot{\theta} \quad (30)$$

İfade edilen motor şaftına etki eden tork ifadesi tekerleğe uygulanan tork ifadesi cinsinden aşağıda ifade edilmiştir.

$$\tau_w = n\tau_m \quad (31)$$

Denklemler düzenlenirse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\tau_w = \frac{nVK_t}{R} - \frac{nK_tK_e}{R} (n\dot{\beta} - \dot{\theta}) \quad (32)$$

Lagrange Denklemi çözülüp gerekli işlemler yapılırsa doğrusal olmayan denklem (33) ile verilen formda elde edilir.

$$\tau = \mathbf{M}(q)\ddot{q} + \mathbf{H}(q, \dot{q})\dot{q} + \mathbf{g}(q) \quad (33)$$

Burada  $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3]^T \in \mathbb{R}^3$  genelleştirilmiş koordinatı,  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T \in \mathbb{R}^3$  genelleştirilmiş kuvvetleri ve  $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^3$ ,  $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^3$ ,  $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^3$  ise sırasıyla atalet, merkezkaç ve koriolis, ve ağırlık matrislerini ifade etmektedir.

Bu denklemler denge noktası etrafında doğrusallaştırılırsa aşağıdaki durum uzayı modeli elde edilir.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (34)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}(t)$$

Sisteme ait parametreler Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Sistem Parametreleri

Parametre	Büyüklik
$M_b$	2.4 kg
$M_w$	0.127 kg
$M_a$	0.04 kg
$H_1$	0.22 m

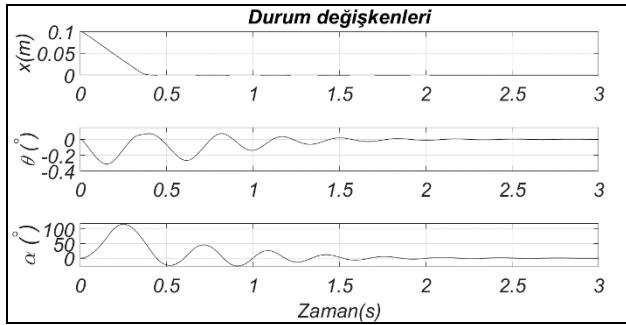


$J_w$	0.0007 kgm <sup>2</sup>
$r$	0.1 m
$g$	9.81 m/s <sup>2</sup>
$B_0$	0.05
$B_1$	0.005
$B_2$	0.01
$L_1$	0.56 m
$H_2$	0.2 m
$n$	30
$K_t$	0.1429 Nm/A
$K_e$	0.1429 Nm/A
$R$	8.7 W

## Uygulama ve Başarımlar

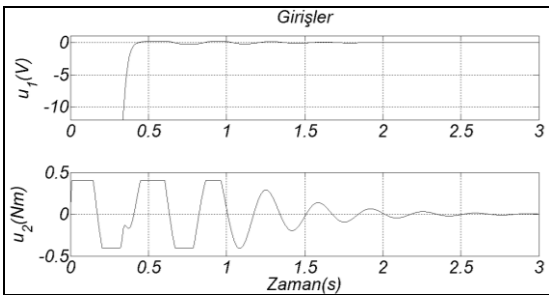
### Doğrusal Model ile Benzetim Çalışmaları

Önceki bölümde bahsedilen ve optimizasyonun gerçekleştirildiği modelde  $x$  konumunun başlangıç şartı 0.1 m olarak alındığında elde edilen sonuçlar Şekil 7, 8, 9, 10 ve 11' de verilmiştir.



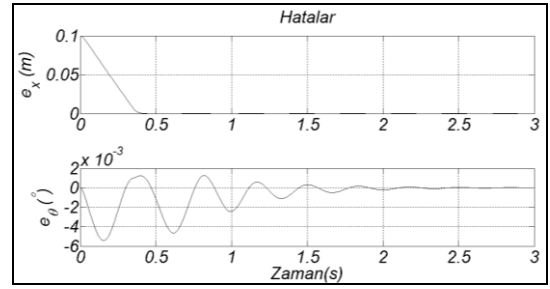
Şekil 7. Verilen başlangıç koşulları altında durum değişkenlerinin cevabı

Şekil 7'de yatay pozisyon değişkeninin kısa sürede kalıcı duruma ulaştığı gözlemlenmiştir.



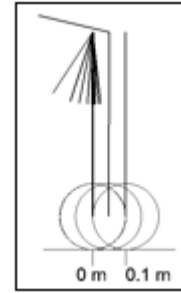
Şekil 8. Tekerlek motoru girişi  $u_1$  voltaj girişi ve  $u_2$  kol motoru tork girişi

Şekil 8'de tekerlek ve kol tahrik girişlerinin çatırdama sorunu olmadan denetimi sağladığı gözlemlenmiştir.

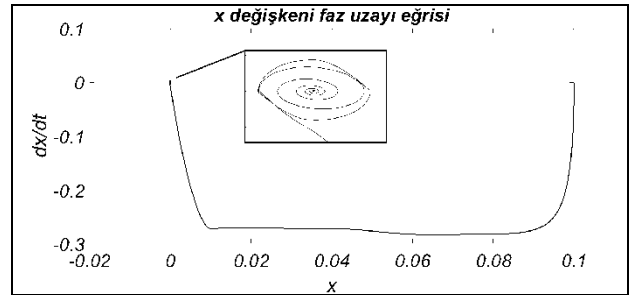


Şekil 9.  $x$  referansının hatası  $e_x$  ve gövde açısı pozisyonunun hatası  $e_\theta$

Şekil 9'de kalıcı durum hatalarının bertaraf edildiği gözlemlenmiştir. Şekil 10'da kol ve gövde hareketi görsel olarak verilmiştir.



Şekil 10. Başlangıç şartları altında benzetim görseli

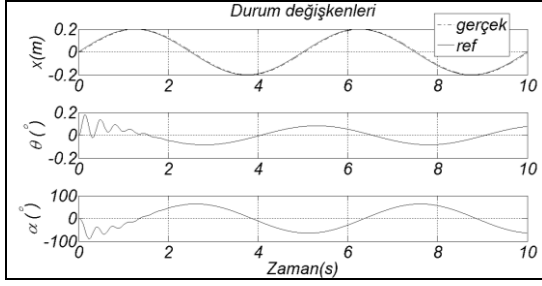


Şekil 11.  $x$  durum değişkenine ait faz uzayı eğrisi

Şekil 11'de yatay konum değişkeninin ve hızının faz uzayı eğrisinde kararlı olduğu gözlemlenmiştir.

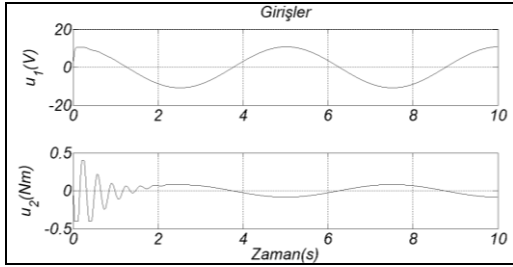
İkinci benzetim çalışmasında platformun  $x$  doğrultusundaki referans sinyali  $x_{ref} = A \sin(2\pi ft)$  seçilmiş olup  $A = 0.2 m$  ve

$f = 0.2 \text{ Hz}$  olarak belirlenmiştir. Sistem cevabı Şekil 12, 13, 14 ve 15’de verilmiştir.



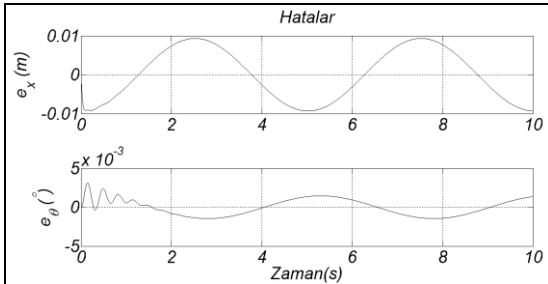
Şekil 12. Durum değişkenlerinin cevabı

Şekil 12’de yatay konum değişkeninin referansı takip ettiği gözlemlenmiştir.

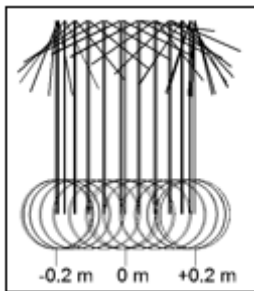


Şekil 13. Sisteme ait girişler

Şekil 13’ de sistem girişlerinin tahrik elemanlarının limitlerini aşmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 14’ de hata sinyallerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir.



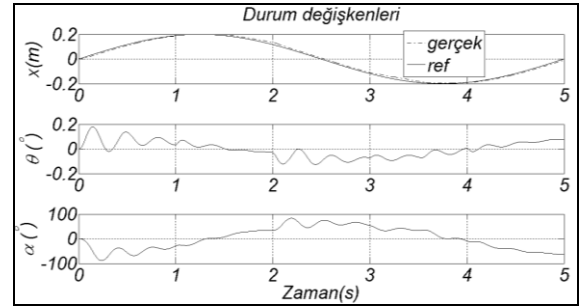
Şekil 14. Sistemden alınan hata sinyalleri



Şekil 15. Sinüs girişi ile edilen benzetim görseli

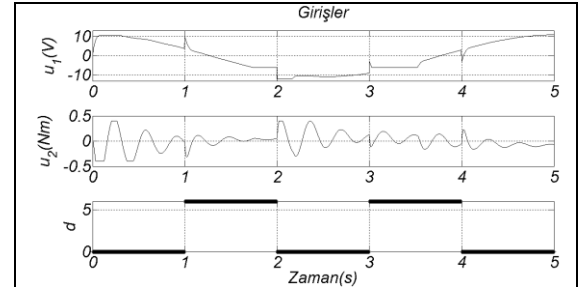
Şekil 15’de yatayda alınan mesafe boyunca gövde açısının düşeyle yaptığı açının düşük olduğu bir görsel ile ifade edilmiştir. Gövde açısının dik durması için kolun sağlamış olduğu hareket miktarı izlenebilmektedir.

Üçüncü benzetim çalışmasında ikinci benzetime ek olarak bozucu giriş uygulanmıştır. Bozucu giriş kuralı olarak  $u_1$  girişine  $d$  bozucu girişi uygulanmıştır.  $d = u_{1max}/2$  olarak seçilmiştir. Sistem cevapları Şekil 16 ve 17’de verilmiştir.



Şekil 16. Bozucu giriş etkisi altında durum değişkenleri

Şekil 16’ da bozucu girişe karşılık gerçek değişkenin referansı takip ettiği izlenmektedir.



Şekil 17. Sisteme ait giriş sinyalleri

Şekil 17’ de sisteme uygulanan bozucu giriş ve tahrik elemanlarının bu girişe karşılık davranışı izlenmiştir. Giriş elemanlarının çatırdama sorunu ile karşılaşmadığı ve girişlerin sınır değerleri aşmadığı izlenmiştir.

### Doğrusal olmayan model ile benzetim çalışmaları

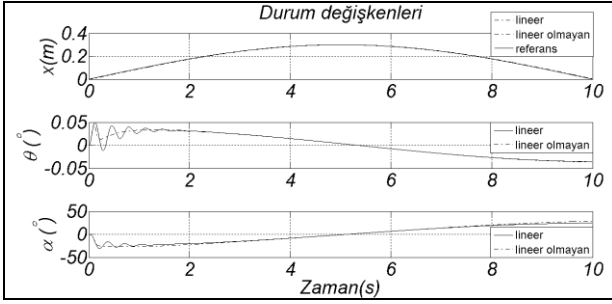
Doğrusal model kullanılarak optimizasyon sonucu elde edilen parametrelerin doğrusal olmayan modelde aynı sonucu vermesi



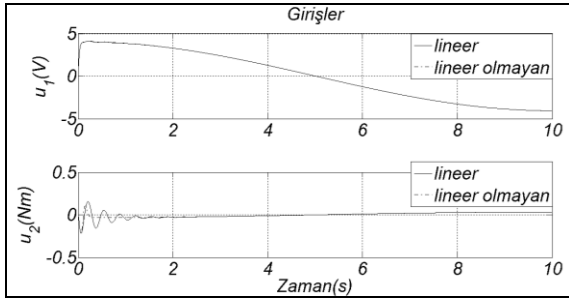
beklenmemektedir. Giriş referans sinyalinin frekans aralığı doğrusal ve doğrusal olmayan modelde farklılık göstermektedir. Ancak belirli bölgede kararlı sonuçlar alınmıştır.

Benzetimler, doğrusal ve doğrusal olmayan modelde koşturulmuş ve grafikler karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Doğrusal olmayan model ile yapılan ilk benzetimde  $x$  doğrultusundaki referans sinyali  $x_{ref} = A \sin(2\pi ft)$  olmak üzere  $A = 0.3 \text{ m}$  ve  $f = 0.05 \text{ Hz}$  olarak seçilmiştir.

Yapılan çalışmalar neticesinde doğrusal model kullanılarak elde edilen en iyi parametrelerin doğrusal olmayan modelde 0-0.05 Hz aralığında başarılı sonuç verdiği Şekil 18 ve 19'da gözlemlenmiştir.

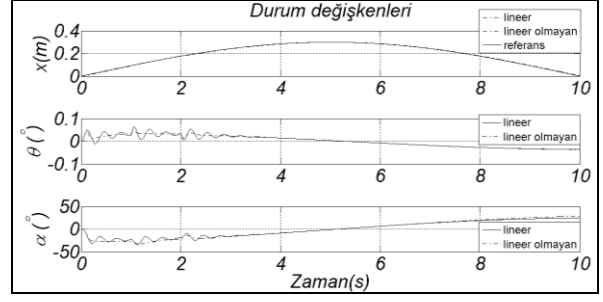


Şekil 18. Durum değişkenlerine ait cevaplar



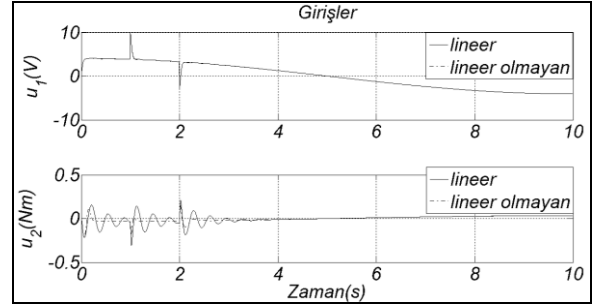
Şekil 19. Sisteme ait giriş sinyalleri

$A = 0.3 \text{ m}$  ve  $f = 0.05 \text{ Hz}$  olmak üzere  $x_{ref} = A \sin(2\pi ft)$  referans sinyali uygulanarak  $u_1$  girişine  $d = u_{1max}/2$  bozucu girişi uygulanmış benzetim sonuçları Şekil 20, 21 ve 22'de verilmiştir.



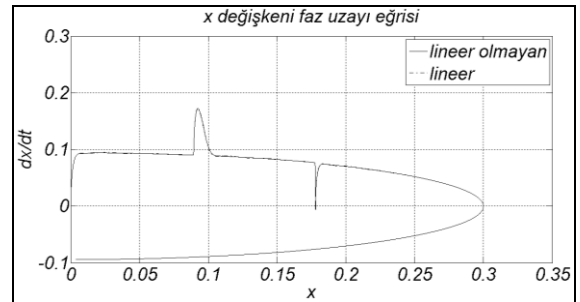
Şekil 20. Durum değişkenlerinin cevabı

Şekil 20' de yatay pozisyon referansının başarılı bir şekilde takip edildiği ve gövde açısının düşeyle yaptığı açının düşük kaldığı izlenmiştir. Kol açısının düşük değerlerde kaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca doğrusal ve doğrusal olmayan modele ait değerlerin bu frekans değerleri için örtüştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 21. Sisteme ait girişler

Şekil 21'de sistem girişlerinin çatırdama sorunu ile karşılaşmadığı ve girişlerin sınırları aşmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 22.  $x$  durum değişkenine ait faz uzayı eğrisi

Şekil 22'de yatay pozisyon durum değişkeninin, doğrusal ve doğrusal olmayan model için örtüştüğü tespit edilmiştir.

## Sonuçlar ve Tartışma

Tek kol ile desteklenmiş sistem üzerinde yapılan çalışmada gövde açısının istenilen doğrultuda denge noktası etrafında kaldığı gözlemlenmiştir. Platforma ait benzetimlerde yatay konum durum değişkenine ait referans sinyalleri başarıyla takip ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca sistemin bozucu girişleri bertaraf ettiği açıkça görülmektedir. Doğrusal olmayan modele ait en iyi denetim parametreleri, doğrusal modelde belirli giriş sinyali frekansı için kabul edilebilir düzeydedir. Çünkü doğrusal olmayan model için yapılan optimizasyon algoritması çok yavaş ilerlemektedir. Özellikle ÇGÇÇ sistemlerde giriş sayısının artmasıyla denetim parametrelerinin sayısı daha da artacak ve optimizasyon süresi uzayacaktır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, gövde açısının denge noktası etrafında kalması ve temel tahrik elemanına uygulanan bozucu girişleri yok etmesi bakımından bilişsel robotik uygulamaları önemlidir.

## Kaynaklar

- Chen, C.S., Chen, W.L., (1998), Robust Adaptive Sliding-Mode Control Using Fuzzy Modelling for an Inverted-Pendulum System, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, **45**, 2., 297-306.
- Grasser, F., D'Arrigo, A., Colombi, S., Rufer, A.C., (2002), JOE: A mobile Inverted Pendulum, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **49**, 1, 107-114.
- Linn, S.C., Tsai, C.C., Huang, H.C., (2011), Adaptive Robust Self-Balancing and Steering of a Two-Wheeled Human Transportation Vehicle, *Journal of Intelligent Robotic Systems*, **62**, 1, 103-123.

Liu, S., Hou, Z., (2002), Weighted Gradient Direction Based Chaos Optimization Algorithm for Nonlinear Programming Problem, *Proceedings of the 4<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation*, 1779-1783.

Nguyen, H.G., Morrell, J., Mullens, K.D., Burmeister, A.B., Miles, S., Farrington, N., Thomas, K.M., Gage, D.W., (2004), Segway Robotic Mobility Platform, *Proceedings SPIE 5609 Mobile Robots XVII*.

Park B.S., Yoo S.J., Park, J.B., Choi, Y.H., (2009), Adaptive Neural Sliding Mode Control of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots with Model Uncertainty, *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, **17**, 1, 207-214.

Pathak, K., Franch, J., Agrawal, S.K., (2005), Velocity and position Control of a Wheeled Inverted Pendulum by Partial Feedback Linearization, *IEEE Transactions on Robotics*, **21**, 3.

Prasad, L.B., Tyagi, B., Gupta, H.O., (2011), Optimal control of nonlinear inverted pendulum dynamical system with disturbance input using PID controller & LQR, *IEEE International Conference on Control System*, pp.540-545.

Stilman, M., Olson, J., Gloss, W., (2010), Golem Krang: Dynamically Stable Humanoid Robot for Mobile Manipulation, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*.

Tavazoei, M.S., Haeri, M., (2006), An Optimization Algorithm Based on Chaotic Behavior and Fractal Nature, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, **206**, 2, 1070-1081.

Yıldırım, G., Aydın, G., Alli, H., Tatar, Y., (2014), Hadoop ile Kaos Temelli FCW Optimizasyon Algoritmasının Analizi, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, 708-712.

## Sliding Mode Control and Parameter Optimization of Two-Wheeled and Single-Arm Robotic Platform

### Extended abstract

*In this study, one-handed and two-wheeled robotic manipulator was simulated with sliding mode control (SMC). In SMC, saturation was applied to overcome the problem of chattering. For the two controlled variables of the robot, there are four unknown parameters in total for the sliding surface and control rule. In finding the best points, gradient-based methods often cannot provide a global solution. In order to overcome this problem, the chaos optimization algorithm (COA) is used.*

*In COA, different points are formed by chaotic series. In this study, a logistic map was used to construct a chaotic series. The primary carrier wave algorithm is used to update the chaotic series. The aim function is the sum squares of the errors.*

*A linear mathematical model of the system is used for optimization. The Runge-Kutta method is used for the solution of equations. The optimization solution in the linear model gives very fast results compared to the nonlinear model. The best parameters obtained in the linear model are used in the nonlinear model in the simulation studies. Simulations were made under the same type of input and initial conditions and compared on the same graph.*

*The sinusoidal position reference of 0,2 Hz and 0,2 m amplitude is applied to the simulations performed with the linear model. The reference and horizontal position variables overlap. In the linear model, the reference has been exposed to the same amount of interference as half the system input. It is observed that the reference overlaps with the horizontal position variable. In either case, the posture of the torso did not exceed 0.2 degrees. Arm position did not exceed 90 degrees for both cases.*

*The simulations made with the non-linear model were carried out together with the linear model. The results are compared. A sinusoidal position reference of 0.05 Hz and amplitude of 0.3 m was*

*applied. It is observed that the reference overlaps with the horizontal position variable. Body angle does not exceed 0.05 degrees and arm angle does not exceed 40 degrees. System input has been examined and no chattering problem has been observed. The system was exposed to disturbance input as much as half of the system input, with the same reference. The phase space curve of the horizontal position is investigated; it is observed that the horizontal positional phases of the linear and nonlinear system overlap.*

*The results show that the optimum parameters obtained for the linear model can be used with low frequency references in the nonlinear model. In the future, more efficient control algorithms will be implemented. We intensify our efforts to see the effects on the real-time system.*

**Keywords:** *Sliding mode control, Chaos optimization algorithm, Service robots, Rehabilitation robots*