Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi
Journal of Engineering and Natural Sciences

Sigma 5
39-50,
2013

ÖZEL SAYI

Araştırma Makalesi / Research Article

YAPAY SİNİR AĞLI KAYAN KİPLİ KONTROLÜN DÖNEL TERS SARKAÇ SİSTEMİNE UYGULANMASI

Muhammet AYDIN[*1], Oğuz YAKUT[2], Hasan ALLİ[3]

[1]Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, ELAZIĞ
[2]Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, ELAZIĞ
[3]Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ELAZIĞ

Geliş/Received: 06.02.2013 Revised/Düzeltme: 29.05.2013 Kabul/Accepted: 06.06.2013

ÖZET

Bu çalışmada, lagrange yöntemi kullanılarak elde edilmiş olan tek çubuklu dönel tek ters sarkaç (tts) sistemine ait hareket denklemleri simulink ortamında modellenmiştir. Kayan kipli kontrol ve yapay sinir ağlı kayan kipli kontrol yöntemleri kullanılarak dönel tts sistemi istenilen konumda kontrol edilmiştir. Bu çalışma ile kayan kipli kontrolün en büyük dezavantajı olan çatırdama probleminin, yapay sinir ağı tekniği ile iyileştirilebileceği ortaya konmuştur.
Anahtar Sözcükler: Kayma kipli kontrol, yapay sinir ağı, dönel ters sarkaç, lagrange yöntemi.

IMPLEMENTATION OF SLIDING MODE CONTROL WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORK TO THE ROTARY INVERTED PENDULUM SYSTEM

ABSTRACT

In this study, the equations of motion relating to single-rod rotary inverted pendulum system are obtained using Lagrange method are modeled in Simulink. The single-rod rotary inverted pendulum system has been controlled in the desired position using sliding mode control and sliding mode control with artificial neural-network methods. Chattering problem, which is the main disadvantage of sliding mode control with this work, is possible to be healed via the artificial neural network technique has revealed.
Keywords: Sliding mode control, artificial neural network, rotary inverted pendulum, lagrange method.

1. GİRİŞ

Ters sarkaç sisteminin denetimi, kontrol tekniklerinin uygulanması açısından önemli bir yere sahiptir. Ters sarkaç problemi, kontrol mühendisliği alanında eğitim vermek için kontrol edilmesi istenen en uygun sistemlerden biridir. Günümüze kadar geliştirilmiş ve kontrol edilmiş olan farklı yapılarda ters sarkaç sistemleri vardır. Tek çubuklu arabalı ters sarkaç sistemleri [1,2], çift çubuklu arabalı ters sarkaç sistemleri [3], tek ve çift çubuklu dönel ters sarkaç sistemleri [4,5], kuvvetin çubuğun ucuna bağlı olan bir tekerin dönmesi sonucu uygulandığı sarkaç sistemleri, tek kollu çiftli paralel çubuklu arabalı ters sarkaç sistemleri, gezgin ters sarkaç sistemleri, seri

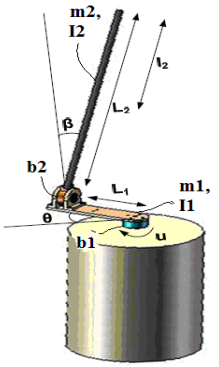
*Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: muhammeta@firat.edu.tr, tel: (424) 237 00 00/4296

robotlarla kontrol edilen ters sarkaç sistemleri gibi ters sarkaç sistemleri ön plana çıkan sistemlerdir.

Literatürde, ters sarkaç sisteminin tek bir kontrol yapısı altında incelendiği ve farklı kontrol yapıları ile birlikte ele alınan çalışmalar mevcuttur. Ters sarkaç sistemi ile ilgili sarkacın yükseltilmesi için insan kontrol stratejisini kullanan bulanık denetleyiciye ait benzetim çalışmaları [6], sarkacın yükseltilmesi için enerji tabanlı ve bulanık mantık kontrolörlerinin karşılaştırıldığı çalışmalar [7], sarkacın yükseltilmesi için sistem enerjisinin de dikkate alındığı geri beslemeli doğrusallaştırma tekniği [1], doğrusal kuadratik kontrol yöntemi [8], PID [9], uzaktan kontrol uygulamaları[10], yapay sinir ağları [11], bulanık mantık [12,13], kinetik ve potansiyel enerji ile enerji kontrolü [14] ve kayan kipli kontrol [11-13] çalışmaları literatürde mevcuttur. Ters sarkaç benzeri dinamik davranış gösteren sistemlere uzay mekikleri, yürüyen robotlar ve şantiyedeki kreyn örnek olarak verilebilir.

2. DÖNEL TEK TERS SARKAÇ SİSTEMİ

Çok tercih edilen ters sarkaç sistemlerinden birisi de dönel tts'dir. Dönel tts sistemi, dolaylı tahrik edilen doğrusal olmayan kararsız sistemlerin kontrolü üzerine çalışma yapabilmek için mükemmel bir deney düzeneğidir. İmalatı arabalı tür ters sarkaca göre daha kolay ve az masraflı olduğundan son zamanlarda oldukça tercih edilmektedir. Dönel tts sistemi hareketli iki rijit uzuv olan yatay silindirik kola bağlı dönel tahrik elemanı ile düşey hareketli mil (sarkaç)'den oluşmakta ve bu sistemde sarkaç dengelenmeye çalışılmaktadır [15,16]. Dönel tts modeli kullanılarak önce kayan kipli kontrol yöntemi, daha sonra yapay sinir ağlı kayan kipli kontrol yöntemi uygulanacaktır.



Şekil 1. Dönel TTS Sistemi [4]

Şekil 1'de hareketi motordan alan dönel kol ve hareketini dönel koldan alan ters sarkaç sistemi görülmektedir. Dönel tts sisteminin parametre değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Kolun kinetik enerjisi denklem (1)' deki yazılır ve düzenlenirse denklem (2) elde edilir.

$$T_1 = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}^2 \tag{1}$$

$$T_1 = \frac{1}{2} m_1 L_1^{\,2} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}^2 \tag{2}$$

Çizelge 1. Dönel tts sisteminin parametreler çizelgesi [4]

Sembol	Parametreler	Değeri	Birimi
g	Yer çekimi ivmesi	9.81	m/s²
m_1	Dönel kolun kütlesi	0.15	kg
m_2	Sarkacın kütlesi	0.1	kg
L_1	Dönel kolun uzunluğu	0.4	m
L_2	Sarkacın uzunluğu	0.4	m
l_2	Sarkacın kütle merkezinin uzaklığı	0.2	m
b_1	Sarkaç ile dönel kol arasındaki sürtünme katsayısı	0.001	N/rad/sn
b_2	Dönel kol ile yüzey arasındaki sürtünme katsayısı	0.001	N/rad/sn
I_1	Dönel kola ait kütlesel atalet momenti	0.0248	kgm²
I_2	Sarkaca ait kütlesel atalet momenti	0.00386	kgm²

Sarkacın kinetik enerjisi denklem (3)' de olduğu gibi yazılır ve düzenlenirse denklem (4) elde edilir.

$$T_2 = \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_{g2}{}^2 + \dot{y}_{g2}{}^2) + \frac{1}{2} I_2 \dot{\beta}^2 \tag{3}$$

$$T_2 = \frac{1}{2} m_2 [L_1{}^2 \cos^2\theta \dot{\theta}^2 - 2L_1 \ell_2 \cos\theta \cos\beta \dot{\theta}\dot{\beta} + \ell_2{}^2 \dot{\beta}^2] + \frac{1}{2} I_2 \dot{\beta}^2 \tag{4}$$

Sistemin toplam kinetik enerjisi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$T = T_1 + T_2 \tag{5}$$

Denklem (2) ve (4), denklem (5)'de yerine konulursa sistemin toplam kinetik enerjisi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$T = \frac{1}{2} m_1 L_1{}^2 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_2 [L_1{}^2 \cos^2\theta \dot{\theta}^2 - 2L_1 \ell_2 \cos\theta \cos\beta \dot{\theta}\dot{\beta} + \ell_2{}^2 \dot{\beta}^2] + \frac{1}{2} I_2 \dot{\beta}^2 \tag{6}$$

Dönel kol yalnızca yatay eksende hareket ettiği için sistemin potansiyel enerjisini sadece sarkaç belirler. Denklem (7) de sistemin potansiyel enerjisi verilmiştir.

$$V = m_2 g \ell_2 (1 - \cos\beta) \tag{7}$$

$$L = T - V \tag{8}$$

Denklem (8)'de verilen Lagrange fonksiyonunu denklem (6) ve (7)'yi kullanarak aşağıdaki gibi elde ederiz.

$$L = \frac{1}{2} m_1 L_1{}^2 \cos^2\theta \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_2 [L_1{}^2 \cos^2\theta \dot{\theta}^2 - 2L_1 \ell_2 \cos\theta \cos\beta \dot{\theta}\dot{\beta} + \ell_2{}^2 \dot{\beta}^2] + \frac{1}{2} I_2 \dot{\beta}^2 - m_2 g \ell_2 (1 - \cos\beta) \tag{9}$$

θ için hareket denklemi:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = Q_\theta \tag{10}$$

Denklem (10) daki Q_θ, θ ya uygulanan dış kuvvetleri ifade eder. Denklem (10) 'daki $\frac{\partial L}{\partial \theta}$ terimi denklem (11)' de verilmiştir.

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = -m_1 {L_1}^2 \cos\theta \sin\theta\dot{\theta}^2 - m_2 {L_1}^2 \cos\theta \sin\theta\dot{\theta}^2 + m_2 L_1 \ell_2 \sin\theta \cos\beta\dot{\theta}\dot{\beta} \tag{11}$$

Denklem (12), denklem (10)' daki $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right)$ terimine karşılık gelmektedir.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) = -2m_1 {L_1}^2 \sin\theta\cos\theta\dot{\theta}^2 + m_1 {L_1}^2 \cos^2\theta\ddot{\theta} + I_1\ddot{\theta} - 2m_2 {L_1}^2 \sin\theta\cos\theta\dot{\theta}^2 + m_2 {L_1}^2 \cos^2\theta\ddot{\theta}$$

$$+ m_2 L_1 \ell_2 \sin\theta\cos\beta\dot{\theta}\dot{\beta} + m_2 L_1 \ell_2 \sin\beta\cos\theta\dot{\beta}^2 - m_2 L_1 \ell_2 \cos\theta\cos\beta\ddot{\beta} \tag{12}$$

Denklem (11) ve (12), denklem (10)'da yerine konulursa θ için hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$(m_1 {L_1}^2 \cos^2\theta + I_1 + m_2 {L_1}^2 \cos^2\theta)\ddot{\theta} - (m_1 {L_1}^2 + m_2 {L_1}^2)\sin\theta\cos\theta\dot{\theta}^2 + m_2 L_1 \ell_2 \sin\beta\cos\theta\dot{\beta}^2$$

$$- m_2 L_1 \ell_2 \cos\theta\cos\beta\ddot{\beta} = u(t) - b_1\dot{\theta} \tag{13}$$

Denklem (13) de u(t) kontrol sinyalini ifade eder.

β için hareket denklemi:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \beta} = Q_\beta \tag{14}$$

Denklem (14) de Q_β, β ya uygulanan dış kuvvetleri temsil eder. Denklem (14) 'deki $\frac{\partial L}{\partial \beta}$ terimi denklem (15)' de verilmiştir.

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} = m_2 L_1 \ell_2 \cos\theta\sin\beta\dot{\theta}\dot{\beta} - m_2 g \ell_2 \sin\beta \tag{15}$$

Denklem (16), denklem (14)' deki $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}}\right)$ terimine karşılık gelmektedir.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}}\right) = m_2 L_1 \ell_2 \sin\theta\cos\beta\dot{\theta}^2 + m_2 L_1 \ell_2 \cos\theta\sin\beta\dot{\theta}\dot{\beta}$$

$$- m_2 L_1 \ell_2 \cos\theta\cos\beta\ddot{\theta} + (m_2 {\ell_2}^2 + I_2)\ddot{\beta} \tag{16}$$

Denklem (15) ve (16), denklem (14)'de yerine konulursa β için hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$(m_2 {\ell_2}^2 + I_2)\ddot{\beta} + m_2 g \ell_2 \sin\beta - m_2 L_1 \ell_2 \cos\theta\cos\beta\ddot{\theta} + m_2 L_1 \ell_2 \sin\theta\cos\beta\dot{\theta}^2 = -b_2\dot{\beta} \tag{17}$$

3. KAYAN KİPLİ KONTROL TASARIMI VE KONTROLÜ

Kayan kipli kontrol yüksek hızlı, doğrusal olmayan bir geri besleme ile önceden belirlenen bir kayma yüzeyi üzerinde zamanda süreksiz bir şekilde anahtarlama yapılarak elde edilen, belirgin, doğrusal olmayan, dayanıklı bir kontrol yöntemidir [17]. Bir sisteme ait parametreler değişken olduğu veya modellenemediği için tam ölçülemiyorsa ve sisteme dışarıdan etki eden bozucular varsa kayan kipli kontrol bunların sınır değerleri bilindiği sürece dayanıklı kontrol sağlar.

Kayan kipli kontrolör tasarımı süreci iki adımlı bir yordam olarak düşünülebilir. Bu adımlar sırasıyla; kayma yüzeyinin belirlenmesi ve belirlenen kayma yüzeyine ulaşmayı sağlayan bir kontrol kuralının elde edilmesidir. Kayma yüzeyine ulaşmak için geçen süre ulaşma zamanı ve faz yörüngesinin bu bölgesi ise ulaşma kipi olarak adlandırılır. Ulaşma kipinde sistem, parametre belirsizlikleri ve dış bozuculara karşı duyarlıdır [18]. Kayma yüzeyine ulaşıldığı zaman sistem yörüngelerinin parametre belirsizlikleri ve dış bozuculara karşı duyarsız olduğu kayma kipi başlar. Kayan kipli kontrol uygulamalarından meydana gelen çatırtı, sistemin ulaşmak istediği denge noktası etrafında meydana gelen osilasyonlardan kaynaklanır ve sistemin modellenmemiş yüksek frekanslı dinamiklerini ortaya çıkarır.

$\ddot{\beta}$ denklem (13)'den çekilirse aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\ddot{\beta} = \frac{\{(m_1 L_1^{\,2} + m_2 L_1^{\,2})\cos^2\theta + I_1\}\ddot{\theta} - (m_1 + m_2)L_1^{\,2}\sin\theta\cos\theta\dot{\theta}^2}{m_2 L_1 \ell_2 \cos\theta\cos\beta} + \frac{m_2 L_1 \ell_2 \sin\beta\cos\theta\dot{\beta}^2 + b_1\dot{\theta} - u(t)}{m_2 L_1 \ell_2 \cos\theta\cos\beta} \tag{18}$$

$$f(t) = \frac{\{(m_1 L_1^{\,2} + m_2 L_1^{\,2})\cos^2\theta + I_1\}\ddot{\theta}}{m_2 L_1 \ell_2 \cos\theta\cos\beta} - \frac{(m_1 + m_2)L_1^{\,2}\sin\theta\cos\theta\dot{\theta}^2}{m_2 L_1 \ell_2 \cos\theta\cos\beta} + \frac{m_2 L_1 \ell_2 \sin\beta\cos\theta\dot{\beta}^2 + b_1\dot{\theta}}{m_2 L_1 \ell_2 \cos\theta\cos\beta} \tag{19}$$

Denklem (19) daki gibi f(t) tanımlanırsa; bu denklem kullanarak $\ddot{\beta}$'yı aşağıdaki gibi yazarız.

$$\ddot{\beta} = f(t) + u_{eq} \tag{20}$$

Denklem (20) de verilen u_{eq} eşdeğer kontrol kuralını ifade etmektedir. Denklem (21), istenilen yörüngeyi; denklem (22) ise hatayı ifade etmektedir.

$$\beta_d = \pi \tag{21}$$

$$\tilde{\chi} = \beta - \beta_d = \beta - \pi \tag{22}$$

Kayma yüzeyi denklem (23)' deki gibi tanımlanmıştır. Buradaki λ sabit bir katsayıdır.

$$S = \dot{\tilde{\chi}} + \lambda\tilde{\chi} = \dot{\beta} + \lambda(\beta - \pi) \tag{23}$$

Kayma şartı $\dot{S} = 0$ ' dır. Buradan u_{eq} çekilirse denklem (24) elde edilir.

$$u_{eq} = \frac{\{(m_1 L_1{}^2 + m_2 L_1{}^2)\cos^2\theta + I_1\}\ddot{\theta} - (m_1 + m_2)L_1{}^2 \sin\theta\cos\theta\dot{\theta}^2}{m_2 L_1 \ell_2 \cos\theta\cos\beta}$$
$$+ \frac{m_2 L_1 \ell_2 \sin\beta\cos\theta\dot{\beta}^2 + b_1\dot{\theta}}{m_2 L_1 \ell_2 \cos\theta\cos\beta} - \lambda\dot{\beta} \quad (24)$$

Kayan kipli kontrol tasarımına göre u(t) kontrol sinyali denklem (25) de olduğu gibi ifade edilir.

$$u(t) = u_{eq} - Ksign(S) \quad (25)$$

Denklem (23) ve (24), denklem (25)'de yerine konulursa kontrol sinyali denklem (26)'da olduğu gibi elde edilir. Denklem (25)' deki K sabit bir katsayı olup denme yanılma tekniği ile bulunmuştur.

$$u(t) = \frac{\{(m_1 L_1{}^2 + m_2 L_1{}^2)\cos^2\theta + I_1\}\ddot{\theta} - (m_1 + m_2)L_1{}^2 \sin\theta\cos\theta\dot{\theta}^2}{m_2 L_1 \ell_2 \cos\theta\cos\beta}$$
$$+ \frac{m_2 L_1 \ell_2 \sin\beta\cos\theta\dot{\beta}^2 + b_1\dot{\theta}}{m_2 L_1 \ell_2 \cos\theta\cos\beta} - \lambda\dot{\beta} - Ksign(\ddot{\beta} + \lambda.\dot{\beta}) \quad (26)$$

$\lambda = 4,\ K = 20000$ alınmıştır.

Ekde dönel tts sistemi için kayan kipli kontrolün simulink uygulaması verilmiştir.

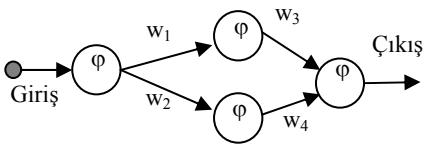
4. YAPAY SİNİR AĞLI KAYAN KİPLİ KONTROL

Yapay sinir ağı kontrol prensipleri ile kayan kipli kontrol teorilerinin eksikliklerini düzeltme imkanı vardır. Yapay sinir ağı kayma kipli kontrol ile kullanıldığında oldukça üstün bir performans gösterir [19]. Bu çalışmada denklem (27)'deki gibi kayan kipli kontroldeki sign fonksiyonu yerine yapay sinir ağı yapısı kullanılarak kontrol sinyalinin keskin değerler yerine ara değerlerden oluşması sağlanmaktadır.

$$u(t) = u_{eq} - K[YSA(S)] \quad (27)$$

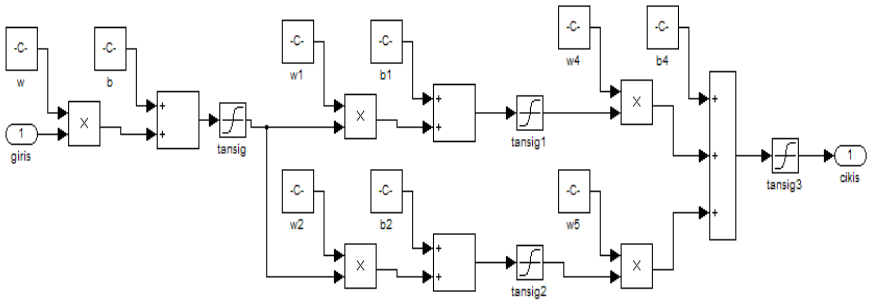
Yapay sinir ağı yapısı için Şekil 2'de görüldüğü gibi çok katmanlı ileri beslemeli bir yapay sinir ağı modeli oluşturulmuştur. Giriş ve çıkış katmanlarında birer hücre, ara katmanda ise iki hücre kullanılmıştır. Hücreler için aktivasyon fonksiyonu olarak çift yönlü sigmoid (tanh) fonksiyonu seçilmiştir. Bu fonksiyon, türevi alınabilir, sürekli ve doğrusal olmayan bir fonksiyon olması nedeniyle doğrusal olmayan problemlerin çözümünde tercih edilebilmektedir. Yapay sinir ağı yapısında yer alan w ağırlık katsayılarının seçimi ise tasarımcının bilgi ve tecrübesine bağlı olarak deneme ve yanılma tekniği ile seçilebilir. YSA yapısının girişine denklem (28) de kayma yüzeyini tanımlayan ifade gönderilmekte ve çıkışında ise denklem (27)'nin ikinci teriminde yer alan YSA(S) kontrol sinyali üretilmektedir.

$$S = \ddot{\beta} + \lambda.\dot{\beta} \quad (28)$$



Şekil 2. Yapay Sinir Ağı Modeli

Ekde dönel tts sistemi için yapay sinir ağlı kayan kipli kontrolün simulink benzetimi verilmiştir. Kullanılan yapay sinir ağı modelinin simulink benzetimi Şekil 3'de gösterilmiştir.

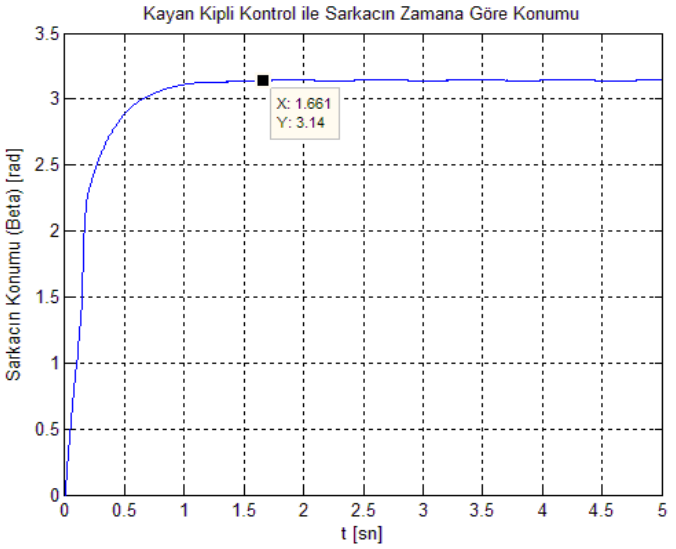


Şekil 3. Yapay Sinir Ağının Simulink Benzetimi

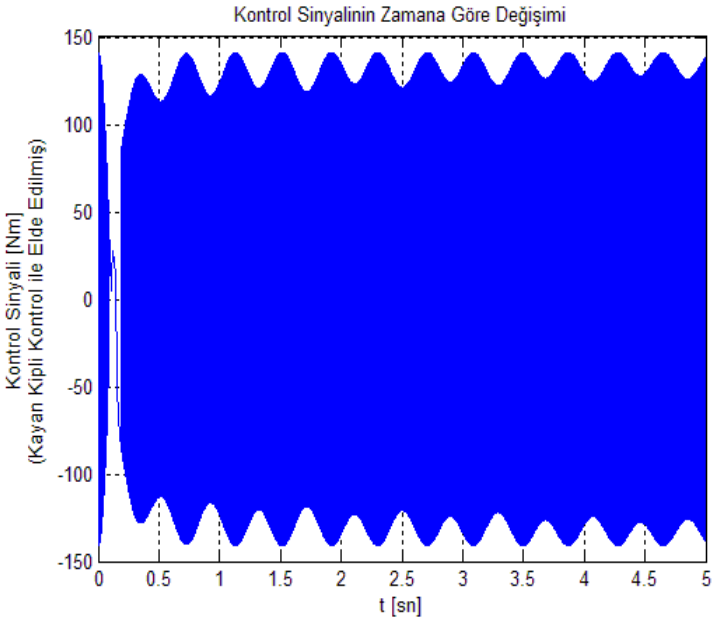
5. SONUÇLAR

Şekil 4 ve Şekil 6'da kayan kipli kontrol ve yapay sinir ağlı kayan kipli kontrol ile elde edilen cevaplar karşılaştırıldığında, yapay sinir ağlı kayan kipli kontrol daha erken sürede istenilen sonuca ulaşmaktadır. Şekil 5'de görülen kayan kipli kontrol sinyali uygulamada çatırtı dediğimiz problemlere yol açarken, Şekil 7'deki yapay sinir ağlı kayan kipli kontrol sinyali daha uygulanabilir yapıdadır. Elde edilen cevaplara göre yapay sinir ağlı kayan kipli kontrol daha iyi bir sonuç vermiştir.

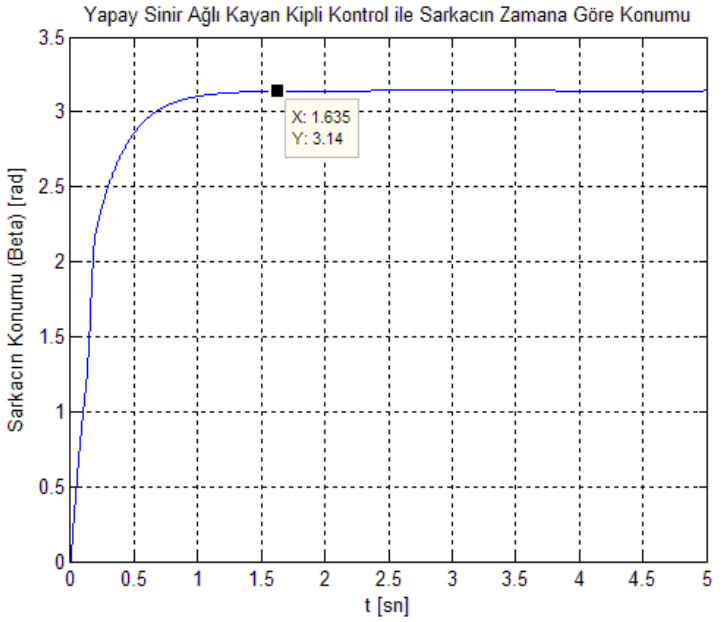
Bu çalışma ile kayan kipli kontrolün en büyük dezavantajı olan çatırdama probleminin, yapay sinir ağı tekniği ile iyileştirilebileceği ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar deneme yanılma tekniği ile elde edilmiştir. Herhangi bir optimizasyon tekniği ile parametrelerin tespit edilmesi halinde çok daha iyi sonuçlar ortaya çıkabilecektir.



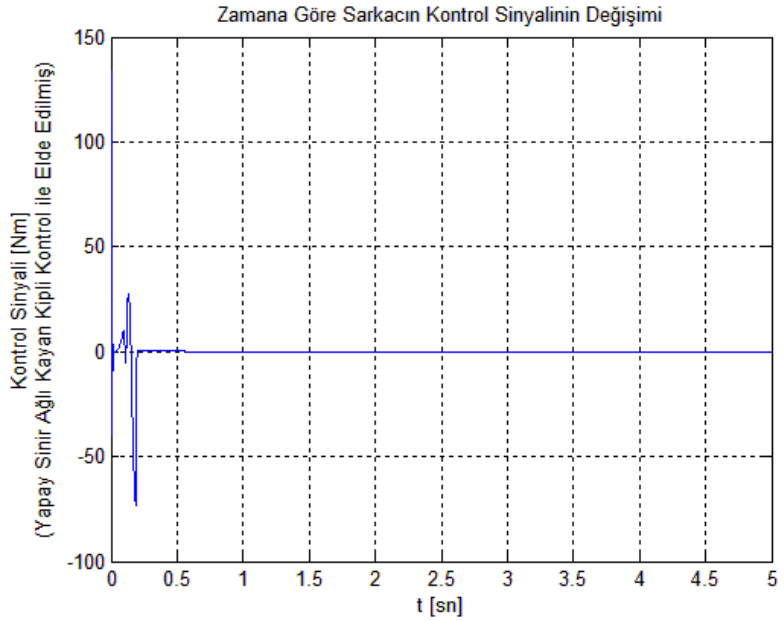
Şekil 4. Kayan kipli kontrol ile sarkacın zamana göre konumu



Şekil 5. Kayan Kipli Kontrol Sinyali



Şekil 6. Yapay sinir ağlı kayan kipli kontrol ile sarkacın zamana göre konumu



Şekil 7. Yapay sinir ağlı kayan kipli kontrol sinyali

KAYNAKLAR / REFERENCES

[1] Bugeja, M., "Non-Linear Swing-Up and Stabilizing Control of an Inverted Pendulum System", EUROCON, Ljubljana, Slovenia (2003).

[2] Stimac, A.K., "Standup and Stabilization of the Inverted Pendulum", Massachusetts Institute of Technology, 1999.

[3] Zhong, W., Röck, H., "Energy and passivity Based control of the double inverted pendulum on a cart", IEEE Conference on Control Applications, 2001.

[4] Krishen, J., Becerra, V.M., "Efficient Fuzzy Control of a Rotary Inverted Pendulum Based on LQR Mapping", IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2701-2706, Germany (2006).

[5] Craig, K., Awtar, S., "Inverted Pendulum Systems: Rotary And Arm-Driven A Mechatronic System Design Case Study", Mechatronics, 12, 357-370, 2001.

[6] Yasunobu, S., Mori, M., "Swing up fuzzy controller for inverted pendulum based on a human control strategy", Sixth IEEE International Conference on Fuzzy Systems**,** 3, 1621 - 1625, 1997.

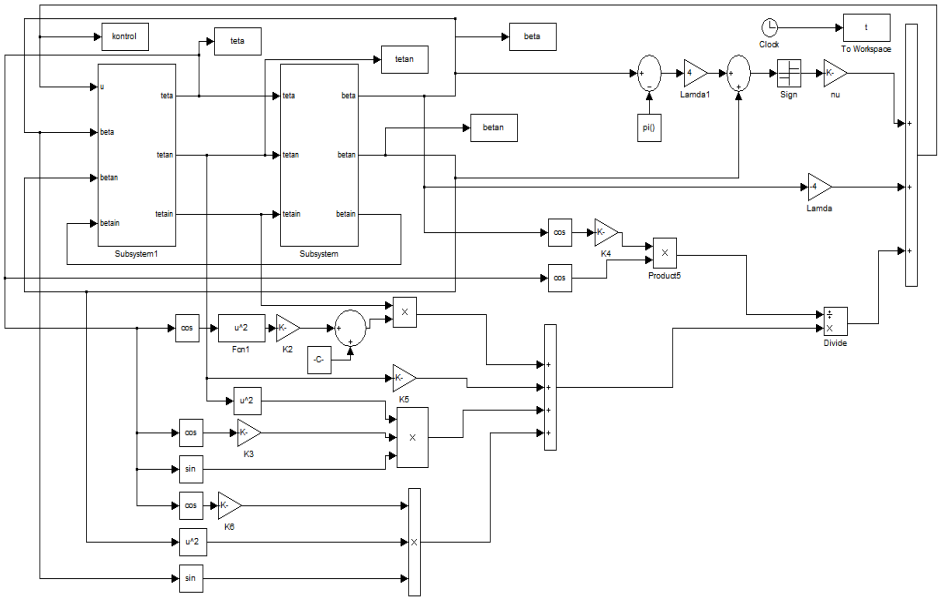
[7] Muskinja, N., Tovornik, B., "Swinging Up and Stabilization of a Real Inverted Pendulum." IEEE Transactions on Industrial Electronics, 53, 2, 631-639, 2006.

[8] Iordanou, H. N., Surgenor, B. W., "Experimental Evaluation of the Robustness of Discrete Sliding Mode Control versus Linear Quadratic Control", IEEE Trans. Contr. Syst. Technology, 5, 2, 254–260, 2001.

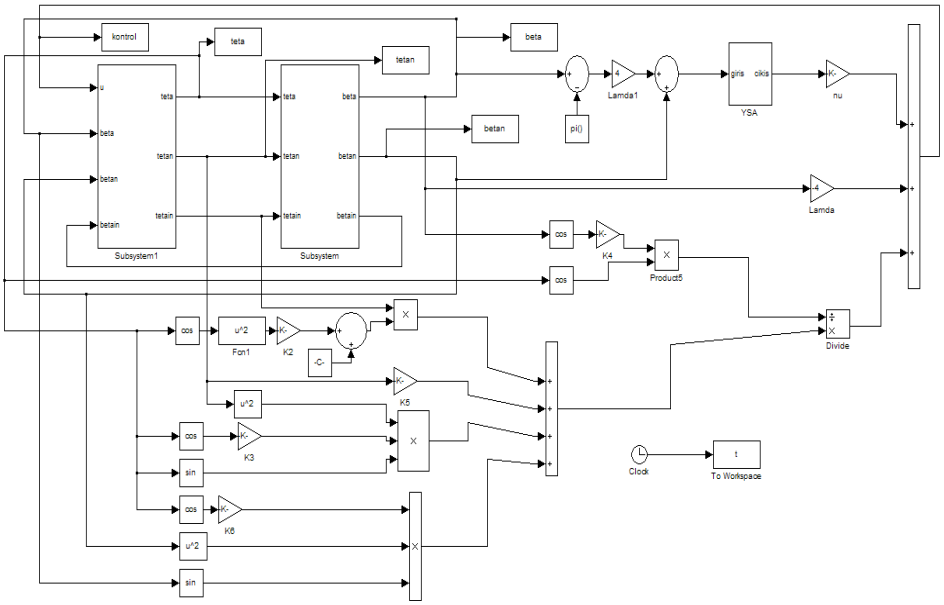
[9] Chang, W., Hwang, R., Hsieh, J., "A self-tuning PID control for a class of nonlinear Systems Based on the Lyapunov approach", Journal of Process Control, 12, 2, 233-242, 2002.

[10] Koga, M., Kawakami, S., "Real-time remote control system in Java and its application to swing up control of inverted pendulum", The Society of Instrument and Control Engineers Annual Conference (SICE 2003), 1, 358-361, Ağustos, 2003.
[11] Mohandas, K P, and Paritala, S., "Simulation of inverted pendulum using neural Networks for identification", Proceedings of the 4th FAE International Symposium, Lefke Avrupa Üniversitesi, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti, 30 Kasım-2 Aralık, 2006.
[12] Lo,J.C., and Kuo, YH., "Decoupled Fuzzy Sliding-Mode Control", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 6, 3, Ağustos, 1998.
[13] El-Hawwary, M.I., Elshafei, A.L., Emara, H.M., Fattah, H.A.A., "Adaptive Fuzzy Control of the Inverted Pendulum Problem", IEEE Transactions on Control Systems Technology, 14, 6, 1135–1144, 2006.
[14] Ortega, R., Spong ,W., Estern, F.G., Blankenstein G., "Stabilization of a Class of Underactuated Mechanical Systems via Interconnection and Damping Assignment", IEEE Transactions on Automatic Control, 47, 8, 1218–1233, 2002.
[15] Awtar S.. et al., "Inverted pendulum Systems: rotary and arm driven – a mechatronic system design case", Pergamon Pres, Mechatronics, 357-370, 2002.
[16] Yan, Q., "Output Tracking of Underactuated Rotary Inverted Pendulum by Nonlinear Controller", Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii, USA, December, 2003.
[17] Young, K.D., Utkin, V.I., Ozguner, U., "A Control Engineer's Guide to Slding Mode Control", IEEE Transactions on Control Systems Technology, 7, 3, 328-342, 1999.
[18] Edwards , C., Spurgeon, S. K., "Sliding Mode Control: Theory and Applications", Taylor and Francis, London, İngiltere, 1998.
[19] Zadeh , L.A., "Outline of a New Approach to the Analys of Complex Systems and Decision Processes", IEEE Trans. Syst, Mon, Cybern, SMC-3, 1, 28-44, 1973.

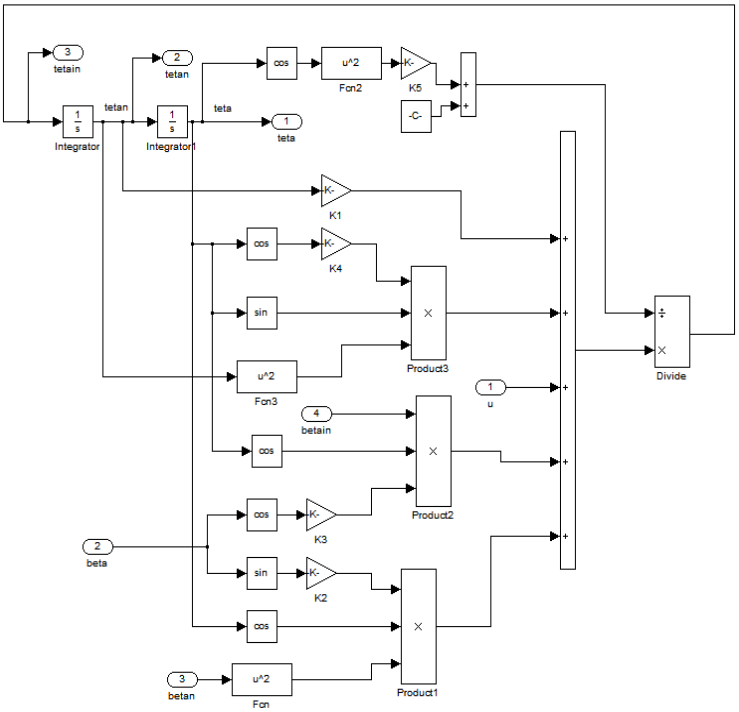
EKLER



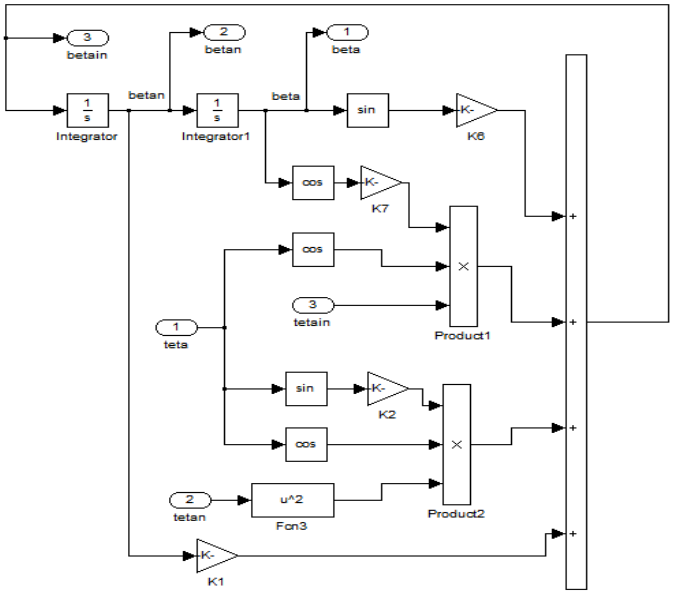
Şekil 8. Dönel tek ters sarkaç sisteminin kayan kipli kontrol simulink benzetimi



Şekil 9. Dönel tek ters sarkaç sisteminin yapay sinir ağlı kayan kipli kontrol simulink benzetimi



Şekil 10. Dönel tek ters sarkaç sisteminin simulink subsystem uygulaması



Şekil 11. Dönel tek ters sarkaç sisteminin simulink subsystem1 uygulaması

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Makaleleri
/
Electrical-Electronics Engineering Articles