



Bulanık yapay sinir ağıyla dört serbestlik dereceli bir robot kolunun kontrolü

Şinasi ARSLAN^{1*}, Mehmet KORKMAZ¹

¹Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, SAKARYA

07.05.2012 Geliş/Received, 15.11.2012 Kabul/Accepted

ÖZET

Bu çalışmada, dört serbestlik dereceli bir robot kolu için bulanık yapay sinir ağ tabanlı hesaplanan tork kontrolü önerilmiştir. Bu tür dört mafsallı robot kolları çoğunlukla endüstriyel uygulamalarda kullanıldığından yüksek hareket ve hassasiyetlik kabiliyetlerine sahip olup yüksek performanslı olmaları istenir. Bunun yanı sıra yüksek hızda çalışma ve robot kollarına uygulanan dış yükler, robot kontrolünde önemli bir rol oynamaktadır. Bu amaçla, robotun verilen yörüngeleri en iyi şekilde takip edebilmesi için hesaplanan tork yöntemi geliştirilmiş ve bu yöntemin bulanık yapay sinir ağıyla birleşimi olan kontrolörün geri beslemeli kontrolünün iyileştirilmesi sağlanmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları, önerilen kontrol yönteminin oldukça başarılı olduğunu ispatlamıştır.

Anahtar kelimeler: Bulanık yapay sinir ağları, dört serbestlik dereceli robot kolu, hesaplanan tork yöntemi, düz ve ters kinematik, geri beslemeli kontrol.

Four degree freedom robot arm with fuzzy neural network control

ABSTRACT

In this study, the control of four degree freedom robot arm has been realized with the computed torque control method.. It is usually required that the four jointed robot arm has high precision capability and good maneuverability for using in industrial applications. Besides, high speed working and external applied loads have been acting as important roles. For those purposes, the computed torque control method has been developed in a good manner that the robot arm can track the given trajectory, which has been able to enhance the feedback control together with fuzzy neural network control. The simulation results have proved that the computed torque control with the neural network has been so successful in robot control.

Key words: Fuzzy neural networks, four degree freedom robot arm, computed torque control, forward and inverse kinematics, feedback control.

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1. GİRİŞ

Robot kolları, endüstriyel uygulamalarda, malzeme taşımada ve sürekli imalat sistemlerinde sık olarak kullanılmaktadırlar. Robot kolu sabit bir düzleme bağlı dönel mafsallardan oluşan açık bir kinematik zincirdir. Mafsallı robot kollarının avantajları, yüksek hareket kabiliyetlerine ve diğer robot manipülatör yapılarına oranla daha geniş bir çalışma uzayına sahip olmalarıdır [1]. Literatürde uygulanan robot yapıları incelendiğinde çoğunlukla iki veya üç serbestlik dereceli robot manipülatörlerinin kullanıldığı görülmektedir. Dört serbestlik dereceli robot kol uygulamaları literatürde mevcut olmasına rağmen [2] çok yaygın bir uygulama alanına sahip değildir. Bunun sebebi, robot kollarında kol sayısı arttıkça kinematik ve dinamik hesaplamaların daha da karmaşık hale gelmesidir.

Hesaplanan tork yöntemi, robot kontrolünde sık olarak kullanılan bir kontrol yöntemidir. Pfeiffer ve ark. [3], Puma 500 tipi manipülatöre hesaplanan tork yöntemi uygulamışlardır. Robot kolu dinamiğinin hesaplanmasında ve kontrolünde karşılaşılan zorluklar, araştırmacıları daha yüksek performanslı kontrol yöntemlerinin araştırılmasına yöneltmiştir.

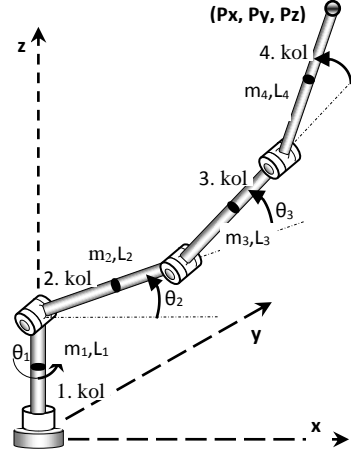
Son yıllarda yapay sinir ağları bilim ve endüstri alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bulanık mantık ve sinir ağları aynı uygulama içinde birlikte kullanıldığında bulanık sinirsel sistem (FNN) olarak adlandırılır. Takagi ve Hayashi 1988'li yıllarda böyle sistemleri ilk olarak tanımlamışlardır [4]. Birbirinin tamamlayıcısı olan bulanık mantık ve sinir ağlarının başarılı birleşimleri araştırmacılar için cazip hale gelmiştir. Farklı araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda FNN'nin başarısının onu oluşturan bileşenlerin tek başına kullanıldığı uygulamalardan daha başarılı olduğunu göstermişlerdir [5].

Hesaplanan tork yöntemi ile yapılan robot kontrol çalışmaları incelendiğinde, geri besleme kontrolünün çoğunlukla geleneksel PID kontrolü ile gerçekleştiği görülmektedir [4,6-8]. Bu çalışmada, hesaplanan tork kontrol yöntemi ve verilen referans modeline ilaveten bulanık yapay sinir ağı ile oluşturulan (FNNCTC) kontrolör tanıtılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmalarıyla, FNNCTC'nin performans sonuçları irdelenmiştir.

2. FİZİKSEL SİSTEMİN MODELLENMESİ

Bu çalışmada kullanılan bir taban eklemi üzerine üç kolun yerleştirilmesiyle oluşturulmuş dört serbestlik derecesine sahip bir robot kolu yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu robotun bütün eklemleri dönel olduğundan, mafsallı robot kolu özelliğini taşımaktadır.

Şekil 1'de verilen modelde; $\{m_1, m_2, m_3, m_4\}$ kol kütlelerini, $\{L_1, L_2, L_3, L_4\}$ kol uzunluklarını ve $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4\}$ ise kolların dönme açılarını (bir önceki kola göre) ifade etmektedir. Robot koluna ait fiziksel özellikler Tablo 1'de verilmiştir.



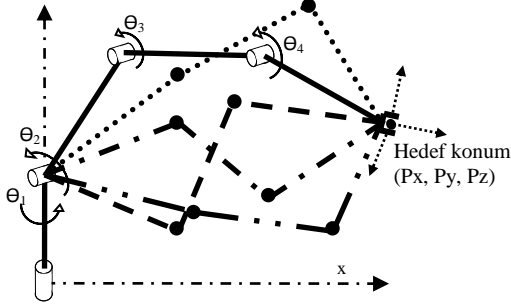
Şekil 1. Dört serbestlik dereceli robot kolunun fiziksel modeli.

Robot kol hareketlerinin modellenmesi amacıyla öncelikle düz ve ters kinematik denklemlerinin çıkarılması gerekmektedir. Düz kinematik işlemi, eklem açıları verilen bir robotun uç noktasına ait konum ve oryantasyonun sabit bir referans sistemine göre belirlenmesi işlemidir. Robot kolunun (P_x, P_y, P_z) uç noktasının konumu Şekil 2'de gösterildiği gibi $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4\}$ açı seti ile hesaplanır. Ters kinematik işlemi ise bir robot kolunun uç noktasına ait koordinatların verilmesi durumunda robot kolunun gerekli konuma ve oryantasyona ulaşmasını sağlayacak olan eklem açılarının bulunması işlemidir.

Tablo 1. Robot kolunun fiziksel özellikleri.

Fiziksel Özellikler	Sembol	Değeri
1. Kolun yarıçapı	R	0,05 m
1. Kolun kütlesi	m_1	1 kg
2. Kolun kütlesi	m_2	1 kg
3. Kolun kütlesi	m_3	1 kg
4. Kolun kütlesi	m_4	1 kg
1. Kolun uzunluğu	L_1	0,5 m
2. Kolun uzunluğu	L_2	0,5 m
3. Kolun uzunluğu	L_3	0,5 m
4. Kolun uzunluğu	L_4	0,5 m
1. Kolun sürtünme katsayısı	b_1	0,5 N/m/s
2. Kolun sürtünme katsayısı	b_2	0,5 N/m/s
3. Kolun sürtünme katsayısı	b_3	0,5 N/m/s
4. Kolun sürtünme katsayısı	b_4	0,5 N/m/s
Yer çekimi ivmesi	g	9,81 m/s ²
1. Kolun atalet momenti	I_1	$\frac{1}{12}(m_1 L_1^2)$
2. Kolun atalet momenti	I_2	$\frac{1}{12}(m_2 L_2^2)$
3. Kolun atalet momenti	I_3	$\frac{1}{12}(m_3 L_3^2)$
4. Kolun atalet momenti	I_4	$\frac{1}{12}(m_4 L_4^2)$
Açıların başlangıç değerleri	$[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]$	$[0, 0, 0, 0]^0$

Şekil 2’de verilen robot kolu aşırı serbestlik dereceli bir robot kolu olduğundan verilen bir P(x,y,z) konumu için sonsuz sayıda çözüm üretilebilir. Bu sebeple, kollardan birinin kontrol kolu olarak seçilmesi ve açısal değerlerinin kullanıcı tarafından yerine getirilmek istenen göreve göre tayin edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada 4. kol, kontrol kolu olarak seçilmiştir.



Şekil 2. Dört serbestlik dereceli robot kolumun verilen noktaya ulaşması.

Dört serbestlik dereceli robot kolumun dinamik modelinin çıkarılmasında Lagrange-Euler yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, bir sistemin toplam enerjisinden yola çıkarak hareket denklemlerinin elde edilmesini amaçlar [13]. Lagrange-Euler denklemi,

$$Q_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i}, \quad i=1, 2, \dots, n; \quad (1)$$

$$L = K - P$$

ifade edilir. Burada; q_i (i) inci eklemin genelleştirilmiş koordinatları, \dot{q}_i (i) inci eklemin genelleştirilmiş hızları, Q_i genelleştirilmiş (i) inci kuvvet, L Lagrange fonksiyonu, K toplam kinetik enerjiyi, P toplam potansiyel enerjiyi ve D toplam kayıp enerjiyi gösterir. Robotun toplam kinetik enerjisi,

$$K = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} I \omega_i^2 \right) \quad (2)$$

denklemi ile elde edilir. Burada; ω_i (i) inci eklemin açısal hızı, v_i (i) inci eklemin ağırlık merkezinin doğrusal hızı ve m_i (i) inci eklemin kütlesidir. Robot kolumun toplam potansiyel enerjisi,

$$P = m_2 g \left(L_1 + \frac{L_2}{2} \sin \theta_2 \right) + m_3 g (L_1 + L_2 \sin \theta_2 + \frac{L_3}{2} \sin \theta_3) + m_4 g (L_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3 + \frac{L_4}{2} \sin \theta_4) \quad (3)$$

denklemi ile bulunur. Robot kolumun toplam sürtünme kayıp enerjisi,

$$D = \frac{1}{2} b_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} b_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} b_3 \dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{2} b_4 \dot{\theta}_4^2 \quad (4)$$

denklem takımı ile ifade edilir. Burada; b_i (i) inci eklemin sürtünme katsayısıdır. Elde edilen enerji ifadeleri Denklem 1’de kullanarak,

$$\tau = M(q) \ddot{q} + H(q, \dot{q}) \dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d; \quad (5)$$

$$N(q, \dot{q}) = H(q, \dot{q}) \dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d;$$

$$\tau = M(q) \ddot{q} + N(q, \dot{q}) \dot{q};$$

doğrusal olmayan bir diferansiyel denklem takımı elde edilir. Burada; $M(q)$ $[n \times n]$ boyutlu kütle matrisini, $H(q, \dot{q})$ $[n \times 1]$ boyutlu merkezkaç ve Coriolis matrisini, $F(\dot{q})$ $[n \times 1]$ boyutlu sürtünme matrisini, $G(q)$ $[n \times 1]$ boyutlu yerçekimi matrisini, τ_d bozucu etkileri ve τ kollara uygulanan torku ifade etmektedir.

3. HESAPLANAN TORK KONTROL YÖNTEMİ

Tasarlanan kontrolör, kolun hareketi boyunca referans modelden gelen her bir dönöl mafsala ait referans yörüngeleri takip edecek mafsallara ait torkları üretmektedir. Kontrolörler, referans yörüğe ve robot kolu dinamik modelinden elde edilen mafsal açı değerlerini girdi olarak alır ve mafsallara uygulanacak tork değerlerini çıktı olarak üretir.

Hesaplanan tork kontrol (CTC) bir model tabanlı kontrol sistemidir. Robot kolumun her bir mafsalı için gerekli olan torklar Denklem 5’den hesaplanır. Sistemin ters kinematığından elde edilen \ddot{q}_d istenen ivmenin kontrolör ile düzeltilmesi sonucu \ddot{q}_u birim atalet ivmesi oluşur. Her bir mafsala uygulanan torklar bu kontrol sinyali ile ayarlanan hesaplanan tork sistemine giriş sinyali olarak verilir.

Burada strateji iki kademelidir. İlk olarak doğrusal sistem tasarım teknikleri kullanılarak takip hatasını

iyileştirecek bir $u(t)$ bulunacak ve daha sonra gerekli kol torkları hesaplanacaktır. Bu durum,

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_d + u) + N(q, \dot{q}) \quad (6)$$

ifade edilir. Bu arzu edilen yörüngeyi takibini garantileyen, doğrusal olmayan bir kontrol kuralıdır. Robot kolunun takip etmesi istenen yörüngeyi önceden tanımlanacağı gerçeğinden yola çıkarak takip hatası,

$$e(t) = q_d(t) - q(t) \quad (7)$$

hesaplanır. Denklem 7'de verilen ifadenin iki kere türevi alınır, Brunovsky kanonik formu [8], $x = [e^T \ \dot{e}^T]^T$ ifadesine bağlı olarak,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (8)$$

elde edilebilir. Denklem 6'dan yola çıkarak kontrol sinyali,

$$u = \ddot{q}_d + M^{-1}(q)(N(q, \dot{q}) - \tau) \quad (9)$$

yazılabilir. Denklem 5'de verilen ve doğrusal olmayan ifadenin, Denklem 8'de verilen doğrusal dinamik denkleme eşdeğer kılan (τ) torkun hesaplanmasına dayanır.

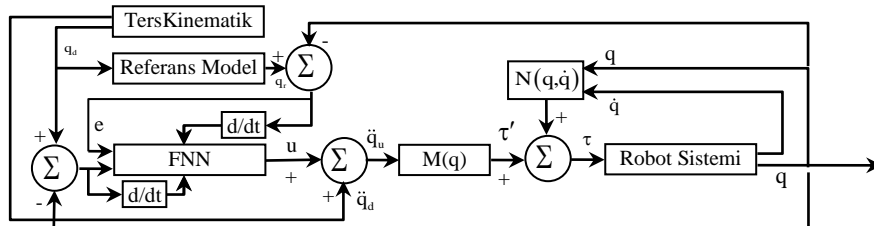
3.1 PID Tabanlı Hesaplanan Tork Yöntemi

$u(t)$ kontrol sinyalinin hesaplanması için PID tabanlı hesaplanan tork kontrol (PIDCTC) yöntemi kullanılırsa, kol torkları,

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_d + K_v \dot{e} + K_p e + K_i \int e dt) + N(q, \dot{q}); \quad (10)$$

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_d + K_v \dot{e} + K_p e + K_i \int e dt)$$

ifade edilebilir. Buradan yola çıkarak takip hatası,



Şekil 3. Hesaplanan tork kontrol sistemi.

$$u = K_v \dot{e} + K_p e + K_i \int e dt \quad (11)$$

elde edilir.

PIDCTC yöntemi üzerine yapılan bazı çalışmalar[6], PID kontrolünün yüksek hata takibinde yüksek kazanç değerleri gerektirdiğini ve sistemi zorladığını göstermiştir. Bu sebeple, PID dışında robot kontrolünde sık olarak tercih edilen bulanık sinirsel ağ tabanlı kontrol yöntemi uygulanacaktır.

3.2. Bulanık Sinirsel Ağ Tabanlı Hesaplanan Tork Kontrol Yöntemi

Bu çalışmada, bulanık yapay sinirsel ağ tabanlı hesaplanan tork kontrol yönteminde bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının birleşimine referans model yapısı [8] ilavesi ile dörtlü yeni bir (FNNCTC) kontrolör önerilmiştir. Robot kolu kontrolünde bu dörtlü birleşimin, kendi aralarındaki etkileşim ile birbirlerinin eksiklerini tamamlamaları sayesinde daha yetenekli yeni bir kontrolör yaklaşımı getireceği düşünülmektedir. Sinir ağları ile sunulan bilgideki anlaşılma zorluğu, bulanık mantığın sözel terimleri ve eğer-o halde kuralları ile ortadan kaldırılabilir. Bu sayede anlaşılabilirliği kolay, sözel dille ifade edilebilen çıktılar elde edilerek bulanık mantık yardımıyla sinirsel ağlara öğrenme yeteneği kazandırılabilir[9]. Özetle, FNNCTC'de bulanık mantık kavramları ile klasik sinir ağlarının bilgi sunum yetenekleri zenginleştirilmektedir.

Sadece robot dinamiğine bağlı olan hesaplanan tork kontrol yöntemi (CTC) ile geleneksel kontrolörün istenen performansı yakalaması zordur. Bu çalışmada, FNN ile CTC birleşiminden ortaya çıkan sinerjiyle Şekil 3'de gösterilen bir FNNCTC kontrolörü ile robot kolunun yörünge kontrolü gerçekleştirilmiştir. FNN gibi öğrenen kontrolörün yörünge takibinde kullanımı giderek artmaktadır [10].

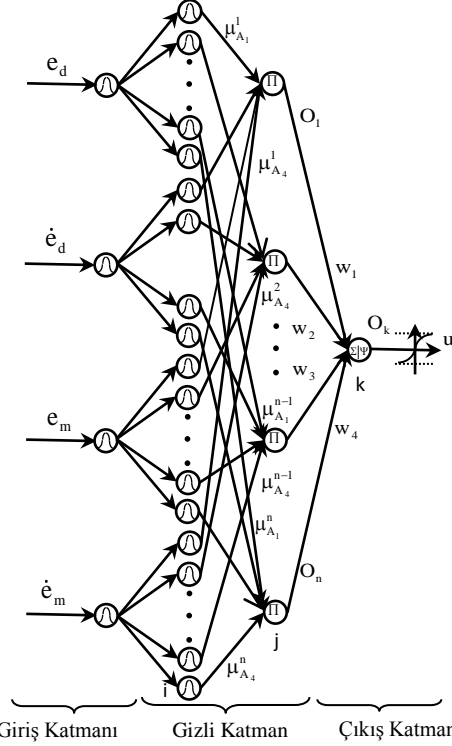
Bulanık mantık sisteminin yapay sinir ağı kullanılarak ifade edilmesi, yapay sinir ağının öğrenme yeteneği sayesinde bulanık mantık parametrelerinin otomatik olarak ayarlanması avantajını sağlar. Robot kolu kontrolü amacı ile referans model ve CTC yapısı altındaki FNN kontrolörü, sistemin ters kinematikinden ve ters dinamikinden robot kolunun her bir mafsalına ait dönme açısının hatasını ve hata değişimini giriş olarak alıp $u(t)$ düzeltici kontrol çıktısını oluşturmaktadır. Bu önerilen FNN yaklaşımı Şekil 4’de verilmektedir.

Şekilde görüldüğü gibi burada bir giriş, bir çıkış ve iki gizli katman mevcuttur. İlk katmanda giriş değeri bulanıklaştırılır. Bulanıklaştırma işlemi için bulanıklaştırıcı sinirsel bulanık ağ yapısı kullanılmaktadır. Daha sonra bulanık girişler sinirsel bulanık ağa uygulanmaktadır. İkinci katman kural katmanı olarak kullanılmaktadır. Üçüncü katman kural sonuç katmanıdır. Dördüncü katman ise durulaştırma katmanıdır. Önerilen FNN yaklaşımının açıklanması her bir katman için aşağıdaki gibidir:

- **1. Katman:** Robotun her bir mafsalı için $\{e\}$ konum hatası ve $\{\dot{e}\}$ konum hatası değişimi olmak üzere hem CTC hem de referans modele ait dört tane düğüm (nöron) vardır. Her düğüm bir giriş değerine karşılık gelmektedir. Bu katmanda alınan veriler herhangi bir işleme veya değişikliğe tabi tutulmaksızın ikinci katmana iletilirler. Bu katmana giriş katmanı adı verilir.
- **2. Katman:** Her bir düğüm, katman 1’deki her bir giriş değerinin sözel ifadesine karşılık gelmektedir. Çıkış bağlantıları her bir giriş değerinin bulanık kümedeki derecesi olan üyelik değerlerini temsil etmektedir. Her bir bulanık verinin hangi kümeye ait olduğunu belirler. Her bir düğüm için bulanık işlevci olarak,

$$\mu_{A_i} = e^{-\frac{(x_i - m_{ji})^2}{\sigma_{ij}^2}} \quad (12)$$

Gauss tipi üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Burada; 2. katmandaki (i) inci düğümün $x_i \in \{e_d, \dot{e}_d, e_m, \dot{e}_m\}$ giriş değişkeni ile 3. Katmandaki (j) inci düğümün m_{ji} Gauss fonksiyonunun merkezini ve σ_{ij} Gauss fonksiyonunun genişliğini ifade eder. m_{ji} ve σ_{ij} terimleri değiştirilerek aynı düğüm için farklı sayıda üyelik fonksiyonu elde etmek mümkündür. Bu katman bulanıklaştırma katmanıdır.



Şekil 4. Bulanık mantık tabanlı yapay sinir ağı yapısı.

- **3. Katman:** Her bir düğüm bir bulanık mantık kuralının ön koşul kısmını temsil eder. Girişlerine gelen işaretleri çarpıp çarpım sonuçlarını bir veri seti içerisinde en küçük olanı,

$$O_j = \min [\mu_{A_i} (x_i)] \quad (13)$$

ile bulunur. j 'inci düğümünün çıkışını temsil etmek şartıyla kuralın ateşleme gücü,

$$O_j = \prod_i \mu_{A_i} (x_i) \quad (14)$$

ile ifade edilir. Bu katman kural çıkış katmanıdır.

- **4. Katman:** Tek düğüme gelen işaretler toplanarak kontrol işareti oluşturulur. İşlevi durulamadır. FNN çıkışı,

$$O_k = \sum_{j=1}^n w_{jk} O_j \quad (15)$$

ile ifade edilir. Burada; w_{jk} bağlantı ağırlığını j inci kuralın çıkış etki gücüdür. Bu katman kural sonuç katmanıdır.

FNN'deki her katmandaki işlem ağırlık katsayıları çıkış başarımına bağlı olarak giriş katmanlarına doğru geriye yayılma öğrenme kuralı ile yapılır. Gözlemcili eğitim düşüşü yöntemi kullanarak yapılan geriye yayılma öğrenmesi için önce performans ölçütü,

$$J_m = \frac{1}{2}(\theta_m - \theta)^2; J_d = \frac{1}{2}(\theta_d - \theta)^2 \quad (16)$$

tanımlanır. Burada; $\{\theta_m, \theta_d, \theta\}$ herhangi bir mafsala ait (θ_m) referans modelden, (θ_d) ters kinematikten ve (θ) ters dinamikten gelen dönme açıları seti; $\{e_m, e_d\}$ referans modelden ve ters kinematikten gelen dönme açıları hataları seti, $\{J_m, J_d\}$ referans modeli ve ters kinematik için performans ölçütü setleridir. Genel olarak performans ölçütü $\{J\}$ ve mafsal açılarındaki hata $\{e\}$ ile gösterilirse, FNN'de gerçek zamanda parametre güncelleme algoritmasını elde etmek için performans ölçütü,

$$J = \frac{1}{2} e^2 \quad (17)$$

olarak tanımlanabilir. 4. katmanda hatanın geriye doğru yayılımı,

$$\delta_k^4 = -\frac{\partial J}{\partial O_k} = -\frac{\partial J}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial O_k} = -\frac{\partial J}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial O_k} \quad (18)$$

ile ifade edilir. 4. katmandan başlayarak her defasında bir katman geriye giderek ilk katmana doğru işlem tekrarlanır. Bu durumda ağırlıklar,

$$w(k+1) = w(k) - \eta \delta^4 O_j \quad (19)$$

ile güncellenebilir. Denklem 19'da verilen; η öğrenme oranı olarak ifade edilir. 3.katmanda hata,

$$\delta_j^3 = -\frac{\partial J}{\partial O_j} = -\frac{\partial J}{\partial O_k} \frac{\partial O_k}{\partial O_j} = \delta^4 w_j \quad (20)$$

hesaplanır ve yayılır. 2.katmanda ise hata,

$$(21)$$

ile hesaplanır. Üyelik işlevinin sırasıyla, m_{ji} merkezini ve σ_{ji} genişliğini belirleyen parametreleri,

$$m_{ji}(k+1) = m_{ji}(k) - \eta_m \delta_{ji}^2 \frac{(x_i^2 - m_{ji})}{2(\sigma_{ji})^2} \quad (22)$$

$$\sigma_{ji}(k+1) = \sigma_{ji}(k) - \eta_\sigma \delta_{ji}^2 \frac{(x_i^2 - m_{ji})}{2(\sigma_{ji})^2} \quad (23)$$

ile güncellenerek alacağı yeni değerler hesaplanabilir. Burada; η_m öğrenme oranı, m_{ji} parametreleri ve η_σ öğrenme oranı, σ_{ji} parametreleri için tayin edilir.

Dördüncü katmandaki hata delta uyarılma kuralı ile bulunur. Bu çalışmada hatanın,

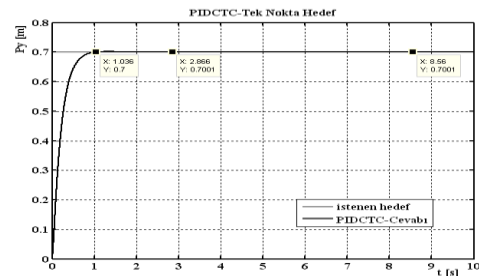
$$\delta^4 = Ae + B \frac{\partial e}{\partial t} \quad (24)$$

ile bulunması önerilmiştir [8]. Burada; A ve B kazanç katsayıları, $\{e\}$ hatadır.

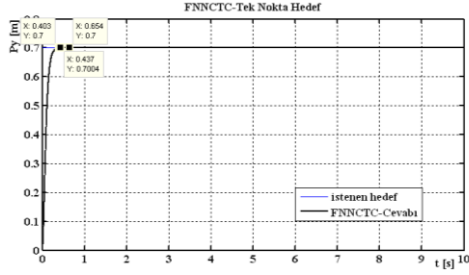
Giriş katmanında her bir mafsal için giriş işareti olarak $\{e, \dot{e}\}$ mafsal açısı ve hatasının türevini alan FNN, çıkış katmanında $\{u\}$ kontrol sinyali üretir. Ağırlık değiştirme denklemleri ağıdaki ortalama hata karesini en küçük yapacak şekilde ayarlanır. Bu çalışmada eğitim düşüşü hesabında tanjant hiperbolik fonksiyonu kullanılmıştır.

4. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

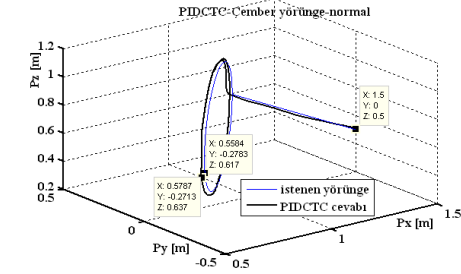
Robot kolu için önerilen kontrolörlerin performans değerlendirmeleri tek nokta hedef ve çember yörünge takipleri ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan hareket analizleri, MATLAB Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5 ve 6'da tek nokta hedef hareketleri ve Şekil 7 ve 8'de çember yörünge takipleri verilmiştir.



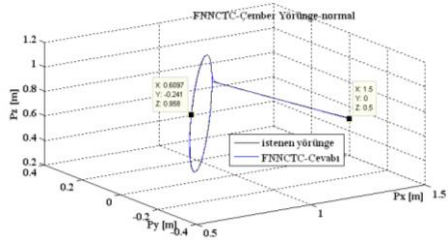
Şekil 5. PIDCTC-tek nokta hedef hareketi.



Şekil 6. FNNCTC-tek nokta hedef hareketi.

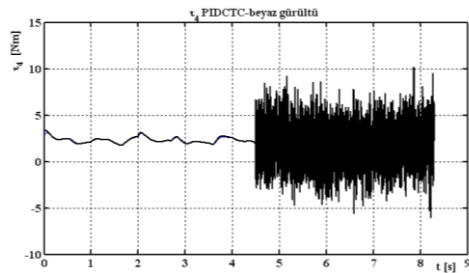


Şekil 7. PIDCTC-çember yörünge takibi.

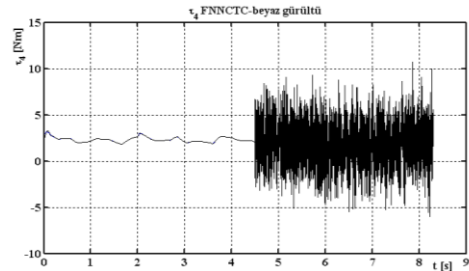


Şekil 8. FNNCTC-çember yörünge takibi.

Robot kolumun dördüncü mafsasına Şekil 9 ve 10'da görüldüğü gibi bozucu beyaz gürültü tork ve 4,5 uncu saniyede dördüncü kola 1 kg kütle ilavesi uygulanmıştır.

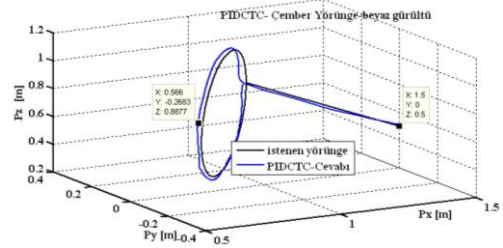


Şekil 9. PIDCTC-çember yörünge takibinde bozucu sinyal.

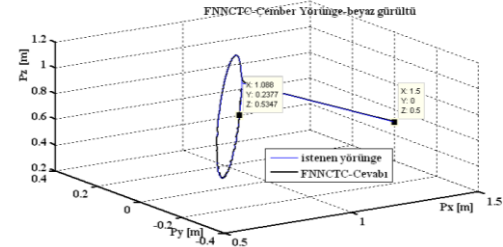


Şekil 10. FNNCTC-çember yörünge takibinde bozucu sinyal.

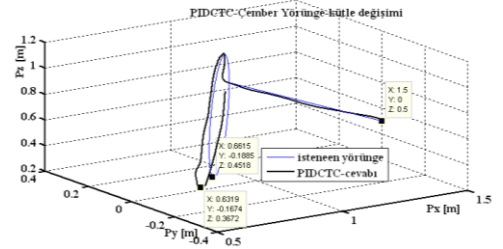
Kontrolörlerin bozucu sinyallerin altında dayanıklılıkları ve performansları Şekil 11 ile 14 arasında gözlenmiştir.



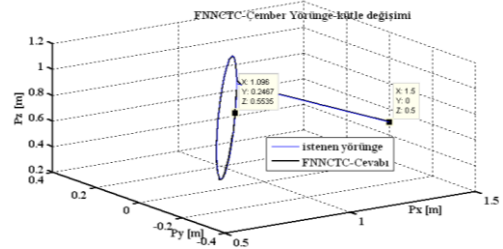
Şekil 11. PIDCTC-beyaz gürültüye karşı performansı.



Şekil 12. FNNCTC-beyaz gürültüye karşı performansı.



Şekil 13. PIDCTC-kütle değişimine karşı performansı.



Şekil 14. FNNCTC-kütle değişimine karşı performansı.

Tasarlanan kontrolörlerin, $P_i(1.5,0,0.5)$ hareket başlangıç noktasından, $P_f(0.9,0.7,1.3)$ verilen bitiş noktasına doğru harekette robot kolumun uç işlevcisinin yörünge takip performans ölçüleri; t_r cevap verme zamanı, M_p aşım oranı, t_s oturma zamanı ve e_{ss} kalıcı rejim hataları Tablo 2'deki gibi elde edilmiştir.

Tablo 2. Tek noktaya ulaşmada kontrolörlerin performansı.

Kontrolör	t_r [s]	M_p (%)	t_s [s]	e_{ss} [m]
PIDCTC	1.036	0.0016	2.866	4×10^{-4}
FNNCTC	0.463	0.0004	0.654	0

5. SONUÇLAR

Simülasyon şekillerinden görüldüğü gibi, hesaplanan tork yönteminde geri besleme doğrusallaştırmasında uygulanan iki farklı kontrol yönteminde, FNNCTC yöntemi daha başarılı performans göstermiştir. PIDCTC'nin geri besleme kontrol uygulamasında, hedefin başarılı bir şekilde takip edildiği, ancak referans yörünge ile çıkan sonuçlar arasında kısmi farklar olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, tek nokta takibi performans tablosundan da görüldüğü gibi PIDCTC'de oturma zamanı, FNNCTC'ne göre oldukça uzundur. Bozucu sinyalsiz yapılan geri besleme kontrolünde, FNNCTC'nin PID kontrolüne oranla daha başarılı bir hata takibi sergilediği ve oturma zamanının PID kontrolüne oranla çok daha kısa olduğu, simülasyon sonuçlarından ve performans tablosundan anlaşılmaktadır.

FNNCTC uygulamasında takip hatasının sıfıra daha çok yaklaştırılabildiği ve bu sebeple PID kontrolörüne oranla daha düşük olması da FNNCTC'nü daha kullanışlı hale getirmektedir.

FNNCTC öğrenilme yetenekleri, hata takibinin minimize edilmesinde önemli bir avantajdır. Ancak hareketin başlangıcında yapay sinir ağı nöronlarını birbirine bağlayan ağırlıkların güncellenmesi sistemin kısmi bir salınımına maruz kalmasına sebep olmaktadır. Bu da yapay sinir ağlarının, gerçekleştirilecek olan harekete göre kendini adapte etmesine kadar geçen süreye bağlı olarak beklenen performansı gerçekleştirmesini zorlaştırmaktadır. Sürekli değişken yörüngeli sistemlerde ise bu durum, performansın düşmesine sebep olmakta ve hata takibinin sıfıra indirgenmesini daha da zorlaştırmaktadır.

Elde edilen sonuçlar, geleneksel kontrolör olan PID'ye alternatif olarak, FNNCTC yöntemiyle robot kolu kontrolü gibi önceden bilinen referans yörüngelerinin uygulamalarında daha başarılı ve dayanıklı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] N-Nagy, F., and Siegler, A., "Engineering Foundations of Robotics", Prentice-Hall International, 1987.
- [2] Chen K., Zhang L., and Zhang Y., "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", Sun Vat-Sen University, Guangzhou, China, 2008.
- [3] Pfeiffer L.E., Khatib O., and Hake. J., "Joint Torque Sensory Feedback in the Control of a Puma Manipulator." IEEE Transactions Robotics and Automation, vol. 5, no. 4, 1989.
- [4] Takagi, H., "Fusion Technology of Neural Networks and Fuzzy Systems: A Chronicled Progression from the Laboratory to Our daily Lives", International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, Vol. 10, No. 4, pp. 647-673, 2000.
- [5] Pedrycz, W., "Computational Intelligence: An Introduction", CRC-Press, 1999.
- [6] Sankaran J., "Real-Time Computed Torque Control of Flexible-Joint Robots", Master of Applied Science, Department of Mechanical, University of Toronto, 1997.
- [7] Asada H., Kanade T., and Takeyama I., "Control of a Direct Drive Arm", Transactions of ASME, vol. 105, 1983.
- [8] Canberi, O., ve Kuzucu, A., "Bulanık Yapay Sinir Ağıyla Model Referans Robot Denetimi", İTÜ Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gümüşsuyu, İstanbul, 2005.
- [9] Baykal, N., Beyan, T., "Bulanık Mantık Uzman Sistemler ve Denetleyiciler", Bıçaklar kitapevi, Ankara, 2004.
- [10] Koo, T. J., "Stable model reference adaptive fuzzy control of a class of nonlinear systems", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 9, No. 4, 2001.