

DETERMINING JOINT ANGLES OF ROBOT ARM BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Muhammet Ali ARSERİM^{1}, Yakup DEMİR²*

^{*1} Electrical and Electronics Engineering Department, Dicle University, Diyarbakir, Turkey

²Electrical and Electronics Engineering Department, Fırat University, Elazig, Turkey

E-mail: marsirim@dicle.edu.tr

Aim of this study is to solve inverse kinematic problem of a five axis articulated robot arm by using artificial neural network. Through this aim five axes articulated SCORBOT-ER VPlus robot arm is used. Experimental coordinate data for this robot arm is collected form a table, on which this robot arm is fixed and artificial neural network simulation, is implemented on MATLAB R2008A software for determining base, shoulder, and elbow joint angles. As a result it is seen that outputs of the ANN's suit the experimental data.

Key words: robot arm, inverse kinematic problem, artificial neural network, SCORBOT-ER VPlus

ROBOT KOL AÇILARININ YAPAY SİNİR AĞI KULLANILARAK BULUNMASI

Muhammet Ali ARSERİM^{}, Yakup DEMİR²*

^{*1} Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye

² Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

Bu çalışmanın amacı beş dönel eksenli bir robot kolunun ters kinematik probleminin yapay sinir ağı (YSA) ile çözülmesidir. Bu amaç doğrultusunda beş dönel eklemlili SCORBOT-ER VPlus robotu kolu kullanılmıştır. Bu robot kolunun, sabitlendiği masa üzerindeki nesnelere ulaşabilmesi için deneysel olarak koordinat verileri toplanmış ve bu verilerle robot kolunun taban, omuz ve dirsek eklem açılarını bulmak için YSA simülasyonu MATLAB R2008A yazılımında oluşturulmuştur. Oluşturulan bu YSA'ların çıktıları gerçek verilerle karşılaştırıldığında sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

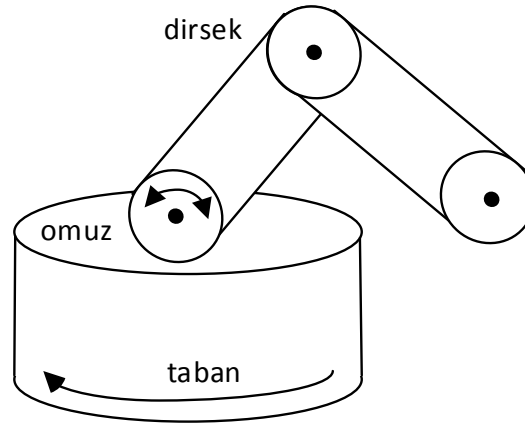
Anahtar sözcükler: robot kolu, ters kinematik problem, yapay sinir ağı, SCORBOT-ER VPlus

1. Giriş

Robot karmaşık olarak işleri kendiliğinden yapabilen manipulatörler ve kontrol edilebilen manipulatörler olarak adlandırılmaktadır [1]. Günümüzde robotlar sağlık, sanayi ve askeri alanlar gibi pek çok yerde insanlara hizmet etmektedir [2].

Kinematik, sistemlerin geometrileri ve hareketleri ile ilgili bir bilim dalıdır. Robot kinematiği ise robotların ve etrafındaki nesnelerin üç boyutlu uzaydaki yerleşimi ile ilgilenir[2]. Birden fazla ekleme sahip bir robot kolu için, tutacağı verilen koordinatlarından yola çıkarak eklem açılarının belirlenme problemine ters kinematik problemi denir[3]. Ayrıca fazla eklemi olan bir robot kolu için ters kinematik problemi klasik yolla çözmek hem zaman alıcı hem de çok karmaşık olabilmektedir. Çoğu endüstriyel robot için 3 bilek eklemi aynı noktada kesiştirilerek ters kinematik problem daha kolay çözülebilir bir forma indirgenir [1].

Robot kollarındaki eklemler, yaptıkları harekete göre prizmatik ve dönelemler olarak iki kategoride sınıflandırılır. Dönelemler R ile gösterilir ve dönen bir eksen etrafında dönme hareketi yapar. Prizmatik eklemler ise P ile tanımlanmakta beraber uzama veya teleskopik hareketle tarif edilir [1]. Robot kollarının sınıflandırılması ilk üç eklem yapıldığı harekete göre sınıflandırılmaktadır. Robot kolunun ilk üç eklemi (taban, omuz ve dirsek) Şekil 1’de verildiği gibi dönelemler ise robot kolu dönelemler olarak adlandırılmaktadır [4].



Şekil 1. Dönelemler Robot Kolunun İlk Üç Eklemi

2. Materyal ve Metot

2.1. Robot Kolunun İleri ve Ters Kinematiği

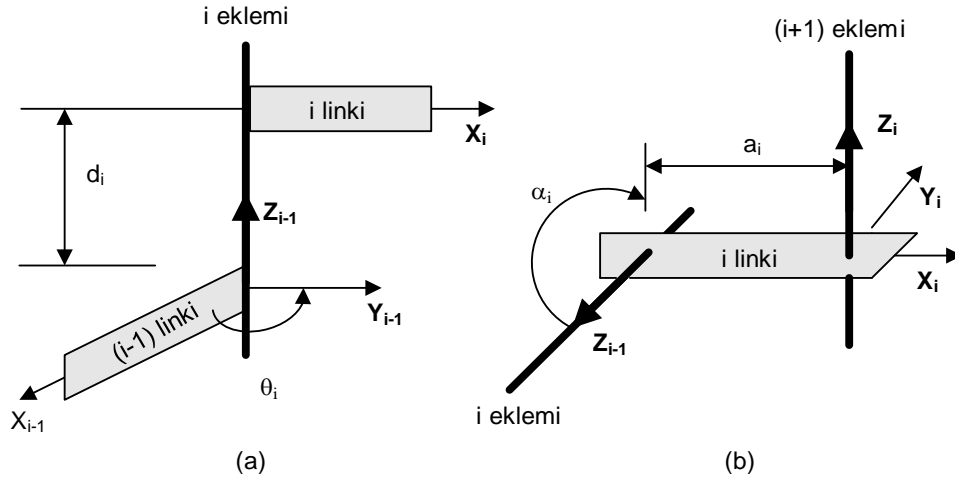
Robot kolu ve üç boyutlu uzaydaki nesneler arasındaki ilişkinin kurulması için koordinat ve yönelim tanımlaması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bunu gerçekleştirmek için robot kolunun her bir eklemine ve nesnelere birer koordinat sistemi yerleştirilir ve hesaplamalar bunlar göz önüne alınarak yapılır [2].

2.1.1 Robot kolunun ileri yön kinematiği

Seri robot kolu taban ekleminden eldeki son eklemeye kadar birbirine seri bağlı prizmatik veya dönelemlerden meydana gelmektedir [2]. Her bir eklem bir koordinat sistemi yerleştirilip i . eklemde $(i-1)$. eklem koordinat dönüşümü ${}_{i-1}^i T$ dönüşüm matrisi ile tanımlanır. Arka arkaya sıralanan bu dönüşüm matrisleriyle (1)'de verilen denklemle el ile taban arasındaki ilişki tanımlanır ve bu ilişkiye ileri kinematik denir [4].

$${}^N T_0 = {}^1 T_0 {}^2 T_1 \dots {}^N T_{N-1} \quad (1)$$

Robot kolunun tabanı ve eli arasındaki ileri yön kinematikini bulmak için Denavit-Hartenberg(D-H) yöntemi kullanılabilir. Bu yöntem ardışık iki eklem arasındaki ilişkiyi sistematik bir şekilde belirlemede kullanılmaktadır [4]. Bu yöntemde eklemler arasındaki ilişkinin bulunması için, iki eksen arasındaki link uzunluğu (a_i), (i-1). ve i. eksenler arasındaki açı (α_i), üst üste çakışan bağlar arasındaki bağ kaçıklığı (d_i) ve iki bağ arasında oluşan eklem açısı (θ_i) olmak üzere dört tane değişken kullanılmaktadır[2, 4]. Bu değişkenler Şekil 2' de gösterilmiştir[2, 5].



Şekil 2. D-H Yönteminde Kullanılan Değişkenlerin Gösterilmesi: a) Eklem Açısı(θ) Ve Eklem Uzunluğu(d), (b) Link Uzunluğu (a) Ve Link Bükme Açısı (α).

Yukarıda belirtilen bu değişkenlerden faydalanılarak robotun kolunun ardışık iki eklemi arasındaki dönüşüm matrisi (2)'de verilmiştir:

$${}^{i-1} T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

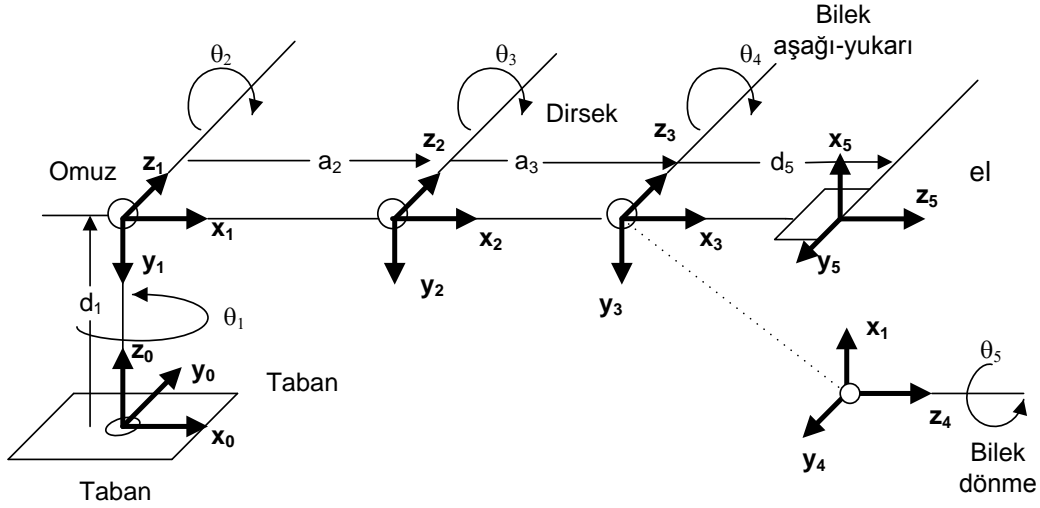
Robot kolunun ait D-H değişkenlerinin belirlenmesi için tablo 1 kullanılarak çıkartılır. Bu tablonun kullanılarak, her bir ekleme ait dönüşüm matrisi elde edilir. Satır sayısı, robotun serbestlik derecesini belirlemektedir. Bu tabloda yer alan α_i ve a_i değerleri, robot hareket ederken değişmemektedir. Buna karşın d_i ve θ_i , robotun hareketiyle değişen parametrelerdir ve her bir eklem için bu parametrelerden sadece biri değişken olarak seçilebilir [2].

Tablo 1. Eklemlere Ait D-H Değişkenleri

Eksen No	D-H Değişkenleri				i. Eklem Değişkenleri
	α_i	a_i	d_i	θ_i	
i	α_i	a_i	d_i	θ_i	d_i veya θ_i
1	α_1	a_1	d_1	θ_1	d_1 veya θ_1
2	α_2	a_2	d_2	θ_2	d_2 veya θ_2
3	α_3	a_3	d_3	θ_3	d_3 veya θ_3
4	α_4	a_4	d_4	θ_4	d_4 veya θ_4

5	α_5	a_5	d_5	θ_5	d_5 veya θ_5
---	------------	-------	-------	------------	-----------------------

Bu çalışmada kullanılan robot kolu beş dönel eksenli SCORBOT-ER VPlus'tır. Beş eksenli dönel robotta; taban, omuz, dirsek eklemlerine ilaveten elin aşağı yukarı ve dönme hareketleri vardır [4]. Bu tip robotlara çalışmadaki robot koluna ilaveten Rhino XR-3 eğitim robotu ve Microbot Alpha II endüstriyel robotu örnek verilebilir. Buna ilaveten bu çalışmada kullanılan robotun bilek eksenlerinin merkezleri Microbot Alpha II robot kolunda olduğu gibi çakışıktır. Bu robotun yapısal formu, eklemler eksenleri ve D-H değişkenleri Şekil 3'te gösterilmiştir [4, 5].



Şekil 3. Bilek Eksenleri Çakışık Beş Eksenli Robotun Eksenel Gösterimi [4]

Gerekli trigonometrik dönüşümler yapıldıktan sonra bu robot kolunun taban ile el eklemleri arasındaki ilişki (3)'te verildiği gibidir;

$${}^5T_0 = {}^3T_3 {}^5T_3 = \begin{bmatrix} C_1 C_{234} C_5 + S_1 S_5 & -C_1 C_{234} S_5 + S_1 C_5 & -C_1 S_{234} & C_1 (a_2 C_2 + a_3 C_{23} - d_5 S_{234}) \\ S_1 C_{234} C_5 - C_1 S_5 & -S_1 C_{234} S_5 - C_1 C_5 & -S_1 S_{234} & S (a_2 C_2 + a_3 C_{23} - d_5 S_{234}) \\ -S_{234} C_5 & S_{234} S_5 & -C_{234} & d_1 - a_2 S_2 - a_3 S_{23} - d_5 C_{234} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Burada C_{ijk} ve S_{ijk} sırasıyla $\cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$ ve $\sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$ 'nin kısaltılmış halidir [4].

2.1.2 Robot kolunun ters kinematiği

Robot kolunun ters kinematik problemi, üç boyutlu uzayda elin taban koordinat düzlemine göre verilen yer değiştirme ve rotasyon verileri yardımıyla eklem değişkenlerinin bulunması olarak tanımlanabilir [2]. Robot kolunun ileri yön kinematiğinde çözümün her zaman var olmasına rağmen ters kinematik problemlerinde her zaman çözüm var olmayabilir [4]. Robotun ters kinematik problemlerinin çözümünde normal durum insan kolunda olduğu gibi 6 eklemdir [6]. Bu durumda ters kinematik problemlerin çözümleri sınırlı sayıda olur. Serbestlik derecesi altıdan daha az robot kolları için elin oryantasyonunu sınırlayarak serbestlik derecesini azaltan durumlar haricinde çözüm bulunamaz. Buna ilaveten serbestlik derecesi altıdan daha fazla robot kolları için sonsuz çözüm oluşmaktadır [6].

Ters kinematik problemlerin çözmek için deküple ters dönüşüm, dönen cebir, dual matrisler, dual dörtlüler ve geometrik teknikler gibi çeşitli metotlar kullanılabilir. Lineer olmayan trigonometrik eşitliklerin kümesi, analitik olarak çözülememesine rağmen çakışık merkezli bilek eklemlerine sahip robotlarda analitik çözüm yapılabilmektedir [6].

Ters kinematik problemleri yaklaşımlardan birisi de ileri kinematikten faydalanarak bu problemleri analitik veya kapalı formda çözmektir. Bu yöntemler robotun yapısına bağımlı kalmakta ancak nümerik metotlara göre daha hızlı çözüme ulaşmaktadır. Ters kinematik problemi analitik olarak çözmek için el konfigürasyon vektörünün bulunmasıyla başlanır ki bu vektör (4)'te verilmiştir;

$$w(\theta) = \begin{matrix} w1 \\ w2 \\ w3 \\ \dots \\ w4 \\ w5 \\ w6 \end{matrix} = \begin{bmatrix} C_1(a_2C_2 + a_3C_{23} - d_5S_{234}) \\ S_1(a_2C_2 + a_3C_{23} - d_5S_{234}) \\ d_1 - a_2S_2 - a_3S_{23} - d_5C_{234} \\ \dots \\ -\left[\exp\left(\frac{\theta_5}{\pi}\right)\right]C_1S_{234} \\ -\left[\exp\left(\frac{\theta_5}{\pi}\right)\right]S_1S_{234} \\ -\left[\exp\left(\frac{\theta_5}{\pi}\right)\right]C_{234} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Bu vektörden faydalanarak taban açısı

$$\theta_1 = \tan^{-1}(w_2 / w_1) \quad (5)$$

olarak bulunur [4]. Dirsek açısı θ_3 bulunması en zor olan açıdır. Bunun çözülmesi için global el aşağı yukarı ara açı değişkeni θ_{234} tanımlanır ki $\theta_{234} = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4$ 'tür. Bu açı çalışma düzlemine göre ölçülen el açısıdır. w vektörünün son üç elemanıyla

$$\theta_{234} = \tan^{-1}(-(C_1w_4 + S_1w_5) / -w_6) \quad (6)$$

olarak bulunur [4]. Burada a omuz eklem açısı ve dirsek açılarının izole edilmesi için (7) ve (8)'de gösterilen x_1 ve x_2 gibi iki ara değer tanımlanır [4];

$$x_1 \square C_1w_1 + S_1w_2 - a_4C_{234} + d_5S_{234} \quad (7)$$

$$x_2 \square d_1 + a_4S_{234} - d_5C_{234} - w_3 \quad (8)$$

Bu eşitlikler için θ_1 ve θ_{234} daha önceden bilindiği için elin aşağı ve yukarı açısı elimine edilir ve dirsek açısı

$$\theta_3 = \pm \cos^{-1} \frac{\|x\|^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3} \quad (9)$$

olarak bulunur. Burada $\|x\|^2 = a_2^2 + 2a_2a_3C_3 + a_3^2$ dirsekten bileğe olan mesafeyi göstermektedir. Dikkat edildiğinde dirsek açısı için iki tane çözüm vardır ancak endüstriyel robot kollarında robot kolunun dirsek eklemine çalışma düzlemine daha uzak olması için dirseğin yukarı olduğu açı seçilir [4]. Omuz eklem açısı ise dirsek açısı bulunduğundan sonra

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left[\frac{(a_2 + a_3C_3)x_2 - a_3S_3x_1}{(a_2 + a_3C_3)x_1 + a_3S_3x_2} \right] \quad (10)$$

olarak bulunur. Elin aşağı ve yukarı açısı diğer iki açının bulunmasından sonra (11)'deki gibi hesaplanır;

$$\theta_4 = \theta_{234} - \theta_{q_2} - \theta_3 \quad (11)$$

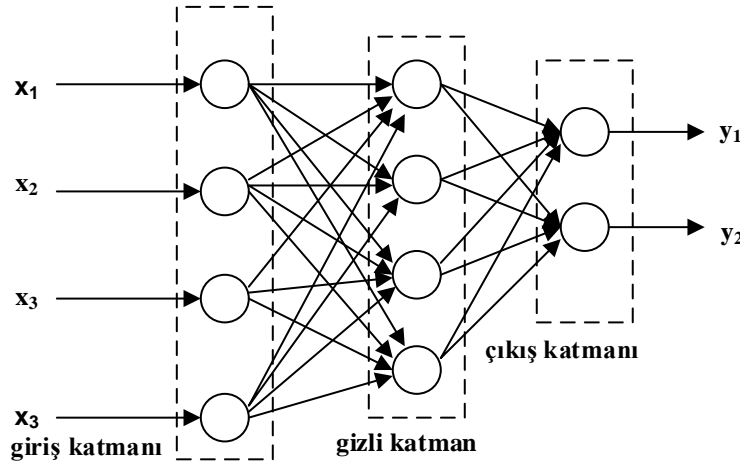
Son olarak elin dönme açısı w vektörünün son üç elemanından elde edilebilir [4];

$$\theta_5 = \pi \cdot \ln(w_4^2 + w_5^2 + w_6^2)^{1/2} \quad (12)$$

2.2. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları giriş vektörünü çıkış vektörüne eşleyen bir yapı olarak tanımlanabilmektedir. YSA biyolojik sinirlerden esinlenilmiş ve nöron adı verilen çok sayıda basit işlem elemanlarının birleşmesinden meydana gelmektedir [7]. Ayrıca YSA paralel dağılımlı bir bilgi işleme sistemidir [3].

Bir YSA giriş vektörünün uygulandığı bir giriş katmanı, çıkış vektörünün elde edildiği bir çıkış katmanı ve gizli katmandan oluşmaktadır. Gizli katman sayısı birden fazla olabilir ancak tek gizli katman tercih edilmektedir. Bir YSA'nın genel yapısı Şekil 4'te verilmiştir;



Şekil 4. YSA'nın Temel Gösterilimi

İleri beslemeli YSA'lar nöronları içeren katmanların birbirine seri olarak bağlanmasından meydana gelmektedir. Gizli katman veya çıkış katmanındaki nöronlardan her biri, bir önceki katmandaki nöronlardan giriş verileri alır ve bu nöronların ilettiği çıkışlar buldukları katmana bağlı olan bir sonraki katmandaki nöronlara girişler olarak iletir. İleri beslemeli bilgi depolamazlar, yani YSA'nın çıkışları sadece o andaki girişlere bağlıdır. İleri beslemeli YSA'ların eğitimindeki en popüler algoritma, hatanın geri yayılımıdır. Bu algoritma, sigmoid aktivasyonlu nöronlardan oluşan ileri beslemeli YSA'nın eğitiminde kullanılır ve YSA'nın toplam işlem hatasının minimizasyonunda kullanılan eğim iniş metodudur [8].

3. Bulgular

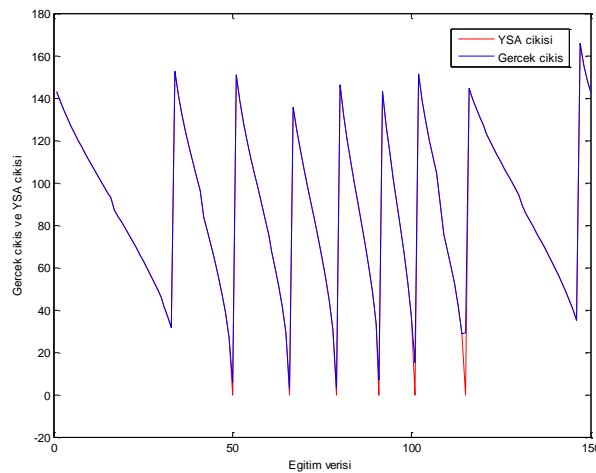
Bu çalışmada kullanılan SCORBOT-ER VPlus 5 dönel eklemlili bir robot koludur. Robot kolunun eksen hareketleri taban rotasyonu, omuz rotasyonu, dirsek rotasyonu, bileğin aşağı yukarı hareket etmesi ve bileğin eksen etrafında dönmesidir. Bu robot kolu bir çalışma masasına sabitlenmiş ve Şekil 5'te gösterilmektedir.



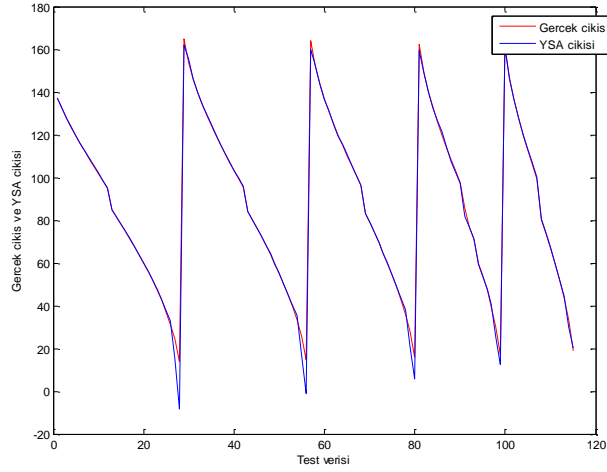
Şekil 5. SCORBOT-ER VPlus 5 Dönel Eklemlı Robot Kolu

Yapılan çalışmada robot kolunun taban, omuz ve dirsek açılarını bulmak için robotun sabitlendiği masa yüzeyi taranarak 266 nokta ile ilgili veriler elde edilmiştir. Burada amaç masa yüzeyinin taranması ve masa yüzeyinden nesnelerin robot kolu tarafından alınması olduğundan dolayı elin yukarı aşağı ve dönme eklemleri -90° ve 0° olarak sabit alınmıştır. Bu verilerin ilk 150 tanesi YSA'ları eğitmek için, geri kalan veriler ise YSA'ların performanslarını testi için kullanılmıştır. Bu çalışmada YSA'ları oluşturmak ve robot kolunun deneysel sistemden elde edilen ve oluşturulan YSA'ların simülasyonu sonucunda elde edilen eklem açıları verilerini karşılaştırmak için MATLAB R2008A yazılımı kullanılmıştır.

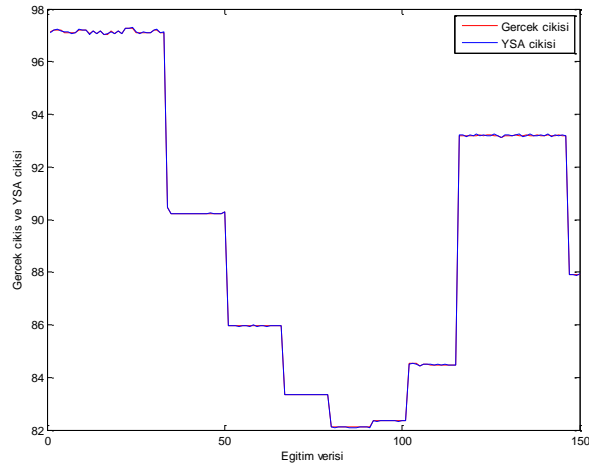
Oluşturulan YSA'ların eğitim ve test verilerine verdiği cevaplar ve robot kolunun gerçek verileriyle karşılaştırılması Şekiller 6-11'de verilmiştir.



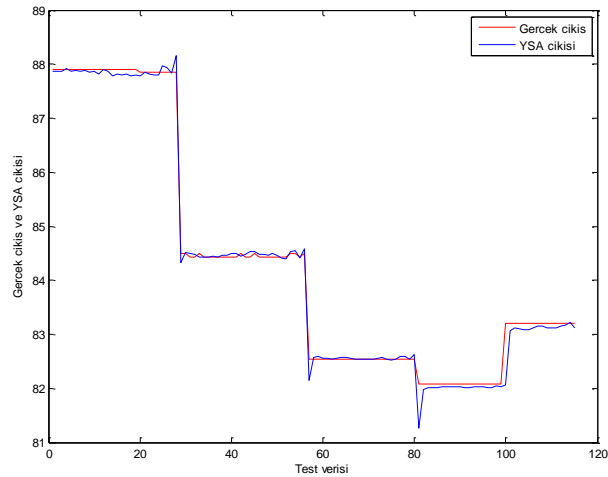
Şekil 6. Eğitimde Kullanılan Taban Açısı Ve YSA'nın Çıkışı.



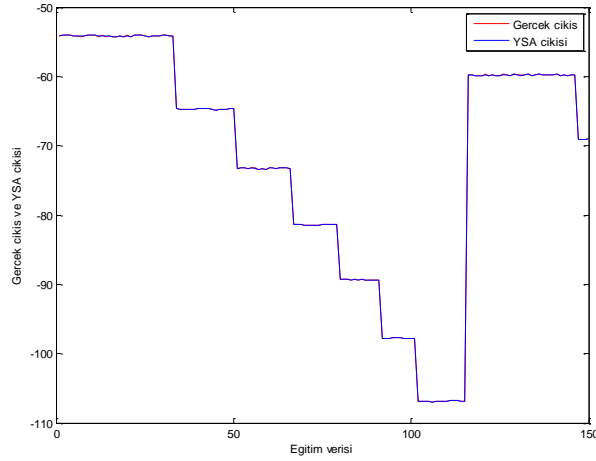
Şekil 7. Testte Kullanılan Taban Açısı Ve YSA'nın Çıkışı.



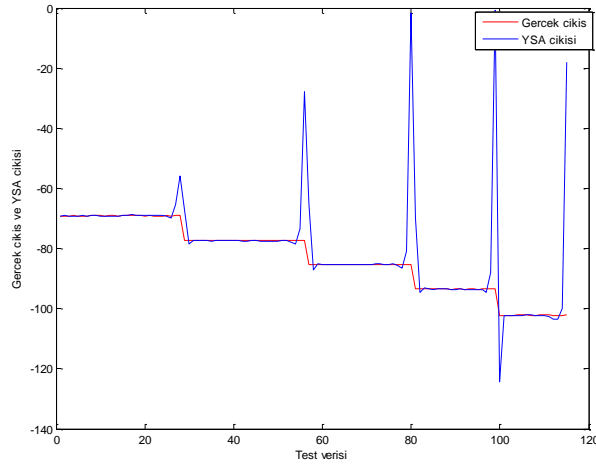
Şekil 8. Eğitimde Kullanılan Omuz Açısı Ve YSA'nın Çıkışı.



Şekil 9. Testte Kullanılan Omuz Açısı Ve YSA'nın Çıkışı.



Şekil 10. Eğitimde Kullanılan Dirsek Açısı Ve YSA'nın Çıkışı.



Şekil 11. Testte Kullanılan Dirsek Açısı Ve YSA'nın Çıkışı

4. Sonuçlar

Çalışmada robot kolunun belirli bir durum için ters kinematik problemi YSA kullanılarak çözülmüştür. Burada YSA'nın çıkışı sadece ileri yönde olup çarpma, toplama ve eşik fonksiyonundan oluştuğundan diğer yöntemlere göre daha hızlı çalışacaktır.

Yukarıdaki şekillerde çeşitli yüksek pikler görülmektedir. Bunlar eğitimde kullanılan çok hızlı değişimlerden kaynaklanmaktadır Robot kolunun pratik çalışması esnasında böyle bir durumla karşılaşılacağından dolayı bu hatalarla karşılaşılmayacaktır. Bunlara ilaveten yapay sinir ağının çıkışının eğitim verileriyle uyduğu ayrıca test verilerin de gerçek çıkışlarla uyduğu görülmektedir.

Bu çalışmanın pratik gerçekleştirilmesi robot kolunun kontrolör ünitesinin eski olması nedeniyle gerçekleştirilememiştir. Çünkü üretici firma kontrolör ünitesinde herhangi bir değişikliğe müsaade etmemektedir.

Robot kolunun hızlı olmasının gerekli olduğu durumlarda veya ileri kinematik koşulun var olup ters kinematik problemin çözümsüz olduğu durumlarda alternatif olarak YSA kullanılabilir. Ancak YSA'nın doğru sonuçlar üretebilmesi için özellik vektörünün çok iyi seçilmesi gereklidir.



5. Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan robot kolu ve kontrolör ünitesi TÜBİTAK'ın 107E170 hızlı destek projesi kapsamında alınmıştır.

Kaynaklar

- [1] Lewis, F. L., Dawson, D. M., & Abdallah, C. T.. Robot manipulator control: theory and practice. CRC Press., 2003.
- [2] Bingül Z., Küçük,S., Robot Tekniği I, Birsen Yayınevi, 2005.
- [3] Ogawa, T., & Kanada, H., Solution for ill-posed inverse kinematics of robot arm by network inversion. Journal of Robotics, 2010.
- [4] Schilling, R. J., Fundamental of Robotics. Analysis & Control., Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1990.
- [5] Arserim, M.A. Akıllı Yöntemlerle Nesne Tanınması ve Robot Kolu Kontrolü, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Türkiye, 2009
- [6] Jazar, N.R., Theory of Applied Robotics: Kinematics. Dynamics, and control. Springer, 2007.
- [7] Kulkarni, A. D., Computer vision and fuzzy-neural systems. Prentice Hall, 2001.
- [8] Cirstea, M., Dinu, A., McCormick, M., & Khor, J. G., Neural and fuzzy logic control of drives and power systems., Newnes, 2002 .