

DÜZLEMSEL ELEKTRO-PNÖMATİK MANİPÜLATÖR TASARIMI VE KONTROLÜ*

Erol Uyar

Prof. Dr.,
Ege Üniversitesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,
İzmir
erol.uyar.deu@gmail.com

Ekrem Yavuz**

Arş. Gör.,
Ege Üniversitesi,
Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İzmir
ekremyavuz35@windowslive.com

Mücahid Candan

Ege Üniversitesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,
İzmir
mucahidcandan@gmail.com

Nail Akçura

Ege Üniversitesi,
Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İzmir
nailakcura@gmail.com

ÖZ

Bu çalışmada, silindirik koordinatlarda hareket yeteneğine sahip iki boyutlu düzlemsel yörünge takip edebilen elektro-pnömatik bir manipülatör tasarımı ve uygulaması tanıtılmıştır. Kartezyen manipülatörün açılma hareketi, çift girişli pnömatik oransal bir valfin çalıştığı döner silindire sağlanmıştır. Manipülatörün uç kısmının doğrusal hareketi ise bir adım motora bağlı "trigger"(tetikleme) kayış-kasnak mekanizması ile gerçekleştirilmiştir. Ana kontrolcü olarak kullanılan bilgisayar ile oransal valf ve adım motor arasındaki iletişim protokolü Arduino mikro işlemci ile sağlanmıştır. Hassas bir pozisyonlama için, gerek oransal valfin sürdüğü döner silindirin, gerekse de adım motorun çizgisel hareketleri geri besleme ile izlenerek kontrol edilmiştir. Tasarımın model uygulaması ile yörünge takibinde başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikroişlemci, kontrol, elektro-pnömatik, valf, manipülatör

DESIGN AND CONTROL OF AN ELECTRO-PNEUMATICAL PLANAR MANIPULATOR

ABSTRACT

In this study, it is worked on design and application of an electro-pneumatic manipulator which is capable of moving along cylindrical coordinates and able to follow planar orbits. The angular movement of the manipulator is provided by cylindrical valve that is powered by double inlet proportional pneumatic valve. The linear movement of the end effector of the manipulator is provided by a trigger belt -pulley which is attached a stepper motor. The communication protocol between main controller (computer) and proportional valve and stepper motor is provided with an Arduino microprocessor. For the precise positioning, linear movements of proportional valve and stepper motor are observed and controlled with feedback. Design and implementation of the model was obtained successful results of the follow orbits.

Keywords: Microcontroller, control, electro-pneumatic, valve, manipulator

** İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 06.03.2015

Kabul tarihi : 27.03.2015

* 22-25 Ekim 2014 tarihinde Makina Mühendisleri Odası tarafından İstanbul'da düzenlenen VII. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi'nde sunulan bildiri, dergimiz için yazarlarınca makale olarak yeniden düzenlenmiştir.

Uyar, E., Yavuz, E., Candan, M., Akçura, N. 2015. "Düzlemsel Elektro-Pnömatik Manipülatör Tasarımı ve Kontrolü," Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 662, s. 56-62.

1. GİRİŞ

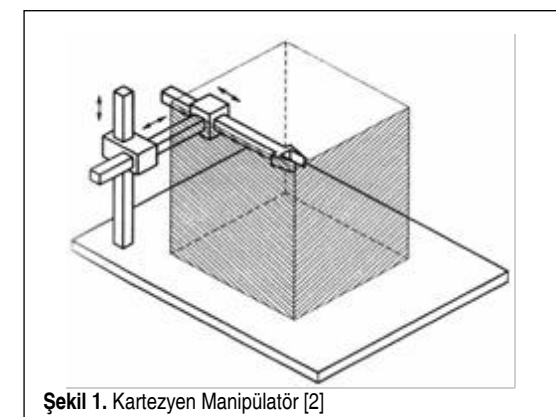
Günümüzde robot sistemlerin çok geniş kullanım alanları olduğundan tanımlanmalarında bazı ufak ayrıntılar önem kazanmıştır. Robot sistemlerin en yaygın kullanım alanlarından biri endüstri sahalarıdır. İngiliz Robot Birliği (BRA) ve Japon Endüstriyel Robot Birliği (JIRA) gibi ulusal robotik birliklerinin yayınladığı resmi robot tanımları, çoğunlukla endüstriyel robotların tanımıdır. Robot sistemlerin endüstri alanlarında kullanılmalıklarıyla ilgili olarak robot tanımı, Amerikan Robot Enstitüsü (RIA) tarafından şu şekilde yapılmıştır. "Robot, çeşitli görevleri yapmak amacıyla değişik şekillerde programlanmış hareketlerle; nesnelerin, gereçlerin veya özel düzeneklerin taşınması için tasarlanmış çok işlevli bir mekanizmadır" [1].

Robot sistemlerin genelde manipülatör olarak da adlandırılacak mekanizması, uygun şekilde bir araya getirilen mekanik ve elektronik alt sistemlerin amaca uygun olarak kumanda edilmesi ile çalışır. Bir robot sistemin tasarımında, istenilen hareketlerin kusursuz biçimde yerine getirilmesi, genelde bilgisayar destekli ölçme-kontrol üniteleri ve uygun programlama yazılımı ile mümkün olabilir. Bir mekanik yapı ya da eklemlerle birbirine bağlanmış sıralı rijit cisimlerden (uzuvlardan) oluşan manipülatörün hareket kabiliyeti, serbestlik derecesi olarak tanımlanır. Eklemlerin, yani manipülatör mekanizmasının hareketi, değişik tahrik elemanları ve sürücü sistemlerle mümkün olur. Manipülatörler çalışma uzaylarına göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılırlar.

2. MANİPÜLATÖRLER

2.1 Kartezyen Manipülatörler

Bu tip bir manipülatör üç tane kayar tip eklemler ile elde edilir. Mekanik yönden çok sağlamdır; fakat çalışma uzayındaki hareket yeteneği bakımından zayıftır. Bu tip manipülatörler çok büyük boyutlarda ve ağırlıklarda nesnelere hareket ettirmek ve taşımak için idealdir. Kartezyen manipülatörlerde eklemler

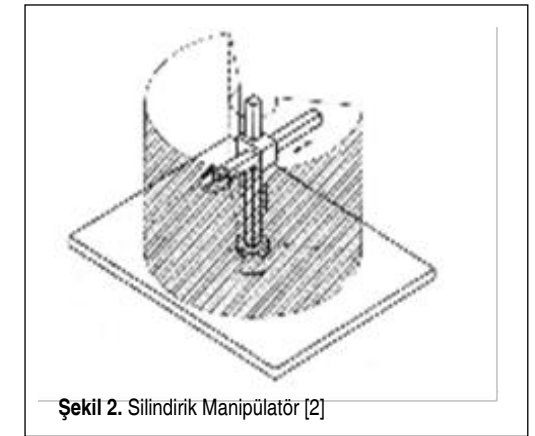


Şekil 1. Kartezyen Manipülatör [2]

ri hareket ettiren motorlar çoğunlukla elektrik, bazen de pnömatik motorlardır.

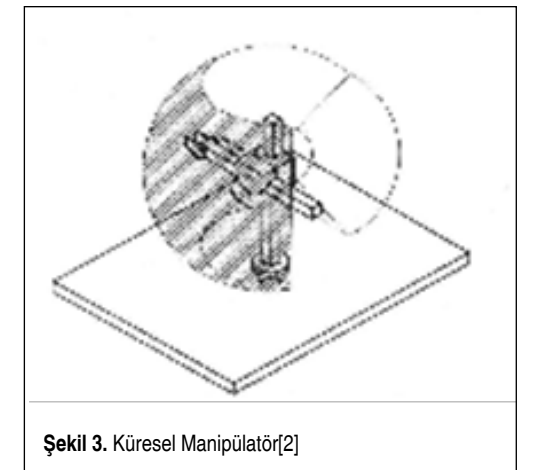
2.2 Silindirik Manipülatörler

Bu tip bir manipülatör, bir tane döner ve iki tane kayar tip eklemler ile elde edilir. Bu tip manipülatörler de mekanik yönden sağlamdır; fakat bilek konum doğruluğu yatay harekete bağlı olarak azalır. Benzer şekilde, büyük boyutlu nesnelerin taşınmasında kullanılırlar. Bu tip manipülatörlerde hidrolik motorları tercih edilir.



Şekil 2. Silindirik Manipülatör [2]

2.3 Küresel Manipülatörler

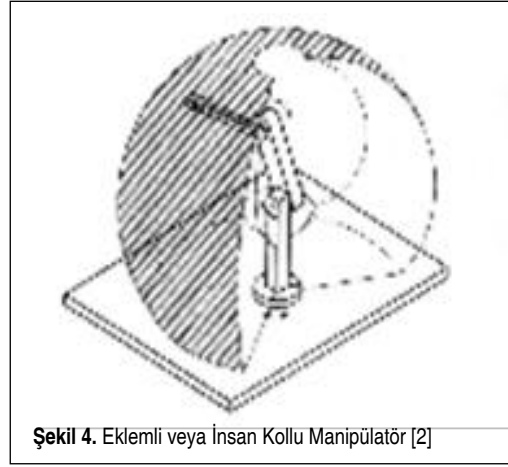


Şekil 3. Küresel Manipülatör[2]

Bu tip bir manipülatör, iki tane döner ve bir tane kayar tip eklemler ile elde edilir. Bu tip manipülatörler mekanik yönden diğer iki tipten daha zayıf, mekanik yapı yönünden daha karmaşıktır. Çoğunlukla makine montajlarında kullanılırlar. Bu tip manipülatörlerde elektrik motorları tercih edilir.

2.4 Eklemler veya İnsan Kolu Manipülatörler

İnsan kol yapısı esas alındığı için bu isim verilmiştir. Bu tip manipülatörlerin tüm eklemleri döner olduğundan, çalışma



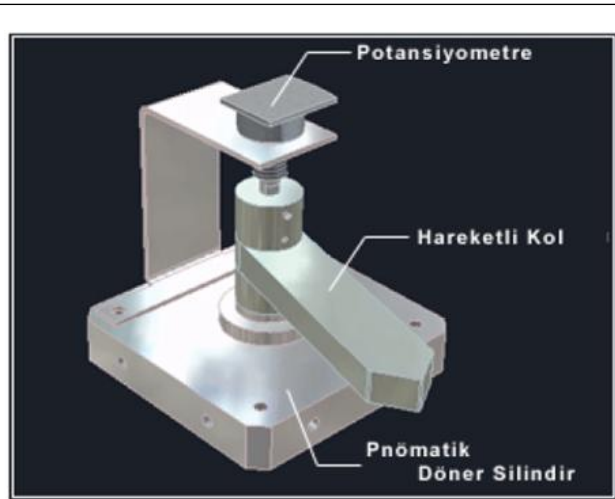
Şekil 4. Eklemlili veya İnsan Kollu Manipülator [2]

uzaylarında en yetenekli manipülatorlerdir. Endüstriyel uygulamalarda geniş kullanım alanına sahiptirler (boyama, kaynak yapma, montaj, yüzey temizleme vb.) Bu tip manipülatorlerde elektrik motorları tercih edilir.

3. MANİPÜLATOR VE KONTROLÜ

Proje kapsamında tasarlanan manipülator, pnömatik bir eleman olan döner silindirin sağladığı açısal hareketle bunun üzerine yerleştirilmiş olan ve doğrusal hareket eden bir trigger kayış-kasnak mekanizmasından oluşmaktadır. Döner silindir, 5/3 yollu oransal bir valf ile hareket ettirilirken; doğrusal hareket, trigger kasnağın bağlandığı bir adım motorla sağlanmaktadır. Bu hali ile manipülator, iki serbestlik dereceli, düzlemsel işlevlere uygun bir robot olarak çalışabilmektedir.

Manipülatorün açısal pozisyonunu ölçmek ve geri besleme ile kontrolünü sağlamak için, enkoder görevi görmek üzere tek turlu bir potansiyometre kullanılmıştır.



Şekil 5. Manipülator Prensi Şeması [2]



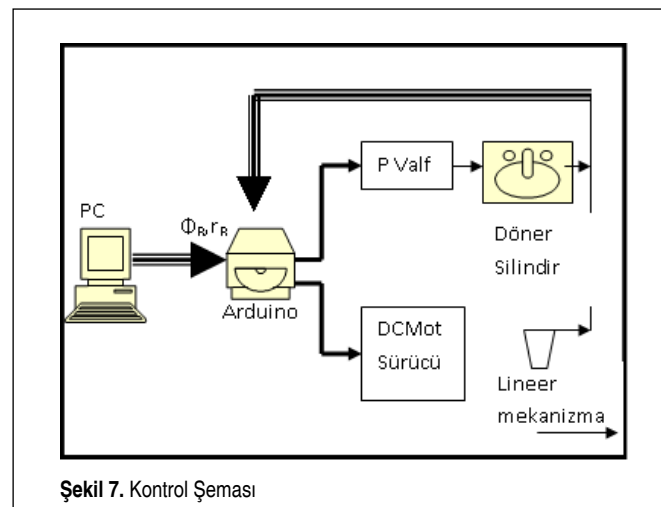
Şekil 6. Çalışma Alanı

Potansiyometre ile döner silindirin milleri Şekil 5 ve Şekil 6'daki gibi eş eksenli hale getirilip sabitlendikten sonra, potansiyometrenin orta ucundan alınan sinyal geri beslenerek döner pozisyon kontrolü için kullanılmıştır.

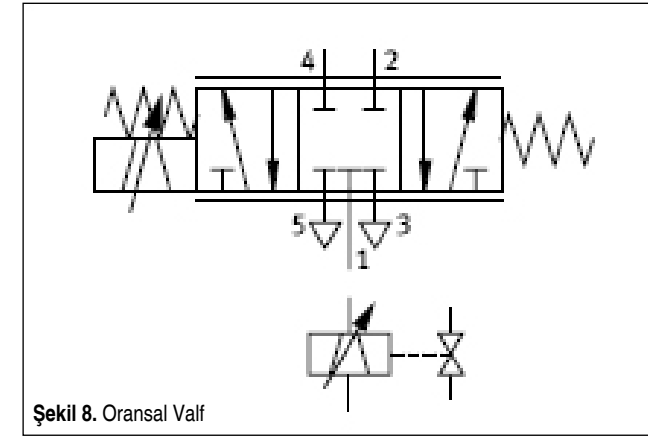
Trigger kasnak-kayış mekanizmasının doğrusal pozisyonu ise 12 voltluk besleme gerilimi ile çalışan adım motorun, adım sayılarının kontrolü ile sağlanmıştır.

3.1 Kontrol Devresi

Sistem kontrolü şematik olarak Şekil 7'de gösterilmiştir. Dönme ve doğrusal referans pozisyon değerleri, Hiper-Terminal olarak çalışan PC'nin USB Portuna bağlı mikro işlemcide (Arduino), ilgili analog portlarından geri beslenen anlık değerlerle karşılaştırılmak üzere gönderilmektedir. Bu şekilde belirlenen hataya bağlı olarak, mikro işlemcinin analog çıkış portlarından kontrol yazılımına göre oransal valfe ve motor sürücüsüne gerekli PWM değerleri yollanarak manipülatorün uç kısmının istenen pozisyona gelmesi sağlanmaktadır. Dev-



Şekil 7. Kontrol Şeması



Şekil 8. Oransal Valf

rede, pozisyon kumandası pnömatik aktüatör olarak çalışan oransal valf ve döner silindire sağlanmıştır.

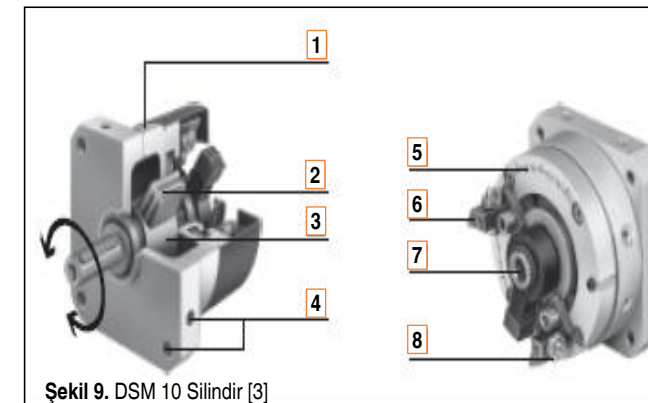
3.2 Oransal Valf Kontrolü

Servo valfler ile aç-kapa valfler arasındaki boşluğu doldurmak için geliştirilen oransal valfler günümüzde pnömatik sistemlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, "5/3-konumlu oransal valfi" (MPYE-5-1/8) kullanılmıştır.

Bu valf, girişine verilen 0-10 V arasındaki gerilim değişimine karşılık, kumanda ettiği "DSM 10" modeli pnömatik döner silindirin 0-270 derece arasında kademesiz olarak döndürmektedir. Pozisyon hatasına göre mikro işlemcinin PWM çıkışından 0-5V arasında üretilen sinyal, Optokuplör ile sürülen bir transistörle 0-10. V seviyesine çevrilerek valfle kumanda edilmektedir. Oransal valf ve döner silindirin yapıları Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir.

3.3 Adım Motor Sürücü Devresi ve Kontrolü

Doğrusal hareketi sağlayan adım motorun kontrolü mikro işlemci ve mikro step sürücü kartı ile sağlanmıştır. Mikro işlemciye aktarılan pozisyon geri besleme bilgileri, işlemci de değerlendirilerek bunun çıkış portlarından sürücü kartına



Şekil 9. DSM 10 Silindir [3]

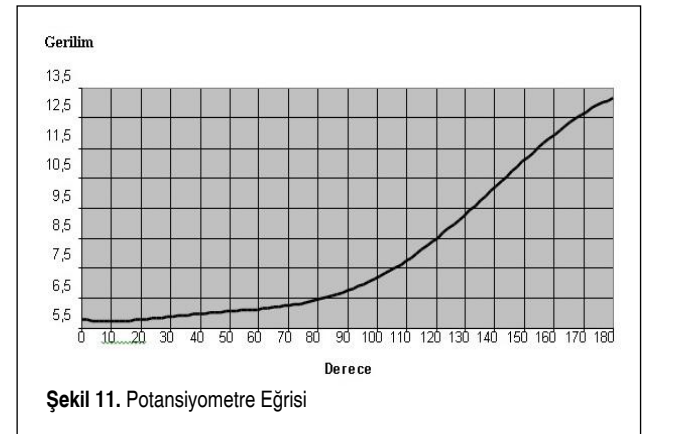


Şekil 10. Mikro Step Sürücü

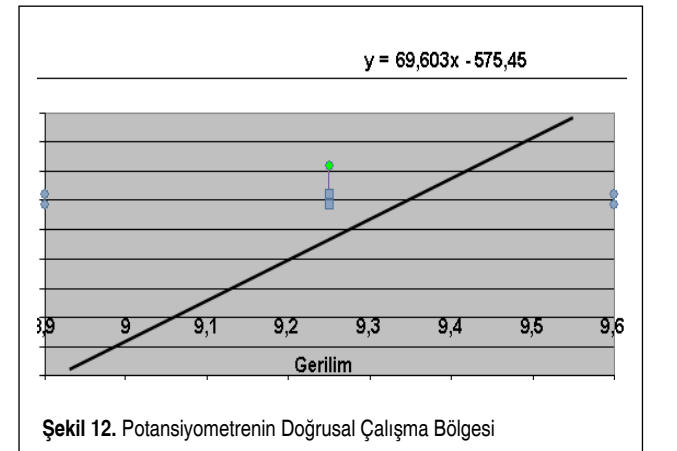
yollanan PWM ve yön sinyalleri ile motorun doğrusal hareketinin kontrolü sağlanmıştır (Şekil10).

3.4 Potansiyometrenin Kalibrasyonu

Manipülatorün çalışma alanı 90° olarak tasarlanmıştır. Şekil 11'deki potansiyometrenin gerilim-degrece eğrisinden 90-170 derece aralığında lineere yakın bir karakteristiğe sahip olduğu görülmektedir. Bu bölgede, doğrusallaştırılan karakteristiğe göre değerlendirilen gerilim (geri besleme) sinyali



Şekil 11. Potansiyometre Eğrisi



Şekil 12. Potansiyometrenin Doğrusal Çalışma Bölgesi

esas alınarak manipülator kolunun pozisyonu hesaplanabilmektedir.

3.5 Çalışma Alanı ve Yörünge Takibi

Robotun çalışma alanını ve yörünge takibini belirlemek için, kutupsal ve Kartezyen koordinatlarda hareket analizi incelenmiştir. Bu amaçla, ilk olarak manipülatorün uç noktasının kutupsal r ve θ ile (x, y) Kartezyen koordinatları arasındaki dönüşümü aşağıdaki ifadelerle belirtilmiştir:

$$x = r \cos \theta \quad (1)$$

$$y = r \sin \theta \quad (2)$$

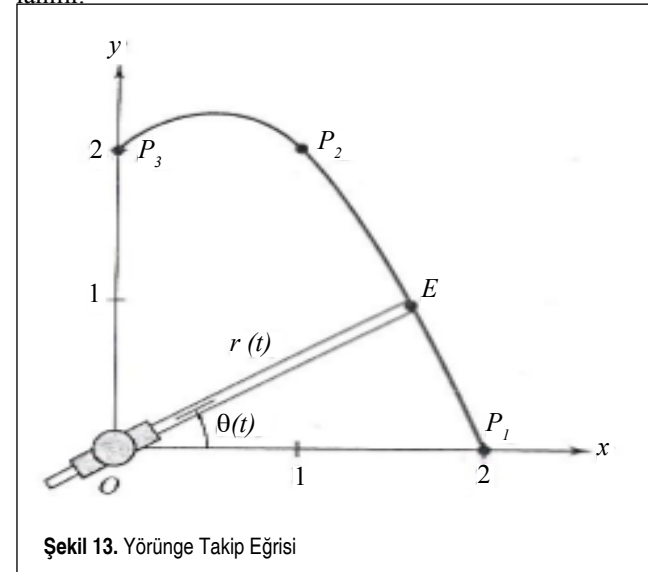
Bu iki formüle göre x ve y cinsinden elde edilen dönüşüm formülleri şöyle yazılabilir:

$$r = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad (3)$$

$$\theta = \arctan (y/x) \quad (4)$$

Tüm düzlemsel koordinat sistemlerinde olduğu gibi, kutupsal koordinat sisteminde de iki koordinat vardır: r (radyal koordinat ya da ışınsal koordinat) ve θ (açısal koordinat) olarak tanımlanır. Koordinat başlangıcı (kutup) $r=0$ ve $\theta=0$ konumu ile belirtilen noktadır.

r koordinatı kutuptan olan ışınsal uzaklığı, θ koordinatı ise noktanın üzerinde bulunduğu ışının, $\theta=0^\circ$ ışınından saat yönünün tersi yönündeki açısını ifade eder. 0° ışını, Kartezyen koordinat sisteminde "pozitif x eksenini" olarak bilinir. Kutupsal sistemde açılar, genel olarak ya derece ya da radyan kullanılır.



Şekil 13. Yörünge Takip Eğrisi

3.6 Yörünge Eğrisi

Uç noktanın istenilen bir eğriyi takip edebilmesi için, önce Kartezyen koordinatlarda eğrinin $y=f(x)$ şeklinde hareket denklemi yazılır. Buradaki manipülatorün uygunluğu açısından

yörünge takibi için kutupsal koordinatlarda çalışmak daha uygun görülmüştür. Bu amaçla, kutupsal koordinatlarda çizici ucun takip etmesi istenilen eğri denklemini oluşturmak için uç noktanın yapması gereken hareket fonksiyonu çıkarılır. Uç noktanın hareket fonksiyonu açısal hareket, yani döner silindirin hareket fonksiyonu ve doğrusal hareket, yani DC motorun hareket fonksiyonu olarak bulunur. Yapılan ters kinematik analiz ile bu iki fonksiyonun zamana bağlı değişim fonksiyonu yazılır. Böylece, hareketin her anında uç noktanın açısal ve doğrusal olarak nerelerde bulunması gerektiği bulunur. Sonuç olarak, istenen bir eğrinin çizimi için, mafsalların yapması gereken hareketin r ve θ koordinatlarındaki verileri elde edilmiştir. Bu veriler robotun anlık pozisyonuyla kontrol edilerek bilgisayar tarafından sürekli olarak yeni hata sinyalleri yaratılır.

4. ÇALIŞMA ALANI SEÇİMİ VE YÖRÜNGE HESAPLANMASI

Tasarımı yapılan manipülatorün çalışma alanı silindirik koordinatlarda aşağıdaki gibi sınırlanmıştır. Şekil 6'da manipülatorün çalışma alanı görülmektedir. Çalışma alanı değerleri $4,5 < r < 25$ [cm], $0 < \theta < 90^\circ$ olarak tasarlanmıştır.

Yörünge takibi için, yukarıda da belirtildiği gibi, döner silindirin ve motorun eş zamanlı olarak sürülmesi gerekmektedir. Bu iki uzvun hareket denklemleri aşağıdaki örnek ile açıklanmaktadır.

4.1 Örnek Eğri Denklemi

Şekil 11'de yörünge olarak verilen $y=a.x^2 + b.x+c$ şeklinde 2.dereceden bir eğrinin aşağıdaki noktalardan verilen koşulları sağlayacak şekilde geçmesi istenir. Verilen noktalar $P_1(2,0)$, $P_2(1,2)$, $P_3(0,2)$, belirtilen noktalardaki hızlar da $v_1=0$, $v_2=1.41\pi$, $v_3=0$ olsun ve P_1 noktasından P_3 noktasına hareketin $t=1$ 'de olması istensin. Bu şartlarla eğrinin a , b ve c katsayılarını bulalım:

$$0 = 4a + 2b + c \quad (5)$$

$$2 = a + b + c \quad (6)$$

$$2 = 0 + 0 + c \quad (7)$$

(5), (6) ve (7) numaralı formüllerden a , b ve c çözümlerse, $a=-1$, $b=1$ ve $c=2$ bulunur. Böylece polinom denklemi:

$$y = -x^2 + x + 2 = f(x) \quad 0 \leq x < 2 \quad (8)$$

Polar koordinatlarda aşağıdaki ifadeler yazılarak eğrinin zamana bağlı denklemi bulunabilir:

$$r(t) = x(t) i + y(t) j \quad (9)$$

$$r(0) = x(0) i + y(0) j = 2i: (x(0), y(0)) = (2,0) \quad (10)$$

$$r(1) = x(1) i + y(1) j = 2j: (x(1), y(1)) = (0,2) \quad (11)$$

$$v(0) = x(0)i + y(0)j = 0 \quad (12)$$

$$v(1) = x(1)i + y(1)j = 0 \quad (13)$$

$$x(t) = a \sin^2 b(c-t) - \frac{1}{2} a (1 - \cos 2b(c-t)) \quad (14)$$

Yukarıdaki pozisyon ve hız bilgilerine göre; $a=2$, $b=\pi/2$, $c=1$ olarak hesaplanarak $x(t)$ ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$x(t) = 1 - \cos \pi(1-t) = 2 \cdot \sin^2 \frac{\pi}{2(1-t)} \quad (15)$$

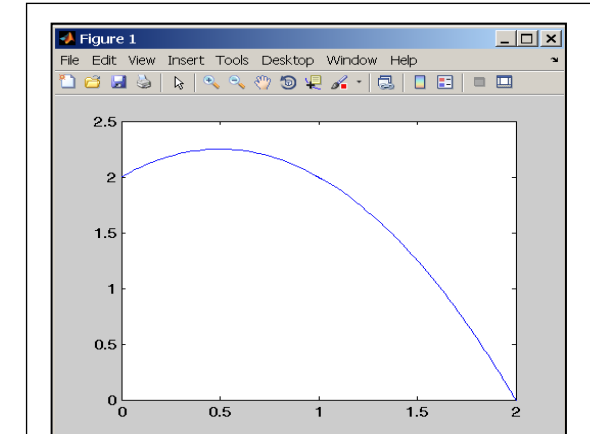
$y(t)=f(x(t))$ ifadesine göre (15) denklemi ile bulunan $x(t)$ ifadesi, (8) denklemindeki $y(t)$ yerine konularak $y(t)$ yörünge fonksiyonu aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$y(t) = -4 \sin^4 \frac{\pi}{2(1-t)} - 2 \sin^2 \frac{\pi}{2(1-t)} + 2 \quad (16)$$

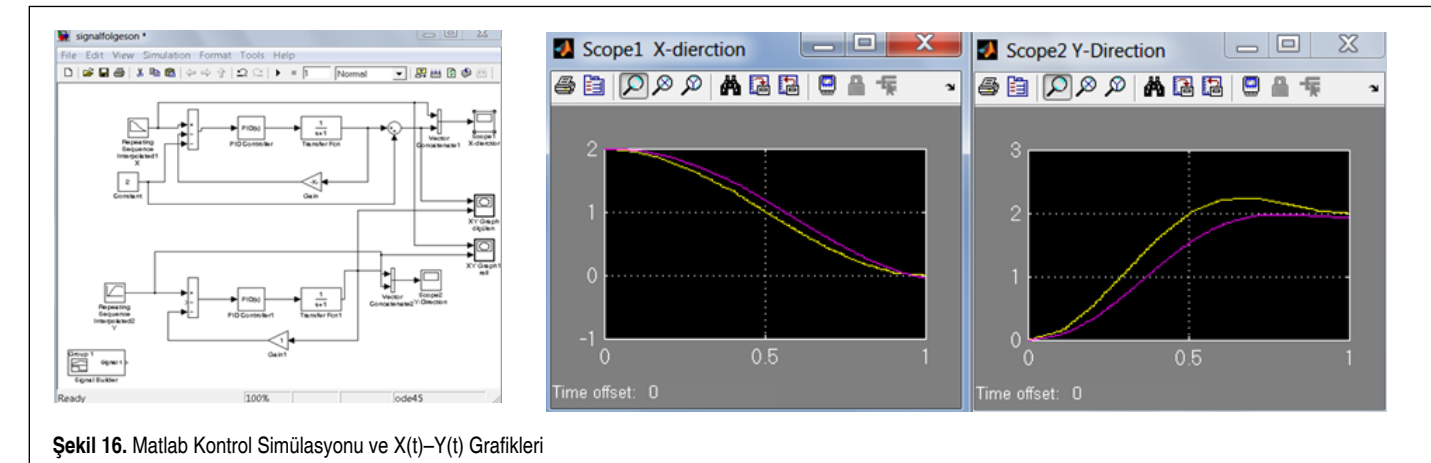
Zamana bağlı polar koordinatlarda eğri denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$r(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (17)$$

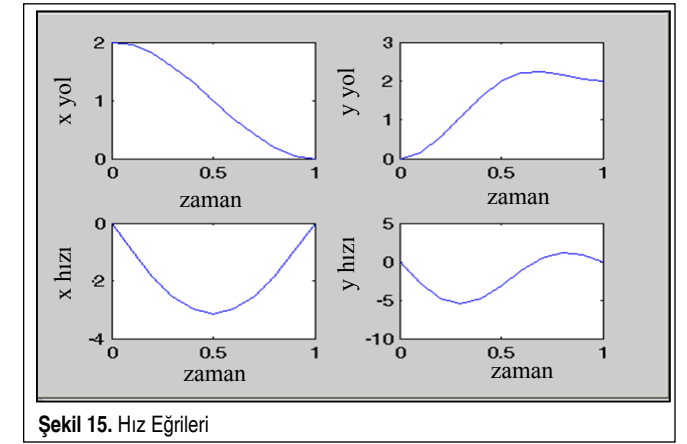
$$\theta(t) = \arctan \left(\frac{y(t)}{x(t)} \right) = \arctan \left[-2 \sin^2 \frac{\pi}{2(1-t)} + 1 \cos e^2 \frac{\pi}{2(1-t)} \right] \quad (18)$$



Şekil 14. Yörünge Eğrisi



Şekil 16. Matlab Kontrol Simülasyonu ve X(t)-Y(t) Grafikleri



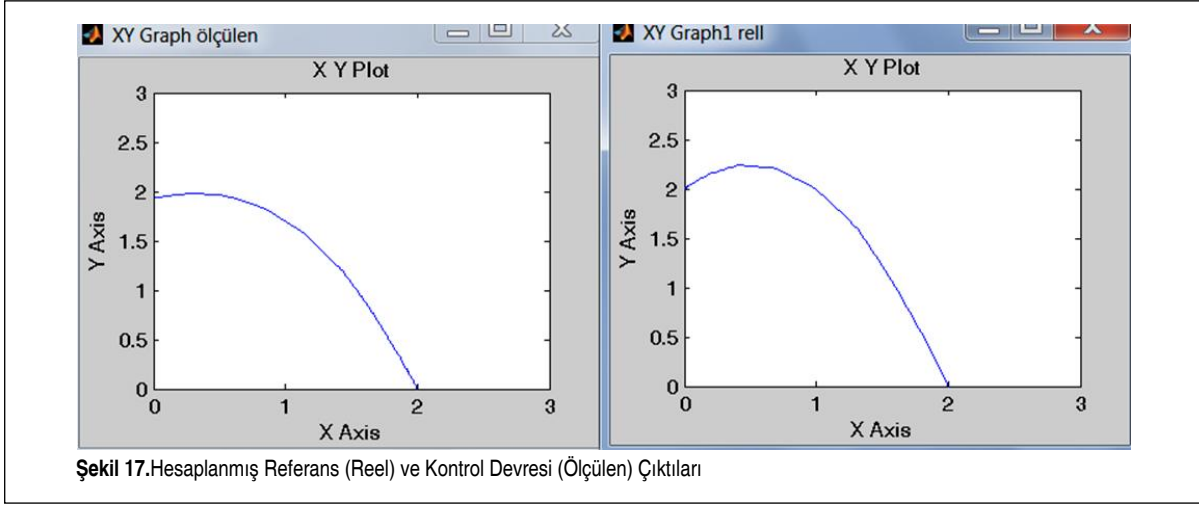
Şekil 15. Hız Eğrileri

5. SONUÇ

Yukarıda, sınır şartları olarak yörünge noktaları ve bu noktalardaki hızları verilerek $x(t)$ ve $y(t)$ fonksiyonları hesaplanan örnek yörünge Matlab ile çizdirilen eğrisi Şekil 14'te görülmektedir. Aynı fonksiyonların mevcut manipülatorde $r(t)$ ve $\theta(t)$ fonksiyonları olarak verilmesi ile de düzlemsel şekil çizdirilebilir. Örnekte belirtilen yörünge noktaları ve bu noktalardaki hızlar verilerek saptanan $x(t)$ ve $y(t)$ fonksiyonlarına göre $V_x(t)$ ve $V_y(t)$ hız eğrilerinin hesaplanmış zamana bağlı eğrileri de Şekil 15'te verilmiştir. Bu eğriler esas alınarak çok hassas yörünge takibi yapılması mümkün olmaktadır.

Aşağıda, bu eğrilerin Matlab ortamında çıktısı verilmiştir.

Tasarımı yapılan ve yörünge hareketi belirlenen robotun Şekil 16'da görülen Matlab Simulink kontrol devresi oluşturularak analizi yapılmıştır. Yukarıda verilen teorik yörünge eğrisinden alınan $X(t)$ ve $Y(t)$ koordinat noktaları referans olarak verilerek kontrol devresi çıktısı olarak önce $x(t)$, sonra da $Y(t)$ eğrileri çizdirilmiştir. Bu eğrilerden her iki durumda da sistem gecikmesinden kaynaklanan hataya rağmen, referans eğrilerin yeterli hassasiyette takibi sağlanmıştır. En son olarak da kontrol devresi çıktıları olarak $Y(t)=f(x(t))$ grafiği çizdirilerek



gerçek yörünge eğrisinden hatası ortaya konmuştur. Gerçek model üzerinde $X(t)$ ve $Y(t)$ değerlerinden hesaplanan r ve θ koordinatları referans verilerek yapılan reel testlerden de simülasyona çok yakın sonuçlar elde edilmiştir.

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

- BRA : İngiliz Robot Birliği
 JIRA : Japon Endüstriyel Robot Birliği
 RIA : Amerikan Robot Enstitüsü
 V : Volt
 PWM : Pulse Width Modulation
 DC : Direct Current
 AC : Alternating Current

KAYNAKÇA

1. Uyar, E., Akçay, M. E., Varol, N. E. 2005. "Cam Temizleme Robotu Tasarımı ve İmalatı," IV. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi, 1-4 Aralık 2005, İzmir.
2. "Notes on Robotics Arm: Robot Arm Tutorial," <http://jun-mechaonline.blogspot.com.tr/2012/06/notes-on-robotics-arm.html>, son erişim tarihi: 3.11. 2013.
3. "Elektro-Pneumatik und Lernsystem Automatisierungstechnik," <http://www.festo-didactic.com/>, son erişim tarihi: 25.10.2013.
4. Antaloczy, T. 2013. "Windoro Window Cleaning Robot," http://robotbg.com/reviews/windoro_window_cleaning_robot_review, son erişim tarihi: 27.06.2013.
5. "Vacuum Technology," http://www.festo.com/cms/nl-be_be/9537.htm, son erişim tarihi: 25.10.2013.
6. "FST4.10 PLC Programming Guide and Software," <http://ftp.me.hwh.edu.tw/ftp/PLC/Festo/FST4%20Manual.pdf>, son erişim tarihi: 15.11.2013.
7. "FESTO Product Catalogue 2008," http://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/10592/VADM_ENUS.pdf, son erişim tarihi: 15.11.2013.
8. Wanders-micro-cleaning, "Wanders GmbH Dorfstr," <http://www.wandres.com/en/contact.html>, son erişim tarihi: 09.09.2013.