

MEKATRONİKTE DONANIM VE YAZILIMIN ROBOT KONTROLÜNDEKİ ÖNEMİ

A. Emre ÇETİN¹

M. Arif ADLI²

^{1,2}Makina Mühendisliği Bölümü

Mühendislik Fakültesi

Marmara Üniversitesi, Göztepe, İstanbul

¹ecetin@eng.marmara.edu.tr

²adli@eng.marmara.edu.tr

Anahtar Sözcükler: Mekatronik, Robot, Kontrol, Donanım, Yazılım

ÖZET

Robot üreticileri ürettikleri robotların kontrol mimarisini tamamen kapalı tutarak kendi yazılımları aracılığı ile sanayi uygulamalarını standartlaştırma ve basitleştirme çabası içerisindeyler. Bu, üretim açısından bakıldığı takdirde iyi bir uygulama olarak görülse de, araştırma ve geliştirme yönünden bakıldığında eğitim kurumları ve üniversitelerde yapılacak çalışmalarda açık mimari bir sistemin gerekliliği çok açıktır. Ayrıca, robotun kontrol sisteminin açık mimari olması da yeterli değildir. Farklı bir kontrol yöntemi uygulamak isteyen araştırmacı çalışmasını yaptığı süreçte sadece kontrol yöntemi ile ilgili değil, aynı zamanda kontrol kartları, bu kartların kurulumu ve programlanması konularında da yeterli bilgiye sahip olması gerekmektedir. Ayrıca sistem bir defa kurulduktan sonra, başka araştırmacıların aynı düzen üzerinde çalışma yapabilmeleri için mevcut yazılımın öğrenilmesi veya değiştirilerek bütün programlamanın en baştan yapılması gerekmektedir. Dolayısı ile bir çalışmada kullanılan yazılım sonraki çalışmalar için çok büyük bir önem taşımaktadır. Bu yüzden, kullanılan yazılımın kontrol yöntemini uygulama esnasındaki öğrenim süreci minimum düzeyde olmalı, araştırmacı programlama üzerinde değil, uygulayacağı kontrol yöntemi üzerinde yoğunlaşabilmelidir.

Bu çalışmada 3 serbestlik dereceli bir kartezyen robot kolunun donanımının değiştirilerek açık mimari bir yapıya dönüştürülüşü ve araştırmacının yazılım konusundaki yükünü azaltarak amacına yoğunlaşmasını ve gerçek zamanlı bir kontrol gerçekleştirmesini sağlayan Matlab yazılımından bahsedilmektedir.

1. GİRİŞ

Günümüzde birçok robot kontrol tekniği, robotun çalışma alanı içerisinde serbestçe hareket ettiğini varsayan pozisyon kontrol metotlarını kullanır. Bu ise PID, veya yerçekimi kuvveti telafili PID gibi temel bazı kontrol yöntemleri ile kolayca yapılabilmektedir[1-2]. Bu yöntemler o kadar yaygınlaşmıştır ki, piyasada sadece bu tarz kontrolleri gerçekleştiren hazır donanımlar (PLC ve modülleri) çok rahatlıkla bulunabilmektedir[15].

Robot kolunun çevresi ile temasta bulunduğu uygulamalarda ise temasta bulunan ortamın geometrik ve dinamik olarak hassas bir modeli elde edilmeden pozisyon kontrol metotları kullanılamaz. Ortamın geometrik ve dinamik olarak hassas bir şekilde modellenmesi ise çoğu uygulamada mümkün değildir. Bu durumda robot kolu çevresi ile temasta iken gerekli etkileşim şartlarını sağlayabilen Kuvvet Kontrol, Hibrid Kontrol ve İmpedans Kontrol gibi kontrol teknikleri kullanılmalıdır[3-8,10,11].

Robot üreticileri ise ürettikleri robotların kontrol mimarisini kapalı tutarak kullanılan kontrol yöntemini kullanıcıdan soyutlama yoluna gitmektedirler. Bu durum karşısında araştırma kurumları ve üniversitelerde araştırma yapan kişiler kendi kontrol yöntemlerini robota direk olarak uygulayamamakta; robotların kontrol mimarisini değiştirmeye, veya açık

mimari kontrol sistemine sahip robotların arayışına girmektedirler[16]. Diğer bir yol ise, robotu baştan üretmektir ki başlı başına ayrı bir araştırma konusudur.

Açık mimari kontrol sistemine sahip bir robot üzerinde istenilen kontrol metodunun uygulanması genel olarak elektronik, makine ve bilgisayar mühendislikleri bilgisi gerektirir. Kontrol için; uygun kontrol kartlarının seçilmesi, donanımın kurulması ve son olarak veri toplama kartlarının programlanarak kontrol metodunun uygulanması aşamaları takip edilir[11,12]. Bu süreci yavaşlatan en büyük etkenlerden biri uygun bilgisayar programlama dilinin seçimi ve kontrol metodunun uygulanacağı programın yazılarak test edilmesidir.

Her kontrol kartı üreticisinin kendi ürettiği kartlar için belirli programlama dillerinde kullanılmak üzere sağladığı giriş-çıkış fonksiyonları mevcuttur[14]. Kullanılan kartın herhangi bir sebepten dolayı başka model bir kart ile değiştirilmesi halinde, yazılımın baştan sona değiştirilerek yeniden oluşturulması gerekmektedir. Bu ise arzu edilmeyen bir durumdur.

Sistem kurulduktan ve istenen çalışma gerçekleştirildikten sonra, diğer önemli bir hususda başka araştırmacıların aynı düzenek üzerinde farklı çalışmalar yapabilmeleridir. Böyle bir durum, kullanılan

programlama dilinin değiştirilmesini yada araştırmacı tarafından en baştan öğrenilmesini gerektirebilir.

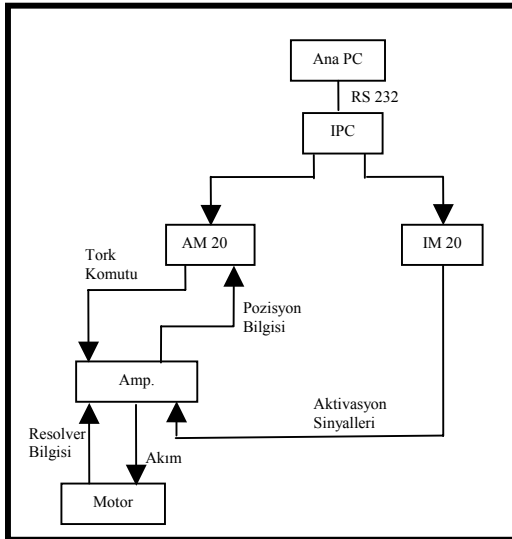
2. DONANIM

Bu çalışma açık mimari bir yapıya dönüştürülen 3 serbestlik dereceli kartezyen bir robot kolunun (Şekil 1) pozisyon, empedans ve kuvvet kontrolü Matlab-Simulink programı ve Matlab-xPC gerçek zamanlı kontrol modülü kullanılarak gerçekleştirildi[10-12].



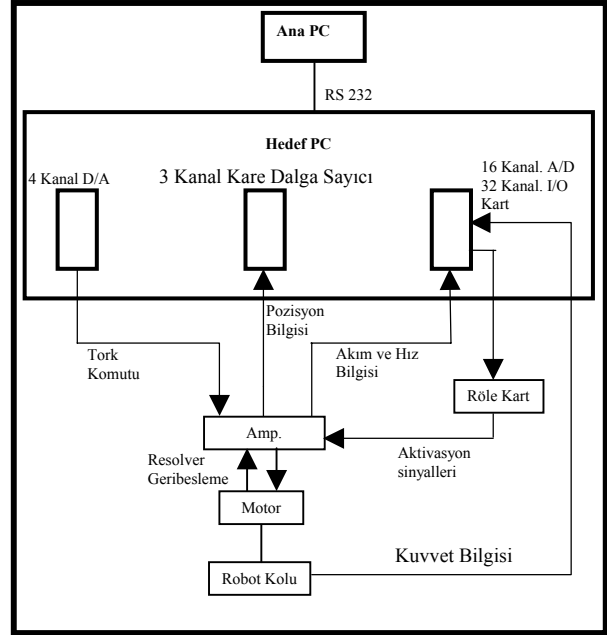
Şekil 1. Üç Serbestlik dereceli kartezyen robot kolu

Sistem ilk kurulduğunda, Şekil 2’de şematik olarak görüldüğü gibi Festo IPC model bir PLC, pozisyon kontrolünü gerçekleştiren AM 20 (her bir eksen için bir adet) modülü ve giriş-çıkış işlemleri içinde IM 20 modülünden oluşmaktaydı. Kontrol, kullanıcıdan bağımsız olarak sadece ana bilgisayardan gönderilen iki nokta ve maksimum hız bilgisi kullanılarak uygulanmaktaydı. Dolayısı ile AM 20 modülünün içsel olarak gerçekleştirdiği pozisyon kontrol yöntemi dışında bir kontrol yönteminin uygulanması mümkün değildi.



Şekil 2. Deney düzeneğinin ilk hali

Robot kolunun çevre ile temasını sağlayacak etkileşim kontrol yöntemleri ile kontrol edilebilmesi için donanım tamamen değiştirilerek Şekil 3’deki son haline getirildi.



Şekil 3. Deney düzeneğinin son hali

Kontrol için üç adet kontrol kartı kullanıldı.

- Amplifikatörün açılıp kapatılması, sınır anahtar konumlarının kontrolü ve kuvvet sensörünün çıkış değerinin okuyabilmek için PCL-812 PG dijital I/O ve A/D çevirici kartı[14].
- Amplifikatörden gelen kare dalga pozisyon sinyallerinin sayılabilmesi için PCL-833 enkoder sayıcı kartı[14].
- Amplifikatöre, kontrol yöntemi ile elde edilen değerdeki tork sinyallerini gönderebilmek için PCI-1820 4 kanal D/A çevirici kartı[14].

Ayrıca PCL-812 PG giriş-çıkış kartından çıkan 5V dijital sinyaller kullanılarak amplifikatörün açılıp kapatılması için gerekli 24 V sinyallerin elde edilmesi için rölelerden oluşan bir elektronik kart üretildi. Aynı kart ile sınır anahtarların 24 V çıkış sinyalleri PCL-812 PG kartının 5 V seviyesine düşürüldü.

3. YAZILIM

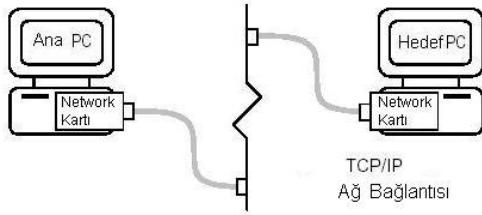
3 serbestlik dereceli kartezyen robot kolunun kontrolü için Matlab ile birlikte dinamik sistemlerin grafiksel simülasyonunun gerçekleştirilebileceği bir ortam olan Simulink ve Simulink’te modellenen sistemi gerçek zamanlı koda dönüştürerek hedef bilgisayarda çalıştıran Real Time Workshop ile xPC modülleri kullanılmıştır[13].

Şekil 3’deki hedef bilgisayar xPC’yi temsil etmektedir. Kontrol kartlarının hepsi hedef bilgisayar üzerinde kurulmuştur. Hedef bilgisayar için sabit diske ve bir işletim sistemine gerek yoktur. Çekirdek bir program vasıtası ile disketten açılmaktadır. Ayrıca Simulink’de modellenerek hedef PC’de çalışmak üzere oluşturulan kodun gerçek zamanlı çalıştırıldığı düşünülürse 486 işlemcili bir bilgisayar da yeterli olmaktadır.

Ana bilgisayarda oluşturulan model gerçek zamanlı çalışabilecek koda dönüştürülerek Şekil 4a'daki gibi RS232 bir bağlantı veya Şekil 4b'deki gibi network yada internet üzerinden hedef bilgisayara yüklenmekte,



a) RS232 ile seri bağlantı



b) Network/Internet üzerinden bağlantı
Şekil 4. Ana ve Hedef PC bağlantı metotları

ve hedef bilgisayara yüklenen program ana bilgisayar tarafından kontrol edilebilmektedir. Ayrıca sistemin çalışması esnasında değişen parametrelerde takip edilebilmektedir.

4. MODEL

3 serbestlik dereceli bir robotun genel denklemi şu şekilde ifade edilebilir.

$$\mathbf{B}(q)\ddot{q} + \mathbf{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \mathbf{F}_d\dot{q} + \mathbf{g}(q) + \mathbf{F}_s \operatorname{sgn}(\dot{q}) = \boldsymbol{\tau}_c - \mathbf{J}^T(q)\mathbf{h} \quad (1)$$

Burada $\mathbf{B}(q) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ pozitif simetrik atalet matrisini, $\mathbf{C}(q, \dot{q}) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ Coriolis ve merkezkaç moment matrisini, $\mathbf{F}_d \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ sönümleme matrisini, $\mathbf{g}(q) \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ yerçekimi kuvveti vektörünü, $\mathbf{F}_s \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ statik sürtünme kuvvetini, $\boldsymbol{\tau}_c \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ eklem moment vektörünü, $\mathbf{h} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ robot koluna etkiyen kuvvet ve moment vektörünü, $\mathbf{J} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ robot kolu ucuna etkiyen harici kuvvet ve momentleri eklem uzayına çeviren Jacobian matrisini ve $\mathbf{q} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ ise eklem konum değişkenlerini temsil etmektedir.

Bu denklem 3 serbestlik dereceli kartezyen robot kolu için aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$\mathbf{B}\ddot{q} + \mathbf{F}_d\dot{q} + \mathbf{F}_s \operatorname{sgn}(\dot{q}) + \mathbf{B}\mathbf{g} = \mathbf{f}_c - \mathbf{J}^T\mathbf{f}_e \quad (2)$$

Burada, kartezyen robotun yapısından dolayı diyagonal atalet matrisi $\mathbf{B}$ ve diyagonal Jacobian $\mathbf{J}$ matrisi eklem pozisyon değişkenlerinden bağımsızdır. Aynı sebepten dolayı sistemde Coriolis, merkezkaç ve eklem momentleri de mevcut değildir. Dolayısı ile eklem moment vektörü $\boldsymbol{\tau}$ ve robot kol ucuna etkiyen harici kuvvet ve moment vektörü $\mathbf{h}$, sırası ile $\mathbf{f}_c$ ve $\mathbf{f}_e$ olarak temsil edilmiştir.

(2) nolu denklem eklem uzayında tanımlanmıştır. Direkt kinematik dönüşüm ile robot kol ucu uzayına aşağıdaki gibi dönüştürülebilir.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{r}} + \mathbf{F}_s \operatorname{sgn}(\dot{\mathbf{r}}) + \mathbf{M}\mathbf{J}\mathbf{g} = \mathbf{f} - \mathbf{f}_e \quad (3)$$

Burada $\mathbf{M}$, $\mathbf{D}$ ve $\mathbf{F}_s \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ sırası ile diyagonal kütle, sönümleme ve statik sürtünme kuvveti matrislerini temsil etmektedir. $\mathbf{M}\mathbf{J}\mathbf{g} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ yerçekimi kuvveti etkisini, $\mathbf{f} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ kontrol kuvvetini ve $\mathbf{f}_e \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ ise robot koluna etkiyen harici kuvvetleri belirtmektedir.

Kontrolü yazılım açısından daha kolay inceleyebilmek için kartezyen robot kolunun sadece x eksenini yönündeki hareketi ele alınarak, (3) nolu denklem aşağıdaki gibi yazılmıştır.

$$m_x\ddot{x} + d_x\dot{x} + f_{sx} \operatorname{sgn}(\dot{x}) = f_x \quad (4)$$

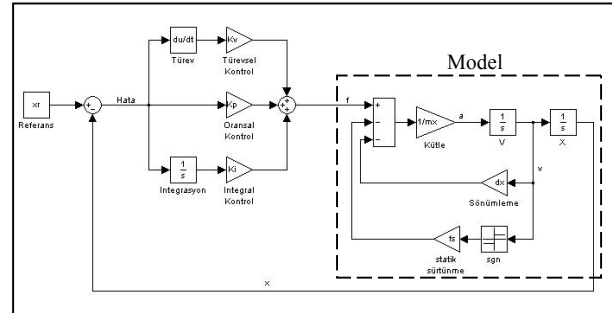
Bu ekseninde yerçekimi kuvveti etkisi bulunmamaktadır. Ayrıca, robot kolunun çevresi ile temasta bulunmadığı kabul edilerek, robot koluna etkiyen harici kuvvete de denklemde yer verilmemiştir.

Kullanılan etkileşim kontrol yöntemleri bu çalışmanın kapsamı dışında olduğundan, sadece PID pozisyon kontrol metodu ele alınmış ve sisteme uygulanması gereken kontrol kuvveti şu şekilde seçilmiştir.

$$f_x = K_p e + K_v \dot{e} + K_i \int e dt \quad (5)$$

Burada, e , robot kolunun referans pozisyonu x_r ile mevcut pozisyonu x arasındaki ($x_r - x$) farkını, yani hatayı, K_p , K_v ve K_i ise sırası ile oransal, türevsel ve integrasyon kontrol kazançlarını temsil etmektedir.

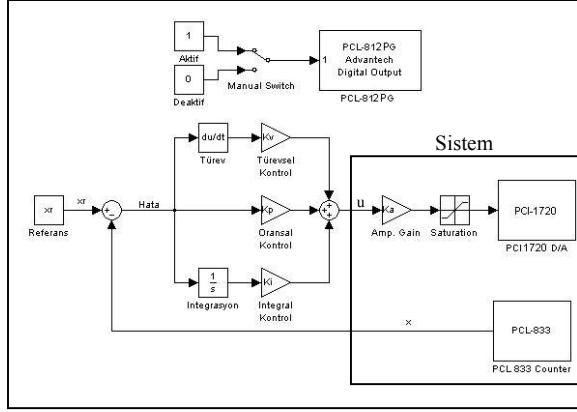
(4) nolu denklem ile temsil edilen sistemin (5) nolu denklem ile kontrolünün simülasyonu Şekil 5'de görülen Simulink blok diyagramı ile gerçekleştirilmiştir[10-12].



Şekil 5. PID Kontrol simülasyonu

Şekil 5'deki kesikli çizgi ile belirtilen kısım robot kolunun x eksenini doğrultusundaki hareketinin modelini temsil etmektedir. Bu simülasyonun gerçekleştirilebilmesi için x ekseninin (4) nolu denklemdeki dinamik parametrelerinin (m_x , d_x , f_{sx}) bilinmesi gerekmektedir. Bu ise sistem parametrelerini tanımlama yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir[4,9,11].

Şekil 5'de simülasyonu gerçekleştirilen ve Şekil 1'de görülen robot kolunun x eksenini doğrultusundaki hareketinin, gerçek zamanlı kontrolü için ise Şekil 6'daki Simulink blok diagramı kullanılmıştır.

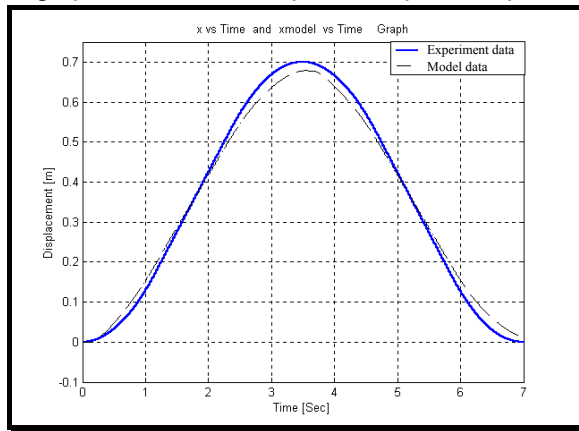


Şekil 6. Gerçek zamanlı PID Kontrol

Şekil 5'de model olarak kesikli kutu ile belirtilen kısım Şekil 6'da kontrol kartlarının blokları ile sistem olarak tanımlanmıştır. Referans pozisyon ve mevcut pozisyon arasındaki hata ile üretilen kontrol çıkışı (u), amplifikatör kazancı * ile motora uygulanması gereken akımı yaratacak sinyale (± 10 V) dönüştürülerek PCI-1720 D/A kontrol kartı ile amplifikatöre uygulanmaktadır. Aynı şekilde amplifikatörden gelen ve motorun pozisyonunu belirleyen kare dalgalar (encoder signals) PCL-833 kare dalga kartı ile sayılarak kinematik bağıntılar ile doğrusal konum değerine dönüştürülüp sisteme geri beslenmektedir. Son olarak bir anahtar vasıtası ile x eksenini amplifikatörü PCL-812 PG kartı ile açık veya kapalı konuma geçirilmektedir.

Şekil 6'daki blok diagramı gerçek zamanlı çalışabilecek koda dönüştürülerek Şekil 4'deki bağlantı metodlarından biri ile hedef bilgisayara yüklenerek, ana bilgisayar vasıtası ile kontrol edilmektedir. Sistemin çalışması esnasında pozisyon, hata, kontrol çıkışı gibi değerler ise takip edilerek kaydedilebilmektedir.

Şekil 7'de aynı referans girişi altında dinamik parametreler kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon ile gerçek sistemin davranışı üst üste çizdirilmiştir.



Şekil 7. Model ile gerçek sistemin davranışı

* Amplifikatör kazancı değeri ürün kataloglarında mevcut olduğu gibi tanımlanabilmektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada 3 serbestlik dereceli bir kartezyen robot kolunun donanımı değiştirilerek açık mimari bir yapıya dönüştürülmüştür. Kullanılan yazılım sayesinde, sistem bir defa kurulduktan sonra, başka araştırmacıların aynı düzen üzerinde çalışma yapabilmeleri için mevcut yazılımın öğrenilme sürecinin çok kısa olması sağlanmıştır.

Kullanılan yazılım şu anda yaklaşık 20 firmanın (Advantech, National Instruments, vb.) 200'e yakın kontrol kartının bloğunu sağlamaktadır. Şekil 6'da görülen kontrol kartlarından sadece PCL-812 PG kartı yazılım tarafından desteklenmektedir. Diğer iki kartın blokları ise C dili ile oluşturulmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Sciavicco L.; Siciliano B.; "Modeling and Control of Robot Manipulators", The McGraw-Hill Comp.
- [2] Craig J. J.; "Introduction to Robotics", Addison-Wesley Publishing Comp.
- [3] An. C. H.; Atkeson C. G.; Hollerbach J. M.; "Model-Based Control of a Robot Manipulator", The MIT Press
- [4] Sinha N. K.; Kuszta B.; "Modeling and Identification of Dynamic Systems", Van Nostrand Reinhold Comp.
- [5] Peng Z. X.; "Compliant Motion Control of Manipulators", PhD, Niigata Univ., Japan, 1992
- [6] Adli M. A.; Ito K.; Hanafusa H.; "Controlling the Compliance via Internal Forces on Objects Held by Dual-Arm Robots", IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS, 1995
- [7] Siciliano B.; Villani L.; "A Survey of Robot Interaction Control Schemes with Experimental Comparison", IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol. 4, pp. 273-285, 1999
- [8] Mason M. T.; "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 418-432, 1981
- [9] Yoshida K.; Ikeda N.; Mayeda H.; "Experimental Study of the Identification Methods for an Industrial Robot Manipulator", IROS July, 1992
- [10] Çetin A. E.; Adli M. A.; "İki Serbestlik Dereceli Kartezyen Robot Kolu ile Temas Yüzeyi Arasında, Hareket Esnasında Oluşan Kuvvetlerin Simülasyonu ve Kontrolü", 10. Ulusal makina Teorisi Semp., Konya, Eylül 2001
- [11] Çetin A. E.; "Handling Interaction Forces Between an Object and Cartesian Robot Arm in Planar Motion", Thesis for the Deg. of Masters of Science, Marmara Univ. Inst. For Graduate Studies in Pure and Applied Sciences, İst., 2002
- [12] Namlı C. N.; Ozan O. G.; "Identification and Control of a Three-Axis Cartesian Robot Arm", Eng. Project, Marmara Univ. Inst. For Graduate Studies in Pure and Appl. Sciences, İst., 2002
- [13] <http://www.mathworks.com>
- [14] <http://www.advantech.com>
- [15] <http://www.festo.com>
- [16] www.sdia.or.jp/mhikobe/products/mechatronic