

ROBOTLARDA KUVVET VE KONUM DENETİMİ

1. GİRİŞ

Robotlar endüstride, çok basit denetim yöntemlerinin başarılı sonuçlar verebildiği işlerde, kullanılmaya başladılar. Bu basit işler bir parçayı bir yerden alıp başka bir yere götürmek, püskürterek boya yapmak veya kaynak yapmak benzeri işlerdi. Yapılan işte istenen kesinliğin artması ve robotların ustalık gerektiren işlerde kullanılması isteği denetim yöntemlerinin karmaşıklaşmasına neden olmuştur. Basit işlerde açık döngü konum denetimi yeterliken yüksek kesinlik isteyen işlerde kapalı döngü konum denetimi ve kuvvet denetiminin birlikte uygulanması gerekmektedir.

Yazının ikinci bölümünde robot kolların kinematik, dinamik, konum denetimi anlatılmakta ve temel konum denetim yöntemleri gözden geçirilmektedir. Yazının üçüncü bölümünde ise, konum ve kuvvet denetiminin birlikte uygulandığı yöntemler gözden geçirilmektedir.

2. KONUM DENETİMİ

Robotların konumlarının denetlenmesi robotların uç noktalarının yer ve yönünün eklem-değişkenleri cinsinden gösterilmesinden sonra olasıdır. Robotların uç noktalarının eklem açılarının cinsinden gösterilmesinde her uzay üzerinde sabit olan koordinat sistemleri arasındaki dönme ve doğrusal hareket ilişkilerini belirten tektürel $[4 \times 4]$ matrisler kullanılır. $[4 \times 4]$ dönüşüm matrisleriyle uzaysal mekanizmaların yer ve yönlerinin belirlenebileceği Denavit - Hartenberg tarafından gösterilmiştir. [1] [2] [3]. Robotun uç noktasının yer ve yönü bütün eklemlerin dönüşüm matrislerinin sıralı çarpımına eşit olan $T_n(q)$ matrisiyle belirlenebilir.

Haluk ZONTUL
Aydın ERSAK

$$T_n(q) = \begin{bmatrix} n_x o_x a_x p_x \\ n_y o_y a_y p_y \\ n_z o_z a_z p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

burada q eklem değişkenlerini, p vektörü robotun uç noktasının uzaydaki yerini n, o, a vektörleri uç noktanın yönünü göstermektedir [2] [3] [4].

$T_n(q)$ matrisinde eklem değişkenleri verildiğinde p, n, o, a vektörlerinin bulunması işi düz kinematik; p, n, o, a verildiğinde eklem değişkenlerinin bulunması işi ters kinematik olarak adlandırılır.

Robotların konum denetimi; verilen zamana bağlı bir $T_t(q)$ için eklem değişkenlerini (açı ve uzuv uzunluklarını) değiştirerek $T_n(q)$ 'yi sürekli olarak sağlayacak değerlerde tutma olarak tanımlanabilir. $T_t(q)$ kartezyen koordinat sisteminde (yada başka bir dünya koordinat sistemi de olabilir) tanımlandığı için yapılan konum denetimi kartezyen koordinat konum denetimi olarak adlandırılır. Eğer konum $q(t)$ şeklinde eklem değişkenleri cinsinden verilirse (eklem değişkenleri uzayında) yapılan denetim eklem uzayı konum denetimi olarak adlandırılır. Yapılacak işler genellikle dünya koordinatları cinsinden kolaylıkla tanımlanabilecek işlerdir. Bu nedenle dünya koordinatlarında denetim yapılması anlamlıdır, yada dünya koordinatlarında tanımlanan işler ters kinematik yardımıyla eklem değişkenleri uzayına dönüştürülür ve eklem uzayı konum denetimi uygulanır.

Robotun eyleyicilerine uygulanan buruyla (torque) eklem değişkenleri arasındaki ilişkiye robotun J_i namik denklemi verir. Dinamik denklemi genel olarak (2) deki gibi yazılabilir.

$$T = M(q)q + V(q,q) + g(q) \quad (2)$$

Burada $M(q)$ eylemsizlik matrisini; $V(q,q)$ merkez kaç ve Coriolis kuvvetlerini, ve $g(q)$ yer çekimi etkisini göstermektedir.

Robotun eyleyicilerine uygulanacak buru büyüklükleri yukarıdaki ikinci dereceden doğrusal olmayan farksal denklemin çözümü yoluyla yapılır. q, \dot{q} ve istenen q verildiğinde T , ya da q, \dot{q}, T verildiğinde q bulunabilir.

Çözülmüş Eylem-Konum Denetimi:

Bu yöntem $T_n(q) = T_n(t)$ denkleminin analitik olarak çözülmesi temeline dayanır. Verilen kartezyen koordinatları sağlayacak eklem değişkenleri analitik olarak ters kinematikten bulunurlar. Ters kinematiğin analitik çözümünün gerekli olması bu yöntemin kolaylıkla her hangi bir robota uygulanmasını engellenmektedir.

(1) doğrusal olmayan bir denklemdir. Altı eklemlili kollarda belirli koşulları sağlamak üzere, bu doğrusal olmayan denklemin analitik çözümünün olduğu gösterilmiştir. [2]. Altıdan farklı eklem sayıları için bu denklemin bir nokta için çözümü elde edilemez yada sonsuz çözüm elde edilir. Endüstride kullanılan robot kollarının ters kinematikleri çoğunlukla analitik olarak üretici kurumlar tarafından tanımlanmaktadır.

Çözülmüş Eylem Hız Denetimi

Çözülmüş eylem hız denetimi eklem hızlarıyla kartezyen koordinat hızları arasındaki ilişkiyi kullanılarak konum denetimi yapar. Eklem hızlarıyla kartezyen koordinat hızları Jacobian'la birbirine bağlanmıştır.

$$\dot{x} = J\dot{q} \quad (3)$$

yine burada x, \dot{x} kartezyen koordinat doğrusal ve açgözlü hızlarını; q, \dot{q} eklem hızlarını göstermektedir.

Çözülmüş eylem hız denetiminde ölçülmüş eklem değişkenleri kullanılarak robotun gerçek yer ve yönünü gösteren T_{ng} hesaplanır. (q eklem değişkenlerinin (1)'de yerine konması yoluyla hesaplanır.) İstenen T_n ile T_{ng} arasındaki farktan x hesaplanır. [2]

$$q = J^{-1}x \quad (4)$$

eşitlik (3) ün tersidir, q bu eşitlik kullanılarak sayısal olarak hesaplanır.

Jacobian $[6 \times n]$ boyutlarındadır (n eklem sayısı). J^{-1} in tanımlı olması için $n = 6$ olmalıdır. Ama $n = 6$ için bu yöntem x vektörünün ne tane denetlenmek istenen değişkeni seçilerek uygulanabilir. (Eğer $n > 6$ ise, bu defa 6 tane eklem değişkeni seçilerek de aynı yöntem uygulanabilir. Diğer eklem değişkenleri başka gerekleri yerine getirmek için serbestçe kullanılabilir, enerjiyi en az harcamak gibi.)

Çözülmüş Eylem İvme Denetimi:

Bu denetim yönteminde (3)'ün zaman göre birinci türevi kullanılmaktadır.

$$\ddot{x}(t) = J(t)\ddot{q}(t) + \frac{J(t)}{t} \dot{q}(t) \quad (5)$$

$$\ddot{q} = J^{-1}(t) (\ddot{x}(t) - \frac{J(t)}{t} \dot{q}(t)) \quad (6)$$

(6) aracılığıyla $q(t)$ hesaplanır. J^{-1} matrisinin tanımlı olması için çözülüş eylem hız denetimi yönteminde yapılan açıklamalar bu yöntem için de geçerlidir.

Çözülmüş işlem konum denetimi açık-döngü olarak uygulanabilir. Çözülmüş eylem hız denetiminde eklem değişkenlerinin, çözülüş eylem ivme denetiminde ise hem eklem hızlarının ölçülmesi gereklidir. Bu nedenle buradan elde edilen veriler; (2) çözülebilir.

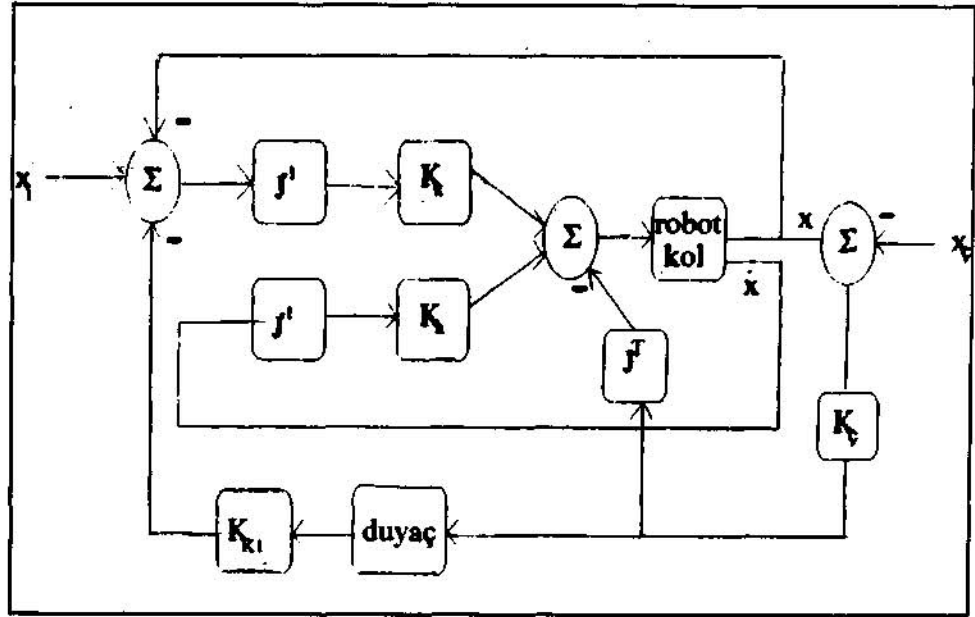
3. KUVVET DENETİMİ

Robotların ilişkide buldukları çevreyle uyumlu çalışmaları için çevreye uygulayacakları kuvvetlerin denetlenmesi gerekmektedir. Kuvvetlerin denetlenmesi robotun ve çevrenin zarar görmesini engelleyeceği gibi belirli bazı kuvvetlerin uygulanmasını gerektiren işlerin de robot tarafından yapılabilmesini sağlamaktadır. Bu işlere örnek olarak bir somunun belirli bir buruyla sıkılması

yada sürtünmeye karşı olarak bir pim'in yerine oturtulması işleri gösterilebilir. Eklem burularıyla uç nokta kartezyen koordinat kuvvetleri arasında Jacobiana bağlı aşağıdaki ilişki vardır.

$$T = J^T F \quad (6)$$

Burada T eklem torklarını F Kartezyen koordinat kuvvetlerini göstermektedir.



Şekil 2: Sönüm Denetiminin Uygulanışının Kavramsal Gösterimi

Stifness Denetimi:

Stifness denetiminde robotun uç noktasının çevreyle olan dokunmasıyla kartezyen koordinat sisteminde bir konum hatası elde edilir. Elde edilen bu hata vektörü yapılacak işe göre tanımlanmış olan bir stifness matrisiyle, K_s çarpılarak kartezyen koordinat kuvvetleri bulunur. Stifness matrisinin, elemanlarına göre bazı ek-

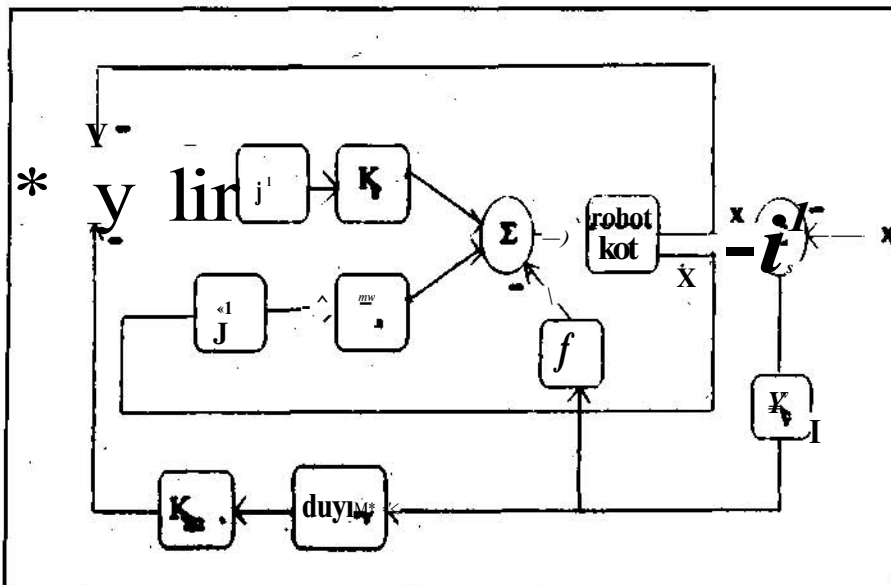
senlerde yüksek bazı eksenlerde düşük kuvvetler uygulanır. Kartezyen kuvvetler J^T ile çarpılarak eklem buruları bulunur. Kartezyen koordinat kuvvetleri konumunun düzeltilmesi için geri besleme olarak kullanılır.[5] Bu yöntemin uygulanışı Şekil 1 de gösterilmektedir.

Sönüm denetimi:

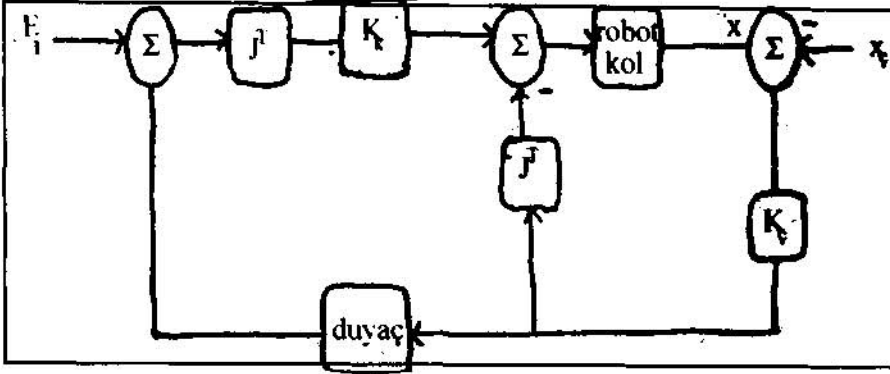
Stifness denetiminin tümlevsel olanıdır. Kartezyen kuvvetler istenilen konum emirleri yerine istenen hız emirlerinin düzeltilmesinde geri besleme olarak kullanılmaktadır. Yalnızca istenilen hızları girdi olarak kabul eden bir denetim yöntemidir.[5] Uygulanışı Şekil 2 de gösterilmektedir.

Celi (İmpedance) Denetimi:

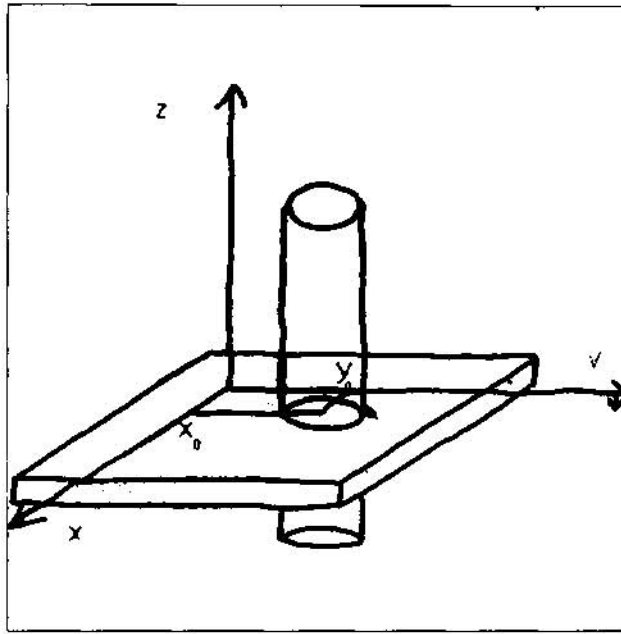
Sönüm ve stifness denetimlerinin genel halidir. Hem istenen konum, hem de istenen hız emirleri denetim döngüsünün girdisidir. Kartezyen kuvvet bilgisi



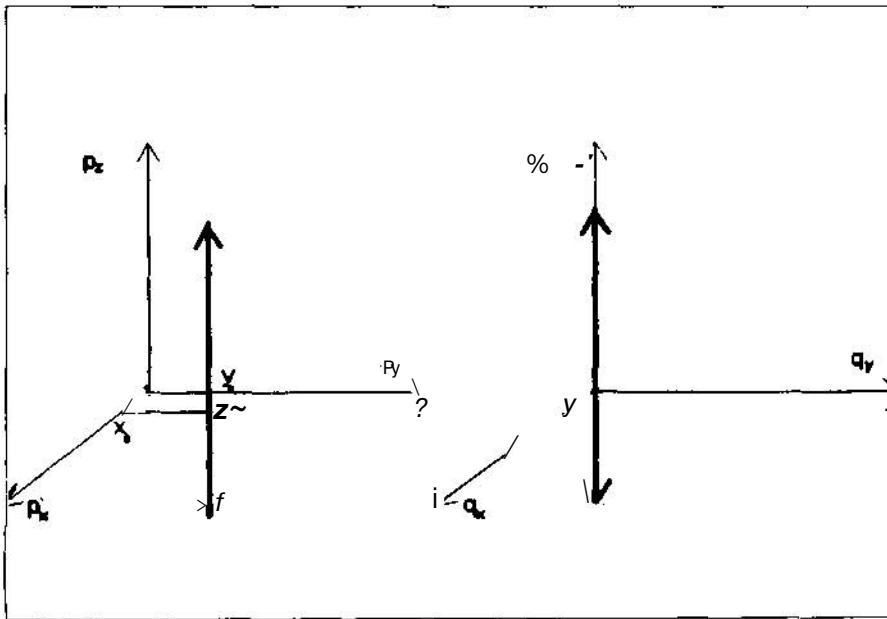
Şekil 1: Stifness Denetiminin Uygulanışının Kavramsal Gösterimi



Şekil 3: Belirtik Kuvvet Denetiminin Uygulanışının Kavramsal Gösterimi



Şekil 4:
Doğal ve Yapay Sınırlamalar



farklı kazançlarla çarpılarak hız ve konum emirlerine geri besleme olarak verilir.[5]

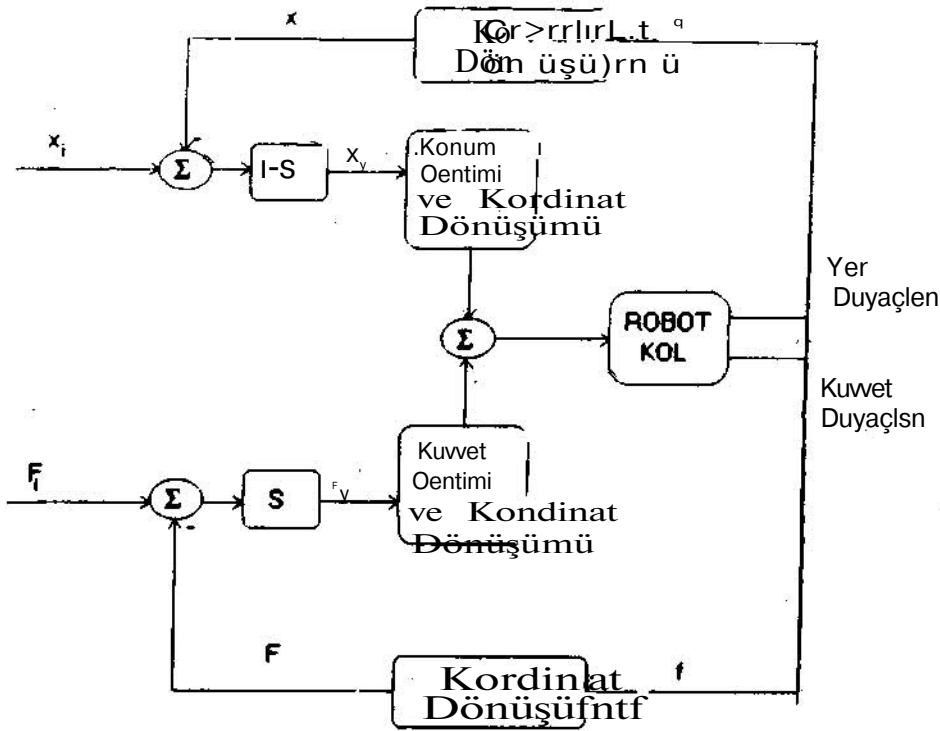
Belirtik (Explicit)
Kuvvet Denetimi:

Yukarıda saydığımız kuvvet denetim yöntemlerinde uygulamak istediğimiz kuvvetler denetimin döngüsüne girdi olarak verilmemektedir. Kuvvet denetimiyle ilgili bilgiler stiffness matrisi, K_v , aracılığıyla denetim yöntemine girilmektedir. Doğrudan kuvvet denetiminde uygulanması istenen kuvvetler denetim döngüsünün girdisidir.[5] Denetim döngüsü Şekil 3 te gösterilmiştir.

Melez Konum-Kuvvet Denetimi:

Melez konum denetimi kartezyen koordinat (yada yapılacak işe uygun başka bir koordinat) sistemindeki konum ve yön tanımlayan eksenleri kuvvet denetlenecek ve konum denetlenecek eksen ve yönler olarak ikiye ayırma temelinde dayanır. İlk uygulamalarda eklemlerin hareket yönleriyle kuvvet veya konum denetimi yapılacak eksenlerin çakışması gerekmektedir. Sonraki çalışmalar eksenlerin çakışmasının gerekli olmadığı kuramsal olarak göstermiştir[6].

Dünya koordinatlarında geometriye göre belirlenen ve birbirini dik olarak tümleyen doğal ve yapay sınırlamalar uzayı tanımlamaları getirilmiştir, doğal ve yapay sınırlamalar Şekil 4'deki örnek üzerinden kolayca anlaşılabilir.



Şekil 5: Melez Denetlemin Kavramsal Gösterimi

Pim delik tarafından sınırlandırıldığı için x ve y yönlerinde doğrusal hızlar sıfırdır. Bunun yanında x ve y eksenleri etrafında dönel hızlar da sıfırdır. (Bu yön ve eksenler etrafında doğrusal ve dönel hareket olanağı yoktur.) z eksenini yönündeki kuvvet ve z eksenini çevresindeki burular sıfır olmalıdır. (Sürtünme yok sayılırsa bu kuvvet ve buruya karşı koyacak ters bir etki yoktur.) Yukarıdaki sınırlama geometrinin getirdiği doğal sınırlamalardır. Yapay sınırlamalar ise şöyle sıralanabilir. x ve y yönündeki kuvvetlere x ve y eksenleri çevresindeki burular sıfır olmalıdır. (Bu yön ve eksen çevrelerinde hareket olası olmadığından kuvvet yada buru uygulamak anlamlı değildir.) z yönündeki doğrusal hız ve z eksenini çevresindeki dönel hız farklı ve herhangi bir değer alabilirler.

Yukarıdaki kuramsal yaklaşım kullanılarak melez bir denetleç gerçekleştirilmiştir [7]. Denetlecin yapısı Şekil 5 de gösterilmektedir.

Denetlecin iki girdisi istenen konum ve kuvvet bilgileridir. Hangi eksenlerde kuvvet, hangi eksenlerde konum denetimi yapılacağı bilgisi S köşegen matrisiyle girilir. Burada 1 birim matrisi göstermektedir. Diğer kuvvet denetim yöntemleriyle karşılaştırıldığında melez kuvvet denetimi hem istenen konum hem de istenen kuvvet bilgilerinin belirtik girdi olarak kabul ettiğinden uygulama kolaylığı vardır. Birden çok kolun birlikte çalıştırılması için de kullanılabilir. Kollardan birinde yalnızca konum denetim döngüsü (yada yüksek kazançlı konum ve düşük kazançlı kuvvet denetim döngüsü) uygulanır. Diğer kolda ise hem kuvvet hem konum denetim döngüsü uygulanır.

4. SONUÇ

Konum denetim yöntemlerinin seçilmesinde temel kısıtlama kullanılabilecek geri besleme duyaçlarının çeşitliliğine bağlıdır. Geri besleme olanağı olmadığı durumlarda çözülmüş-eylem

konum denetimi, konum geri beslemesinin olası olduğu durumlarda çözülmüş-eylem hız denetimi uygulanabilir, hız ve konum geri beslemelerinin bulunduğu durumlarda çözülmüş-eylem ivme denetimi uygulanabilir. Kuvvet ve konum denetimi birlikte uygulanacaksa yapılması istenen göreve göre bir KÇ tanımlama yada belirtik kuvvet denetimi yöntemi uygulanabilir.

Kaynakça

- [1] Denavit, J. ve Hartenberg, R.S. 1955. A kinematic Notation For Lower-Pair Mechanics Based On Matrices, ASME J. Applied Mechanics 22(2) 215-221
- [2] Paul, R.P. 1981. Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- [3] Fu, K.S., Gonzalez, R.C., Lee, C.S.G., 1987. Robotics: McGraw-Hill
- [4] Özgören, M.K. 1993. Robot Kollarının Düz ve Ters Kinematikliği. Elektrik Mühendisliği, Cilt:38, Sayı:391. sayfa 11-19
- [5] Whitney D.E., 1987, Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control, International Journal of Robotics Research, Cilt:6, No:1, sayfa 3-14.
- [6] Mason, M.T., 1981, Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators, IEEE SMC-11 No.6, sayfa 418-432.
- [7] Raibert, M.H., Craig, 1981, Hybrid Position/Force Control of Manipulators, ASME J. Dyn. System, Mea. Con., Cilt 101, Sayfa 126-133.