

ROBOT KOLLARDA KİNEMATİK PERFORMANS VE TASARIM

1. GİRİŞ

Robot-kollar günümüzde endüstrinin birçok değişik alanında uygulanmakta olup, bu alanların sayısı her geçen gün daha da artmaktadır. Şekil 1'de tipik bir N serbestlik dereceli kol, ve kullanılan kinematik notasyon [1] gösterilmiştir. Görüldüğü gibi S_j vektörleri eklem eksenlerini belirlenmekte, a_j vektörleri ise komşu oldukları S_i ve S_j vektörlerinin ikisine de dik olarak tanımlanmaktadır (ghj) ardışık 4 tamsayıyı simgelemektedir. Öte yandan, a_m vektörü etrafında S_j 'den S_i 'ye doğru ve sağ el kuralına göre ölçülen açı α_i olarak tanımlanmıştır. Benzer bir şekilde, 9_h 'de S_h etrafında α_{gh} 'den α_{hi} vektörüne doğru ölçülmektedir, α_{gh} ve α_{hi} ile S_h ve S_i vektörleri arasındaki dik uzunluklar ile sırasıyla S_{hh} ve α_{hi} olarak tanımlanmıştır. Burada kullanılan notasyon Denavit - Hartenberg notasyonuna çok benzemektedir olup, a_{ij} , α_{ij} , S_U ve O_i parametreleri Denavit - Hartenberg notasyonunda C_{ij} , α_{ij} , d_i ve O_i ye karşılık gelmektedir.

ÖZET

Bu makalede robot kolların en önemli kinematik özelliklerinden biri olan çalışma hacmi (workspace) ile ilgili temel bilgiler verilmiştir. Ayrıca, robot elinin bir rijid cisim olarak 3-boyutlu uzaydaki toplam serbestliğini sayısal olarak verebilen bir ölçütten bahsedilmiş; ve bu ölçütün robot tasarımında nasıl kullanılacağı gösterilmiştir.

Sadece döner eklemler (R) içeren bir robot kolda, $\alpha_2 \dots \alpha_{N-1}$ (N); $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_N$ (N + 1) ve $S_n \dots S_{NN}$ sabit olup, robotun kinematik boyutlar setinin oluşturmaktadır. Robot'un i'nci eklemının kayar eklem (P) olması halinde S_U bir eklem değişkeni olacaktır, sabit olan 8 boyut parametresi olacaktır. Böylece, N serbestlik dereceli bir manipülatörde birbirinden bağımsız (3N - 1) adet kinematik boyut bulunacaktır. Söz konusu bu boyutlar robotun pozisyon, hız ve ivme analizlerini; çalışma hacmini (workspace) ve dinamiğini doğrudan etkilemektedirler. Buna karşın, manipülatörlerin kinematik ve dinamik tasarımlarıyla ilgili somut ve rasyonel kriterler çok sınırlıdır. Kinematik boyutlar genelde tasarımcının tecrübesi, robotun kaba kinematik özellikleri (örneğin, küresel bilekli), imalat kısıtları gözönüne alınarak ve deneme yanılma sayılabilecek yöntemler aracılığıyla seçilmektedir. Dinamik tasarım ilkeleri ise kinematik tasarım ilkelerine göre çok daha kısıtlıdır. Bu makalada robotların kinematik performansları ve tasarım ilkeleri tartışılacaktır.

2. ÇALIŞMA HACMI

Robotlarda çalışma hacmi kavramı ilk olarak Roth [2] tarafından ortaya atılmıştır. Bu konuda Kumar ve Waldron [3, 4] daha ayrıntılı bir inceleme yaparak çalışma hacimlerini birincil (primary [5] veya dextrous [4])

Reşit SOYLUO

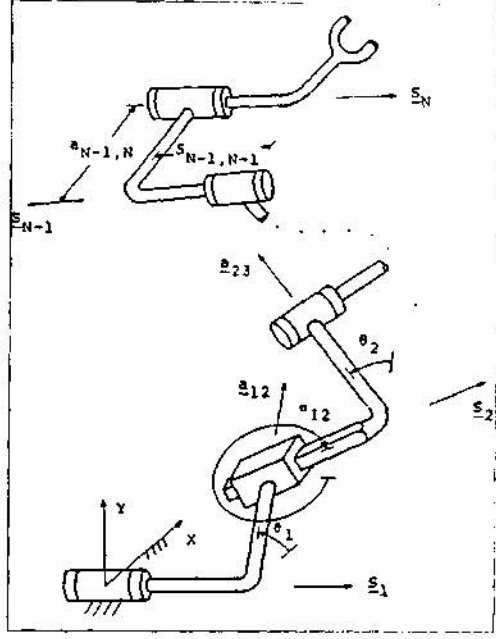
Unu Doğu 7. mih I'm: • /sitesi, Makina Mühendisliği Bölümü

ve ikincil (secondary [5] veya reachable [4]) olmak üzere iki sınıfa ayırmışlardır. Birincil çalışma hacmi, el üzerindeki bir referans noktasının erişebileceği noktalar kümesi olarak tanımlanmıştır, ikincil çalışma - hacmi ise elin istenilen herhangi bir açısal konumu da sağlayarak erişebileceği noktalar kümesidir. Bir manipülatörde çalışma hacmi olabildiğince büyük tasarlanmaya çalışılmalı; ve ayrıca bu hacmin olabildiğince büyük bir kısmının birincil çalışma hacmi olmasına dikkat edilmelidir.

Herhangi serbestlik dereceli bir manipülatörün ikincil çalışma hacmi Kumar ve Waldron'un geliştirmiş olduğu nümerik bir algoritma [4] kullanılarak bulunabilir. Birincil çalışma hacminin elde edilmesi ise çok daha güçtür. Birincil çalışma hacminin temel birtakım özellikleri, ve bu tür çalışma hacmine sahip bazı manipülatörler [3] nolu çalışmada verilmiştir. Çalışma hacimlerinin alabileceği şekiller ve küresel bilekli manipülatörlerde el büyüklüğünün (hand size) birincil çalışma hacmi üzerindeki etkileri Gupta ve Roth [5] tarafından incelenmiş ve el büyüklüğünün küçük olmasının yararlı olduğu sonucuna varılmıştır. Bilindiği gibi küresel bilekli robotlar, son üç döner eklemler bir H noktasında kesişen manipülatörlerdir. Bu tür robotların el büyüklüğü, el üzerindeki referans noktasının H noktasına olan uzaklığı olarak tanımlanmıştır [5].

Tsai ve Soni [6] ve 2 ve 3 serbestlik dereceli düzlemsel robotları incelemişlerdir. Bu tür robotların çalışma hacimlerinin tasarım abakları kullanılarak nasıl bulunabileceğini göstermişler ve ayrıca istenen bir çalışma

hacmini kapsayan manipülatörlerin elde edilebilmesi için tasarım metodları geliştirmişlerdir. Yang ve Lee [7, 8] ise çalışma hacminde bulunabilecek delik (hole) ve boşlukların (void) oluşma şartlarını incelemişler ve bu hacmin şekil ve hacmini verebilen bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Burada, çalışma hacminin içine gömülü olup da erişilemeyen noktalar kümesi boşluk olarak tanımlanmıştır. Öte yandan, delik içeren bir çalışma hacminde, çalışma hacmi tarafından çevrelenen fakat bu hacmin içinde yer almayan en az bir çizgi bulunması gerekmektedir.



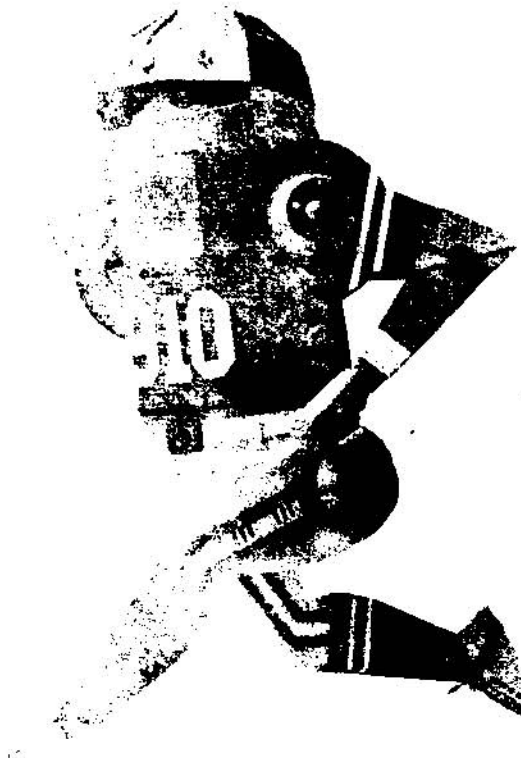
ŞekiL- 1
N. Serbestlik Dereceli
Robot Kol

Küresel bilekli bir manipülatörün bilek noktasının uzayda konumlandırılması için 3 serbestlik dereceli uzaysal bir kinematik zincire gereksinim vardır. Bu nedenle, bu tür kinematik zincirlerin çalışma hacimleri değişik araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Freudenstein ve Primrose [9] konuya analitik olarak yaklaşmışlar; Spanos ve Kohli [10, 11] ise 8 değişik tür zincirin çalışma hacimlerinin bulunabilmesi için gerekli eşitlikleri üretmişlerdir. Tsai ve Soni [12] ise uzuv boyutlarının çalışma hacmi üzerindeki etkilerini inceleyerek, tasarıma yönelik bazı bulguları ortaya koymuşlardır.

Çalışma hacminin içinde belirlenmiş birtakım noktalara istenen bir açısal konumla erişilecek 3, 4, 5 ve 6 serbestlik dereceli, döner eklemlerli robotların kinematik sentezi Tsai ve Soni [13] tarafından incelenmiştir. Vijaykumar, Waldron ve Tsai [14] ise bütün ay açıları 0 ve 90 olan, her uzva ait SII ve aij boyutlarından en az birinin sıfır olduğu küresel bilekli robotları incelemişlerdir, ve bu tür manipülatörlerde çalışma hacminin maksimize edilmesi için gerekli şartları araştırmışlardır.

Genişletilmiş çalışma hacmi (3xtended workspace) kavramı Pohl ve Lipkin [15] tarafından ortaya atılmış olup, eklemler değişkenlerinin kompleks de olabileceği varsayıldığında referans noktasının





erişebileceği noktalar kümesi olarak tanımlanmıştır. Bu kavram, yörünge planlaması (path planning) aşamasında erişilmek istenen noktaların çalışma hacminin dışında kalması durumunda yararlı olmaktadır.

Tanımdan da açıkça görülebileceği gibi çalışma hacmi el üzerinde seçilen referans noktasına bağlı bir kavram olup bu noktanın yeri değiştirildiği zaman çalışma hacminin şekli ve boyutları da değişecektir. Ayrıca çalışma hacmi kavramı elin erişebileceği değişik açısal konumlar ile ilgili hiçbir sayısal bilgi içermemektedir. Robot elinin uzaydaki serbestliğini (açısal konum serbestliği de içerilerek), referans noktasına bağlı olmaksızın sayısal olarak verebilen bir ölçüt Soylu ve Duffy [16] tarafından tanımlanmıştır. Bundan sonraki bölümde bu ölçütün tanımı ve kullanım alanları açıklanacaktır.

3. EL SERBESTLİK ENDEKSİ

Robotlarda Konum Transformasyonu (KT), domeni eklem değişkenleri uzayı (fl - uzayı), ranji ise el pozisyon ve açısal konum uzayı olan bir fonksiyon olarak tanımlanabilir. Şu fonksiyon verilen bir fl vektörünü, karşılık gelen el pozisyon ve açısal konumuna dönüştürür. Öte yandan Jakobian matrisi, [J], ise

$$\dot{\mathbf{v}} = [\mathbf{J}] \dot{\mathbf{q}} \quad 1$$

eşitliği aracılığıyla tanımlanabilir.

Burada $\dot{\mathbf{q}} = \frac{d\mathbf{q}}{dt}$ ve y ise elin hız vektörüdür.

Bu vektörün ilk üç ve son üç elemanları sırasıyla elin açısal hızını ve el üzerindeki bir referans noktasının lineer hızını vermektedir. N serbestlik dereceli bir manipulatörde fl, a ve [J]'nin boyutları (N x 1), (N x 1) ve (6 x N) olacaktır.

Şimdi, 6 serbestlik dereceli bir manipulatörün fl-uzayındaki bir D bölgesini göz önüne alalım. Bu bölgede konum transformasyonunun 1-1 olduğunu ve Jakobian'ın determinantının (|J|) işaretinin değişmediğini varsayalım. Bu durumda, D bölgesinin el serbestlik endeksi (Hand Freedom Number)

$$HFN(D) = \int_{D} |J| \text{Abs}(U) dV_q \quad 2$$

olarak tanımlanacaktır. Burada dV_q uzayının diferansiyel hacim elemanını, Abs (...) ise mutlak değer fonksiyonunu simgelenmektedir. Birimi L^3 (L - uzunluk birimi)

olan bu endeks q e D iken elin bir rijid cisim olarak toplam serbestliğinin sayısal bir ölçütüdür. Bu ölçütün elin pozisyon ve açısal konum serbestliği ile olan ilintisi Soylu ve Duffy [16] tarafından küresel bilekli robotlar kullanılarak türetilmiştir.

Şimdi robotun fl - uzayında denklemi |J| = 0 ile verilen singüler konumlar hiperyüzeyi (Hypersurface of special configurations) ile çevrelenmiş bulunan ve CO_j olarak isimlendirilmiş bölgeleri [17] ve

$$D_j^i(\mathbf{q}): \begin{cases} q, \text{ döner eklem ise } 0 \leq q_i \leq 2\pi \\ q, \text{ kayar eklem ise } 0 \leq q_i \leq S_{i_{ii}} \end{cases} \quad 3$$

bölgesini ele alalım. Burada S_{MU}^+ , S_M^- eklem değişkeninin üst sınırlarını simgelemektedir. Öte yandan fl vektörünün yukarıda tanımlı bir CO_j bölgesinde bulunması, robotun o anda i'inci konfigürasyonda bulunduğunu gösterecektir. Genelde CO_j bölgelerinin sayısı robotun verilen bir el konumuna karşılık gelen reel fl vektörünün maksimum sayısına eşit olmaktadır. Bu durumda, robot i'inci konfigürasyonda iken elin toplam serbestliğinin sayısal ölçütü $HFN(CO_i)$ olacaktır. $HFN(D_i)$ ise bütün konfigürasyonlara karşılık gelen el serbestliğinin bir ölçütü olacaktır.

Eklem değişkenlerinin üzerinde $q_i \leq q_{i_{ii}}$ gibi bir takım kısıtlar olması durumunda, bu kısıtlar CO_i ve/veya D bölgelerinin tanımlanması sırasında kolaylıkla gözönüne alınabilir. Böylece robotun bu kısıtlar altındaki serbestliği bulunabilir. Bilindiği gibi,

manipülâtörler verilen bir el pozisyon ve açısız konumunu değişik konfigürasyonlarda sağlayabilirler (diğer bir deyişle, KT fonksiyonu 1 - 1 değildir). HFN (D), KTnin bu özelliğini de göz önüne almakta olup; verilen bir el konumuna karşılık gelen g, vektörlerinin sayısı arttıkça, HFN (Dt) endeksi de büyümektedir.

HFN (D), robotun aktif lineer boyutlar vektörüne (I) [16, 17] bağlıdır. Bu vektör, birimleri uzunluk birimi olan ve g/ye bağlı olmaksızın $\frac{dI}{db} * 0$ eşitsizliğini sağlayan b boyutlarından oluşmuştur. Örneğin sadece döner eklemlerden oluşan 6 serbestlik dereceli bir robot için 1 vektörü içinde yer alabilecek boyutlar a₂, a₃, a₄, a₅, a₆, S₂₂, S₃₃, S₄₄, ve S₅₅ olacaktır. Bu boyutlardan pasif olanlar [17] (yani U)'yi etkilemeyenler) l'nin içinde yer almayacaktır. Herhangi bir eklemin (örneğin, i'inci eklem) kayar eklem olması durumunda, 1 vektörü S_n yerine S_{II} ve S_{üü}'yu (yani S'nin alt ve üst limitlerini) içerecektir. Bu durumda, l'nin 1 normuna göre normalize edilmiş el serbestlik endeksi, yani lHFN (D)l_h, HFN (D)'nin

$$||l||_1 = 1 \quad 4$$

varsayıldığındaki değeri olarak tanımlanabilir. Öte yandan, HFN (D)'nin ||l||₁ = C'ye karşılık gelen değeri

$$HFN (D) = C^3 ||l||_1 \quad 5$$

olacaktır.

El serbestlik endeksi kavramı kinematik açıdan optimum manipülâtörlerin tasarımında ve değişik robotların kinematik performanslarının karşılaştırılmasında kullanılabilir. Örneğin kinematik tasarım sırasında robotun boyutları HFN (Dt)'yi engelleyecek şekilde seçilebilir. Burada, başka bazı kriterleri sağlamak için kullanılacak boyutlar optimizasyon işleminin dışında bırakılmalıdır (örneğin, küresel bilekli manipülâtörlerde a₄₅ = a₅₆ = S₅₅ « 0 olmalıdır).

Bu tür bir optimizasyon bütün olası küresel bilekli robotlar için yapılmış olup [16, 18] RRRRRR, RRPRRR, RPRRRR, PRRRRR, RPPRRR, PRPRRR, PPRRRR ve PPPRRR tipi robotların optimum lHFN (D)_h değerleri sırasıyla 2674.3, 1327.4, 465.5, 298.8, 73.5, 73.5, 23.5 ve 5.8

olarak bulunmuştur. Yer darlığı nedeniyle optimum robot boyutları burada verilememiştir. Optimum boyutları belli bir C sabitiyle çarpılması durumunda, lHFN (D)_h 'in yeni optimum değeri (5) no'lu eşitlik aracılığıyla bulunabilir. Düzlemsel bilekli manipülâtörler [19, 20] için de benzeri bir optimizasyon yapılmış olup, sonuçlar [18] no'lu kaynakta sunulmuştur.

HFN (D) kavramını eklem değişken limitleri olan q_n ve q_i'nin seçiminde de kullanmak mümkündür. Örneğin, bir öner eklemin hareket ranjının 300° olduğunu varsayalım, q_j = q_n + 300° olsun. Bu durumda, q_n parametresi toplam el serbestlik endeksini maksimize edecek şekilde optimize edilirse, döner eklemin serbestliği verimli bir şekilde kullanılmış olacaktır.

4. SONUÇ

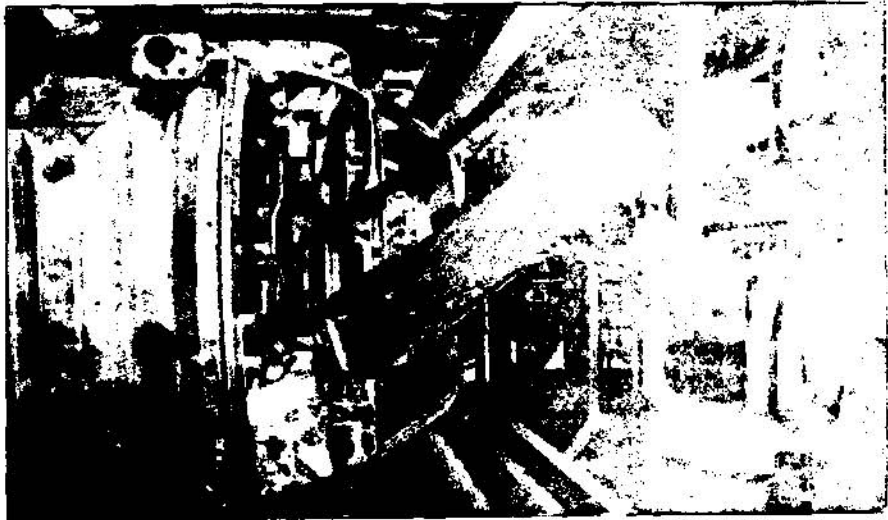
Bu çalışmada robotlarda çalışma hacmi ve el serbestlik endeksi kavramları incelenmiştir. Söz konusu endeks robot elinin uzaydaki serbestliğini bir referans noktasına veya kullanılan eksen takımına bağlı olmaksızın sayısal olarak veren bir ölçüttür. Bu endeks aracılığıyla:

- Değişik manipülâtörlerin boyutlara bağlı olmaksızın kinematik performanslarını karşılaştırmak,
- Kimenatięi optimum olan robotlar tasarlamak mümkündür.

El serbestlik endeksi için gereken U'l'nin hesaplanmasını kolaylaştıran eksen takımları [21] no'lu kaynakta verilmiştir. Ayrıca, robotun değişik konfigürasyonlarını belirleyen COI bölgelerinde konum transformasyonunun 1-1 olabilmesi için gerekli olan bazı şartlar [22] no'lu kaynakta incelenmiştir.



"Bu çalışmada robotlarda çalışma hacmi ve el serbestlik endeksi kavramları incelenmiştir. Söz konusu endeks robot elinin uzaydaki serbestliğini bir referans noktasına veya kullanılan eksen takımına bağlı olmaksızın sayısal olarak veren bir ölçüttür."



- [1] Duffy, J., "Analysis of Mechanisms and Robot Manipulators" John Wiley, New York 1980
- [2] Roth, B., "Performance Evaluation of Manipulators from a Kinematic Viewpoint" Performance Evaluation of Programmable Robots and Manipulators, NBS Special Publication 459, s. 39-62, 1976.
- [3] Kumar A. ve Waldron, K.J., "The Dextrous Workspace", ASME Makale No: 80-DET-108, 1980.
- [4] Kumar A. ve Waldron, K.J., "The Workspaces of a Mechanical Manipulator", Journal of Mechanical Design, Cilt 103, No 3, s. 665-672, 1981
- [5] Gupta, K.C. ve Roth, B., "Design Considerations for Manipulator Workspace", Journal of Mechanical Design, Cilt 104, s. 704-711, 1982
- [6] Tsai Y.C. ve Soni A.H., "Accessible Region and Synthesis of Robot Arms", Journal of Mechanical Design, Cilt 103, s. 803-811, 1981.
- [7] Yang D.C.H. ve Lee T.W., "On the Workspace of Mechanical Manipulators", ASME Makale No: 82-DET 127, 1982.
- [8] Lee, T.W., ve Yang. D.C.H., "On the Evaluation of Manipulator Workspace", ASME Makale No 82-DET- 126, 1982
- [9] Freudenstein F. ve Primrose E.J.F., "On the Evaluation of Manipulator Workspace", ASME Makale No 82 - DET -126, 1982.
- [10] Kohli, D. ve Spanos, J., "Workspace Analysis of Mechanical Manipulators Using Polynomial Discriminants", ASME Makale No: 84-DET- 121, 1984.
- [11] Spanos, J. ve Kohli D., "Workspace Analysis of Regional Structures of Manipulators", ASME Makale No: DET -120, 1984.
- [12] Tsai, Y.C. ve Soni A.H., "The Effect of Link Parameter on the Working Space of General 3 R Robot Arms", Mechanism and Machine Theory, Cilt 19, No. 1, s. 9-16, 1984
- [13] Tsai, Y.C. ve Soni, A.H., "Work space Synthesis of 3R, 4R, 5R and 6R Robots", Mechanism and Machine Theory, Cilt 20, No. 6, s. 555-563, 1985
- [14] Vijaykumar, R., Waldron K.J. ve Tsai, M.J., "Geometric Optimization of Serial Chain Manipulator Structures for Working Volume and Dexterity", International Journal of Robotic Research, Cilt 5, No. 2, s. 91-103 1986.
- [15] Pohl, E. ve Lipkin, H., "Real and Extended Workspace in Robotic Manipulators", ASME Mechanisms Conference Proceedings (DE-Vol, 25), s. 307, 1990
- [16] Soylu, R. ve Duffy, J., "Hypersurfaces of Special Configurations of Serial Manipulators and Related Concepts, Part 3: Measures for the Position and Orientation of 6DOF Manipulators", Journal of Robotic Systems, Cilt 5, No 1, s. 55-72, 1988.
- [17] Soylu, R. ve Duffy, J., "Hypersurfaces of Special Configurations of Serial Manipulators and Related Concepts, Part 2: Passive Joints, Configurations, Component Manifolds and Some Applications", Journal of Robotic Systems, Cilt 5, No. 1, s. 31-53, 1988.
- [18] Büyüklimanlı, E., "Kinematic and Dynamic Performance of Spherical Wrist and Planar Wrist Manipulators", Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ., 1992.
- [19] Soylu, R., "Düzlemsel Bilekli Manipulatorler, Bölüm 1: Ters Pozisyon Analizi", 4. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi Bildiri Kitabı, s. 172- 180, 1990.
- [20] Soylu, R., "Düzlemsel Bilekli Manipulatorler, Bölüm 2: Singüler Konumlar, Çalışma Alanı ve Hız Analizi", 4. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi Bildiri Kitabı, s. 181-190, 1990.
- [21] Soylu, R. ve Duffy, J., "Hypersurfaces of Special Configurations of Serial Manipulators and Related Concepts, Part 1: Theory and Development of the Hypersurfaces of Special Configurations", Journal of Robotic Systems, Cilt 5, No. 1 s. 13-30, 1988.
- [22] Soylu, R. ve Duffy, J., "On the Forward Displacement Mapping of Serial Manipulators" Symposium on robotics, ASME, s. 185-197, 1988.

BAŞSAĞLIĞI
Değerli Meslektaşımız
Sayın

ADNAN KAHVECİ

ve AİLESİNİ, geçirdikleri elim bir trafik kazasında yitirmenin üzüntüsü içinde, ailesine, yakınlarına ve çalışma arkadaşlarına başsağlığı dileriz.

ELEKTRİK MÜHENDİSLERİ ODASI YÖNETİM KURULU