

# ROBOT ELLE KAVRAMA PLANLAMASI

## 1. GİRİŞ

**R**obotik alanında yeni gelişmekte olan çalışma odaklarından bir tanesi çok-parmaklı robot elle ince işçilik yapma problemidir, ince işçiliğin çok maksatlı olması, ayrıca da birçok analiz ve tasarım gerektirmesi parmak hareketlerinin yapılacak işe, cisme ve birbirlerine bağımlı olarak, hızlı kısa süreli ve en önemlisi paralel ve aynı zamanda ardışık özellikler göstermelerine bağlıdır.

İlginçtir ki, çok parmaklı robot el problemi, bir üretim hücresi içinde koordineli biçimde çalışan birkaç robot kolu problemine eşdeğer alınabilse bile, robot elle kavrama ve cisim manipülasyonu yine de 6-eklemli robot kol tutacını sıkıca tuttuğu cisim taşıma probleminden daha karmaşıktır. Bunun iki gerekçesi vardır: i) parmak eklem hareketleri ve cisim hareketi arasındaki kinematik bağıntının karmaşık olması, ve ii) hareket anında elin cismi kararlı bir biçimde kavraması.

El tutuş biçimleri, kavramadaki manipülasyon ve kararlılık özelliklerini artırıcı şekilde oluşurlar. Bu oluşum yeni çalışma alanı olan el tutuş veya kavrama planlamalarına girer.

## 2. Robot Elle Kavrama Planlaması

### 2.1 Yüksek düzey kavrama planlaması

Yüksek düzey denetim stratejileri insanı örnek alan antropomorfik [1], nörofizyolojik [2], ve davranış [3] yaklaşımlardır. Bu denetim algoritmaları ya kısıtlı el tutuş biçimlerine, yada sınırlı sayılı hareketlere bağlı kalmışlardır.

İnsan eli tutma analizlerinde [4, 5], başlıca iki tip kavrama gözlemlenmiştir: i) güçlü kavrama, ve ii) ince iş kavraması. Güçlü kavramada, cisim, kıvrılmış parmaklar ile avuç içine kısırlanmıştır. Başparmak uzanmış durumdadır ve gerektiğinde karşı basınç yaratabilecek şekilde cisim üzerine uzanmıştır. İnce iş kavramasında ise, cisim sadece parmak uçları arasına kısırlanmıştır. Gerekli olan kavrama biçimini belirleyen unsur yapılacak işteki amaçtır. Yani tutuş biçiminin seçimi tamamen amaca bağlıdır. Gösterilmiştir ki, insan eli bir cisme uzanırken yapacağı işe uygun birtutuş biçimi alır [6].

İnsan elinin kavrama planlaması Iberall [7] tarafından incelenmiştir. Öncelikle, cisim ve iş modelleri tutuş biçimine yönelik tümleşik bir amaç oluştururlar. Bu gösterim bir sonraki aşamada elin serbestlik derecesinin ve elde edilebilecek kuvvetlerin gösterimini içeren yeni bir uzaya dönüştürülür.

*Doç. Dr. Aydan ERKMEN*

*ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği*

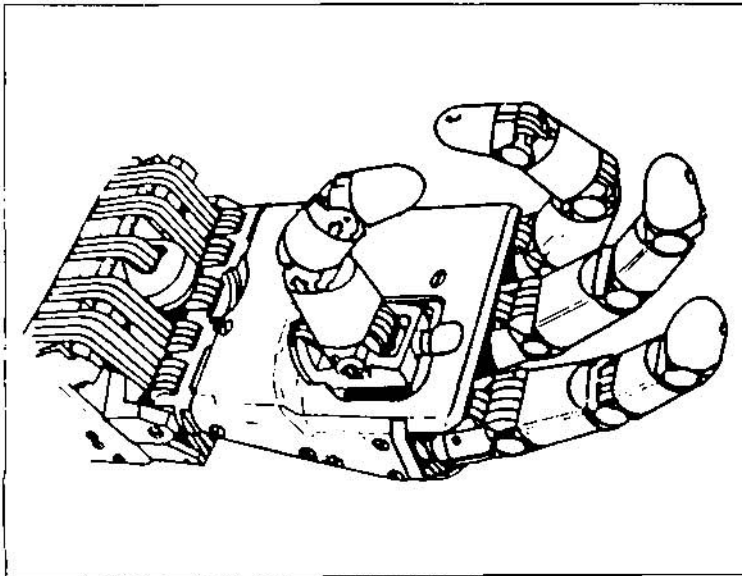
Bu dönüşümler tek tip olmadıklarından el, cisim ve amaç etkileşimlerinden dolayı ortaya çıkan bazı sınırlamaların olması gereklidir. Parmakların kavranan cismin hareketine getirdiği sınırlamalar antropomorfik (insana özgü) olarak üç kaynakta toplanabilir: i) parmak iç yüzeyi, ii) avuç içi, iii) parmak yan yüzeyi.

Sanal parmak (vital finger) konusu, kavrama teorisine bir düzenleme mekanizması getirmiştir, ve ayrıca Potansiyel Alan Teorisi'nde [8] elin tutuş biçimi kazanmasında kullanılmıştır. Buna göre cisim ve el arasında bir sanal parmak koyarak, cisim el sisteminin bir parçası haline getirilmiştir. Bu yaklaşımda, her parmak potansiyeli diğer parmak potansiyel alanlarına değişik tepkiler göstererek parmağın belirli pozisyonlar almasını sağlar. Potansiyel alan değişiminden kuvvet oluştuğunu göz önünde tutarsak, pozisyonların bu kuvvet temeline dayandığını kolayca saptayabiliriz.

Lyons [9], ve Venkataraman & Lyons [10] dağıtık bilgisayar ortamı için yüksek düzey kontrol mekanizması sunmuşlardır. Bu mekanizma hem cisim karakteristiklerini, hemde yapılacak işlerin türünü göz önüne almaktadır.

Kavramının iki özelliğe vardır: i) tutuş için parmak şekillenmesi, ve ii) cismi tuttukten sonra elin kalan serbesti derecesi, insan davranışının incelenmesinden elde edilmiş üç kavrama biçimi vardır: i) parmak iç yüzeylerinin kullanıldığı kavramlar, ii) bazı parmak yan yüzeylerinin kullanıldığı kavramlar, iii) ve ince iş kavramlarıdır. Kavrama biçimi seci için iki fonksiyonel girdi kullanılır: i) kavramanın gerektirdiği kararlılık, ii) kavramadaki hareket inceliği dereceleri.

**Şekil: 1**  
Utah-MIT Robot eli



Kavranacak cisimler ise, boyutları (küçük, büyük, uzun, geniş gibi) ve şekilleri (yassı, yuvarlak gibi) ile özellik kazanırlar. Cutkosky ve Wright [1] küçük sanayi üretimlerinde bulunan elle uygun işlem (manipulation) bilgisini kodlama amacı ile bir kavrama taksonomisi oluşturmuşlardır. Bunun yanısıra Tomoviç ve grubu [3] yüksek düzey denetim mimarisi sunmuşlardır. Yaklaşımda üç kademe vardır:

- Hedefe yaklaşma (bu hedef tanımayı, el tutuş biçiminin elde edilmesini, ve el yönlendirmesini içermektedir)
- Kavrama uygulama (şekil ve gücün bağdaştırılması)
- Refleks denetim (bu kademede i) insan (operatör) için bir bağdaştırıcı "arabirim" in tasarlanması, ii) yönünge oluşturumu, iii) el biçimi oluşumu, ve iv) manipülatör denetimi yapılmaktadır.

Bu kademelerin gerçekleşmesi için bir bilgi bazı (knowledge base) kullanılmaktadır.

## 2.2. Düşük düzey kavrama denetimi

Denetim algoritmaları en alt düzeyde, basit parmak ucu tutuş işlemlerine uygulanırlar. Karmaşık parmak ucu kavrama işlemlerinin (kavanoz kapağı açmak gibi) denetimlerinde ve avuç içi tutmalı kavrama işlemlerinin (çekici kullanma gibi) denetimlerinde ise alt düzey denetim metodları uygun değildir ve kullanılmazlar.

İnsana özgü (antropomorfik) olmayan birçok metod geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu metodlar pozisyon denetimini, hız denetimini, kuvvet denetimini, kuvvet/pozisyon karışık denetimini [11, 12] ve gerginlik (stiffness) denetimini [13, 14] kapsarlar. Bu denetimlerin çoğu önce robot kol için tasarlanmış olup el denetimine uyarlanmışlardır ve ayrıca, uygulamaya özgüdürler. Örneğin, Utah-MIT elinin (Şekil 1) alt düzeydenetiminde [15] odak noktası gerginlik denetimi ve gerilim idaresidir. Makalede, dinamik modelleme etkileri ve adaptasyon göz ardı edilmiştir. Sürtünmesiz parmak ucu dokunmayı içeren kavrama için, Hollerbach ve grubu [16] bilgisayar kullanımı açısından etkili olan, "Jacobian" kullanmadan kuvvet yayılma metodunu geliştirmişlerdir. Venkataraman ve Djaferis [17] Stanford-JPL elinin (Şekil 2) her parmağı için bölgesel kararlılığı olan çok değişkenli geri-beslemeli denetim tasarlamak için parmakların dinamik modellerini kullanmışlardır. Buna karşın parmaklar arasındaki bağımlılığı göz önüne almamışlardır.

## 3. Kararlılık ve El İşlemine Uygunluk

(manipulability)

k parmaklı ve her biri  $m_i$  eklemlili ( $i = 1...k$ ) bir robot elini ele alalım ve cisme dokunan parmak uçları  $n$ ; serbesti dereceli olsun ( $i = 1...k$ )  $6e R^m$  eklem açılarını, ve  $TE R^m$  ise dönme momentlerini göstersin.

Kavramda Kararlılık Tanımı: (manipulability)

Eğer, cisme uygulanan, her kuvvet-moment (wrench)  $f_p^t$ ,  $m_p^t$  ) sistemini dengede tutacak bir eklem dönme momenti bulunabiliyorsa kavrama kararlıdır.

Kavramanın İşleme Uygunluğu Tanımı:

Eğer, tutulan cismin

$$\langle Vb_p, V_{bp}^t \rangle >$$

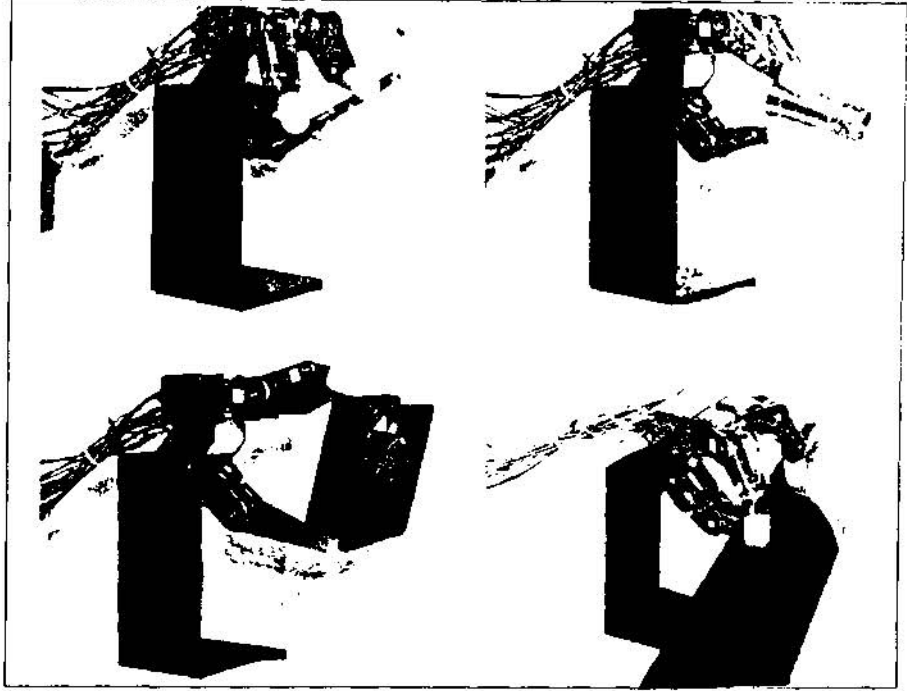
olarak değerlendirilen her hareketi için bu hareketi sağlayacak ve teması bozmayacak, bir eklem hız vektörü seçilebiliyorsa kavrama el işlemine uygundur.

Değişik parmak yapısı, dokunma niteliği ve cisim tipleri için kararlı kavramaların analiz ve sentezi geniş çapta incelenmiştir. Çoğu metodlar statik kavramları ve sürtünme olmayan nokta dokunuşları göz önünde tutmaktadır.

Baker ve grubu [18] yay içeren üç parmaklı ve kararlı olan kavramaları incelemişlerdir. Bu analizde, poligon kesiti olan silindirik yüzeylerin kararlı kavraması potansiyel enerji fonksiyonunun yerel minimumu bulunarak elde edilmiştir. Kavrama esnasında sürtünmenin ve yer çekiminin rolleri açıkça gözlemlenmiştir.

Bunun yanı sıra, Holtzman ve Mc Carthy [19] üç parmaklı elle katı cisimleri kavramadaki statik dengeyi incelemişlerdir. Burada vurgulanan husus kavramadaki cisim kaymasını önceden belirlemek amacı ile cisim ve parmak yüzeyleri arasındaki sürtünme kuvvetlerinin hesaplanmasıdır.

Yumuşak parmak uçları ile kavrama kararlılığının analizi Jameson ve Leifer tarafından yapılmıştır [20]. Çalışmada, statik açıdan belirsiz kavramalar, ve eklemlerle birleşen bütün parmak bölümlerini kapsayan dağıtık temas ele alınmış birinci-derece kararlılık (kayma hareketinden kay-



Şekil: 2  
JPL Robot Eli ve  
Tutuş Biçimleri

naklanan tür uyanlar altında) ve ikinci-derece kararlılık (ağırlığa uyumdan kaynaklanan tür uyanlar altında) arasındaki fark ortaya konulmuştur. Ayrıca cismin manipülasyonu yapılırken, kavramayı kararlı tutma probleminde incelenmiştir.

Kararlı kavrama sentezi için bir metod Jameson ve Leifer [21] tarafından sunulmuştur. Cisim ve elin geometrik modelleri verildiği takdirde, kararlı kavramanın kararsız kalmaya uzaklığını tanımlayan bir kavrama hedef fonksiyonunun maksimum hale getirilmesi ile bulunur. Dönme-momenti ve hareket sınırlamaları gibi fiziksel sınırlamalar çalışmaya katılmıştır.

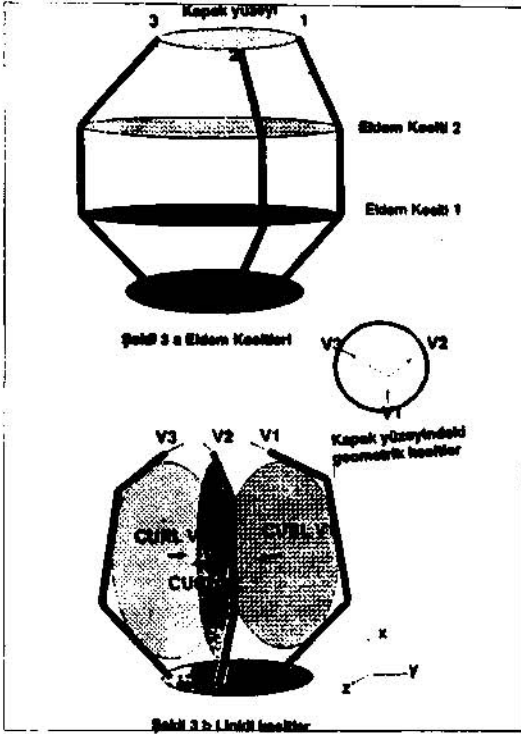
#### 4. Kavrama Optimizasyonu

Kavrama optimizasyonundaki ana problemler, Kerr ve Roth [22] tarafından belirlenmiştir. Bunlar şunlardır:

- Güvenli bir kavrama elde etmek için cisim ne kadar sıkmalı?
- İstenilen hareketi elde etmek için gereken parmak yörüngeleri nelerdir?
- Elin çalışma alanı nasıl tanımlanmalıdır.

Birincisi, sürtünme ve eklem dönme-moment sınırlamaları olan bir doğrusal programlama problemi şeklinde formüle edilmiştir.

Feddema ve Ahmad [23]'ün çalışmalarında tümleşik bir kavrama optimizasyonu elde etmek için kullanılan kısıtlamalar, çişimin



Şekil: 3  
Hacimsel El Tutuş Modelleri

tepkiler, cismin elin tutma hacmi içerisindeki kararlılığının ölçütü olarak kullanılmıştır. Kavramanın niteliğinin belirlenmesi için kuvvet alanında kavrama matrisinin tekil değerlerine bağlı olarak üç ölçüt geliştirilmiştir [26]. Ölçütler yapılacak işe bağımlı olup, yapılacak iş ise kuvvet ve moment uzayında elipsoidler şeklinde modellenmiştir.

Kinematik olarak fazla eklemli robot ellerinin tasarım ve denetimi için geliştirilen dört "el becerisi" (dexterity) değeri Klein ve Blaho [27] tarafından incelenmiştir. Bunlar manipülabilite matrisinin en küçük tekil değeri ve eklem içi serbestisine bağlıdır.

### 5. El Tutuş Biçiminin Parametrik Tanımı

Robot el problemlerinin kapsadığı alanlar genellikle yörünge planlaması, durağan tutuş biçimi belirleme, ve cisime dokun-

bilgisayar destekli tasarımdaki geometrik tarifine bağlı olarak, endüstriyel uygulama aşamasındaki yapılacak işin ve el karakteristiklerinin getirdikleri ön koşullar olarak tasarımda yer almıştır.

Özel kavrama biçimleri (çok sınırlı, az sınırlı, yozlaşmış) Kerr ve Roth [24] tarafından incelenmiştir. Walter ve grubu [25] ise geometrisi bilinen cisimler için otomatik kavrama temas noktaları bulma metodu geliştirmişlerdir. Dış kuvvetler yüzünden oluşan kaymaya ve burulmaya karşı olan

duktan sonraki kararlı kavrama olarak sınıflandırılabilirler. İnsan örnek alınacak olursa, elin tutmak üzere bir cisme uzanırken biçimlendiği göze çarpar. Bu etken altında, gereken araştırma konusu, yörünge planlamasını ve tutuş biçiminde bir belirleme aşamalarını bütünleştirecek şekilde olan dinamik el biçimlendirme problemidir. Bu alandaki ilk aşamaları [28, 29]'da geliştirmiştik.

El kapanma hareketi iki kademe olarak aşağıdaki özelliklere sahiptir.

1) Parmakların başta birbirlerinden ayrı iken yaklaşmaları; buna parmakların diverjansı denilir. Bu konu vektöriyel alandaki diverjans'a bağlıdır.

2) Parmakların bükülmesi; bu karakteristik ise vektöriyel alandaki rotasyonel (curl) ile ilişkilidir.

Şekil 3'te üç parmaklı bir elin şematik gösterimi bulunmaktadır. Bir robot eli parmaklarla sınırlı olarak genel biçimde bir çalışma hacmini belirler. Bu hacmi betimleyen 2 tip kesitler dizgesi vardır: i) "link" li (iki eklem arası bağ) kesitler (LK); ii) eklemli kesitler (EK).

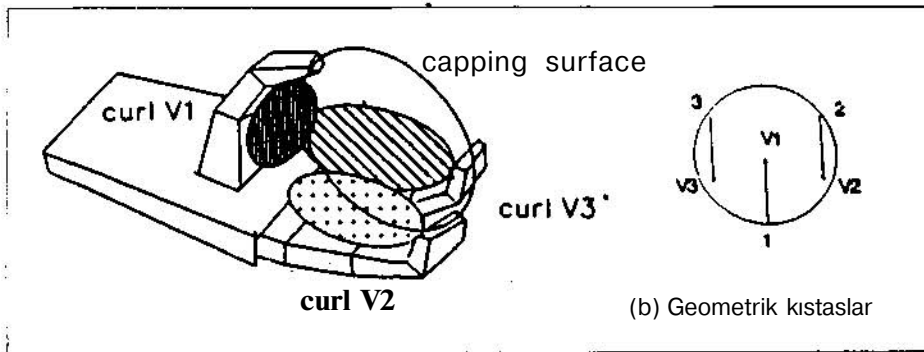
Parmak sayısı M ve her parmaktaki eklem sayısı N ise, i inci (i = 1, ..., M) LK, i inci parmağın tüm eklem arası bağlarına teğet kapalı düzlemsel bir eğridir. J inci (J = 1, ..., N) EK kesit bitiş eğrisi her parmağın J inci ekleminden geçen bir düzlemsel yüzeydir. Hacmin genel şekilde olmasının getirdiği esneklik, diverjans ve rotasyonelin belirli bir hacim şekline veya yüzey şekline bağımlı olmamalarına dayalıdır.

### 6.1. El akısı (Flux)

EK eklemli kesitin birim dik vektörüne ne diyelim (Şekil 3a) ve F, de bir vektör fonksiyonu olsun. F'nin dik komponentinin yüzey entegrali  $\int_{S} F \cdot n \, ds$  F'nin akısıdır (flux). Bu entegralin EK1 kesiti içeren hacmine bölümünün, bu hacim sıfıra doğru küçülürken ki limiti diverjansıdır:

$$V.F = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \int_{S} F \cdot n \, ds$$

Şekil: 3c  
Silindirik Tutuş



Şekil 3a'da el hacminin birim dik vektörü n olan, kapak yüzeyi gösteriliyor. Birim kütlesi olan parmakların bu kapak yüzeyden akışını inceleyelim. Kavrama diverjansı, hareket eden el kütlelerinin el çalışma hacmi içindeki bir noktadan ne kadar ayrıldığına bağlıdır.

dir. Ve bu diverjans, parmak ucu hızlarının diverjanslarının toplamına eşittir.

Büzülen biçimlenmiş el hacmindeki parmaklar akısının toplamını el akısı olarak tanımlayalım. Böylece

$$(A.V)_{el} = \sum_j A.V_j$$

Burada  $V_j$  inci parmak ucu hızıdır.

## 6.2. El Rotasyoneli (curl)

Vektör fonksiyonunun C kapalı eğrisine teğet olan bileşenin kapalı eğri C (linkli (eklem arası bağı)) kesit LK sınırı üzerinde yol entegralini oluşturalım:

$$\oint_C \mathbf{F} \cdot d\mathbf{c}$$

de burada sonsuz küçüklükte birim uzunluklu eğri parçasıdır, F ise C eğrisi üzerinde her yerde tanımlanan bir vektör fonksiyonudur, ve t'de C'ye birim teğettir. Bu yol entegraline sirkülasyon denmektedir. C eğrisinin içerdiği alana S diyecek olursak ve n vektörünü de bu alana her noktasında dik olarak tanımlarsak, türetilen

$$\nabla \times \mathbf{F} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta S} \oint_C \mathbf{F} \cdot d\mathbf{c}$$

F fonksiyonelinin rotasyonelidir, ve fonksiyonelin bir kapalı eğri etrafındaki rotasyonunu veya döngüsünü belirler.

Parmağın bükülmesini, parmak ucunun kendi linkli kesiti (LK) sınır eğrisi üzerindeki sirkülasyonu olarak modelleyebiliriz. ( $A \times r$ ) rotasyoneli, parmak ucu konumunun değişmesinden doğar ve parmak ucu açılma hızını parmak bükülmesini yapan eklem açılına bağlar. ( $A \times v$ ) rotasyoneli ise, parmağın açılma hızını bükülmeyi sağlayan eklem hızlarına bağlar.

Rotasyonel vektörlerinin her bileşeni, kendi bazına göre, parmağın bir yönde bükülmesini tanımlar ve böylece N parmaklı elin rotasyonel vektörleri:

$$(A.r)_{el} = \sum_j V_j$$

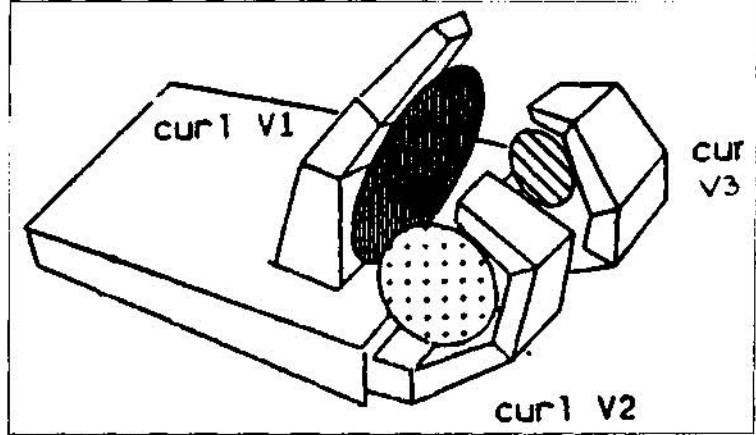
$$(A.v)_{el} = \sum_j V_j$$

olarak tanımlanır.

## 7. Sonuç

Bir robot elinin hareketi beş temel hareket döneminden oluşur:

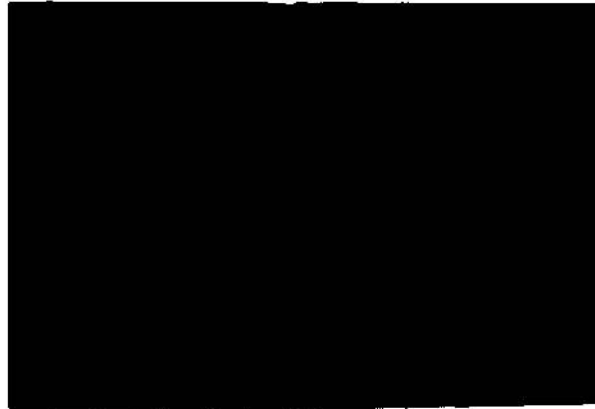
1) Bileğin tutulacak cismin yakınına kadar



Şekil: 3d  
Çengel Tutuş

gittiği yaklaşma dönemi, 2) elin çalışma hacminin oluşması için elin tutuş biçimine girmesi; 3) cismin çalışma hacmine girmesi ile başlayan elin kapanma dönemi; 4) parmakların cisme kuvvet uyguladığı temas dönemi; 5) serbesti derecesinin cisme aktarıldığı işlem (manipülasyon) dönemi. Bu yazımızda çoğunlukla dönem iki, dört ve beşte kümeleşen Robot El Kavrama problemine ilişkin başlıca yapıtlar sunduk. Yeni gelişmekte olan bu araştırma alanındaki en az uğraşmış ve büyük eksikliği hissedilen konu ise iki ve üçüncü dönemlerin dönem beşteki parametreler cinsinden tanımlanıp her iki dönemi tümleşik duruma getirme problemidir. Bu konuya yaklaşımımız, yazımızın altıncı bölümünde sunulduğu gibi, elin çalışma hacmini durağanlıktan kurtarıp elin kapanma hareketine bağımlı dinamik bir yapıya sokmaktır.

Bu yazımızda değindiğimiz tüm çalışmalarda gösterdiği gibi elin kavrama problemi çok karmaşıktır ve bu problemi dağıtık küçük problemler halinde çözmeye yönelinmiştir. Bu küçük araştırma alanları olgunlaştıkça gereksinim duyulan, alanların bütünleştirilmesi olacaktır. Robot el kavrama metodolojisi geleceğe doğru bu yönde hızla gelişmektedir.



## 8. Referans

1. M.R. Cutkosky and P.K. Wright, 1986, "Modeling manufacturing grips and correlations with the design of robotic hands", Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 1533-1539.
2. M.A. Arbib, T. Iberall, D. Lyons, 1983, "Coordinated Control programs for Movements of the Hand", COINS Technical Report, University of Massachusetts.
3. R. Tomovic, G.A. Bekey and W.J. Krplus, 1987, "A strategy for grasp synthesis with multifingered robot hands", Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 83-89.
4. J.R. Napier, 1956, "The prehensile movement of the human hand", J. Bone Joint Surgery, Vol. 38B, pp. 902-913.
5. J.M. Landsmeer, 1962, "Power Grip and Precision handling", Ann. Rheum Diseases, Vol. 22, pp. 164-170.
6. M. Jeannerod, 1981, "Intersegmental coordination during reaching at natural vision objects", Attention and Performance IX, J. Long and A. Baddley (eds.) pp. 153-168.
7. T. Iberall, 1987, "The nature of human prehension: three dextrous hands in one", Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 396-401.  
T. Iberall, 1987, "Grasp planning for human prehension", Proc. Int. J. Conf. Artificial Intelligence, pp. 1153-1156.
8. D.M. Lyons, 1985, "A simple set of grasps for a dextrous hand," Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 588-593.
9. D.M. Lyons, 1986, "Tagged potential fields: an approach to specification of complex manipulator configurations." Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 1749-1754.
10. S.T. Venkataraman and D.M. Lyons, 1985, "A task-oriented architecture for dextrous manipulation", Workshop on Dextrous Robot Hands, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 31-46.
11. T. Yoshikawa, 1984, "Analysis and control of robot manipulators with redundancy in Robotics Research, M. Brar, Eds., Prentice Hall, pp. 735-747.
12. M. Raibert, J.J. Craig, 1981, "Hybrid position / force control of manipulators", IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 11, No. 2, pp. 126-133.
13. J.K. Salisbury, D. Brock, S. Chiu, 1986 "Integration of force sensing and control for a robot hand", Robotics Research, O.D. Faugeras and G. Giralt, eds., MIT Press, pp. 389-396.
14. M.R. Cutkosky, 1985. Robot Grasping and Fine Manipulation, Kluwer Publishers.
15. K.G. Biggers, S.C. Jacobsen, and G.E. Gerpheide, 1986, "Low level control of the Utah/MIT dextrous hand", Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 61-66.
16. J.M. Hollerbach, S. Narasimhan and J.E. Wood, 1986, "Finger force computation without the grip Jacobian", Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 871-875.
17. S.T. Venkataraman and T. E. Djaferis, 1987, "Multivariable feedback control of the JPL/Stanford hand", Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 77-82.
18. B.S. Baker, S. Fortune, E. Grosse, 1985, "Stable prehension with a multifingered hand", Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 570-575.
19. W. Holzmann and J.M. McCarthy, 1985, "Computing the friction forces associated with a three fingered grasp", IEEE J. Robotics and Automation, Vol. RA-1, No. 4, pp. 206-210.
20. J.W. Jameson and L.J. Leifer, 1986, "Quasi-static analysis: a method for predicting grasp stability", Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 876-883.
21. J.W. Jameson and L.J. Leifer 1987, "Automatic grasping: an optimization approach", IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-17, No. 5, pp. 806-814.
22. J. Kerr and B. Roth, 1986, "Analysis of multifingered hands, Int. J. Robotics Research, Vol. 4, No. 4, pp. 3-17.
23. J.T.F. Feddema and S. Ahmad 1986, "Determining a static robot grasp for automated assembly", Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 918-924.
24. J. Kerr and B. Ruth, 1986, "Special grasping configurations with dextrous hands", Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 1361-1367
25. J.D. Wolter, R.A. Volz and A.C. Woo, 1985, "Automatic generation of gripping positions," IEEE Trans. Syst. Man and Cyber, Vol. SMC-15, No.2, pp. 204-213.
26. Z. Li and S. Sastry. 1987, "Task Oriented Optimal Grasping by Multifingered Robot Hands", Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 389-394.
27. C.A. Klein and B.E. Blahotny, 1987, "Dexterity measures for the control of kinematically redundant manipulators", Int. J. Robotics Research, Vol. 6, No. 2, pp. 72-83.
28. A. M. Erkmen, "Grasp Momentum Grasp Planning", Proc. International Workshop on Intelligent Motion Control, Vol. 1, pp. 253-258.
29. A.M. Erkmen, 1989, "Information Fractals for Approximate Reasoning in Sensor Based Robot Grasp Control", Ph.D. Dissertation, George Mason University, USA.