

ÜÇ PARMAKLI ŞEKİL BELLEK ALAŞIMLI (SMA) ROBOT ELİN YAPIMI VE
UYGULAMA ANALİZİ

(*PRODUCTION OF THREE-FINGER SMA ROBOT HAND AND ITS PRACTICAL
ANALYSIS*)

DİLİBAL, Savaş¹, GÜNER, Ertan²

ÖZET / ABSTRACT

Robotik alanında gelişmekte olan yeni çalışma konularından bir tanesi de çok parmaklı robot elle değişik özellikteki cisimleri amaca yönelik olarak kavrama çalışmalarıdır. Robot uygulamalarında uç eleman olan tutucular parçaların taşınmasında, montaj işlemlerinde, kaynak işlemlerinde, boyama işlemlerinde çok rahat bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat bir montaj hattında aynı tutucunun birden fazla işi yapması veya değişik özellikteki parçaları taşınması düşünüldüğünde bunun işlevsel bakımdan zorlukları görülmektedir. Bu durumda genel maksatlı robot ele ihtiyaç duyulduğu bir gerçektir. Robot ellerde eklemlerin hareketi için gerekli gücü sağlayan çeşitli teknolojilere dayalı hareketlendiriciler vardır. En yaygın olarak kullanılan hareketlendirici teknolojileri elektrik motorları, hidrolik hareketlendiriciler ve pnömatik hareketlendiricilerdir. Bu geleneksel hareketlendiriciler dışında şekil bellekli alaşımları da hareketlendirici teknolojilerine dahil etmek mümkündür. Şekil bellekli alaşımlar, belli sıcaklık derecelerinde daha önceden kazandırılmış konumlarına geçerek malzemeye bir hareket kazandırır. Önemli olan konu bu hareketi robot el üzerinde kullanarak bunu kavrama özelliğine dönüştürmektir. Çalışmamızda, Nikel-Titanyum (Ni-Ti) şekil bellekli alaşım kullanarak bir robot el (SMA robot eli) yapılmış ve bu robot elin endüstriyel ortama uygunluğunu belirlemek amacıyla çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir.

Gripping of different types of objects with multi-finger robot hand is one of the study area in robotics. Grippers, which are end effector elements in robot applications, can be used easily in the transfer of parts, the assembly, the welding and painting operations. However, if a gripper is considered to handle different jobs or to carry different types of parts in an assembly line, some functional difficulties can be faced. Hence, a general purpose robot hand is going to be strongly required in these kind of cases. There are various technological actuators such as electrical motors, hydrolic and pneumatic ones, etc. Besides these conventional actuators, it is possible to include shape memory alloys into technological actuators category. Shape memory alloys can give materials a motion by arriving its predetermined positions at a specific temperature. The conversion of this motion to gripping feature of the robot hand is the heart of matter. In this tudy, we have developped a Robot Hand using Ni-Ti shape memory alloys and performed the experimental studies with SMA Robot Hand, in order to check the compatibility of the system in the industrial environment.

ANAHTAR KELİMELER / KEY WORDS

Robotik, Hünerli Robot Eller, Şekil Bellekli Alaşımlar, Ni-Ti Alaşımı
Robot Grippers, Dexterious Robot Hands, Shape Memory Alloys, Ni-Ti Alloy

¹ Topçu Füze Okulu Polatlı- Ankara

² Gazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Endüstri Müh.Böl.,06570 Maltepe-Ankara

1. GİRİŞ

Son dönemlerde robotik uygulamalar alanında çok parmaklı robot ellerle daha hünherli ve daha iyi kavrama gerçekleştirilmesine ilişkin tasarımlar devam eden çalışmalar arasındadır. Robot elin değişik görevler için çok amaçlı tutucu özelliklerine sahip olması gereklidir. Robot elin tasarımında ve çalışma fonksiyonlarının oluşturulmasında en hünherli el olan insan elinin özellikleri ve şekli örnek alınmıştır. Değişik geometrik yapılarıdaki parçaları veya makinaları uygun kavrama için çok parmaklı robot eller vazgeçilmez bir ihtiyaçtır. Robot elin tasarım ve imalatında dikkat edilmesi gereken en önemli konular: elin fonksiyonelliği, boyutları, imalat ve bakım kolaylığı ve çalışmaya uygunluğudur. Hünherli robot eller incelenirken öncelikle en hünherli el olan insan elinin kavrama davranışını incelemekte yarar vardır. İnsan elinde kavrama davranışı incelendiğinde üç ayrı kavrama biçimi görülmektedir (Erkmen, 1993).

1. Parmak iç yüzeylerinin kullanıldığı kavramalar yani; güçlü kavrama denilen avuç içine cismin sıkıştırılması ile oluşur.

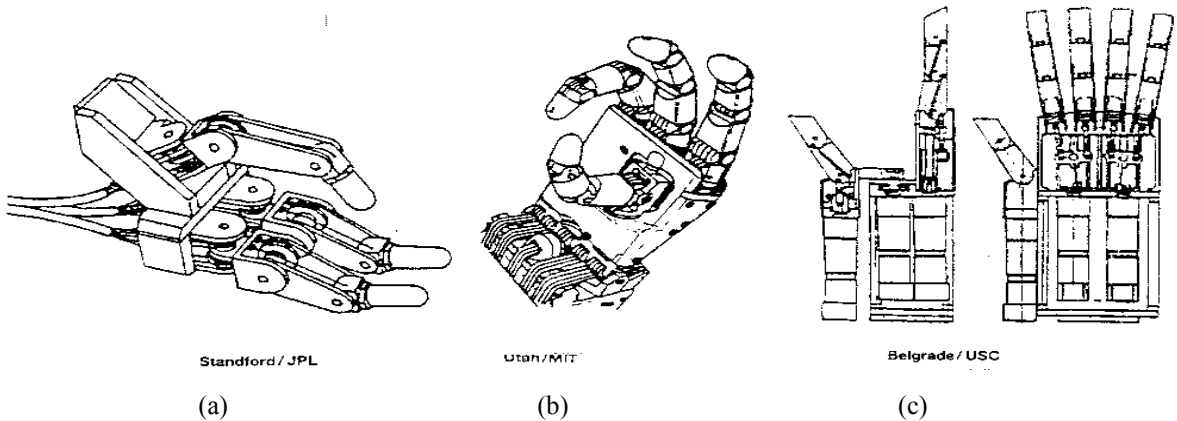
2. İnce iş kavramaları yani; parmak uçlarının kullanılması ile oluşur.

3. Bazı parmak yan yüzeylerinin kullanıldığı kavramalar.

Kavrama hareketi, cismin kavranmasında parmakların kavrama alanı ve kavramanın kararlı bir kavrama olması ile beraber düşünölmektedir. Kavrama hareketi analitik olarak düşünöldüğü zaman üç ana kısıttan söz edilebilir. Kavranacak parça kısıtı (parçanın şekli, kayganlığı, kırılğanlığı), kavrama kısıtı (maksimum hareket alanı ve parmakların maksimum açılması) ve görev kısıtı (parçanın ne yapılacağı). Bu temel kısıtlar dikkate alınarak mümkün kavrama alanı ortaya çıkarılabilir.

Bugüne kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde kavrama hareketinin daha çok elektrik ve pnömomatik sistemlerle kullanıldığı görölmektedir (Kerr vd..1986). Robot eldeki parmak sayıları üç ile beş arasında değişmektedir. Üç parmaklı bir robot ele örnek JPL/Standford (Şekil 1.1-a)'dir. Her parmağı üç serbestlik derecesine ve dört adet elektrik motoruna sahiptir. Kontrol sistemi çok karmaşıktır ve parmaklarda dört ayrı kablonun gerilimini ayarlamak ve uzun süre aynı gerilimi korumak oldukça zordur. Utah/MIT (Şekil 1.1-b) robot eli bir baş parmak ve üç parmaktan oluşmaktadır. Her parmakta dört eklem vardır. Ayrıca her parmakta dört serbestlik derecesi, sekiz bağımsız tendona ve pnömomatik silindirlere gereksinim duymaktadır (Lin vd.. 1998). Belgrad/USC (Şekil 1.1-c) beş parmaklı ve dört motorlu bir sisteme sahiptir. Motorlardan iki tanesi başparmak diğher ikisi diğher parmaklar için kullanılmaktadır (Lin vd.. 1998).

Mat/ODTÜ, pnömomatik hareketlendirici tipine sahip bir robot eldir. Parmaklarda hareket iletimi yine makara-ip sistemi ile yapılmaktadır (Tüz, 1996).



Şekil 1.1 Bazı Örnek Robot Elleri (Lin vd..1998)

Belirtilen bu robot ellerin çeşitli özelliklerine göre karşılaştırılması Tablo 1.1’de gösterilmiştir. Metu-hand (Ek -1’de gösterilmektedir) ise her biri üç serbestlik derecesine sahip üç parmaklı, dokuz adım motorlu bir robot eldir. Elde hafif metal olarak alüminyum kullanılmıştır. Tendon olarak plastik kaplanmış 18 adet çelik kablo kullanılmıştır (Zergeroğlu, 1996).

Tasarımını yaptığımız SMA Robot El (Ek-2’de verilmektedir), devam eden bölümlerde detaylı olarak açıklanacaktır.

Tablo 1.1. Bazı robot ellerin karşılaştırılması

Özellik Robot El	Hareketlendirici tipi	Parmak sayısı	Başparmak eklemi	Toplam Ser.Derecesi	Hareket iletimi
UTAH/MIT	Pnömatik	4	4	16	Makara-ip
Belgrad/USC model II	Elektrik	5	2	16	Özel mekanizma
JPL Standford	Elektrik	3	3	9	Makara-ip
METUHAND	Elektrik	3	3	9	Makara-ip
MAT/ODTÜ	Pnömatik	4	2	4	Makara-ip
SMA Hand*	Elektrik	3	Şekil bellek Etkisi	Özel yapı	Isıtma/soğut ma

*: Bu çalışmada geliştirilen robot eli ifade etmektedir.

2. GELENEKSEL HAREKETLENDİRİCİ SİSTEMLERİ ÜZERİNE KARŞILAŞTIRMALAR

Robot tasarımlarında öncelikle, mevcut sürücü mekanizmalarının hangisinin en uygun olduğuna karar verilmelidir. Ayrıca konumlama doğruluğu, güvenilirliği, işlem hızı, fiyatı ve diğer bazı faktörlerde bu seçimde değerlendirilmesi gereken konulardır. Elektrik motorları doğal olarak temiz olup doğru çalıştırıldıklarında yüksek güvenilirlikli konumlama sağlayabilirler. Bunun tersine hidrolik motorlar için basınçlı yağ kullanımı gereklidir. Pnömatik sürücülerde döngüsel yol işlemlerinde yüksek doğruluklu konumlama sağlayamazlar. Hidrolik sürücüler elektrik motorlarına göre küçük bir hacimde büyük güç verebilirler. Basınçlı yağ, basit motorlara verilerek aşırı yüksek burulma (tork) ve hızlı işlem sağlanabilir. Aynı zamanda elektrohidrolik bir valfi kontrol etmek için gerekli olan güç küçüktür. Esas olarak iş, yağı sıkıştırırken ve bunu robot kollarındaki motorlara iletirken yapılır. Robotun tabanında veya başka uzak bir yerde yerleştirilmiş olan hidrolik pompa için gerekli olan tüm güç tek, güçlü ve verimli bir elektrik motoru tarafından sağlanabilir. Güç küçük elektrohidrolik valfler ile kontrol edilir. Buna rağmen yüksek doğruluklu küçük elektrohidrolik valfler, güçlü elektrik yükselteçleri ve kontrolörlerine göre daha pahalı ve daha az güvenilirdir (Critchlow, 1985). Kısaca, hidrolik sürücüler yüksek burulma momentlerinde hızlı hareket beklenildiği durumlarda, yüksek güç ihtiyaçlarının fazla olduğu, azda olsa yağ kaçağının kabul edilebileceği yerlerde kullanılır. Elektrik sürücüler daha düşük güçler için ve patlayıcı malzemelerin ateşlenme tehlikesinin olmadığı yerlerde tercih edilir (Critchlow, 1985).

Pnömatik sistemler bütün sistemler içinde eğer uygulama için yeterli özellikleri sağlıyorsa büyük olasılıkla en ucuz sistemlerdir. Elektrik motorlarda güç/ağırlık oranı düşüktür. Buna

rağmen kolay taşınabilirler, ihtiyaç duyduğu elektrik gücünü kolaylıkla elde edebilirler ve kolay çalışırlar. Gazların sıvılara göre sıkıştırılabilmesi göz önüne alındığında pnömatik sistemlerin kontrol uyarılarına verdikleri tepki hidrolik sisteme göre yaklaşık 4 kat daha yavaştır. Hidrolik yağlar pnömatik sistemde kullanılan havaya göre daha az akışkan olduğu için, hidrolik sistemler sönümleyici olarak kullanılabilirler. Hidrolik sistemlerde kullanılan yağın düzenli bir şekilde temizlenmesi ve filtre edilmesi gerekir. Aksi takdirde çok küçük parçalar bile sistemde kitlenme yaratabilir (Wolfram, 1995).

Şu an kullanılan robotlardan yarısına yakın kısmı elektrik hareketlendiricilerle yönetilmektedir. Elektrik motorlarında sabit mıknatısların geliştirilmesi güç/ağırlık oranlarında artma yaratacaktır. Bunların en büyük avantajı robotun uç etkileycisinin gereksinimi olan sürekli hız kontrolüne uygundur (Wolfram, 1995). (Aslında hız kontrolü sıfırdan istenilen motor hızına kadar, uygulanan voltajı basitçe ayarlayarak kontrol edilebilir. Bu kontrol yetenekleri istenen bir hareketi sağlamakta, çok değişik yüklemelere rağmen kullanılabilir bu sistem akışkan hareketlendiricilerine göre önemli bir avantajdır.)

Sonuçta her üç sisteminde kendi içinde ayrı ayrı avantajları vardır. Pnömatik hareketlendiriciler doğal basitlikleri, hidrolik hareketlendiriciler güçleri ve elektrik hareketlendiriciler iyileştirilmiş kontrol kapasiteleri ve temizlikleri ile seçilebilirler.

3. ŞEKİL BELLEKLİ ALAŞIMLARIN GENEL ÖZELLİKLERİ

Şekil bellekli alaşımlar termoelastik martenzitik faz dönüşümü sonucu martenzit fazda belirli bir sıcaklıkta plastik deformasyona uğratıldıklarında daha yüksek bir sıcaklığa ısıtıldıklarında tamamen geri bir hareketle ilk şekillerini alırlar. Yani düşük sıcaklıktan martenzit fazdan, beta fazına (ostenit faz, ana faz) geçiş difüzyonsuz olarak (atomların serbest hareketleri olmaksızın) tamamlandığından gerçekte plastik olan deformasyon aslında termoelastik bir faz dönüşümüdür. Ms (Martensit start) sıcaklığında başlayan martenzit plakaların oluşması Mf (Martensit final) sıcaklığında % 100 martenzit plakaların oluşumu ile son bulur. Bunun tersine, ısıtma ile beraber As (Austenit start) ile başlayan ana faza geçiş Af (Austenit final) ile son bulur. 1932'de Chang ve Read tarafından altın-kadmiyum (Au-Cd) alaşımı ile aralanan şekil bellek süreci 6 yıl sonra bakır-çinko (Cu-Zn) alaşımında şekil bellek etkisinin görülmesiyle hız kazandı. Nikel-Titanyum (Ni-Ti) alaşımında şekil bellek etkisinin görülmesi 1962'de W.J. Buehler ve arkadaşları tarafından ABD'de deniz savaş araçları laboratuvarında olmuştur. Nitinol (Ni-Ti Naval Ordnance Laboratory) olarak adlandırılan ve yaklaşık olarak eşit sayıda Ni-Ti atomlarından oluşan bu alaşımlar deformasyon ve sıcaklığa bağlı olarak olağanüstü mekanik bellek göstermiştir. Tablo 3.1'de bazı şekil bellekli alaşımların bileşimleri ve dönüşüm sıcaklıkları görülmektedir (Selimbeyoğlu, 1992).

Tablo 3.1. Bazı Şekil bellekli Alaşımların Bileşimi Ve Dönüşüm Sıcaklıkları

<u>Alaşım</u>	<u>Bileşimi</u>	<u>Dönüşüm Sıcaklıkları (°C)</u>
Ag-Cd	44/49 % Cd	-190 °C ile -50 °C arası
Au-Cd	46.5/50 % Cd	30 °C ile 100 °C arası
Cu-Al-Ni	14/14.5 % Al (3 / 4.5 % Ni	-140 °C ile 100 °C arası
Cu-Zn	38.5/41.5 % Zn	-180 °C ile -10 °C arası
Mn-Cu	5/35 % Cu	-250 °C ile 180 °C arası

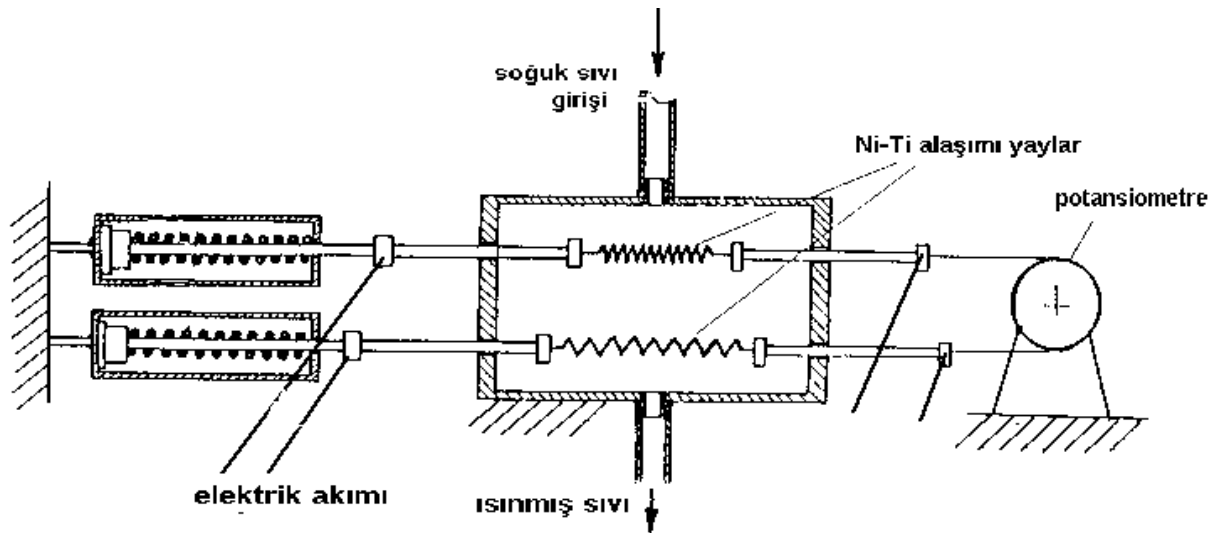
Nikel-titanyum (Ni-Ti) alaşımının (49/51 % Ni) bazı özellikleri şöyledir (Jackson vd..1972) :

Ergime Derecesi	1300 °C (2370 F)
Yoğunluğu.....	6.45 g/cu.cm
Özdirenci.....	100micro-ohm.cm (Ostenit)
.....	70 micro-ohm.cm (Martenzit)
Dönüşüm Sıcaklıkları	-200 °C ile 110 °C arası
Korozyona dayanıklılık.....	çok yüksek
Şekil belleği kazandırma.....	550 °C de

Alaşımın şekil belleğinin kazandırılması için yaklaşık 550 °C'ye kadar ısıtılmakta ve bu sıcaklıkta istenilen şekil belleği verilmektedir. Yüksek sıcaklık, alaşımı oluşturan nikel ve Titanyum atomlarının kafes yapılarına ait uygun yerlerini almalarını sağlamaktadır (Kauffman vd.1993).

Günümüzde şekil bellekli alaşımların kullanımı hızla birçok teknolojik alana yayılmaktadır. Artık elektronikte sıcaklık sensörlerinden, tıpta kan basıncı test valflerine, otomotivde radyatör fanlarından robotikte çok bacaklı mobil robotlara kadar değişik alanlarda şekil bellekli alaşımlar kullanılmaktadır. Şekil bellekli alaşımların şekil değiştirme anındaki yüksek güçleri Japon Şekil Bellek Alaşımlar Birliği tarafından kayaların parçalanmasında kullanılmasını, alaşımın hafifliği ise NASA'nın uzay araştırmalarında ağır makinelerin yerine şekil bellekli alaşımları tercih etmesini sağlamıştır. 1994 yılında Mars gezegenine gönderilen Pathfinder/Sojourner mobil robotu üzerinde de şekil bellekli alaşımlar kullanılmıştır. Alaşımın buradaki görevi mobil robotta bulunan güneş ışığına duyarlı bir hücreciğin (solar cell) üzerindeki cam kapağı harekete geçirip açmaktır. Bu sayede bilim adamları küçük bir karşılaştırma yaparak mobil robotun hareketiyle cam üzerine biriken toz miktarını tesbit edip gelecekteki Mars yolculuklarında ihtiyaç duyulacak güneş enerjisi panellerinin en etkin kullanımı ve temizlenmesinin nasıl olacağı hakkında bir fikir elde etmeyi amaçlamışlardır.

Bergamasco ve arkadaşları (1989) tarafından tasarlanan hareketlendirici ise şekil bellek etkisinin hareketlendirici (actuator) teknolojisinde kullanılması açısından iyi bir örnektir. Burada alaşımları ısıtma, üzerinden elektrik akımı geçirerek, soğutma ise sıvı ile yapılmaktadır. Sistemin çalışma prensibi Şekil 3.1 'de gösterilmiştir



Şekil 3.1. Şekil Bellekli Alaşımların Hareketlendirici (actuator) Olarak Kullanımı
(Bergamasco vd.. 1989)

Şekil bellekli alaşımların faz değişimi kullanılarak çalışan bu hareketlendiricilerin en büyük avantajı sistemin basitliğidir. Sistemin gürültü yapmadan, çevreyi kirletmeden çalışması diğer bir avantajdır. Bu özelliğinden dolayı mikroelektronikte, biyoteknolojide ve tıbbi çalışmalarda kullanımı yaygınlaşmaktadır. Sistemi 3 veya 12 volt gibi düşük voltajlarda kullanma kolaylığı vardır. Elektrik akımı ile bu hareketlendiricilerin çalışması sistemi uzaktan komuta imkanı da sağlamaktadır. Hareketlendirici teknolojileri ve bunların güç/ağırlık oranları arasında bir karşılaştırma yapıldığında hareketlendiricinin en hafif olması güç/ağırlık oranında en yüksek olması istenilen bir özelliktir. Nikel-titanyum alaşımının güç/ağırlık oranının yüksek olması tutma işleminin daha kuvvetli olmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda alaşımın öz direncinin faz değişimlerinde değişmesi, sistemin kontrolünü kolaylaştırmaktadır. Şekil bellekli alaşımların robotik teknolojisinde kullanılmasına ilişkin avantajlar şöyle sıralanabilir (Ikuta, 1990):

- Çalışma mekanizmasının basitliği
- Yüksek güç/ağırlık oranı
- Gürültüsüz ,sessiz bir şekilde çalışması
- Korozyona karşı yüksek dayanıklılık göstermesi
- Temiz ve çevreyi kirletmeden çalışması
- Elektrik akımıyla kontrol edilebilme kolaylığı

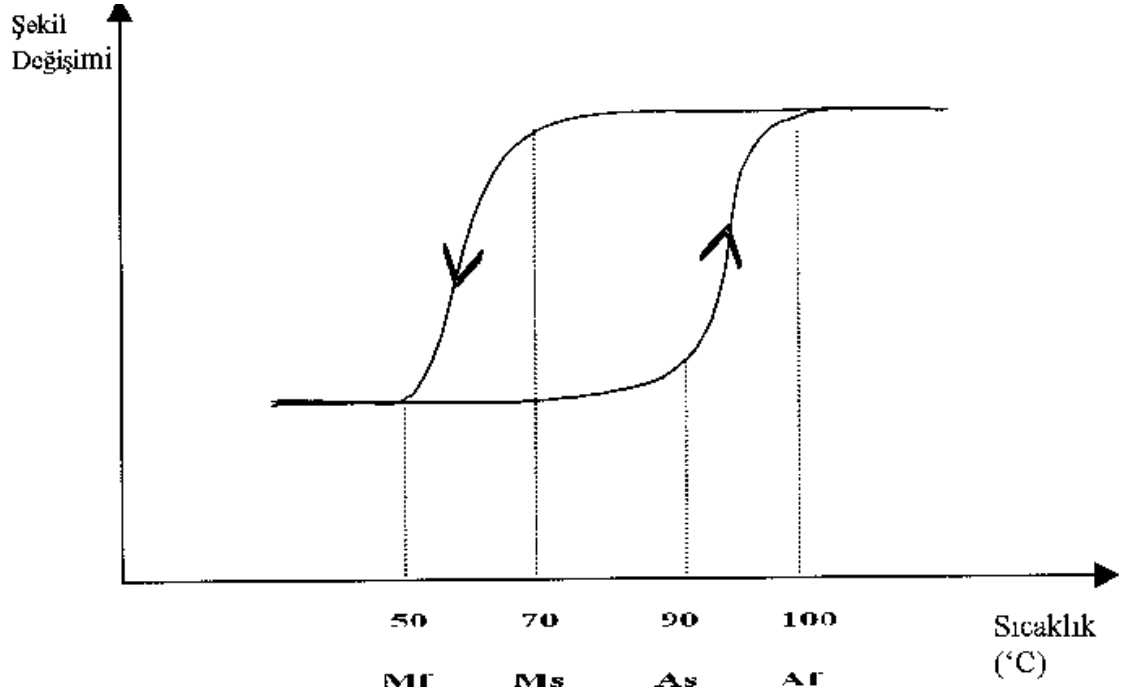
Sistemin zayıf noktası olarak tekrar ömrü (yorulma problemi) görünmektedir. Tekrar ömrü alaşımın özelliğine ve istenilen şekil bellek değişimi oranına göre değişmektedir. Mf ve Af sıcaklık noktalarının düşük olduğu alaşımlarda tekrar ömrü daha yüksek olmaktadır. Nikel-Titanyum alaşımı ile yapılan deneylerde 1.000.000 dan fazla tekrar yapıldığında şekil bellek kabiliyetinin %1 'e kadar düştüğü görülmüştür. 10.000 tekrar yapıldığında hareket kabiliyeti %2 civarında olmaktadır.

4. SMA ROBOT ELİN TASARIMI VE KULLANILAN SİSTEMLER

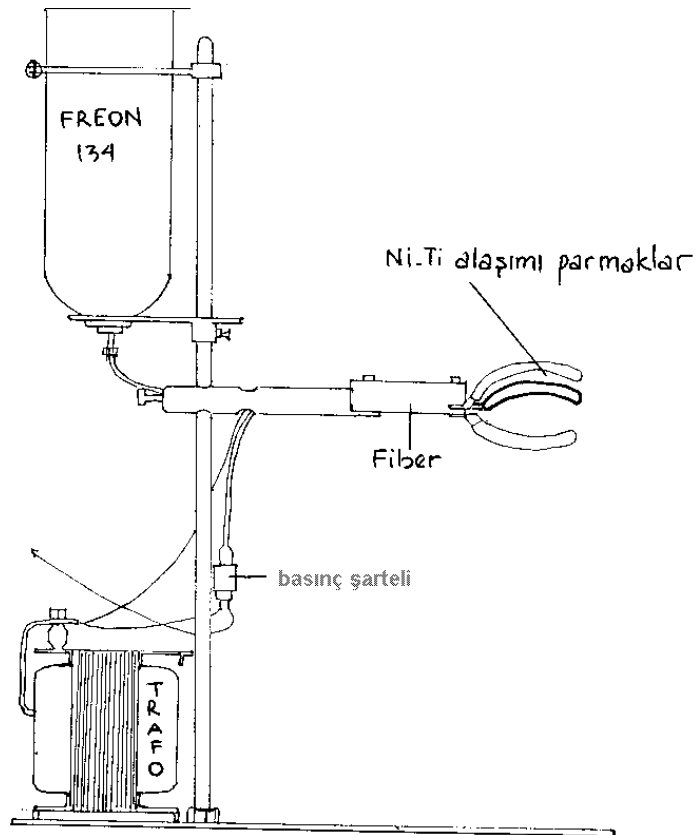
Araştırmamız için gerekli olan Nikel-titanyum (Ni-Ti) alaşımı ABD.de Shape Memory Applications, İnc. firmasından (25x75x2 mm) boyutlarında levhalar halinde ithal edilmiştir. Gelen levhalar İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü laboratuvarlarında soğuk kesim sonucu (5x75x2 mm.) boyutlarına indirilmiş ve DTA (Differential temperature analysis)'sı yapılarak 550°C de fırınlanarak istenilen kavrama hareketlerini sağlayacak şekilde çift yönlü şekil bellek etkisi verilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde Mf 50 °C , Ms 70 °C , A s 90 °C , Af 100 °C olarak bulunmuştur (Şekil 3.1).

SMA Robot Elde el ayası olarak ısıya ve darbeye dayanıklılık ve yalıtkanlık özelliğinden dolayı fiber levha kullanılmıştır. Robot elin öncelikle Proengineer'de katı modellemesi yapılmış ve gerekli parça boyutları tesbit edilmiştir. Uygun kavrama hareketlerini sağlayacak çift yönlü şekil belleği verdiğimiz Ni-Ti alaşımı parmaklar fiber levha üzerine monte edilmiştir.

Robot el sistemimize uygunluğu ve ileride oluşturulacak kontrol sistemi için bir veri oluşturması açısından projemizde üzerinden elektrik akımı geçirerek ısıtma yolu tercih edilmiş ve bu iş için çıkışı 300 watt, 3 voltluk bir trafo kullanılmıştır. SMA Robot El, ısıtma, basınç kontrolü ve soğutma olmak üzere üç ayrı alt sistemden oluşmaktadır. Şekil 3.2 'de SMA Robot Elin tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kullandığımız Ni-Ti 'de Sıcaklık/Şekil Değişimi

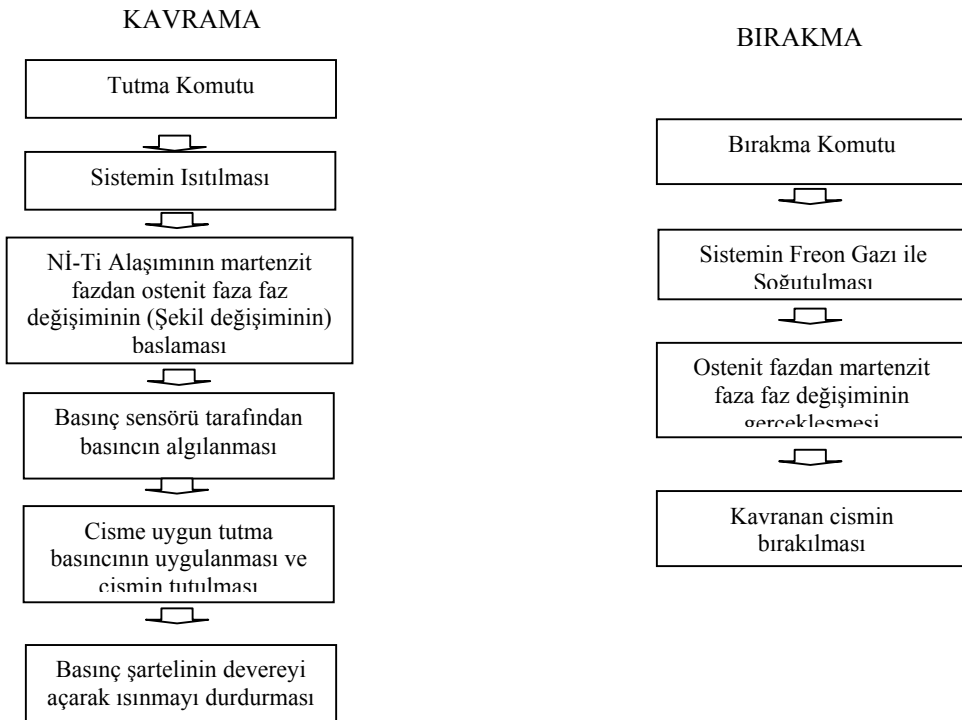


Şekil 3.2 SMA Robot Elin Tasarımı

Tutma komutu verildiği anda elektrik devresi kapanarak Ni-Ti alaşımının ısıtılması sağlanmaktadır. Ni-Ti alaşımının öz direncinin yüksekliği ve yüksek akım eldesi ısıtma periyodunu çok kısa bir zamana düşürmektedir. Böylece Ni-Ti alaşımının faz değişimi sonucu parmaklarda şekil değişimi yani kavrama hareketi görülmektedir. Gücün (300 watt), yükseltip azaltılması ile parmak hareketlerinin hızlandırılıp yavaşlatılması mümkündür.

Cismin uygun kavranması baş parmak üzerine yerleştirilen hidrolik balon vasıtasıyla olmaktadır. Hidrolik balonun bağlı olduğu basınç şarteli istenilen basınç olduğu anda devreyi kesmekte, elektrik akımını durdurmaktadır. Bu durumda ısınma durmakta ve istenilen kavrama gerçekleşmiş olmaktadır. Parmaklardaki ısınma problemleri yanmaz kablo ve makaron kullanılarak çözülmüştür.

Soğutma aşamasında hızlı bir soğutma işleminin gerçekleşmesi için Freon 134R(C₂H₂F₂) gazı kullanılmıştır. Isınan Ni-Ti alaşımı parmaklar üzerine püskürtülen freon gazı vasıtasıyla alaşımın martenzit faza geçmesi yani şekil değiştirerek, robot el tarafından tutulan cisim bırakma işlemi sağlanmıştır. Aslında sistem bir müdahale olmaksızın 40 °C den aşağı bir ortam sıcaklığına bırakıldığında soğuma yavaş yavaş olacak , parmakların cisim bırakma eylemi de aynı yavaşlıkta gerçekleşecektir. Sistemin çalışma prensibi bir algoritma üzerinde Şekil 4.3 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. SMA Robot elin çalışma algoritması

5. PERFORMANS ANALİZLERİ VE ENDÜSTRİYEL ALANDA KARŞILAŞTIRILMASI

SMA Robot Elinin performansını belirlemek amacıyla verilen güce göre parmakların kapanma süreleri, robot elde kavrama/bırakma zaman analizi, robot elin kavrayabileceği en küçük ve en büyük parça boyutları, robot elde taşınabilecek en büyük parça ağırlığı, robot el parmaklarının uygulayabileceği en yüksek kuvvet deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar adım motorları kullanılarak yapılan Metuhand'e ait performans sonuçları ile de karşılaştırılmıştır.

5.1. Verilen güce göre Ni-Ti parmakların kapanma süresi

SMA Robot elde parmakların kapanma sürelerini ölçmek için yapılan deneyde, 100 wattlık ve 300 wattlık iki trafo kullanılmıştır. 100 wattlık trafo ile 3 parmağın en son kavrama şeklini alması 92 saniye olurken, 300 wattlık trafo ile 3 parmağın en son kavrama şeklini alması 8.75 saniyede tamamlanmıştır. Tablo 4.1'de yapılan deney sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 4.1. Parmak sayısına ve verilen güce göre Ni-Ti parmakların kapanma süresi

		Parmak sayısına göre kapanma süresi		
		1 parmak	2 parmak	3 parmak
Verilen	100 watt	38 saniye	62 saniye	92 saniye
Güç	300 watt	3.76 saniye	6.34 saniye	8.75 saniye

5.2. SMA robot elde kavram-bırakma zaman analizi

SMA robot elle kavrama-bırakma zaman analizinde robot el parmaklarının ne kadar süre içerisinde tam kavramayı gerçekleştirdiği, parçayı geriye bırakma süresinin freon gazı, su ve normal oda sıcaklığında ne kadar süre içerisinde tamamlandığı tespit edilmiştir (Tablo 4.2). Robot elin bir önceki deneyden de görüldüğü gibi, tam kavrama yapması 8.75 saniye sürmektedir.

Tablo 4.2. SMA Robot elde farklı soğutma sistemleri kullanıldığında bırakma süreleri

	Parçayı bırakma	Tam olarak açma
Freon gazı	0.8 saniye	3 saniye
15°C su	0.7 saniye	4 saniye
29°C oda sıcaklığı	17 saniye	397 saniye

5.3. SMA Robot elin kavrayabileceği en küçük ve en büyük parça boyutları

SMA robot elle kavranabilecek en küçük ve en büyük parça boyutlarının belirlenmesi için yapılan ölçümlerde prizmatik bir parçanın boyutları üç ayrı kartezyen düzlemde değiştirilerek

ince kavrama ve güçlü kavrama sonucunda kavrayacağı en küçük ve en büyük cisim boyutları bulunmuştur. Öncelikle robot elle ince kavrama ile yani parmak uç yüzeyleri kullanılarak yapılan kavramada en küçük kağıt inceliğinde bir parçadan, en büyük 4.5 cm. kalınlığındaki bir parçaya kadar tutma görülmüştür. SMA robot elin şu andaki tasarımında parmak iç yüzeylerinin kullanılması, yani güçlü kavrama ile en küçük 2.5 cm. çapında silindirik parçayı kavrayabileceği tespit edilmiştir. Parça boyutlarının 2.5 cm.'den başlayarak arttırılması sonucunda kavrayabileceği en büyük parça çapı 7.5 cm. olarak ölçülmüştür. Robot elin ince ve güçlü kavrama çalışmalarında parmak yuvalarının açıları parmakların fiber levhaya tutturulduğu yerden değiştirildiğinde kavrama alanı kolay bir şekilde daraltılıp genişletilebilmektedir.

5.4. SMA robot el ile taşınabilecek en büyük parça ağırlığı

SMA robot elle taşınabilecek en büyük parça ağırlığını bulmak amacıyla robot el parmakları ince kavrama ile bir parçayı tutmuş, tutulan bu parçaya askıyla parçalar ilave edilerek en son kaç gramlık bir cismi parmak uçlarında taşıyabileceği ölçülmüştür. Bu deney için robot elin konumu değiştirilerek yerdeki bir parçayı yukarı çekebilecek duruma getirilmiştir. 250 gramdan itibaren parça ağırlığı 250 gramlık parçalarla adım adım artırılarak robot elin 1750 grama kadar olan parçaları taşıyabildiği, yüklemeye devam edildiğinde parmak aralarına konulan parçanın kaymaya başladığı görülmüştür.

5.5. Robot el parmaklarının uygulayabileceği en yüksek kuvvet

SMA robot el parmaklarının uygulayabileceği en yüksek kuvveti tesbit etmek amacıyla robot elin bir parmağı kullanılarak gerekli deneyler yapılmıştır. Deney için öncelikle bir yayın k sabiti tesbit edilmiş ($k=0.59$) daha sonra k sabiti belli olan bu yay bir parmak altına takılarak parmağın kapanmasıyla birlikte parmağın yaya uyguladığı en yüksek kuvve tesbit edilmiştir. Parmak ısıtıldığında 2250 grama kadar olan ağırlıkları çekebildiği görülmüştür.

5.6. SMA robot elin METUHAND ile karşılaştırılması

SMA Robot elin tesbit edilen deney sonuçları, Metuhand'e ait daha önceden tesbit edilmiş performans sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. SMA robot el için yukarıda bahsedilen performans deneylerine karşılık Metuhand'de taşınabilecek en küçük ve en büyük parça hacmi, kaldırılabilir en büyük parça ağırlığı ve tekrar analiz ölçümleri yapılmıştır.

Metuhand ile yapılan kuvvet analizinde ise 22 gramlık silindirik parçanın ağırlığı 32 grama kadar 2 gram 2 gram artırılarak parçanın kontrolünü kaybetmeden tutması sağlanmıştır (Zergeroğlu, 1996). SMA robot el ile yapılan aynı testte robot el 1750 grama kadar olan parçaları taşıyabilmiştir. Taşınabilecek en küçük ve en büyük parça hacmini tespit amacıyla Methuhand ile yapılan testlerde prizmatik parçanın boyutları büyütülerek ölçümler yapılmıştır (3.5 X 2 X 5.5 cm., 5 X 2 X 8 cm., 2 X 5 X 10 cm.). Sonuçta Metuhand ile 2X5X10 cm. büyüklüğüne sahip ve daha küçük parçaların tutulabileceği görülmüştür. SMA Robot elle yapılan aynı testte ise parmak uçları kullanılarak 4.5 cm. genişliğinden daha küçük parçaları, parmak içinde ise 2.5 cm. den 7.5 cm. çapına kadar olan bütün cisimleri uygun kavrayabileceği görülmüştür.

Yapılan performans analizleri sonucunda SMA robot elin Methuhand ile yaklaşık aynı kavrama alanına sahip olduğu görülmüştür. Ancak parça taşıma kapasitesinin SMA robot elde Methuhand'e göre oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir.

SMA Robot El ile yapılan gözlemlerde yaklaşık 1000 tekrara kadar parmak hareketinde herhangi bir hata olmamakla birlikte ilerleyen tekraralarda parmak kavrama eksenlerinde % 1 oranında bellek kaybetme olduğu görülmüştür. Tekrar analizlerinde, SMA robot elin yaklaşık 1 000 tekrardan daha önceki uygulamalarında pozisyonlama hatalarının uygun kavramayı etkilemeyecek kadar düşük olduğu görülmüştür. Metuhand robot elinde parmaklara hareket iletimi sağlayan makara-ip sisteminde kullanılan kabloların kaçınıcı tekrardan sonra hata verdiğine ilişkin üst sınır belirtilmemiştir. Ancak metuhand robot elin kanca tutuşu, güçlü kavrama ve ince kavrama esnasında ilk hata yapmasının kaçınıcı tekrardan sonra olduğu belirtilmiştir. Robot elin tekrar hataları ile ilgili sonuçlar Tablo 4.3.'de verilmektedir (Zergeroğlu, 1996).

Tablo 4.3. Metuhand ait tekrar analiz sonuçları (Zergeroğlu, 1996)

	KANCA TUTUŞU		GÜÇLÜ KAVRAMA		İNCE KAVRAMA	
	İLK HATA	ŞEKİL KARIŞTIRMA	İLK HATA	ŞEKİL KARIŞTIRMA	İLK HATA	ŞEKİL KARIŞTIRMA
YÜKLENMEMİŞ EL	6	8	5	7	5	6
SİLİNDİRİK PARÇAYI TAŞIMA	---	---	3	4	3	4
PRİZMATİK PARÇAYI TAŞIMA	---	---	4	4	3	5

SMA robot elde Ni-Ti parmaklardaki yorulma sonucu (yaklaşık 1000 tekrar üstü) parmaklarda hareket kısıtının oluşması problemi, parmakların çok kısa bir anda değiştirilmesi ile kolayca halledilebilmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Hünerli robot el tasarımlarında en uygun antropomorfik kavramayı sağlamak, endüstriyel robotun görev alanını genişletmek bakımından önemli bir çalışma alanını oluşturmaktadır. Artık günümüzde endüstriyel robotların işletme içerisinde hemen her bölümde kullanıldığı düşünülürse, geleceğin işletmelerinin tamamıyla bilgisayarla bütünleşik üretim ve onun alt sistemlerinin modernizasyonu ile şekil alacağını düşünmek hiç de zor değildir.

Robotik alanda şekil bellekli alaşımların kullanılması oldukça yenidir. Özellikle geleneksel hareketlendirici sistemlerden başka şekil bellekli alaşımları a robotik alanında kullanmak bu alanda yapılacak çalışmalara bir başlangıç oluşturması bakımından önemlidir.

Bu çalışmada şekil bellekli alaşımların robot uç etkileyici kısmında, hünerli bir robot el tasarımlarında etkin bir şekilde kullanılabileceği kanıtlanmıştır. Şekil bellekli alaşımlar kullanılarak gerçekleştirilen üç parmaklı SMA Robot El prototipinin geliştirilerek endüstriyel alanda, örneğin montaj hattında esnek bir şekilde kullanılacağı ve robot el kavrama sistemine yeni bir bakış açısı getireceği değerlendirilmektedir.

Diğer robot el sistemleriyle karşılaştırıldığında SMA Robot El sisteminin sağladığı avantajlar şöyledir: robot el parmaklarındakullanılan Ni-Ti alaşımlarının insan eli kas yapısına benzer davranışlar göstermesi parmakların daha esnek hareketini sağlamaktadır. Böylece diğer robot el parmakları için geçerli olan serbestlik derecesini artırma problemi SMA robot elde yaşanmamaktadır. Ni-Ti alaşımının güç/ağırlık oranının yüksek olması dolayısıyla daha

etkin ve güçlü bir kavrama sağlanabilmektedir. Robot el ile yapılan parça taşıma, tutma/bırakma tekrarlarında hata oranının düşük olması ve yaklaşık 1000 tekrara kadar uygun kavramayı engellememesi endüstriyel alanda kullanılabilmesini kolaylaştırmaktadır.

Oluşturulan prototip robot elin kavrama yeteneğinin geliştirilmesi Ni-Ti alaşımının alternatif şekillerde kullanılması ile mümkündür. Robot elde parmaklarda levha halinde Ni-Ti alaşımı kullanılması yerine tel şeklinde Ni-Ti alaşımının kullanılması, sistemin daha esnek bir şekilde çalışmasını sağlayacaktır. Ayrıca robot el parmaklarında daha düşük sıcaklıklarda şekil bellek etkisi gösteren Nikel-Titanyum alaşımlarının kullanılması robot el alt sistemlerinden ısıtma ve soğutma sistemlerinin çalışma hızını artıracak ve enerji tasarrufu sağlayacaktır. SMA Robot elde kullanılan soğutma alt sisteminin kapalı bir sistem haline getirilmesiyle sistemin daha ekonomik çalışması sağlanabilir. Robot el soğutma alt sistemi üzerinde yapılan deneylerde sistemin su ile soğutulması ile freon gazı ile soğutulması arasında 1 saniyelik bir fark olduğundan sistemin daha yavaş çalışmasının istenildiği durumlarda sisteme su ile soğutma alt sisteminin de eklenmesi ayrıca bir tasarruf sağlayacaktır.

SMA robot elde basınç şalterinden alınan, taşınacak olan parçanın parmaklara uyguladığı basınç ile ilgili verilerin sayısal olarak alınması sağlanarak, oluşturulacak bilgisayar programına veri olarak girilmesiyle robot elin bilgisayarla kontrolü yapılabilir. Bu konuda çalışmalarımız devam etmektedir.

METUHAND Robot elinde adım motorlarının hacim olarak büyük yer kaplaması en büyük problemlerden birini oluşturmaktadır. Bunun aksine SMA Robot el sistemindeki basitlik ve daha küçük yer kaplama bu robot elin bir avantajı olarak görülmektedir.

Ayrıca şekil bellek alaşımlarla yapılan sistemlerin çalışma mekanizmasının basitliği, sessiz, etrafa gürültü yaymadan, temiz çalışması, uzaktan komuta edilebilme özelliği, alaşımın hafifliği, korozyona dayanıklılığının yüksek olması gibi özellikleri dolayısıyla ilerki yıllarda robotikte ve diğer mühendislik çalışmalarında yapılacak tasarımlarda kullanılma oranının daha da artacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımız esnasında yardımlarından dolayı İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nden Yard.Doç.Dr. Mustafa GÜDEN'e, ODTÜ Elektrik Elektronik Müh'den Doç.Dr.Aydan ERKMEN'e, Erkan ZERGEROĞLU'na, ODTÜ CAD/CAM/ROBOTİCS'ten Erhan KAYABAŞ'a derin teşekkürlerimizi sunarız.

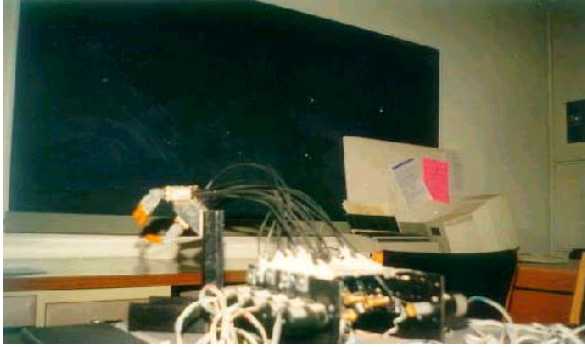
KAYNAKLAR

- Bergamasco, B., Salsedo, F., Dario, P. (1989): A Linear SMA Motor as Direct-Drive Robotic Actuator, "IEEE Robotic and Automation", pp. 618-623.
- Critchlow, A.J. (1985), Introduction to Robotics, Mac Millan, pp. 108-112.
- Erkmen, A., (1993): Robot elle kavrama planlaması," Elektrik Mühendisliği", Sayı: 393 sf. 25-30.
- Ikuta, K. (1990): Micro/miniature shape memory alloy actuator, "International Conference in Robotic and Automation", pp. 2156, 2161.

- Jackson, C.M., Wacner, H.J. and Wasilewski, R.J., (1972): Nitinol-The Alloy with memory: Its Physical Metallurgy, Properties and Applications, A Report.
- Kauffman, G., Mayo, I., (1993): Memory Metal,” Chem. Matters”, pp. 4-7.
- Kerr, J. and Roth, B., (1986): Analysis of multifingered hands, “ International Journal Robotics Research”, Vol. 4, no: 4, pp 3-17.
- Lin, L.R. and Huang, H.P., (1998): NTU Hand: A new design of dexterous Hands, “Journal of Mechanical Design”, Vol. 120, pp 282-292.
- Selimbeyoğlu, E., (1992): “Design of shape memory alloy actuators”, Doktora tezi, ODTÜ
- Tüz, M.A., (1994):” Design and Construction of Multipurpose Robot gripper”, Y. Lisans Tezi, ODTÜ.
- Wolfram, S., (1995): “ Analytical Robotics and Mechatronics”, Mc Graw-Hill, pp. 304-339.
- Zergeroğlu, E., (1996): “Implementation and Control of a three fingered robot hand METUHAND”, Y. Lisans Tezi, ODTÜ.

EKLER

EK -1 Metuhand Robot Elinin Resmi (Metuhand Robot Eli (adım motorları ile birlikte)



EK -2 SMA Robot Elinin resmi (ısıtma/soğutma sistemleri ile beraber)

