

# ROBOTLARI HASSAS ÇALIŞTIRMAYI AMAÇLAYAN TASARIM, MODEL VE KONTROL YÖNTEMLERİ

ENDÜSTRİLEŞME SÜRECİNE BİR  
BAKIŞ

**R**obotların bugünkü konumu ve geliştirilmesi gereken alanları gözden geçirmeden önce, onların endüstrileşme süreci içindeki yerine işaret etmek istiyoruz. Bu amaçla, endüstrileşme sürecini, birçok endüstrileşmekte olan ülkenin de onu paralel olarak izlemesi nedeniyle, ABD'deki gelişmeleri örnek alarak inceleyebiliriz:

Öncelikle 1800'lerde tekstil endüstrisi organize edilmiş ve sözü edilebilir bir güç haline gelmiştir. Bunu 1900'larda gelişen otomotiv sanayi izlemiştir. Bu dallar, katı otomasyon denilen, kolayca başka işlere uygulanamayan, fakat yaptıkları işi son derece başarılı olarak yapan, otomasyon tezgahları sanayini yaratmış ve geliştirmiştir.

İlk zorlukların aşılması, bilgi ve tecrübenin birikimi ile de, önceleri tekstil ve otomotiv sanayileri ile sınırlı kalan endüstride hızlı bir çeşitlenme gözlenmiştir. Piyasa desteği ve insanların değişik mallar isteme eğilimi de bu çeşitlenmeye ivme katmıştır.

Bilgisayarların gelişmeye başlamasıyla birlikte 1950 ve daha sonraki yıllarda tezgahların bilgisayarlarca kontrol edilmesi yoluna gidilmiş ve Bilgisayar Kontrollü Tezgahlar geliştirilmiştir. Bu yöntem bilgisayar programlarının değiştirilmesiyle tezgahların daha çeşitli amaçlarla kullanılmasına, ya da yan-katı otomasyon'a olanak sağlamıştır.

Bundan sonra atılan adımda da, tezgahların yerine robotların(\*) kullanılması gözlenmektedir. Yine bilgisayar kontrollü olan bu sistemler pek çok değişik amaçla kullanılacakları için çok amaçlı otomasyon'a ilke olarak olanak sağlıyordu. Örneğin, geleceğin fabrikası kavramı içinde o kadar fazla esneklik öngörülmektedir ki, bir adetlik bir ürün siparişi bile tasarımından üretilmesine ve kalite kontrolüne kadar bilgisayar ve robotlarca tamamlanabilecek ve bu maddi açıdan kazançlı olacaktır. Endüstrileşmedeki bu aşamaları Tablo 1'deki gibi de özetleyebiliriz.

Burada işaret etmek istediğimiz, robotların endüstrileşme süreci içinde çok çeşitlilik sunma potansiyelleri nedeniyle önemli bir yere sahip oldukları ve bu önemin daha başarılı robot tasarımlarıyla gelecekte daha da artacağıdır.

ROBOT TASARIMLARINA BİR BAKIŞ

Endüstride daha etkin olabilmeleri için, bugün piyasada kullanılmakta olan robo-

## ÖZET

*Günlük kullanımları sırasında bugünün robotları pek çok işte yardımcı oldukları kadar özellikle mühendislere pek çok sorunlar da yaratabilmekte. Bu yazıda önce robotların yerini ve önemini geniş bir açıdan, endüstrileşme süreci içinde, değerlendireceğiz. Daha sonra, robotların önemlerini koruyabilme ve daha yararlı olabilmeleri için geliştirilmesi gereken yönlerini yine oldukça geniş bir açıdan ele alacağız. Genelde amaç, robotların hafif, kuvvetli, hızlı, hassas araçlar olabilmesidir. Bunlar, bir ölçüde teknolojinin gelişmesine de bağımlı olan yeni tasarımları, detaylı robot modellerini ve yeni, yaratıcı kontrol yöntemlerini içermektedir. Son olarak da, modelleme ve kontrol alanında yapılan çalışmalardan örnekler de vererek, aynı robot için geliştirilen biri elastik iki ayrı modelin kontrol yöntemlerini nasıl etkilediğini göreceğiz.*

*Sabri TOSUNOĞLIH\**

*(\*) Texas Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, ABD.*

Yıl	Endüstri Dalı	Otomasyon Tipi
1800 öncesi	Teknolojiye Dayanmayan Tarım Ekonomisi	—
1800'ler	Tekstil Endüstrisi	Katı Otomasyon
1900'ler	Otomotiv Endüstrisi	Katı Otomasyon
1950 sonrası	Endüstri Çeşitlenme	
1950'ler	Bilgisayar Kontrollü Tezgahlar	Yarı-Katı Otomasyon
1970'ler	Bilgisayar Kontrollü Robotlar	Çok Amaçlı Otomasyon

**A Tablo 1:**  
*ABD'de Teknolojinizi Celi.",nesi*

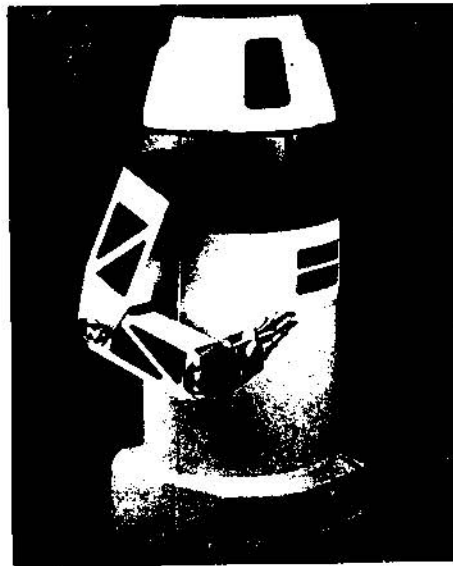
(\*) *Burada robot sözcüğünü, eklem ve linklerin (mafsalların) seri olarak birleşmesiyle oluşan, insan kolunu anımsatan mekanizmalar için kullanıyoruz. Genel olarak bu sözcük hareket edebilen ayaklı veya tekerlekli platformlar, duvarlara tırmanabilen mekanizmalar, vb. için de kullanılmaktadır.*

(\*\*) *Robotların bir veya birkaç ögesinin (motorlar, sensörler) çalışamaz hale gelmesi durumunda, kontrol sisteminin hatayı tanıyıp, çalışmayan ögeyi kendiliğinden devre dışı bırakması ve robotun önceden planlanan işini aksatmadan tamamlamasını öngören sistemler hata toleranslı olarak tanımlanmaktadır.*

tların geliştirilmesi gereken pek çok yönleri bulunmaktadır. Bunlar arasında şunları sayabiliriz:

- Yavaş hareket etmeleri
- Genellikle ağır olmaları
- Yük taşıma kapasitelerinin düşük olması
- Link ve özellikle eklemlerdeki elastikiyet nedeniyle robot eli hassasiyetinin düşük olması
- Modüler tasarım eksikliği
- Hata toleranslı (\*\*) olmamaları
- Standardların yetersizliği
- Kullanımlarının güç olması

Bu sorunlar zaman içinde çeşitli öge teknolojilerinin de gelişmesi ve robot tasarımlarının daha başarılı olmasıyla çözülebilecektir. Ancak bu tür gelişmeleri kısa ve uzun dönemlerde inceleyebiliriz. Örneğin, uzun dönemde robot verimini etkileyecek belli başlı alanlar şunlardır:



- Yüksek mukavemet/ağırlık oranlı alaşımlar (plastikler ve kompozitler gibi)
- Yüksek tork/ağırlık oranlı motorlar (özellikle elektrik motorları)
- Eklemlerdeki boşlukları önleyecek tasarımlar (yeni dişli sistemleri, her eklemden birine karşı çalışan iki motor kullanma gibi)

- Modüler tasarımlar
  - Değişik kapasitede, Standard motor, eklem, link ve iletişim modülleri
  - Standard bir set modülle, gereksinime göre, kısa sürede değişik robot sistemlerini montaj etme olanağı
  - En son teknolojinin yeni modüller eklenerek yakından izlenebilmesi
- Hata toleranslı tasarımlar
  - Eklem sayısı altıdan fazla olan robot tasarımları
  - Gereken en-azdan fazla sensör kullanma
  - Eklemleri bir yerine iki motorla kontrol etme
  - Çalışmayan öğeleri kendiliğinden bulup devre dışı bırakan kontrol yöntemleri
- Robotların kolay kullanım yöntemleri

Özetlersek, geleceğin robot tasarımları hafif, hızlı, hassas, hata toleranslı ve modüler robotlara yönelmek durumundadır. Uzun dönemde bu tür gelişmeler beklenirken, kısa dönemde, halen kullanılmakta olan robotların daha hızlı ve hassas çalışmalarını sağlayabilecek birkaç yöntemden söz edebiliriz:

- Yeni Kontrol Yöntemleri: Robotlardaki elastik elemanların, sürtünmenin, boşlukların, linkler arasında oluşan dinamik kuvvetlerin matematik sistem modeline alınması ve yeni kontrol yöntemlerinin böyle detaylı bir model için geliştirilmesi ile var olan robotların olanakları içerisinde hem daha hızlı, hem daha hassas çalışması amaçlanmaktadır. Bu konuya biraz daha etraflıca aşağıda değineceğiz.
- Robot Elinin Hassasiyetini Arttıran Mikro-Robot: Bu yaklaşımda hassasiyeti arttırılmak istenen robotun eline

mikro-robot denilen küçük bir robot yerleştirilmektedir. Mikro-robotun hareket yeteneği asıl robotun % 1'i kadar olabilir ve küçük hareketlerle robotun taşıdığı aletin veya yükün pozisyonunun hassas olarak kontrol edilmesini sağlar.

**Tasarım Değişiklikleri :** Robotun çalışmasında belli bir performans düşüklüğüne neden olan öğelerin değiştirilmesi önemli kazançlar sağlayabilir. Örneğin, link boyutlarında, motorlarda, özellikle bilgisayar ve kontrol yöntemlerinde yapılacak yenilemeler kısa sürede robotları daha etkin araçlar kılabilir.

ABD'de Robotics Research Corp. tarafından üretilen, tasarımında bazı modüler robot kavramları da bulunan ve genelde başarılı bir tasarım örneği sayılabilecek 7 eklemlili bir robot (3 eklemlili omuz, 1 eklemlili dirsek, 3 eklemlili bilek) Şekil 1'de gösterilmiştir.

#### ROBOT DİNAMİK SİSTEM MODELLERİ

Bu bölümde robot modelleri ve bu modeller için geliştirilen kontrol teknikleri üzerine yapılan çalışmaları kısaca gözden geçireceğiz. Doğal olarak robotun yaptığı işin hız ve hassasiyet düzeyine göre çok basit modeller kullanıldığı gibi, çok detaylı modellerden de yararlanılmaktadır. Örneğin, robotun elastik elemanlarını göz önüne almayan modellerde dinamik sistem denklemleri şu şekilde verilmektedir:

$$\ddot{e} = A(6)\{u(t) - f(e, \dot{e})\} \quad (D)$$

Eğer n eklemlili bir robotu modelliyorsak, 9, n boyutlu eklem pozisyon vektörü; A, 9'ya bağlı, doğrusal olmayan, robotun genel kütlelerini veren  $n \times n$  boyutlu matris; f hem

9, hem de 9'ya bağımlı, yine doğrusal olmayan merkezkaç ve Koriolis ivmeleri ile yerçekiminin yarattığı torkları içeren n boyutlu vektör, u ise motorların eklemlere uyguladığı n torku içermektedir. Böyle bir robot modeli için pekçok kontrol teknikleri geliştirilmiş bulunmaktadır [7].

Link ve eklemlerdeki elastikiyetin modellenmesi ile daha gerçekçi, ama aynı zamanda daha karmaşık modeller de kullanılmaktadır. Bu amaçla, robot öğelerinin kütle ve elastikiyeti sürekli [1] veya sürekli olmayan [2] sistemler şeklinde modellenebilir. Eklemler ve linklerdeki elastiklik Şekil 2'de gösterildiği gibi modele eklenen doğrusal yaylarla gösterilirse, dinamik sistem denklemleri şu şekli almaktadır [8]:



• **Şekil 1:**  
Modüler tasarım yaklaşımını ilk kez uygulayan Robotics Research Corp. 'un 7 eklemlili bir robotu: K-807I

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(6, \beta) & C^T(6, \beta) \\ C(6, \beta) & A_2(6, \beta) \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} u(t) \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_1(e, p, \dot{e}, \dot{p}) \\ f_2(e, p, \dot{e}, \dot{p}) + K\beta \end{bmatrix} \right\} \quad (2)$$

Önce verdiğimiz (1)'e oranla buradaki ayrıcalık, robotun genel devinimini tanımlayan denklemlere ek olarak, ikinci sette B ile gösterdiğimiz elemanlardaki eğilmenin neden olduğu titreşim denklemlerinin eklenmesidir. Yine n eklemlili bir robot için 9 vektörü n boyutlu; eğer toplam olarak link ve eklemlerde m esnek eleman modellenmişse, 3, m boyutlu olacaktır. Ayrıca (1)'de A ile gösterilen sistem kütle matrisi  $A_1$ ,  $A_2$ , C matrisleriyle, yine (1)'deki f terimi ise n boyutlu  $f_1$  ve m boyutlu  $f_2$  şekline almaktadır. Yay sertlik katsayıları ise  $m \times m$  boyutlu, köşegen K matrisi ile gösterilmiştir. Aşağıda değineceğimiz gibi, böyle bir model, robot performansını arttırmak için çeşitli kontrol tekniklerinin geliştirilmesinde kullanılabilir.

#### KONTROL YÖNTEMLERİ

Elastik olmayan robotlara oranla elastik robotlar için geliştirilen kontrol yöntemleri yeni ve gelişmekte olan bir alanı oluşturmaktadır. Yine de uyarlamalı kontrol, tekil tedirgileme, eniyileme yöntemleri gibi çok çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Örneğin, Siciliano [6] referans modeli uyarlamalı kontrol, Nemir [5] ise öz-ayarlı uyarlamalı



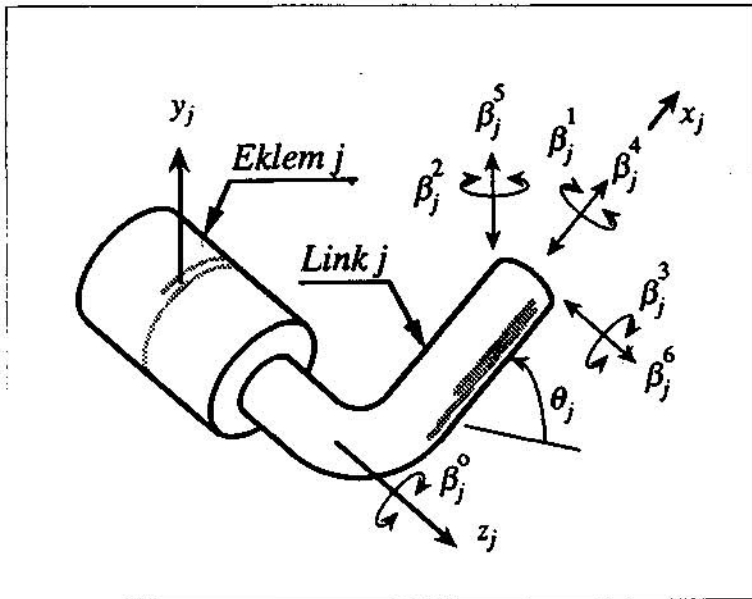
kontrol tekniğinden yararlanarak tek linkten oluşan robotların kontrolü üzerinde çalışmalar yapmışlardır.

Tekil tedirgileme yöntemi ise robottaki elastikiyet nedeniyle oluşan titreşimleri, robotun genel deviniminin üzerine tedirgileme olarak modeller. Böylece, yavaş sistem olarak anılan robotun genel devinimi, hızlı sistem olan yüksek sıklıklı, küçük boyutlu titreşimlerce tedirgilenir ki, değişmez manifoldlar kavramı hızlı sistemin (titreşimler) yavaş sistemi (robotun titreşimsiz genel devinimi) izlemesini sağlayan kontrol yöntemleri geliştirilmesine olanak verir [3]. Wang ve Vidyasagar da eniyileme yöntemlerini bir linkten oluşan robotlara uygulamışlardır [9]. Yapılan araştırmalarla ilgili daha ayrıntılı bilgi [8]'de bulunabilir.

Bu çalışmalarda dikkati çeken özellik, araştırmaların çok büyük bir kısmının yalnızca tek linkten oluşan robotlarla sınırlı kalmasıdır. Oysa bu robotlar, çok linkli robotlarda görülen linkler arası dinamik ilişkileri bulundurmadığından uygun bir örnek oluşturamamakta ve geliştirilen yöntemler çok linkli robotlara genelleştirilememektedir. İkinci bir konu da, [8]'de işaret edildiği gibi Denklem (2) de verilen elastik robotların kontrol edilebilirliklerinin her zaman garanti edilemediğidir. Bunun nedeni, elastik öğelerin sisteme yeni ve bağımsız devinim olanağı getirmesi; buna karşılık sistem giridilerinde (motor sayısında) herhangi bir artış olmamasıdır. Örneğin, Denklem (1)'deki robot sistemi için bu durum söz konusu değildir. Bu nedenle, elastik robotların kontrol yöntemi tasarımlarında bu konunun dikkate alınması gerekmektedir.

• Şekil 2:

Robot eklem  $[Q_j^0; e]$  linklerinde  $\beta_j^1, \beta_j^2, \dots, \beta_j^6$  modellenebilecek elastik elemanlar



Burada, (2)'de verilen n linkli ve m elastik öğeli bir robot için geliştirilen bir kontrol yönteminden söz etmek istiyoruz. Kullanacağımız teknik daha önceden (1)'de verdiğimiz elastik olmayan robotlar için geliştirilmiş olup, "hesaplanan torklar" adıyla da anılmaktadır. Bu yöntem, (1)'deki doğrusal olmayan terimlerin (A(9) ve f(8,9) terimleri) bilgisayarca gerçek-zamanda hesaplanarak kompanse edilmesini amaçlar ve PID geribildirimli şekli şöyle verilir:

$$u = f(e, \dot{\theta}) + [A(\theta)]^{-1} [\ddot{\theta}_d + K_v \dot{\theta} - \dot{\theta}_d] + K_p \theta - e + K_e [j - f_p - e] dt \quad (3)$$

Yukarıdaki denklemde K kazanç matrislerini ve d simgesi istenen eklem devinimini göstermektedir. Ancak sözünü ettiğimiz bu yöntem, (2)'de gördüğümüz titreşim denklemlerinin eklenmesi nedeniyle elastik robotlara aynen uygulanamamaktadır. O zaman, kontrol u'nun seçiminde şöyle bir yaklaşım kullanılabilir:

$$u = f + A^{-1} u_e + C^+ u_p + u_s \quad (4)$$

Bu denklemde  $u_s$  ve UR, 9 ile  $I3^a$  bağılı geribildirim döngülerini içermektedir:

$$u_s = \ddot{\theta}_d + K_v \dot{\theta} - \dot{\theta}_d + K_p \theta - e_j + K_e \{-f(e - e_j) \} \quad (5)$$

$$u_p = \ddot{\beta}_d + K_v \dot{\beta} - \dot{\beta}_d + K_p \beta - \beta_d + K_e \{-f(P - P_j) \} \quad (6)$$

Ayrıca,  $C^+$ , C matrisinin sağ tersini; K yine çeşitli kazanç matrislerini;  $u_s$  sistemin kararlı durumda kalmasını sağlayan terimi oluşturmaktadır. Burada, [4]'de Lyapunov'un ikinci metodundan yararlanılarak bulunan  $u_s$ 'nin verilmesini yinelemiyoruz.

Denklem (1) ve (2)'de iki ayrı robot modeli arasında yalnızca elastikiyetin modellenmesi olduğu halde, bu farklılığın kontrol tasarımında neden olduğu güçlük (3) ve (4-6)'da verilen kontrol anlatımlarının karşılaştırılmasıyla da anlaşılabilir. Genel olarak, elastik sistem için geliştirilen model daha gerçekçi olduğundan robotu daha hassas modellemekte ve bu model için geliştirilen kontrol yöntemi robotun daha üstün performans vermesini sağlamaktadır. Yukarıda kısaca özetlemeye çalıştığımız kontrol tekniği, 6 eklemli Cincinnati Milacron T3-776 endüstriyel robot modeline 7 elastik eleman eklenerek (n=6, m=7), bilgisayar yardımıyla denenmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır [4].



## KAYNAKLAR

[1] W.J. Book, "Recursive Lagrangian Dynamics of Flexible Manipulator Arms," The International Journal of Robotics Research, Cilt 3, sayfa 87-101-1984.

R.L. Huston, "Flexibility Effects in Multibody System Dynamics," Mechanics Research Communications, Cilt 7, sayfa 261-268, 1980.

C. Khorasani, M.W. Spong, "Invariant Manifolds and Their Application to Robot Manipulators with Flexible Joints," Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation, St. Louis, MO, sayfa 978-983, Mart 1985.

[4] S.H. Lin, S. Tosunoğlu, D. Tesar, "Control of a Six-Degree-of-Freedom Flexible Industrial Manipulator," IEEE Control Systems Magazine, Cilt 11, Sayı 3, sayfa 24-30, Nisan 1991.

[5] D. Nemir, A.J. Koivo, R.L. Kashyap, "Control of Gripper Position of a Compliant Link Using Strain Gauge Measurements," Proceedings of the 25 th IEEE Conference on Decision and Control, Cilt 2, sayfa 1140-1144, 10-12 Aralık 1986.

[6] B. Siciliano, B.S. Yuan, W.J. Book, "Model Reference, Adaptive Control of a One-link Flexible Arm," Proceedings of the 25 th IEEE Conference on Decision and Control, Cilt 1, sayfa 91-95, 10-12 Aralık 1986.

[7] S. Tosunoğlu, D. Tesar, "State of the Art in Adaptive Control of Robotic Systems," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Cilt 24, sayı 5, sayfa 552-561, Eylül 1988.

[8] S. Tosunoğlu, S.H. Lin, D. Tesar, "Accessibility and Controllability of Flexible Robotic Manipulators," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Cilt 114, Sayı 1, sayfa 50-58, Mart 1992.

[9] D. Wang, M. Vidyasagar, "Control of a Flexible Beam for Optimum Step Response," Proceedings of the IEEE Conference of Robotics and Automation, Raleigh, NC, Cilt 3, sayfa 1567-1572, 31 Mart-3 Nisan 1987.

## SONUÇ

Robotların gelecekte daha verimli olabilmeleri için tasarımlarının geliştirilmesi kaçınılmazdır. Bunların bir kısmı öge teknolojilerinin gelişmesine bağımlı olduğu gibi, detaylı modeller ve yeni kontrol teknikleri hem var olan, hem de geleceğin robotlarının daha hızlı ve hassas çalışmasına olanak sağlayabilecektir. Burada, örnek olarak, çok eklemlili, genel bir robotun modellemesini ve kontrol yöntemini önce robot elemanlarını katı, sonra da elastik olarak alıp, aralarındaki farka kısaca değindik. Genel olarak, elastik elemanları içeren bir model, robotu daha iyi tanımlamakta ve bu model için geliştirilen kontrol yöntemleri robot performansını arttırmaktadır. Bu nedenle, henüz tam gelişmemiş sayılan bu alanda özellikle çok eklemlili robotlar için yeni kontrol yöntemlerinin bulunması ve bunların önce bilgisayarda sayısal, sonra laboratuvarlarda deneysel olarak denenmesine gereksinim vardır.

## SÖZLÜK

boşluk: backlash

eklem sayısı altıdan fazla olan robot (burada): redundant robot

hata toleranslı: fault tolerant

link (mafsal) : link, linkage (of a mechanism)

öge teknolojisi: component technology

öz-ayarlı: self-tuning

tekil tedirgileme : singular perturbation

uyarlamalı kontrol: adaptive control