

Altı Serbestlik Dereceli Bir Endüstriyel Robotun Tasarımı, İmalatı ve Çalıştırılması

Oygun Eren
Makina Y. Müh.

Bilgin Kaftanoğlu
Profesör

Makina Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
06531 ANKARA

Yapılan bu çalışma kapsamında altı serbestlik dereceli bir endüstriyel robotun tasarımı, imalatı ve montajı yapılmış ve robot deneme çalışmaları da tamamlanarak kullanıma hazır hale getirilmiştir. Robotun tasarımında bilgisayar destekli tasarım (CAD) teknikleri yoğun bir şekilde kullanılmıştır. Aynı şekilde fiziksel montajdan önce bilgisayar ortamında üç boyutlu sanal montaj yapılmış ve bu sayede oluşabilecek montaj problemleri önceden çözümlenebilmiştir. Üretilen robot ileri akıllı kontrol çalışmalarının uygulanabileceği bir platform olarak kullanılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Endüstriyel Robot, Robot İmalatı, Robot Montajı

GİRİŞ

Endüstriyel robotlar, çeşitli işlerin gerçekleştirilmesi için değişik biçimlerde planlanmış hareketler aracılığıyla, malzemeleri, parçaları ve cihazları taşımak için tasarlanmış yeniden programlanabilen çok fonksiyonlu makinelerdir [1].

Robotlar günümüzde çoğunlukla programlanabilir ve esnek otomasyon uygulamalarında kullanılmaktadır. Bir endüstriyel robot, temel olarak, verilen bir görevi yerine getirmek için programlanabilen hareketli bir kola sahiptir. Robot, programlandığında, farklı bir program hafızasına yükleninceye kadar, o programı tekrarlar. Bu programlanabilir özelliği, robotun, bir çoğunda farklı otomatik veya yarı otomatik ekipmanla birlikte çalışmasını gerektiren çeşitli endüstriyel işlemlerde çalıştırılabilmesini sağlar.

Yapılan çalışmanın amacı, altı serbestlik dereceli bir endüstriyel robot prototipinin tasarlanması, imalatı, montajı ve deneme çalışmalarının gerçekleştirilmesidir. Üretilen robot, endüstride taşıma, yükleme-boşaltma, kaynak veya boyama işlemlerinde kullanılabilir.

ROBOT TASARIMI

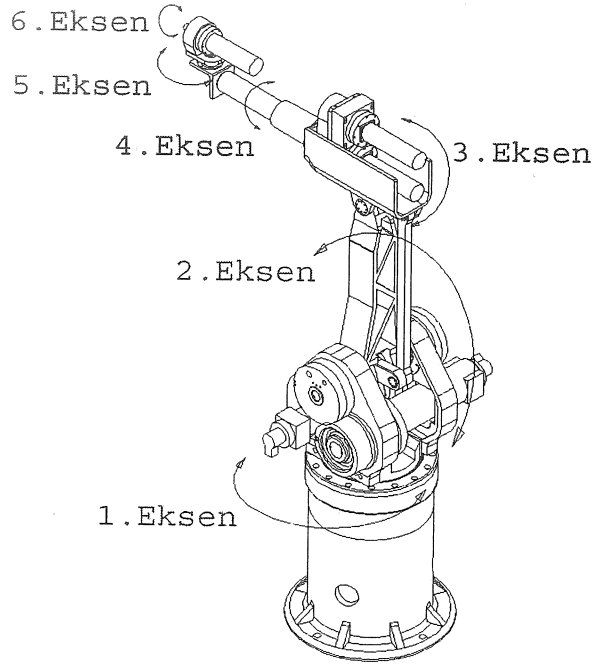
Bu proje kapsamında altı serbestlik dereceli bir endüstriyel robot tasarımı yapılmıştır. Robotun tüm eklemleri döner tipte olup, altı adet servo kontrollü alternatif akım motoru tarafından tahrik edilmektedir. Robotun hareket eksenleri Şekil 1 de gösterilmiştir.

Robotun kullanılabilmesi için uygun uygulamalar, sahip olabileceği en uygun çalışma hacmi ve eksenleri tahrik edecek motorların yerleşimi gözönüne alınarak çeşitli tasarım alternatifleri oluşturulmuştur.

İlk olarak en basit ve etkili çözüm olan doğrudan tahrik değerlendirilmiştir. Doğrudan tahrik alternatifinde herhangi bir aktarma sistemi kullanılmaması hem dinamik cevap yönünden bir iyileşme sağlamak hem de karmaşıklığı azaltıcı yönde etki etmektedir. Ancak özellikle ikinci ve üçüncü eksen tahrik sistemlerinin ağırlığı, neredeyse tüm enerjinin robotun bağlantı elemanlarının hareket ettirilmesi için kullanılmasını dolayısıyla faydalı yük taşıma kapasitesinin çok büyük oranda azalmasını gerektirmektedir ki bu durumda tam bir doğrudan tahrik düzeneği uygun bir çözüm olarak görülmemiştir.

İkinci ve üçüncü eksenlerin motor ve aktarma sistemlerinin ağırlık ve boyutları gözönüne alındığında bu sistemlerin robotun taban kısmına yakın yerleştirilmesine karar verilmiştir. Her iki eksen için motor torkunu bağlantı elemanlarına iletebilmek için sırasıyla dişli kayış, zincir ve dört çubuk mekanizmalarının kullanıldığı alternatifler değerlendirilmiş ve sonuçta ikinci eksen için doğrudan tahrik, üçüncü eksen için ise dört çubuk mekanizması kullanılmasına karar verilmiştir.

Robotun son üç eksen için içerisinde doğrudan tahrik, kardan mili, dişli kayış ve konik dişlilerin bulunduğu farklı düzenlemeler değerlendirilmiş ve sonuçta altıncı ve dördüncü eksenlerde doğrudan tahrik ve beşinci eksen için ise dişli kayış ve konik dişlilerin kullanıldığı bir bir düzende karar kılınmıştır.



Şekil 1. Hareket eksenleri

Tasarlanan mekanizma 9 adet eklem ve kol elemanından oluşmaktadır. Robotun kinematik ve dinamik analizleri mekanizmanın oluşturulan kinematik zinciri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bilinmeyen reaksiyon kuvvetlerini ve karşılık gelen denklemleri belirleyebilmek için, mekanizma iki alt grup halinde incelenmiştir. Yapıyı oluşturan bağlantı elemanları ve bunların dizilişi Şekil 2 de gösterilmiştir.

Yapılan kinematik ve dinamik analizlerde kullanılan Hartenberg-Denavit parametreleri Tablo 1 'de verilmiştir.

Kinematik ve dinamik analizlerden sağlanan veriler kullanılarak, amaçlanan eklem ivmelenme ve hız değerleri Tablo 2 görüldüğü gibi belirlenmiştir.

Tablo 2 'de verilen değerleri doğrudan motorlardan karşılamak güç olduğu ve bağlantı elemanlarının tork ihtiyaçlarının yüksek olması gözönüne alınarak, motorlarla eksenler arasında moment değiştirici mekanizmalar kullanılmasını gerektirmiştir. Bu amaçla seçilen mekanizmalar Cyclo firması tarafından üretilen dişli kutularıdır. Bu dişli kutuları tiplerine bağlı olarak 1/89 ve 1/119 çevrim oranlarına sahiptir.

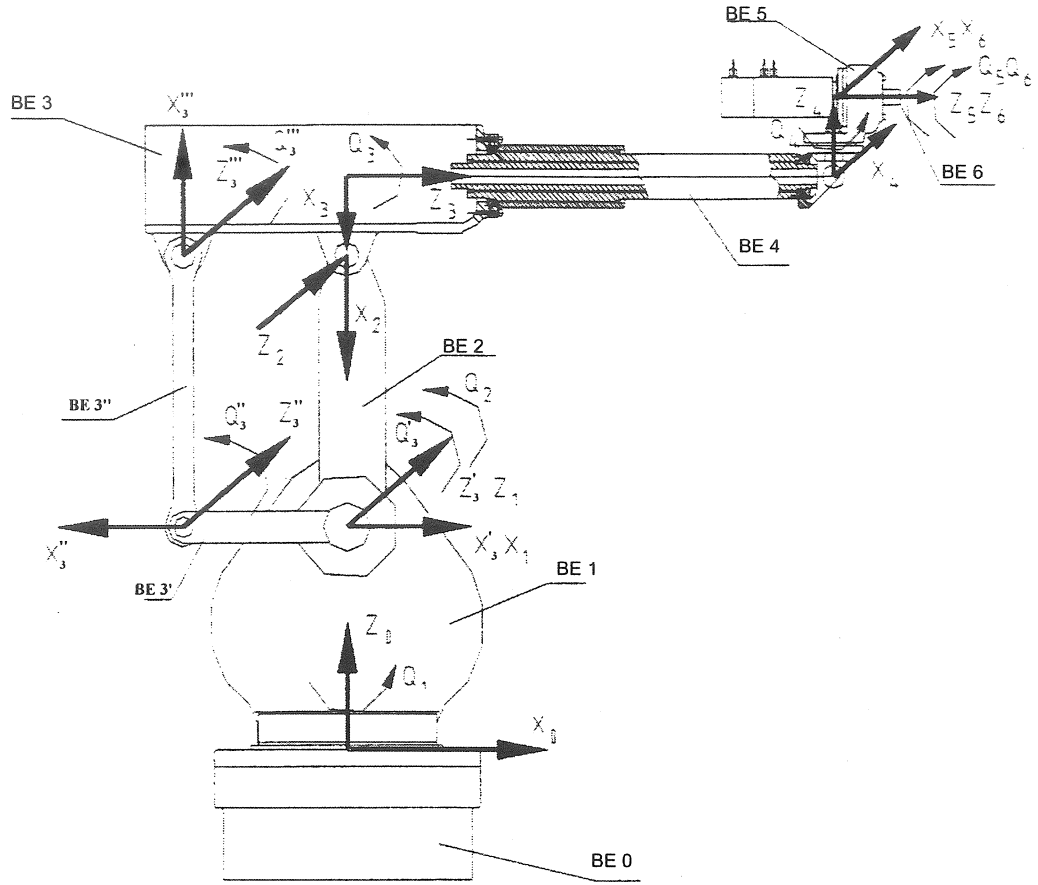
Robotun bazı eksenlerinde Cyclo dişli kutuları dışında başka tip iletim mekanizmaları da

kullanılmıştır. Bunlar düz ve konik dişliler ile dişli kayış sistemleridir. Uygulanan iletim sistemlerinin robotun eksenlerine göre dağılımı Tablo 3 'de verilmiştir.

Motorların yerleşimlerinin belirlenmesi ve uygun iletim sistemlerinin seçilmesinden sonra, bağlantı elemanlarının tasarımına geçilmiştir. Bağlantı elemanlarının tasarımında gözönüne alınan ana kriterler mukavemet, sehim ve özellikle üst kısımlar için ağırlıktır.

Taban kısmından başlanılarak, tüm bağlantı elemanlarının ve iletim sistemlerinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bağlantı elemanlarının tasarımının ardından, eklemlerde kullanılacak rulmanlı yatakların seçimi ve hesabı gerçekleştirilmiştir.

Bağlantı elemanlarının ön tasarımları tamamlandıktan sonra, bütün elemanların iki ayrı bilgisayar destekli tasarım (CAD) programı kullanılarak üç boyutlu katı modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller hem yapılan parça tasarımlarının son haline getirilmesinde hem de robotun ileriki safhada gerçekleştirilecek sanal montajında kullanılmıştır. Robotun bazı parçalarının katı modelleri Şekil 3 de gösterilmiştir.



Şekil 2. Bağlantı elemanlarının (BE) dizilişi [3]

Tablo 1. Mekanizmanın Hartenberg-Denavit parametreleri [3]

Eklem i	θ_i (derece)	α_i (derece)	a_i (mm)	d_i (mm)
1	0	270	0	428
2	90	0	-800	0
3	0	90	-152	0
3'	0	270	0	428
3''	180	0	200	0
3'''	90	0	400	0
4	0	270	0	800
5	0	90	0	151
6	0	0	0	0

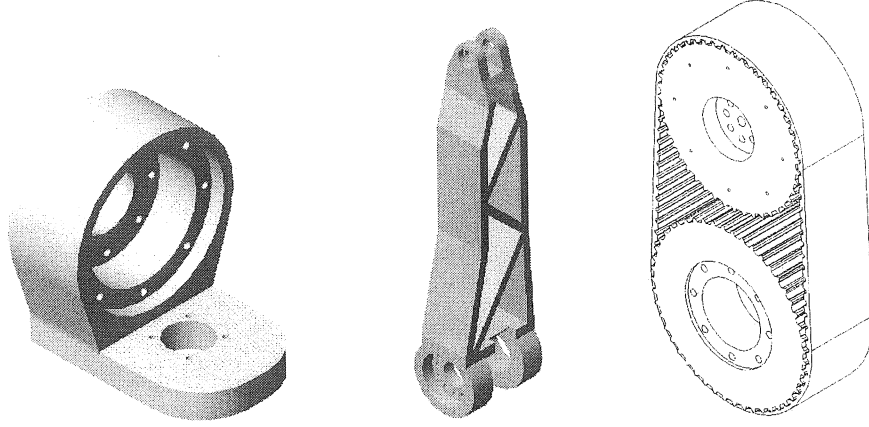
Tablo 2. Amaçlanan eklem ivme ve hız değerleri

	İvme (rad/s ²)	Hız (rad/s)
1. Eksen	15.7	2.09
2. Eksen	15.7	1.57
3. Eksen	15.7	2.09
4. Eksen	15.7	4.19
5. Eksen	15.7	4.19
6. Eksen	15.7	4.19

Tablo 3. Kullanılan iletim sistemleri

Eksen	Yerleşim	İletim Sistemi
1	Taban	Doğrudan Tahrik*
2	1. Eksen Gövdesi	Dişliler ile İletim
3	1. Eksen Gövdesi	Dişliler ile İletim
4	3. Eksen Gövdesi	Dişli Kayış
5	3. Eksen Gövdesi	Konik Dişli
6	5. Eksen Gövdesi	Doğrudan Tahrik*

* Cyclo dişli kutusu doğrudan tahrik içerisinde ele alınmıştır.



Şekil 3. Bazı Robot parçalarının katı modelleri

Sonlu Elemanlar Analizi (FEA)

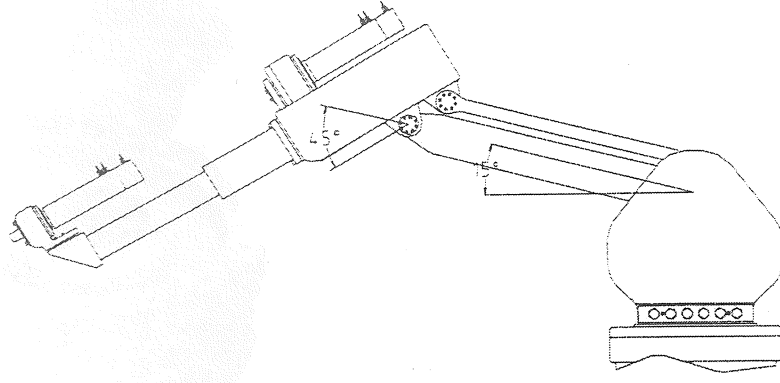
Robotun kinematik ve dinamik analizleri tamamlandıktan sonra, bağlantı elemanlarının mukavemet ve sehimi analizleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan üç boyutlu katı modeller ABAQUS yazılımına aktarıldıktan sonra sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır.

Sonlu elemanlar analizi, robotun bağlantı elemanlarının eylemsizlik yük ve momentleri açısından en fazla zorlanmaya maruz kaldığı konumu gözönüne alınarak gerçekleştirilmiştir.

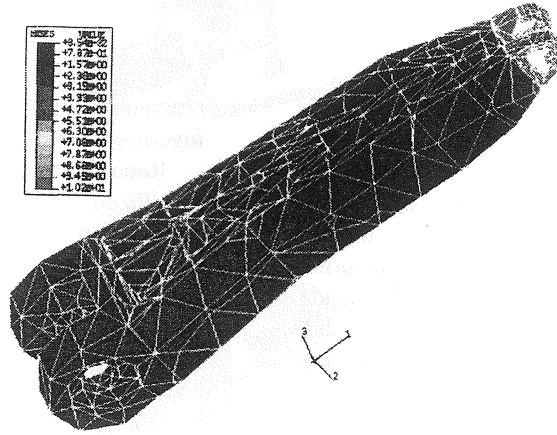
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, bağlantı elemanları için hesaplanan mukavemet değerlerinin, maksimum dinamik yükleme koşullarında bile elemanlarda hasara yol açabilecek sınırların altında olduğu gözlenmiştir. Bu durumda üzerinde durulması gereken konunun robotun uç noktasında oluşacak sehimi olduğu görülmüştür.

Uç noktasında oluşacak sehimin belirlenmesinde robotun alacağı pozisyon büyük önem taşımaktadır. Bu sebepten dolayı, hesaplarda uç nokta için sehimi değerleri toplamının en yüksek olduğu konum gözönüne alınmıştır. Robotun bu konumu Şekil 4 'de gösterilmiştir.

Robotun uç noktasında oluşan sehimi miktarını belirlemek için yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda, uç noktada 0.248 mm lik bir sehimi oluşacağı belirlenmiştir. Bu miktara ikinci bağlantı elemanı 0.11 mm ile en fazla katkıyı yapmaktadır. Bu durumda hedeflenen 0.1 mm lik sehimi miktarına ulaşabilmek için ikinci bağlantı elemanının tasarımı üzerinde çeşitli değişikliklere gidilmiştir. Yapılan her değişiklik sonrasında analizler tekrarlanmış ve bu çalışma sonucunda tasarımda toplam 0.0594 mm lik bir sehimi miktarına ulaşılmıştır. İkinci bağlantı elemanının sonlu elemanlar analizinden bir görüntü Şekil 5 'de gösterilmektedir.



Şekil 4. Robotun sehim analizinde kullanılan konumu



Şekil 5. İkinci bağlantı elemanının sonlu elemanlar analizi

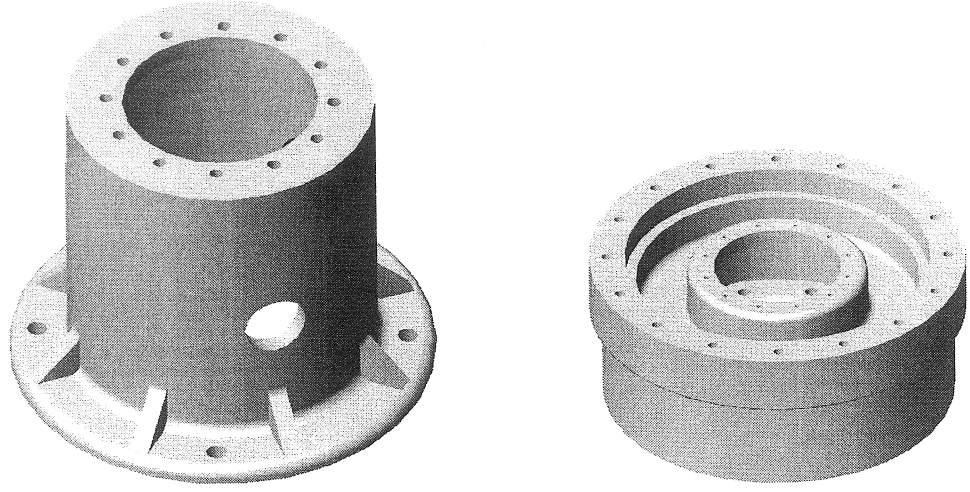
ROBOT İMALATI

Robotun genel tasarımının ardından, parça tasarımları tamamlanmıştır. Bunu takiben her parçanın bilgisayarda üç boyutlu katı modelleri hazırlanmıştır. Bu modellerin kullanılmasıyla, bütün parçaların imalat resimleri çok hızlı bir şekilde oluşturulabilmiştir.

İmalat, üniversite sanayi işbirliğinin iyi bir örneğinin sergilendiği ortak bir çalışma şeklinde gerçekleştirilmiştir. Parçaların bir kısmı ODTÜ Bilgisayar Destekli Tasarım İmalat ve Robotik

Merkezinde (BİLTİR), diğer kısımları da çeşitli sanayi kuruluşlarında imal edilmiştir.

Robotun taban kısımları dökme demir ve oldukça büyük parçalardan oluşmaktadır. Bu parçaların dökümü Türk Traktör Fabrikası yardımı ile yapılmış ve dökümü takiben talaşlı imatları Ankara Şeker Makina Fabrikasında gerçekleştirilmiştir. Dökme demir parçalara ek olarak, orta ve üst kısımda kullanılan alüminyum parçaların da dökümü Türk Traktör Fabrikası yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Taban kısmını oluşturan parçalardan bazılarının resimleri Şekil 6'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Taban parçaları

Orta gövdeyi oluşturan döküm parçaların talaşlı imalatı Ankara OSTİM'de bir firma tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu imalatlarda sayısal kontrollü dikey torna ve freze tezgahları kullanılmıştır.

Hassas imalat gerektiren parçaların imalatı BİLTİR Merkezinde bulunan CNC kontrollü torna, freze ve tel erezyon (WEDM) tezgahlarında gerçekleştirilmiştir. Bu imalatlarda doğrudan bilgisayarda bulunan parça çizimleri kullanılarak CNC kodları çıkarılmıştır.

MEKANİK MONTAJ

Robotun mekanik montajı iki aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada bilgisayar ortamında sanal montaj, sanal montajı tamamlanmasının ardından ikinci aşama olarak fiziksel montaj gerçekleştirilmiştir.

Sanal Montaj

Robotun tüm parçalarının bilgisayar destekli tasarım yazılımı kullanılarak üç boyutlu katı modellerinin oluşturulduğu daha önce belirtilmişti. Bu modeller öncelikle imalat resimlerinin çıkarılması için kullanılmıştır. Robotun gerçek anlamda veya fiziksel montajına geçilmeden önce bu modeller kullanılarak robotun üç boyutlu sanal montajı gerçekleştirilmiştir.

Sanal prototip hazırlama yönteminde oluşturulan parça modelleri içerisinde parçaların geometrik biçim özellikleri ve parçalar ile bağlama elemanları

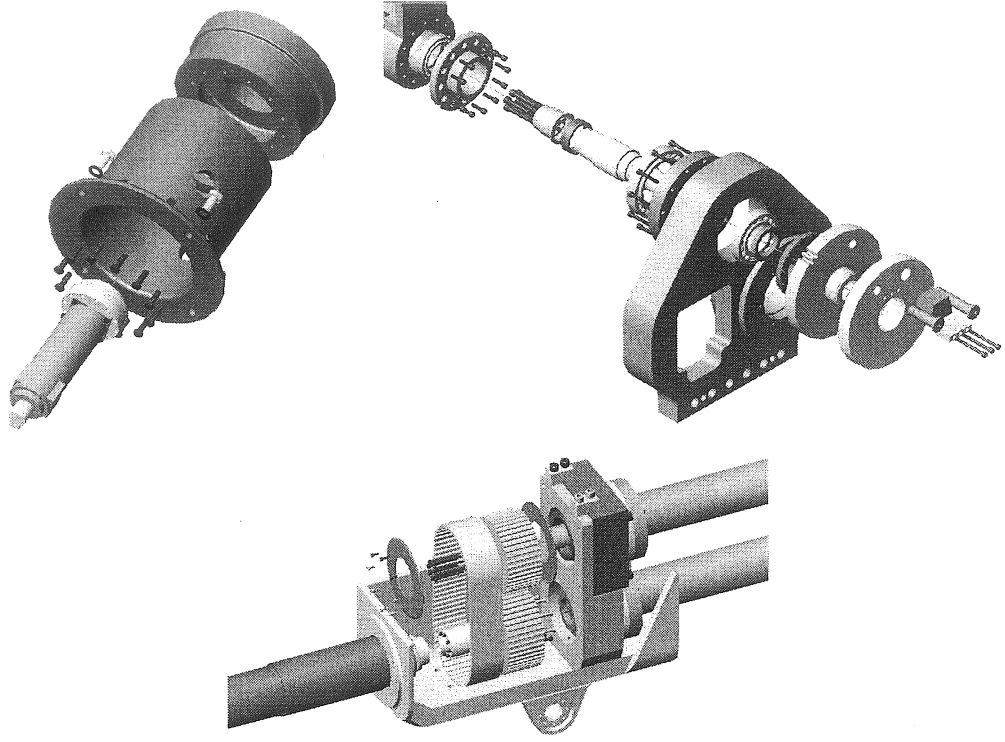
arasındaki eşleşme özelliklerini kapsayan bir montaj hiyerarşisi bulunmaktadır [4].

Robot sanal montajındaki bir montaj dosyası belli bir düzen içerisinde biraraya getirilmiş bağımsız parçalardan oluşmaktadır. Montajın oluşturulması sırasında parçalar birbirleriyle belirli konumlarda biraraya getirilmektedirler. Bu birleştirme işlemi sırasında parçaların serbestlik dereceleri yapı içerisindeki işlevlerine bağlı olarak üç boyutlu konum sınırlamaları kullanılarak azaltılmaktadır [5].

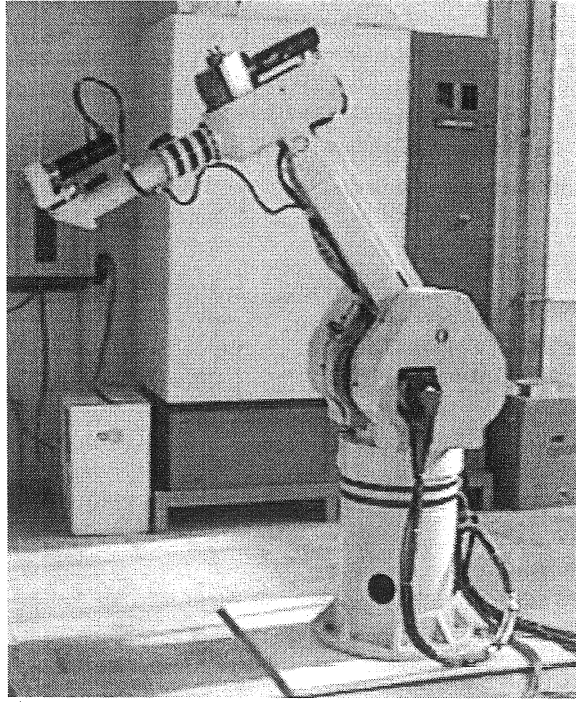
Robotun öncelikle bir sanal montajının oluşturulması, fiziksel montaj esnasında ortaya çıkabilecek montaj problemlerinin en aza indirgenmesini sağlamıştır. Ortaya çıkabilecek problemler de gerçek montaj başlamadan gerekli imalat işlemleriyle düzeltilmiştir. Robotun sanal montajından bazı örnek görüntüler Şekil 7'de verilmiştir. Robotun tamamlanmış olarak gösteren bir fotoğraf da Şekil 8'de verilmiştir.

Fiziksel Montaj

Sanal montajın tamamlanmasının ardından, robotun fiziksel montajına başlanılmıştır. Bilgisayar ortamında yapılan montaj, fiziksel montajın nasıl bir sırayla yapılacağı ve hangi noktalara dikkat edilmesi gerektiği konusunda çok yararlı bilgiler sağlamıştır. Bu bilgilerin ışığında fiziksel montaj safhası oldukça az sorunla karşılaşılarak tamamlanmıştır. Montajın tamamlanmasının ardından robot, korozyonun önlenmesi ve estetik açısından boyama işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 7. Sanal montajdan görüntüler



Şekil 8. Robotun fotoğrafı

Tablo 4. Kullanılan motorların özellikleri

Eksen	Motor Tipi	Motor Gücü (kW)	Hız (d/d)	Motor Torku (Nm)
1	1326AB-B2E-21	2.3	3000	11.5
2	1326AB-B3E-11	3.8	3000	14.3
3	1326AB-A3E-21	1.2	3000	5.4
4	1326AD-K4F-11	0.67	3500	2.37
5	1326AD-K4F-11	0.67	3500	2.37
6	1326AD-K2G-31	0.52	5000	1.24

ELEKTRİKSEL MONTAJ

Elektriksel montaj safhasında robotun üzerinde monte edilmiş halde bulunan motorlar ile bu motorların servo kontrolünü sağlayacak sürücüler, tüm elektrik sistemine güç sağlayacak trafo ve güç kaynakları ve diğer gerekli ekipmanın bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Robot üzerinde kullanılan ve Allen Bradley firması üretimi olan motorların özellikleri Table 4’de sunulmuştur.

Elektriksel montaj safhası aşağıda belirtilen işlemleri kapsamaktadır:

- Uygun bir kontrol panosunun temin edilmesi ve üzerinde gerekli işlemlerin yapılması.
- Trafo, güç kaynakları, servo sürücüler ve diğer gerekli ekipmanın pano içerisine yerleştirilmesi.
- Motorlar ve kontrol panosu arasındaki bağlantıların yapılması.
- Servo sürücüler ile bilgisayar içerisinde bulunan kontrol kartının bağlantılarının yapılması.

Robotun elektriksel montajı, sanayiden bu alanda deneyimli bir şirket ile işbirliği içerisinde gerçekleştirilmiştir. Bu işbirliği, robotun elektrik montajının başlangıcından, deneme çalışmalarının sonuçlandırılmasına kadar devam etmiştir.

Gerekli montaj ve bağlantı işlemlerinin tamamlanmasından sonra, robotun el kumandasıyla çalıştırılabilmesi için uygun bir kumanda aygıtı hazırlanmıştır. Bu aygıt kullanılarak, her eksenin birbirinden bağımsız olarak hız kontrolü yapılabilmektedir. Ancak robotun asıl kullanım yöntemi bilgisayara monte edilmiş olan eksen kontrol kartının aracılığıyla gerçekleştirilecektir.

Sistem içerisinde kullanılan kontrol kartı, Delta-Tau firması tarafından üretilmiş olan PMAC serisi, aynı anda sekiz eksen kontrol kapasitesine sahip bir

karttır. Robot, hem kart ile birlikte gelen arabirim kullanılarak hem de Visual Basic veya Visual C dillerinden biri aracılığıyla hazırlanmış bir yazılım kullanılarak kontrol edilebilmektedir.

DENEME ÇALIŞMALARI

Robotun elektrik montajının tamamlanmasından ardından deneme çalışmalarına başlanılmıştır. Deneme çalışmaları ilk olarak robotun el kumandası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada ilk olarak, sistemin verilen bağımsız eksen kontrol komutlarına cevabı incelenmiştir. Görülen bir takım aksaklıklar bu seviyede çözülmüştür. El kumandası kullanılarak altı eksen de eksen limitleri içerisinde çalıştırılmıştır.

Deneme çalışmalarının ilk safhasının tamamlanmasından sonra, robotun bağlantı elemanlarının limit anahtarları kullanılarak sınırlandırılması gerçekleştirilmiştir. Her eksen pozitif ve negatif yönlerde olmak üzere en az iki adet anahtarla sınırlandırılmıştır. Bu sınırlandırma sayesinde robotun kontrol dışı hareketler ile kendisine verebileceği muhtemel zararlar önlenmiştir.

Deneme çalışmalarının son kısmı, bilgisayara bağlı kontrol kartı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kontrol kartının kendi yazılımı ve arabirimi aracılığıyla tüm eksenler çalıştırılmış ve robotun eksen limitleri içerisinde verilen komutlara cevap verdiği görülmüştür.

ROBOT MALİYET ANALİZİ

Yapılan çalışmada robotun tasarımından çalıştırılmasına kadar olan süreç boyunca ortaya çıkan maliyet Amerikan Doları olarak hesaplanmış ve Tablo 5’de sunulmuştur.

Tablo 5. Robot maliyet hesabı

MALİYET UNSURLARI	MALİYET
Tasarım	22.000
İmalat	4.500
Montaj ve Boyama	1.400
Elektrik Donanımı (Motorlar ve aktarma sistemleri, Servo Sürücüler, Kontrol Kartları...vs)	35.900
Elektriksel Montaj	3.900
TOPLAM	67.600

Bu tablo sonucunda ortaya çıkan toplam rakamın 67.600 USD civarında olduğu görülmektedir ki, piyasada satılmakta olan eşdeğer sistemlere göre yaklaşık yarıyarıya bir tasarruf sağlanmaktadır. Ayrıca hesaplanan bu maliyetin seri olarak üretilen bir robota ait olmayıp bir prototip çalışması sonucunda ortaya çıktığı da unutulmamalıdır.

SONUÇ

Altı serbestlik dereceli bir endüstriyel robot prototipi tasarım, imalat ve montajı tamamlanarak uygulamaya hazır hale getirilmiştir. Robotik gibi her aşamasında yüksek teknolojinin kullanıldığı bir alanda, ülkemiz çok sınırlı bir tecrübeye sahiptir. Bu araştırma ve geliştirme projesinde aşağıda ifade edilen alanlarda tecrübe kazanılmıştır:

- Endüstriyel robot tasarım ve imalatı
- Tahrik ve kontrol
- İleri akıllı kontrol çalışmalarının uygulanabileceği bir platformun oluşturulması.

Üretilen endüstriyel robot, görüntü algılama ve işleme, yapay zeka ve bulanık mantık gibi algoritmaların uygulandığı bir platform olarak kullanılabilir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar ODTÜ Bilgisayar Destekli Tasarım, İmalat ve Robotik (BİLTİR) Merkezine sağlanan tasarım ve imalat olanakları, Sayın Tolga Ünver'e robotun tasarımında sağladığı katkılar, Türk Traktör Fabrikası Genel Müdürü Sayın Hakkı Akkan'a da bazı parçaların imalatı için sağladıkları olanaklar ve Elmas Makina Şirketine montaj konusunda verdikleri destek ve olanaklar için teşekkür ederler. Ayrıca yazarlar, AFP-08-04 DPT 2001 K 120980 ve AFP-06-02 DPT 98K 0122 880 kod no'lu projeler kapsamında desteklenmiş olan bu proje için DPT'ye teşekkürlerini sunarlar.

DESIGN, PRODUCTION AND OPERATION OF AN INDUSTRIAL ROBOT WITH SIX DEGREES OF FREEDOM

In this study, design, production and initial operation of a six degree of freedom industrial robot prototype are performed. Computer Aided Design (CAD) techniques are intensively used. A virtual assembly of the robot is performed before the physical assembly thus eliminating possible assembly problems. The robot may be used as a platform for advanced intelligent control.

Keywords: Industrial Robot, Robot Production, Robot Assembly

KAYNAKÇA

1. Groover M. P., Weiss M., Nagel N. R., Odrey N. G., *Industrial Robotics*, McGraw Hill, 1986.
2. Mair G. M., *Industrial Robotics*, Prentice Hall, 1988.
3. Ünver Tolga, *The Computer Aided Design of an Industrial Robot*, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 1997.
4. Siddique Z., Rosen D. W., A Virtual Prototyping Approach to Product Disassembly Reasoning, *Computer Aided Design*, 1997, Vol 29, No 12, pp 847-860.
5. Ethier S. J., Ethier A. C., *Mechanical Desktop 4.0*, Prentice Hall, 2000.
6. Toker Ş. Bülent, *Virtual Modelling, Planning and Production of Parts of an Industrial Robot*, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 1999.
7. Eren Oykun, *Production, Assembly and Application of an Industrial Robot*, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001.