

GİRİŞ

- Bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve bilgisayar destekli üretim (CAM) gibi alanlarda gelişimler nedeniyle, endüstriyel otomasyon sistemleri çok kısa zamanda çok hızlı yaygınlık kazanmıştır.
- Bu hızlı gelişmenin sonucunda endüstriyel robotların kullanımı ivme kazanmıştır. Günümüze kadar büyük aşama kaydeden robotlar, madde taşınması(konveyör sistemler), boyacılık, kaynak endüstrisi, tıp vs. gibi birçok farklı sektörde kullanılmaktadır.
- Robot, Çek dilinde köle veya işçi anlamına gelen ‘robot’ kelimesinden gelmektedir. Birçok farklı görevi yapmak üzere programlanabilen bir makinedir.
- Sıradan bir makineyle aralarındaki en belirgin fark, robotların birçok kez programlanabilmelerinden ve bünyelerinde mekanik sistemlerin yanında bir de denetleyici içermesinden kaynaklanmaktadır.
- Başka bir deyişle robot, genel anlamda bilgisayar kontrollü bir endüstriyel manipülatördür.

- Robot bilimi matematik, fizik, kontrol, makine, elektrik ve bilgisayar mühendisliği gibi birçok bilim dalını içine alan disiplinler arası bir terbiyedir.
- Bu bilim dallarından makine mühendisliği robotların dinamik ve statik yapısını incelerken, matematik robotların hareketlerini tanımlayıp modelini çıkarır. Kontrol mühendisliği, kontrol algoritmaları geliştirerek sistemin istenilen hareketi gerçekleştirmesini sağlar.
- Elektrik mühendisliği, eyleyicilerin (actuators) ve algılayıcıların (sensor) tasarımıyla ilgilenir. Bilgisayar mühendisliği ise gerekli robot programlarının yapılmasında katkı sağlar.
- Genellikle robotlar **seri** ve **paralel** olmak üzere iki temel gruba ayrılır. Seri robotlar bir dizi eklemler (joint) ve bu eklemleri birbirine birleştiren bağlardan (link) oluşur.
- **Seri robotlar:** geniş çalışma uzayına (aktif olarak robotun ulaşabileceği uzay), az sayıda mekanik parçaya ve paralel robotlara göre daha basit kinematik denklemlere sahiptir. Fakat kaldıracakları kütlenin toplam mekanik yapılarının kütlesine oranı çok küçüktür.

- **Paralel robotlar:** Ana çerçeve ile yük arasında birbirine paralel pek çok bağı bir araya gelmesiyle oluşan paralel robotlar, seri robotlara göre daha sağlam bir mekanik yapıya sahiptir. Kinematik denklemlerinin çok karmaşık olmasına karşın, kaldıracakları kütlenin mekanik yapılarının kütlesine oranı büyüktür.



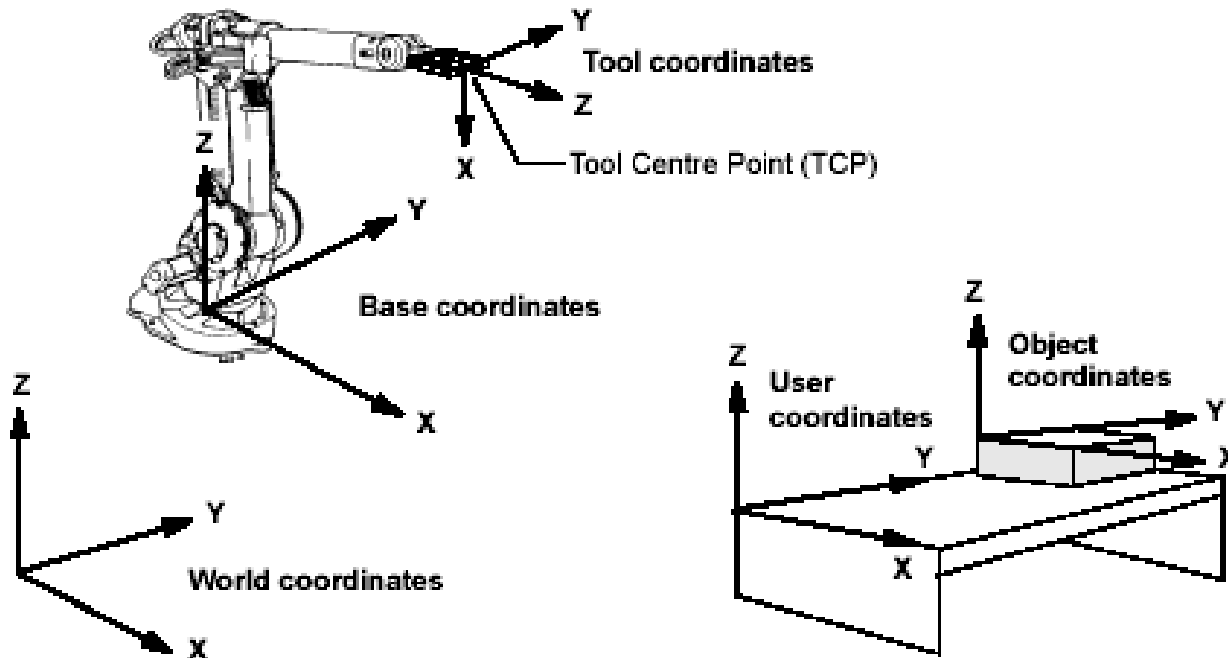
IRB 660 seri robotu



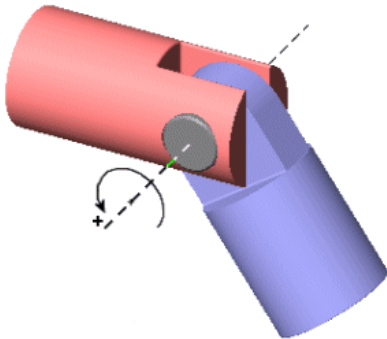
IRB 940 paralel robotu

- **Konum ve Yönelim Bilgisi:** Robot kinematiği, üç boyutlu uzayda robotun kendi tasarımı ve çevresindeki nesnelerin yerleşimiyle ilgilenir. Yerleşim bilgisi **konum vektörü** ve **yönelim** (orientation) **matrisi** gibi iki nitelikte açıklanır.
- Üç boyutlu uzayda bir nesnenin yönelimi ve konumunu tanımlamak için, o nesnenin merkezine bir **koordinat sistemi** yerleştirilir. Yerleştirilen bu koordinat sistemleri vasıtasıyla robotla çalışma alanındaki nesneler arasında yönelim ve konum ilişkisi tanımlanır.

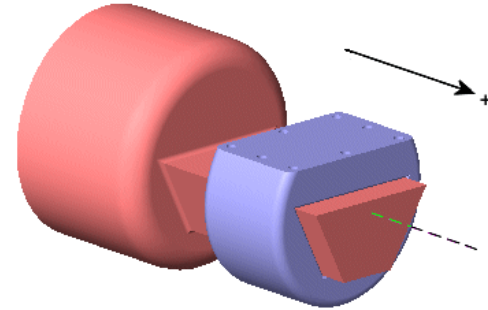
Coordinate systems



- **Kinematik Bilimi**: Kinematik bilimi nesnelerin devinimleri ile ilgilenen bir hareket bilimidir. Robot kinematiği ile robotun konum, hız ve ivme analizi yapılır. Özellikle uç işlevci (end-effector) ile eklemler arasında bir ilişki tanımlar.
- Bir robot yapısal olarak birbirine göre bağımsız hareket eden, **öteleme** (prismatic-genellikle P) ve **dönme** (revolute-R harfi ile gösterilir) hareketi gerçekleştiren eklemlerle, bu eklemleri birbirine birleştiren bağlardan oluşur.
- Dönme hareketinden dolayı gerçekleşen yer değiştirmeye **eklem açısı** (joint angle) ve bağlar arasındaki yer değiştirmeden dolayı oluşan ötelemeye ise **eklem kayması** (joint offset) denir.



Dönel eklem



Prizmatik eklem

- Her bir robot ekleminin konumu ve yönelimi bir öncekine veya bir sonrakine göre ifade edilir. Arka arkaya oluşturulan bu ilişkiye açık kinematik zincir denir.
- Bu ilişkiyi oluşturan ifadeler, robotun konum ve yönelim bilgisini içeren **4×4 homojen dönüşüm matrislerinden** (transformation matrix) oluşur.
- Her bir eklem için bir homojen dönüşüm matrisi oluşturulur. Oluşturulan bu matrislerin sayısını, robotun **serbestlik derecesi** (degree of freedom) belirler.
- Üç boyutlu uzayda herhangi bir noktaya herhangi bir yönelimle ulaşmak için altı serbestlik derecesi yeterlidir. Buna karşın, serbestlik derecesi altıdan fazla olan robotlarda **artıklık** (redundancy) durumu oluşur. Bu durumda, bir eklemin taradığı alan diğer eklemin taradığı alanla çakışır. Bu olay özel koşullar için tasarlanmış özel maksatlı robotlarda görülür.

Robot ve robotun çalışma alanındaki nesnelere genel isimler verilir.

Ana Çerçeve {B} (Base Frame)	:	Robotun sabit, yani referans koordinat sistemidir.
İstasyon Çerçeve {S} (Station Frame)	:	İstasyon çerçevesine evrensel çerçeve de denir. Robot bütün hareketlerini bu çerçevede yapar. İstasyon çerçevesi genellikle ana çerçeveye göre ${}^B_S T$ şeklinde tanımlanır.
Bilek Çerçevesi {W} (Wrist Frame)	:	Bilek çerçevesi robotun son bağlantısına yerleştirilmiştir. Bu çerçeve, ana çerçeveye göre ${}^B_W T$ şeklinde tanımlanır.
Araç Çerçevesi {T} (Tool Frame)	:	Bu çerçeveye robotun herhangi bir işlevi gerçekleştirmesi için eleman yerleştirilir. Araç çerçevesi bilek çerçevesine göre ${}^W_T T$ şeklinde tanımlanır.
Hedef Çerçevesi {G} (Goal Frame)	:	Robotun işlem yapacağı nesnenin üzerindeki çerçevedir. Hedef çerçevesi istasyon çerçevesine göre ${}^S_G T$ şeklinde tanımlanır.

- **İleri Yön Kinematiği:** Robotun ileri yön kinematiği (forward kinematics), robot bağlarının konumları, hızları ve ivmeleri arasındaki ilişkiyle ilgilenir. Bir robot, ana çerçevesinden araç çerçevesine doğru birbirine prizmatik veya dönel eklemlerle tutturulmuş seri bağlardan oluşur.
- İki bağ arasındaki ilişki bir homojen dönüşüm matrisiyle açıklanır. Eklem dönüşüm matrislerinin art arda çarpılmasıyla, ana çerçeveye araç çerçevesi arasındaki ilişki tanımlanır. Bu ilişki araç çerçevesinin yönelimini ve konumunu ana çerçeveye göre verir.
- Başka bir ifadeyle, ileri kinematik denklemler, eklem değişkenlerinin (prizmatik veya dönel) verilmesiyle uç işlevcisinin konumunu ve yönelimini ana çerçeveye göre hesaplar.
- **Ters Kinematik:** Robotlar için ters kinematik problem ise, araç çerçevesinin ana çerçeveye göre yönelimi ve konumu verildiğinde, robotun bu yönelim ve konuma ulaşabilmesi için gerekli olan açı setlerinin hesaplanması şeklinde tanımlanır.

- **Dinamik:** Dinamik, harekete neden olan kuvvetlerin incelenmesi olarak tanımlanabilir. Bir robot manipülatörünü ivmelendirebilmek, uç işlevcisini sabit hızla hareket ettirebilmek ve sonunda durdurabilmek için eklemlere belli bir torkun uygulanması gereklidir.
 - Eklemlere uygulanan tork ifadesi, robotun takip ettiği yörüngeye, eklemlerin kütesine, manipülatörün kaldıracağı yük gibi bir çok duruma bağlıdır. Robot manipülatörünün arzu edilen yörüngeyi takip edebilmesi için manipülatörün dinamik eşitliklerini kullanarak eklemlere uygulanacak tork ifadelerinin bulunması gerekir.
 - **Robotların sınıflandırılması:** Robotlar, serbestlik derecelerine, kontrol yöntemlerine, eyleyicilerin kullanıldığı güç kaynağına, kesinlik derecelerine ve eklem yapılarına göre çok çeşitli şekilde sınıflandırılabilir.
1. **Serbestlik derecelerine göre sınıflandırma:** Günümüz endüstrisinde genellikle altı serbestlik derecesine sahip robotların kullanılması tercih edilmektedir. Robotlar serbestlik derecelerine göre sınıflandırılırken ilk üç bağın eklem özelliği dikkate alınır.

2. **Eklem yapılarına göre sınıflandırma:** Bunlar içinde en yaygın kullanılanı eklem yapılarına ve eklemlerin yerleşimine göre olan **iki harfli kod** sınıflandırmasıdır. Bu sınıflamalardan farklı sınıflandırmalarında gerçekleştirilebileceği unutulmamalıdır.
- Eğer ilk üç bağıın tamamı prizmatik eklemlere sahipse, sonuçta oluşan kinematik düzenleme (configuration) kartezyen (PPP) düzenleme denir. Kinematik düzenlemesi en basit olan robot türüdür. Bu tip robotlar madde ve kargo taşınması gibi ağır materyal transferinde kullanılırlar.



İlk bağ döner, ikinci ve üçüncü bağ prizmatik eklemlere sahipse, bu tip sınıflandırma **silindirik** (RPP) düzenleşim denir.



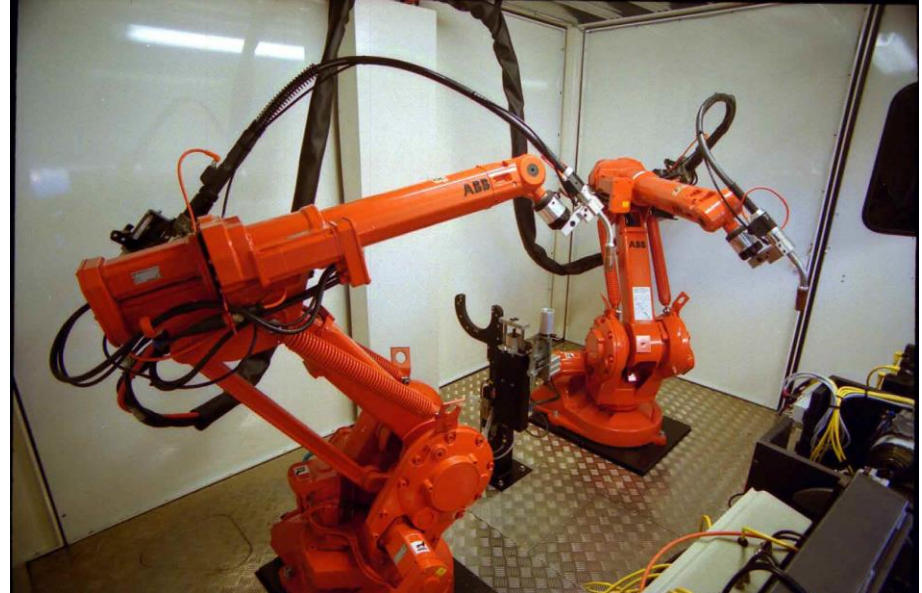
İlk iki bağ döner, üçüncü bağ prizmatik eklemlere sahipse ve bütün eklemler bir birine paralelse, buna **SCARA** (RRP) düzenleşim denir. SCARA (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly) **silindirik** bir çalışma uzayına sahiptir ve endüstride sıklıkla tercih edilmektedir



İlk iki bağ döner, üçüncü bağ prizmatik eklemlere sahipse küresel (RRP) düzenleşim denir. Küresel düzenleşime sahip bir robotun ilk iki eklemi dönel, 3. eklemi ise prizmatiktir.



İlk üç bağın tamamı döner eklemlere sahipse sonuçta oluşan kinematik düzenleşime dönel (articulated, anthropomorphic RRR) düzenleşim denir.



ROBOT DÜZENLEŞİMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

1. Kartezyen Düzenleşim (Gantry Tipi Robotlar)

Üstünlükleri:

- Kinematik denklemler basit olduğundan kontrolü çok kolaydır.
- Gövde yapısı çok sağlam olduğundan yük kaldırabilme kapasitesi çok iyidir.
- Çalışma uzayının her noktasında geniş çaplı hareket kabiliyeti aynıdır.
- Kinematik yapısı basit olduğundan yeni eleman eklenmesi çok kolaydır.

Eksiklikleri:

- Çalışma uzayının hacmi robotun boyutlarından küçüktür.
- Robotun kendi ana gövdesine ulaşamaz.
- Prizmatik eklemlerinin çalışma ortamındaki tozlardan korunması güçtür.

2. Silindirik Düzenleşim (SCARA Robotu) :

Üstünlükleri:

- Temel çerçevenin dönel olmasından dolayı uç işlevci hızlı hareket eder.
- Kinematik denklemler basit olduğunda kontrolü de kolaydır.
- Kartezyen robotlara göre daha büyük çalışma uzayına sahiptir.

Eksiklikleri:

- Küresel robotlara göre daha küçük çalışma uzayına sahiptir.
- Geniş çaplı hareket kabiliyeti kol uzunluğuna göre değişir.

3. Küresel Düzenleşim (Stanford Robotu)

Üstünlükleri:

- Çok büyük çalışma uzayına sahiptir.

Eksiklikleri:

- Çok karmaşık kinematik denklemlere sahip olduğundan kontrolleri de zordur.
- Geniş çaplı hareket kabiliyeti her noktada farklıdır. Özellikle ana çerçeve civarında çok düşük olduğundan eklem açılarındaki küçük bir değişim uç işlevcinin daha büyük bir yer değiştirmesine sebep olur.

4. Dönel Düzenleşim (Puma Robotu)

Üstünlükleri:

- Çok büyük bir çalışma uzayına sahiptir.
- Tamamı dönel olan eklemlerin hareket ettirilmesi kolaydır.
- Çok esnek ve hızlıdır.

Eksiklikleri:

- Geniş çaplı hareket kabiliyeti her noktada farklıdır. Çalışma uzayında her noktaya ulaşamaz.
- Çok karmaşık kinematik denklemlere sahip olduğundan kontrolleri de zordur.
- Doğruluğu düşüktür. Her eklemin oluşturduğu küçük hatalar sonuçta toplanarak daha büyük bir hataya neden olur.

3. Kontrol yöntemlerine göre sınıflandırma: Kontrol yöntemlerine göre robotlar noktasal kontrol edilen robotlar ve sürekli yörünge kontrollü robotlar olmak üzere iki alt sınıfa ayrılabilir.

- **Noktasal Kontrollü Robot:** Bu tür robotlar için özellikle belirtilmiş bir çalışma alanı yoktur. Bu sınıfa giren robotların serbestlik derecesi altıdan küçüktür ve genellikle bir nesneyi bir yerden başka bir yere yerleştirmede (tut ve yerleştir: pick and place) kullanılır.
- **Yörünge Kontrollü Robot:** Bu tip robotlar bir kullanıcı tarafından belli bir yörüngeyi izleyecek şekilde kontrol edilirler. Kaynak işlemleri gerçekleştiren robotlar bu sınıf için uygun bir örnektir.

4. **Robot eyleyicilerin kullandığı güç kaynağına göre sınıflandırma:** Bu grup temel olarak elektrik, pnömatik ve hidrolik olmak üzere üç ayrılır.

1. **AC-DC ve Adım (Step) Motorlu Robot:** DC servo motorların robotlarda kullanılmasının en önemli nedeni, düşük gerilimde yüksek tork üretmeleridir.

Adım motorları ise daha basit uygulamalarda (tut ve yerleştir) kullanılırlar. Çünkü bu uygulamalarda geri besleme ihtiyacı yoktur. AC servo motorlar yüksek dinamik özelliklere sahip olmalarından dolayı robot uygulamalarında son yıllarda oldukça sık kullanılmaktadır.

2. **Hidrolik Robot:** Bu tip robotlar, daha çok ağır endüstride kullanılırlar. Ürettikleri yüksek kuvvete oranla tükettikleri güç düşüktür. Bu üstünlüklerine rağmen yapıları doğrusal olmadığından elektrik motorlarına göre kontrolleri daha zordur.

3. **Pnömatik Eyleyicili Robot:** Robot uygulamalarında kullanılan en basit tasarıma sahip sürücülerdir. Prensip olarak hidrolik robotlara benzerler. Fakat hareket eden robot pistonlarının ataletini hızla ortadan kaldıracak yüksek hava basıncının üretilmemesinden dolayı pnömatik sürücülerin kontrolü zordur. Bu yüzden basit uygulamalarda kullanılırlar.

5. Robotların kesinlik derecelerine göre sınıflandırılması: Bu sınıf, **çözünürlük** (resolution), **doğruluk** (accuracy) ve **tekrarlanabilirlik** (repeatability) şeklinde üç ayrılır.

1. Çözünürlük: Çok küçük bir yer değiştirmeyi gerçekleştirme yeteneği olan çözünürlük endüstriyel gelişmelere paralel olarak her geçen gün artmaktadır.

2. Doğruluk: Doğruluğu tanımlamak oldukça güçtür. Doğruluk daha çok çevrim dışı uygulamalarda kullanılan bir özelliktir ve robotun hareket edebilmesi için yazılan programın, uç işlevci tarafından gerçekleştirilme derecesidir.

Teknolojinin gelişmesiyle robotlarda doğruluk her geçen gün artan hızla iyileşmektedir.

3. Tekrarlanabilirlik: Robotun uç işlevcisinin birçok işlemi gerçekleştirdikten sonra tekrar aynı noktaya gelebilme özelliğidir. Bir robotun 'tut ve yerleştir' özelliği için programlandığında her seferinde aynı noktadan nesneyi alabilmesi örnek olarak verilebilir.

Günümüzde kullanılan endüstriyel robotların tekrar edebilirliği 0.05 ile 0.005 mm arasındadır.

BENZETİM

Benzetim, fiziksel bir etkinliği gerçekleştirmeden önce, bilgisayar ortamında gerekli programlar yardımıyla olayı canlandırma işlemine denir.

- Robot programları gerçek robotlar üzerinde denenmeden önce benzetim programları vasıtasıyla test edilir.
- Benzetim programlarının robotlar açısından birçok avantajı vardır. Yazılan robot programlarının eksik olması durumunda, robot beklenmeyen hareketler yaparak kendisine ve çevresine zarar verebilir.
- Benzetim programları robotların yapacağı hareketleri önceden göstererek bu tehlikeyi ortadan kaldırmaktadır. Böylece benzetim programları hem ekonomik kazanç, hem de zaman tasarrufu sağlar.
- Robotlar eklemler ve bu eklemleri birleştiren bağlardan oluşmaktadır. İyi bir robot benzetim programı, robot bağlarının konumlarını, yönelimlerini, çevresini ve çevresindeki nesneleri doğru bir şekilde modellemelidir.
- Robotlar birçok görevi yapabilecek esneklikte üretilerek firmalar için ekonomik bir getiri sağlamaktadır. Robotların çalışma alanlarının esnek ve geniş olmasında benzetim programları önemli yer tutar.

Son yıllarda robot benzetim programları, robot çalışma sahasının eniyilenmesi (optimization), programlanması ve tasarımı gibi konularda çok yol kat etmiştir. Robot benzetim programları genel olarak **çevrimdışı** (off-line) ve **çevrimiçi** (on-line) olmak üzere iki kısma ayrılır.

1. Çevrimiçi programlama: Çevrimiçi programlama tamamen üretim aşamasında gerçekleştirilir. Robotun uç işlevcisini, bir kullanıcı arabirimi vasıtasıyla, eş zamanlı olarak istenilen noktaya ulaştırmak için kullanılır.

Çevrimiçi programlama, robotun çalışma alanının çok karmaşık ve değişken olduğu (örnek olarak kaynak işlemlerinin gerçekleştirildiği limanlar) ortamlarda avantaj sağlar.

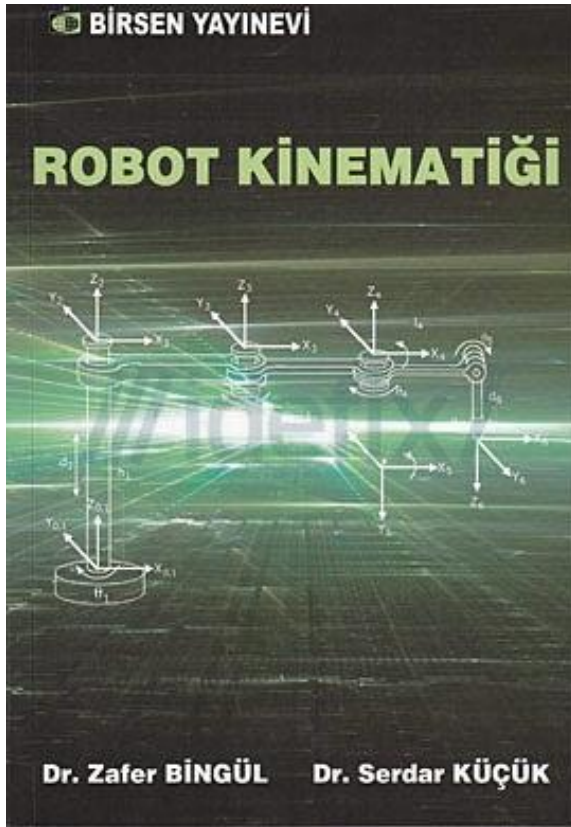
2. Çevrimdışı programlama: Çevrimdışı programlama (ÇP) sistemi, bilgisayar destekli tasarım yardımıyla desteklenen her türlü fizibilite çalışmasını sağlar. ÇP, günümüz endüstriyel otomasyonunda olduğu kadar robot araştırmalarında da kullanılan vazgeçilmez bir yöntemdir.

Bilgisayar ortamında kullanıcıya doğruyu buluncaya kadar deneme imkanı sağlayan bu yöntem, ayrıca zamandan ve ekonomiden tasarruf sağlamaktadır.

Çevrimdışı programlama kullanmanın bir takım avantajları vardır.

- ÇP sistemini kullanarak, robotlar bir kullanıcı arabirimi vasıtasıyla (teach pendant) kolaylıkla programlanabilir ve bu arabirim vasıtasıyla çalıştırılıp test edilebilirler.
- ÇP sisteminde, robot ve çalışma hücresinde (working cell) bulunan bütün robot parçaları ve diğer nesneler üç boyutlu olarak modellendiğinden, bu parçaların gerçek uygulamada çarpışma ihtimali ortadan kalkmış olur.
- Modelleme sonucunda benzetim ortamında iki nesne çarpışsa bile, ÇP sistemi kullanıcıyı uyarıp çarpışmanın koordinatlarını vererek problemin çözümüne yardımcı olur.
- ÇP sistemini kullanarak çizilen bir yörüngeyi (path planning emulation) robotun takip etmesi yüzde yüz doğrulukla gerçekleştirilebilir. Ayrıca manipülatörün ters kinematik hesaplamalarında yanlış açı kullanımından doğacak kazaları ve hatalı uygulamaları da ortadan kaldırır.

Kaynak



- Genel Kavramlar
- Genel tanımlamalar ve Dönüşümler
- İleri Kinematik
- Ters Kinematik
- Jakobiyen
- Yörünge Planlaması
- Çalışma Uzayının Tasarımı

Bu kitapta uluslararası robot camiası tarafından İngilizce olarak kullanılan bazı terimlerin Türkçe karşılıklarına yer verilmiştir. Bu terimlerin İngilizcesi ve Türkçe karşılığı aşağıda görülmektedir.

Accuracy	: Doğruluk	Computer aided manufacturing - CAM	: Bilgisayar destekli üretim
Actuator	: Eyleyici	Configuration	: Düzenleşim
Animation	: Canlandırma	Conveyer system	: Taşıyıcı sistem
Approaching	: Yaklaşım vektörü	Coordinate frame	: Koordinat :çerçevesi
Articulated	: Dönel	Cross product	: Vektörel çarpım
Base frame	: Ana çerçeve	Coupling	: Bağlaşım
Centrifugal	: Merkezkaç	Degree of freedom	: Serbestlik derecesi
Closed form	: Kapalı biçim veya analitik çözüm	Design variable	: Tasarım değişkeni
Computer aided design - CAD	: Bilgisayar destekli tasarım	Diagonal matrix	: Köşegen matrisi

Distinct	: Farklılık	Link	:Bağ
End effector	: Uç işlevci	Link length	:Bağ uzunluğu
Exponential method	: Üssel yöntem	Link twist	:Bağ açısı
Forward kinematics	: İleri kinematik	Manipulability measure	:Beceri ölçeği
Global conditioning index	:Evrensel vaziyet göstergesi	Maximum	:En büyük
Global performance index	: Evrensel başarı göstergesi	Minimum	:En küçük
Goal frame	: Hedef çerçevesi	Motion matrix	: Hareket matrisi
Gross motion	: Geniş çaplı hareket	Mutiobjective	: Çok ölçütlü
Hollow	: Boşluk	Nonlinear inequality constrain	: Doğrusal olmayan eşitsizlik kısıtı
Joint	: Eklem	Numeric solution	: Sayısal çözüm
Joint angle	: Eklem açısı	Objective function	: Amaç işlevi
Lineer	: Doğrusal	Off line programming - OLP	: Çevrim dışı programlama

On line programming	: Çevrim içi programlama	Reachable workspace	: Ulaşılabilir çalışma uzayı
Optimization	: Eniyileme	Recursive	: Özyineli
Optimum	: En iyi	Redundancy	: Artıklık
Orientation	: Yönelim	Regional structure	: Bölgesel yapı
Orientation structure	: Yönelim yapısı	Repeatability	: Yinelenebilirlik
Orthogonal robot	: Dikgen robot	Resolution	: Çözünürlük
Parametrically continuity	: Parametrik olarak sürekli	Revolute	: Dönel
Path planning emulation	: Yörünge planlama öykünümü	Revolute Joint	: Dönel eklem
Performance index	: Başarı göstergesi	Rigid	: Katı
Pick and place	: Tut ve yerleştir	Robot error model	: Robot hata modeli
Pemultiplication	: Ön çarpma	Rotation matrix	: Dönme matrisi
Planar robot	: Düzlemsel robot	Round-off	: Yuvarlama

Sensor	: Algılayıcı	Station frame	: İstasyon çerçeve
Shape matrix	: Şekil matrisi	Step motor	: Adım motoru
Simulation	: Benzetim	Structural length index	: Yapısal uzunluk göstergesi
Singular point	: Tekil nokta	Teach pendant	: Kullanıcı arabirim
Skew symmetric cross product matrix	: Eksi bakışimli vektörel çarpım matrisi	Tool frame	: Araç çerçeve
Sliding vektor	: Kayma vektörü	Transpose of a matrix	: Matrisin devriği
Static	: Durağan	Trace of a matrix	: Matrisin izi