

ROBOT KOLLARININ KINEMATİĞİNİN
İNCELENMESİ VE DÜRT SERBESTLİK
DERECELİ ROBOT MANİPÜLATÖRÜ İLE
BİR UYGULAMA

Yücel CAN

Yüksek Lisans Tezi
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

1991

ROBOT KOLLARININ KINEMATİĞİNİN İNCELENMESİ VE DÜRT
SERBESTLİK DERECELİ ROBOT MANİPÜLATÖRÜ İLE BİR UYGULAMA

Yücel CAN

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman : Doç. Dr. Soner ALANYALI

Eylül - 1991

YÜCEL CAN'ın "YÜKSEK LİSANS" tezi olarak hazırladığı "ROBOT KOLLARININ KİNEMATİĞİNİN İNCELENMESİ VE DÜRT SERBESTLİK DERECELİ ROBOT MANİPÜLATÖRÜ İLE BİR UYGULAMA" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

10.9.1991

üye : Prof. Dr. Battal Kuehan

üye : Yrd. Doç. Dr. Cengiz Malkoç

üye : Doç. Dr. Sener Alançob.
(Danışman)

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...11 EYLÜL 1991... gün ve 286-16 sayılı
kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Rüstem KAYA
Enstitü Müdürü

ÖZET

Robotlar, son yıllarda endüstrinin bir çok alanlarında kullanılmaya başlanmış ve üretim kalitesinin artmasında, zaman ve işçilikten tasarrufta, maliyetin düşürülmesine çok yararlı olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada amaç, robot kollarının kinematikliğini incelemek ve uygulama olarak da dört serbestlik dereceli bir robot manipulatorü ile yumurta kontrolü ve paketlemesi işlemini içeren bir araştırma yapmaktır.

Çalışmada, endüstri robotları kol konfigürasyonlarına göre tanıtılmaya çalışılmış ve robotu oluşturan elemanların özellikleri açıklanmıştır. Ayrıca, robot kollarının kinematik çözümünde kullanılan yöntemler üzerinde durulmuş ve robot kolunun pozisyon ve oryantasyonunun hesaplanması gösterilmiştir. Son olarak da, dört serbestlik dereceli bir robot manipulatorü ile yumurta kontrolü ve paketlemesi işlemi uygulaması incelenerek, hesaplamaları yapılmıştır.

SUMMARY

On the recent years, robots have shown admirable developments in the various branches of industry all over the world and seen that they are really useful in achieving high quality in production, economy in time, labour and the cost.

The aim for this thesis is to examine the kinematic of robot arms and with the aid of robot manipulator with four degrees of freedom, I have worked on egg control and packing process which will be applicable in industry.

Firstly, I have tried to explain the properties of the elements of industrial robots according to their arm configurations. Beside this, sufficient emphasis has given to the method for the analysis to arm kinematic of robot's arms to determinate robot's position and orientation. At last, examination and calculations have been fulfilled on the application of egg control and packing process with the robot manipulator of four degrees of freedom.

TEŐEKKUR

Robot Kollarının Kinematiginin incelenmesi ve Dört Serbestlik Dereceli Robot Manipulatörü ile Bir Uygulama başlıklı bu çalışmayı hazırlamamda, beni destekleyen Sayın hocam Doç. Dr. Soner ALANYALI'ya, tezimin yazım aşamasında bana destek veren Değerli eşim Nurhan CAN, Sayın Araş. Grv. Hüseyin ANKARA ve bölüm sekreteri Sayın Semra UNAN'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xii
SİMGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ENDÜSTRİ ROBOTLARININ TANITIMI	4
2.1. Robotların Fiziksel Yapısı.....	4
2.1.1. Geometrik konfigürasyon ve çalışma alanı.....	4
2.1.2. Kartezyen koordinat yapısı.....	4
2.1.3. Silindirik koordinat yapısı.....	5
2.1.4. Polar (küresel) koordinat yapısı	6
2.1.5. Eklemlı kol yapısı	7
2.1.5.1. Tamamiyle küresel eklemlı kol yapısı.....	7
2.1.5.2. Paralel kenar ek- lemlı kol yapısı.....	8
2.1.5.3. Silindirik eklemlı kol yapısı	9
2.1.5.4. Sarkaç kol yapısı.....	11
2.1.5.5. Çok eklemlı kol yapısı	11
3. ROBOT ELEMANLARI	12
3.1. Giriş	12
3.2. Mekanik Sistem	12
3.2.1. End-efektörler	12
3.3. Tahrik Ediciler.....	13
3.4. İletim (Transmisyon) Sistemleri.....	14

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.5. Sensör Sistemleri	15
3.6. Kontrol Ediciler	16
4. ROBOT KOLU KİNEMATİĞİ	18
4.1. Giriş	18
4.2. Düz Kinematik Problemi	20
4.2.1. Dönme matrisleri	21
4.2.2. Bileşik dönme matrisi	25
4.2.3. Homojen koordinatlar ve transformasyon matrisi	26
4.2.4. Uzuvar eklem ve para- metreleri	30
4.2.5. Denavit-Hartenberg göste- rimi	32
4.2.6. Manipülatörler için kinematik denklemler	40
5. DÜRT SERBESTLİK DERECELİ BİR ROBOT MANİPÜLATÖRÜ İLE YUMURTA KONTROLU VE PAKETLEMESİ	46
5.1. Yumurta Kontrol ve Paketleme işleminin İş Akışı	46
5.2. Yumurta Kontrol ve Paketleme işleminin Özellikleri.....	49
5.3. Robotun Mekanik Tanımı	49
5.4. Robotun Hareket Sırası	52
5.5. Motor ve Tahrik Mekanizması Seçimi....	55
5.5.1. Θ eksenli motor ve tahrik mekanizması seçimi	57
5.5.1.1. Θ eksenli için adım adım motor seçimi.....	59
5.5.1.2. Θ eksenli ile ilgi- li hesaplamalar.....	66
5.5.2. r eksenli motor ve tahrik mekanizması seçimi	71
5.5.2.1 r eksenli için adım adım motor seçimi.....	72
5.5.2.2 r eksenli ile ilgi- li hesaplamalar.....	77

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.5.3 ϕ ekseni motor ve tahrik mekanizması seçimi	83
5.5.3.1 ϕ ekseni için adım . adım motor seçimi	85
5.5.3.2 ϕ ekseni ile ilgi- . li hesaplamalar	91
4. SONUÇ	97
KAYNAKLAR DİZİNİ	99

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Kartezyen koordinat robotu	5
2.2. Silindirik koordinat robotu	5
2.3. Küresel koordinat robotu	7
2.4. Tamamıyla küresel eklemlili bir robotun geometrisi.....	8
2.5. Paralel kenar küresel eklemlili robotun geometrisi ve çalışma uzayı	9
2.6. Silindirik eklemlili robotun çalışma uzayı ve robot geometrisi	10
3.1. Tipik bir motor kontrol sisteminin elemanları	17
4.1. Düz ve ters kinematik problem	19
4.2. Referans ve cisme-bağlı koordinat sistemi	22
4.3. Dönme koordinat sistemleri	24
4.4. Eklem ve uzuvları gösteren bir PUMA robot kolu	31
4.5. Eklem çeşitleri	32
4.6. Uzuv koordinat sistemi ve parametreleri....	33
4.7. Bir PUMA robot kolunun uzuv koordinat sistemlerinin oluşturulması	35
4.8. El koordinat sistemi ve (n, s, a)	41
5.1. Yumurta paketleme sisteminin yerleşimi	46
5.2. Yumurta kontrolü ve paketleme sisteminin genel yerleşimi	48
5.3. Yumurta kontrolü ve paketleme işleminde kullanılan dört serbestlik dereceli manipölatör	51

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>		<u>Sayfa</u>
5.4.	Yumurtayı yakalamada kullanılan tutucu	51
5.5.	Embriyosuz yumurta için hareket-zaman diyagramı	54
5.6.	Θ eksenini hız profili	58
5.7.	Θ ekseninin moment-zaman diyagramı	69
5.8.	r eksenini hız profili	71
5.9.	r ekseninin moment-zaman diyagramı	81
5.10.	ϕ eksenini hız profili	85
5.11.	ϕ ekseninin gösterimi	86
5.12.	ϕ ekseninin moment-zaman diyagramı	95

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>		<u>Sayfa</u>
4.1.	PUMA manipülatörünün Denavit-Hartenberg parametreleri	36
5.1.	Manipülatör eksen yüklerinin dağılımı	52
5.2.	Robot eklemlerini tahrik etmede kullanılan motor listesi	56
5.3.	Elektrocraft E-532 d.c. servomotorun özellikleri	66
5.4.	Pitman 9432 d.c. servomotorun özellikleri	77
5.5.	Yumurta kontrolü paketlenme uygulaması için robot dizaynı özeti	96

SİMGELER DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$i^{-1}A_i$	i uzvundan $i-1$ uzvuna homojen transformasyon matrisi
a	Elin yaklaşma vektörü
B_L	Yükün viskoz sönümlenme sabiti, N.m.s/rad
B	Motorun viskoz sönümlenme sabiti, N.m.s/rad
d	Çap, mm
g	Yerçekimi ivmesi, m/s^2
I_{pk}	Maksimum akım, A
$(I_{pk})_{max}$	Güç kaynağının maksimum akımı, A
I_{demag}	Demagnetize akımı, A
i	Uzuv ve eklem sayısı
J_L	Efektif atalet momenti, $kg.m^2$
J_M	Motor atalet momenti, $kg.m^2$
J_T	Toplam atalet momenti, $kg.m^2$
K_E	Voltaj sabiti, V/1000 rpm
K_T	Moment sabiti, N.m/A
m	Kütle, kg
n	Elin normal vektörü
N	Serbestlik derecesi
N_0	Motorun devir sayısı, rpm
p	Vida adımı, devir/m
P	Pozisyon vektörü
q	Herhangi bir robot kolu için eklem açısal vektörü
r	Yarıçap, mm
R	Dönme matrisi
R_a	Rotor fırça direnci, Ohm
R_h	Sıcak ortamda rotor direnci, Ohm
R_{th}	Isıl direnc, $^{\circ}C/W$
s	Elin kayan vektörü
S	Ölçek faktörü
t_a	Hızlanma süresi, s
t_d	Durma süresi, s
t_{cv}	Sabit hız süresi, s

SIMGELER DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
t_a	Yavaşlama süresi, s
T	Homojen transformasyon matrisi
T_a	Hızlanma momenti, N.m
T_{CONT}	Motorun sürekli arızalanmaya neden olan momenti, N.m
T_{Cv}	Sabit hız momenti, N.m
T_{dw}	Durma esnasındaki moment, N.m
T_d	Yavaşlama momenti, N.m
T_f	Sürtünme momenti, N.m
T_L	Efektif statik moment, N.m
T_{pk}	Maksimum moment, N.m
T_{RMS}	RMS momenti, N.m
T_{TRAN}	Temel homojen ötelenme matrisi
V_{pk}	Maksimum voltaj, V
$(V_{P\#})_{MAX}$	Güç kaynağının maksimum voltajı, V
α_a	Motor milinin maksimum açısal ivmesi, rad/s ²
α_d	Hızlanma açısal ivmesi, rad/s ²
ω_d	Yavaşlama açısal ivmesi, rad/s ²
ω_{pk}	Motor milinin maksimum açısal hızı, rad/s
ω_a	Hızlanma açısal hızı, rad/s
ω_d	Yavaşlama açısal hızı, rad/s
W	Ağırlık, N
θ_{arm}	Rotor sıcaklığı, °C
θ_{amb}	Çevre sıcaklığı, °C
θ_{rise}	Sıcaklık yükselmesi, °C

1. GİRİŞ

Otomasyonla ilgili en önemli adımlar 17. ve 18. yüzyılda atılmıştır. Robot sözcüğünü ilk olarak, Çekoslovak oyun yazarı Karel Capek kullanmıştır. 1921'de yazdığı "Rossum's Universal Robots" adlı oyununda kullandığı "robot" Leh dilinde işçi anlamına gelmektedir. Slav dillerinde "robot" sözcüğü işçi anlamındadır. Günümüzde Robot sözcüğü insan ve makina olarak her iki anlamda kullanılmaktadır.

Uzmanlar, robot sözcüğünü tanımlamak için farklı yaklaşımlar kullanmışlardır. Genelde, bir robotun yürüdüğü, konuştuğu, gördüğü ve insan gibi hissettiği zannedilir. Robot kullanım alanlarındaki işlemleri, şartları kıyaslayabilmek ve açık olarak ifade edebilmek için, bu sözcüğün herkesçe bilinen bir anlamı olması gerekir (Hunt, 1983).

Asimov (1982), robot tanımı ile birlikte robotik kuralları da koymaya çalışmıştır.

Bunlar:

1. Robot insanların hizmetinde olan yararlı bir makinadır.

2. Bir robot, kendisine insanlar tarafından verilen emirlere uymak zorundadır.

3. Bir robot, birinci ve ikinci kurala uyduğu sürece varlığını korumak zorundadır.

Boyle bir makina, canlı bir varlık veya insana benzemeyebilir. Robot üreticileri ve kullanıcılarını biraraya getiren "Amerika Robot Enstitüsü" kuruluşu, robotu şu şekilde tanımlar (Hunt, 1983).

"Bir robot, bir takım işlemleri yapmak, çeşitli parçaları, aletleri veya özel aletleri hareket ettirmek için dizayn edilmiş, programlanabilir, çok fonksiyonlu bir manipülatördür veya bir çok farklı amacın gerçekleştirilebilmesi için çeşitli programlanmış hareketleri yapan özel araçtır."

Robot terminolojisinde adı çok sık geçen manipülatör, birçok serbestlik derecesine sahip bir mekanizmadır. Genellikle, robotun mekanik yönünü ifade etmekte kullanılır. Manipülatör, birbirini izleyen uzuvlardan meydana gelmiştir. Manipülatörü meydana getiren uzuvların aralarındaki bağlantı, eklemler vasıtasıyla sağlanır. Robot manipülatörleri, kendisini oluşturan eklemlerin geometrik şekline göre adlandırılmaktadır. Örneğin, silindirik eklemler, küresel eklemler, paralel kenar eklemler robot manipülatörü vb. gibi. Manipülatörün eklem sayısı serbestlik derecesi olarak adlandırılmaktadır.

Endüstri robotu, genel amaçlı, insana benzer özelliklere sahip, programlanabilir bir makinedir. Bir robotun insana benzeyen en önemli özelliği onun koludur. Tutma ve yerleştirme işlemlerinde robot kolu kullanılır. Robot kolu, başka bir makinayla birleştirilerek, malzemenin yüklenmesi ve takım değiştirme işlemini yapar. Kesme, şekil verme, yüzey kaplama, silindirik ve düzlem yüzey taşlama gibi imalat işlemlerini gerçekleştirir. Montaj ve kontrol uygulamalarında kullanılır. Robot kolları, hassas döküm, dövme işlemleri, presle şekil verme işlemleri, plastik kalıplama, püskürtme boyama, yüzey işlemleri, nokta kaynağı, ark kaynağı, parça transferi, parçaların sıraya konulması (dizilmesi) gibi uygulamalarda geniş çapta kullanılmaktadırlar (Klafter et al.,1989).

Bu çalışmada, endüstriyel robotların fiziksel yapısı (kol konfigürasyonları) ve kontrol tipleri üzerinde durulmuştur. Robot elemanları ve görevlerinin ne olduğu hakkında bilgi verilmiştir. Verilen bir robot manipülatörünün kinematik çözümü yapılmıştır. Kinematik çözümde, manipülatörün kol kısmının uzayda hangi pozisyonu alacağını ve bileğin hangi oryantasyonda olacağını hesaplanması gösterilmiştir. Uygulama olarak da yumurta kontrol ve paketlenme işlemi yapan dört serbestlik dereceli bir manipülatörün, işleme ilgili iş akışı yapılmış, θ , r ve ϕ eksenlerini tahrik eden motor seçimi hesaplamaları, θ , r ve ϕ eksenleri ile ilgili, efektif statik moment, efektif atalet momenti, toplam atalet momenti, açısal ivmelerin katedilen mesafelerin, hızlanma veya yavaşlama momentlerinin, rms momentinin ve θ , r , ϕ eklemlerini tahrik eden servo motor ile birlikte çalışacak güç kaynağının hesaplamaları yapılmıştır.

2. ENDÜSTRİ ROBOTLARININ TANITILMASI

2.1. Robotların Fiziksel Yapısı

2.1.1. Geometrik konfigürasyon ve çalışma alanı

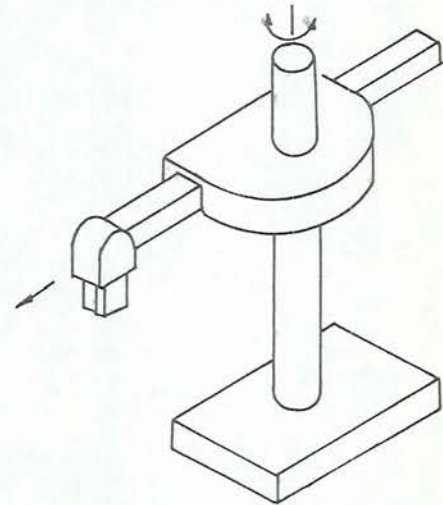
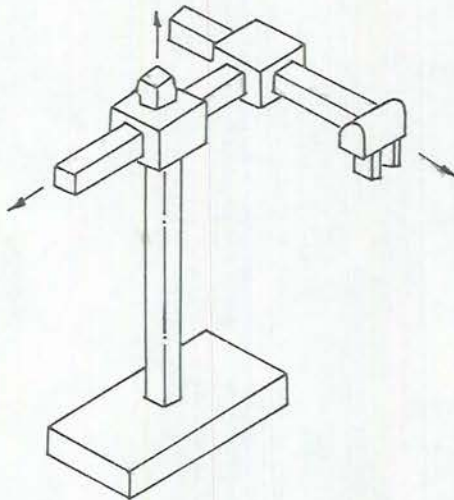
Robot kolları, birbirleriyle dönel veya doğrusal hareket yapan uzuvların elemanlarının birleştirilmesinden oluşturulmuştur. Bu eklemlerin kombinasyon ve düzeni robotun geometrik konfigürasyonunu belirler. Pratikte robot tasarımcısı nispeten daha az sayıda permütasyonla karşılaşmasına rağmen, teorik olarak daha çok sayıda konfigürasyon mümkündür (Hunt, 1983).

Robot kolunun taradığı yüzeylerin oluşturduğu uzaysal hacime robot çalışma uzayı denir. Bu hacmin şekline çalışma alanı (veya zarfı) denir ve bu, robotun fiziksel görünüşünü tanımlar. Günümüzde, kullanılan yedi tür konfigürasyon vardır. Maksimum teorik iş alanı, robotun fiziksel konstrüksiyonu yüzünden sınırlıdır. Her robot kolunun sonunda bir bilek bulunmaktadır ve bir takımı yerleştirmek için bir, iki veya üç eksenli vardır.

2.1.2. Kartezyen koordinat yapısı

Bu konfigürasyonda dikdörtgen şeklinde bir çalışma alanı vardır. Kolun üç ana eksenli çizgiseldir ve kontrolü nispeten basit olan hareketleri sağlarlar. Üç boyutlu uzaydaki bir noktaya, kolun end-effektörünü hareket ettirmek için, kolun her eksenli uygun miktarda x, y, z mesafeleri kadar hareket ettirilir. Böylece, sadece bir yönde hareket, sadece bir eksenli hareket demektir ve end-effektörün oryantasyonu değişmez. Bu konfigürasyonun iki çeşiti vardır. Bir dikdörtgen çalışma sahası içinde hareket eden bir vinç asılı kolu olan, tabanı ve bir düz eksenli çalışma sahası boyunca veya yere monte edilmiş kolu olan bu vinç tipi robotlar düz eksen kolaylıkla uzatılabildiğinden büyük bir çalışma alanında çalışabilirler (Warneek, 1982). Ayrıca alan oranını desteklemek amacıyla, bu robotların normalde

küçük bir çalışma alanı vardır. Örneğin, vinç tipi robotun ayakları tarafından işgal edilen yer alanından daha az bir çalışma alanı vardır. Büyük tipte robotlar bazen takım tezgahı yüklemeye kullanılmalarına rağmen, montaj işlemleri için çoğunlukla kartezyen robotları kullanılır. Enjeksiyon kalıplama makinası için en basit formlar kullanılabilir. Dikiş kaynağı için, entegre servo kontrollü, dönebilen donanım ile birlikte bazı çok büyük karmaşık örnekler bir vinç formunda kullanılır. Şekil 2,1 kartezyen koordinat robotu gösterilmiştir.



Şekil 2,1 Kartezyen Koordinat Robotu

Şekil 2.2 Silindirik Koordinat Robotu

2.1.3. Silindirik koordinat yapısı

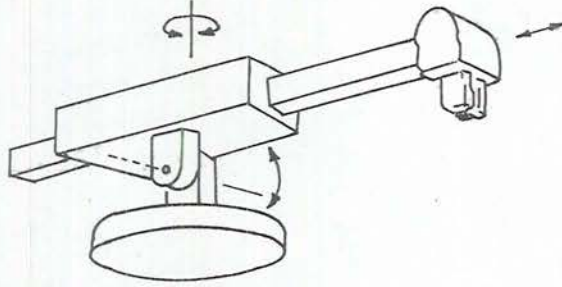
Bu robotlar, bir temel üzerinde dönebilen merkezi bir direk şeklindedir. Direk üzerinde dikey ve yatay içeri ve dışarı hareket edebilen bir kol vardır. Bu da silindirik bir çalışma alanı oluşturur. Yukarı-aşağı ve içeri-dışarı hareketlerin kontrolü, sadece bir eksenin kontrol edilmesini gerektirir. Benzer şekilde merkezi dikey eksen etrafında yapılan bir dönele hareketinde, sadece bir eksenle kontrol edilir. Fakat, sol tarafa doğru bir düz çizgi hareketi gerekiyorsa, dönele ve içeri-dışarı eksenlerin koordinasyonu

gereklidir. Bir takımı, end-effektörü üzerinde sabit bir oryantasyon ile tutmak gerektiğinde, üçüncü bir bilek ekseninin kontrolü gereklidir. Böylece, koordineli düz çizgi hareketini sağlamak için, kontrol sistemi her bir eksen hareketini hesaplayabilmelidir. Eger, istenen noktaların dikdörtgen koordinatlardaki tablodan kontrolöre beslenmesi gerekiyorsa, gerekli eklem hareketlerini sağlamak için, robot işlemcisi matematiksel dönüşümleri yapabilmelidir.

Silindirik robotlar kuvvetlidir ve iyi bir çalışma alanı/zemin alanı oranına sahiptir (Crischlow, 1985). Kolları uzun olduğundan, takım tezgahı yükleme, boşatma ve paletleme için uygundur. Bunların verimli bir iş yerleşimi, radyal olarak düzenlenmiş takım tezgahlarının ve bir taşıyıcı sistemin merkezine yerleştirmektir. O zaman, bir robot bir taşıyıcıdan işi alabilir, işi bir makinadan diğerine transfer edebilir ve bir çıkış konveyörüne yerleştirebilir. Nümerik kontrollu takım tezgahlarına monte edilmek üzere dizayn edilmiş küçük robotlar GM Fanuc tarafından üretilirler ve çift silindirik koordinat konfigürasyonuna sahiptirler Şekil 2,2'de silindirik koordinat robotu gösterilmiştir.

2.1.4. Polar (küresel) koordinat yapısı

Küresel olarak da anılan bu sistem, en eski tip konfigürasyondur. Bu yüzden hala bir çok alanda kullanılır. Bu robotlar güçlü olmalarına rağmen, eğer düz çizgi hareketi veya off-line kontrol gerektiğinde eklem kollu robotlara göre daha az esnektir ve kontrolü karmaşıktır. Çalışma uzayları kısmen küresel olup, nokta kaynağı, paletleme ve ağır yüklerde kullanılırlar. Şekil 2,3'de küresel koordinat robotu gösterilmiştir.



Şekil 2,3 Küresel Koordinat Robotu

2.1.5. Eklemlı kol yapısı

Gerçekte eklemlı kol robotlarının beş farklı tipi vardır.

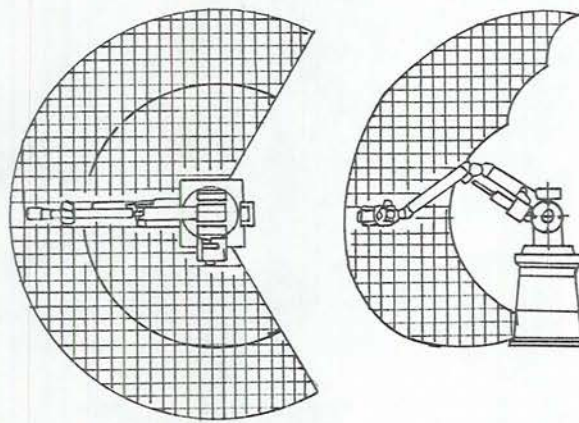
- (1) Tamamiyle küresel eklemlı kol yapısı,
- (2) Paralelkenar eklemlı kol yapısı
- (3) Silindirik eklemlı kol yapısı,
- (4) Sarkaç kol yapısı,
- (5) Çok eklemlı kol yapısı,

bunlar kısaca incelenecektir.

2.1.5.1. Tamamiyle küresel eklemlı kol yapısı

En çok kullanılan eklemlı konfigürasyonlardır. Robot uzuvlarının hepsi eksenlenmiştir ve bundan dolayı, dönel bir şekilde hareket ederler. Bu dizaynın en önemli avantajı robotun temeline ve çalışma sahası içindeki herhangi bir engelle ulaşmanın mümkün olmasıdır. Şekil 2,4'de gösterildiği gibi, kolun üst kısmı, alt kısma (veya alt kol) bağlıdır. Eksen noktasına çoğunlukla dirsek eklemi denir ve bu nokta ön kolün α yönünde dönmesine izin verir. Üst kol bir temele bağlıdır. Bu, omuz ekleminde (β yönünde temele dik bir düzlemde hareket mümkündür.) temel ekseninde dönecek

şekilde serbesttir. Böylece, tüm sistem (γ yönünde) temele paralel bir düzlemde hareket edebilir. Bu düzeneğe sahip bir robotun çalışma uzayı yaklaşık olarak küreseldir (Klafter et. al., 1989). Bu geometriye sahip endüstriyel manipülatörlere örnek olarak şunlar sayılabilir. Puma Unimation, Cincinnati Milacron T³, ASEA, NICO ve GCA tarafından yapılanlar.

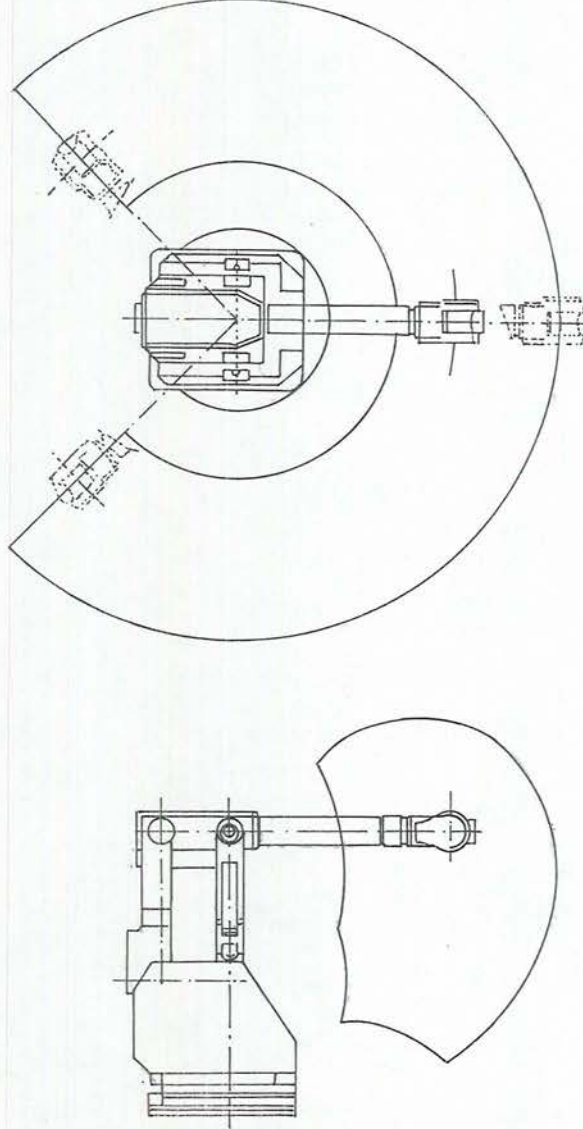


Şekil 2,4 Tamamiyle Küresel Eklemlili Robotun Geometrisi (Groover, 1986)

2.1.5.2. Paralel kenar eklemlili kol yapısı

Burada, tek rijit eleman olan üst kolun yerine bir paralel kenar şeklinde kapalı çok uzuvlu bir düzenek kullanılmıştır (Şekil 2,5). Bu konfigürasyonun avantajı, eklem tahrik edicilerinin robotun temelinde veya yakınına yerleştirilebilmesidir. Bu, şu anlama gelmektedir. Tahrik ediciler, kol ataleti ve ağırlığını azaltabilmek için, üst kolun veya ön kolun üzerinde taşınmamaktadırlar. Bunun sonucunda ise, aynı büyüklükte tahrik edici kullanan bir küresel eklemlili robottan daha büyük yük kapasitesi yaratılmış olur. Bu konfigürasyonun diğer avantajı, mekanik olarak diğerlerinden daha mukavemetli bir manipülatör meydana getirmesidir. Paralel kenar düzeneginin dezavantajı ise, küresel eklemlili robotla karşılaştırıldığında, bu robotun daha sınırlı bir çalışma uzayının olmasıdır. Bu tür

endüstri birimlerine örnek olarak şunlar verilebilir. ASEA Hitachi, Cincinnati Milacron, Yaskawa, Toshiba Manipülatörleri (Klafter et. al., 1989).



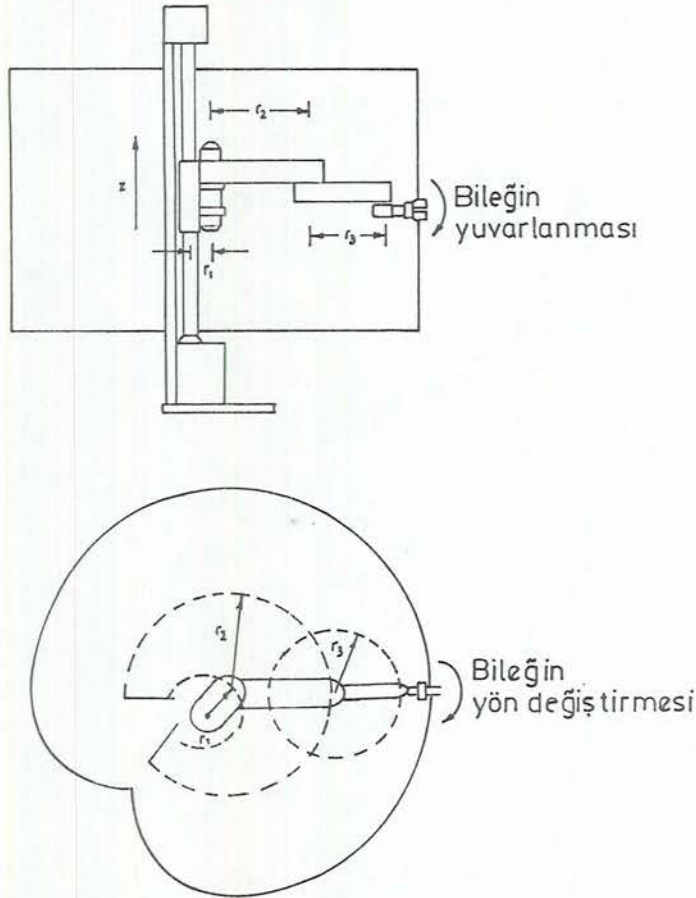
Sekil 2,5 Paralel Kenar Küresel Eklemlı Robotun Geometrisi ve Çalışma Uzayı (Klafter, et. al., 1989)

2.1.5.3. Silindirik eklemlı kol yapısı

Bu tür robotlar, hassas ve hızlıdır ama z yönünde sınırlı bir uzanma yeteneğine sahiptir. Diğer eksenler, daha hassas elektrikle tahrik (yani servomotor ve geri

besleme) kullanırken, çoğunlukla z eksenini hareketi basit açık devre hava silindirlere veya adım motorlar (step motorlar) kullanılarak kontrol edilir. Bu konfigürasyonlara sahip robotlara örnek olarak, Hireta, Reis, GCA ve Unitate States robotları verilebilir. Silindirik eklemlerli manipulatörün bir alt sınıfı, seçmeli esneklikli montaj robot kolu tipindeki bir robottur (Coiffet and Chiroze, 1983).

Tipik olarak bu robotlar nisbeten ucuzdur, hızlı ve hassas hareketlerin gerektiği uygulamalarda kullanılır. En önemli özelliği olan seçmeli esneklik, nesnelere deliklere yerleştirilmesinin gerekli olduğu montaj uygulamalarında özellikle yararlı olmaktadır.



Şekil 2,6 Silindirik Eklemlerli Robotun Geometrisi ve Çalışma Uzayı (Hunt, 1983)

2.1.5.4. Sarkaç kol yapısı

Bu robot ASEA tarafından montaj işlemleri için dizayn edilmiştir ve bu konfigürasyon vince monte edilmiş kaynak robotları için kullanılır. Yüksek hızlı ve yüksek ivmeli hareketler için uygun olan küçük bir atalete sahip yapıdır. Çalışma uzayı kısmi küredir (Hunt, 1983).

2.1.5.5. Çok eklemlili kol yapısı

Bu konfigürasyon mükemmel esneklik sağlar ve çok sayıda uygulamada kullanılır. Sprey boyama, nokta kaynağı ve dikiş kaynağı için özel olarak dizayn edilmiştir ve araba gövdesine ulaşılabilir. Alışılmadık konstrüksiyona sahip robotlarla ulaşılması zor olan alanlarda çalıştırılabilir. Bu tip kolun diğer formları nükleer reaktörlerin kontrolü ve tamir amacıyla dizayn edilmiştir (Warnecke, 1982). Bu robotların oluşturduğu çalışma uzayı, düz bir tabana ve oyuk bir merkeze yerleştirilmiş olan komple bir küredir.

3. ROBOT ELEMANLARI

3.1. Giriş

Robotik bir sistemin, aşağıdaki birbiri ile çalışan elemanlar veya yan sistemlerden oluştuğu kabul edilir (Coiffet and Chirouze, 1983).

1. Birbirinden bağımsız şekilde çalışan gerçek uzuvlar (kollar, eklemler ve end-efektörler) den oluşan açık mekanik sistem (manipulatör).

2. Mekanik sisteme, dikkatlice kontrol edilmiş şartlar altında güç veren tahrik ediciler. Güç; elektriksel, pnömatik veya hidrolik olabilir.

3. Eklemlerin tahrik edicilerine hareket transferi yapan transmisyon sistemleri.

4. Geri besleme aletleri olan sensörler, iki grupta sınıflandırılabilir. Mekanik sistemin kendisi hakkında bilgi veren iç sensörler ve kontrol sistemi ortamı hakkında bilgi veren dış sensörler.

5. Mekanik sistemin istenen hareketini elde eden tahrik edicileri tahrik ve kontrol eden kontrol sistemi.

3.2. Mekanik Sistem

3.2.1. End-Efektör

End-efektörleri, manipulatörlerin ucuna monte edilmiş tutucu aletleri, kavrayıcılar (tutucular) eller ve takımlardır. Bunlar, gerçek işi yapan mekanizmalardır. End-efektörleri çoğunlukla özel bir işi yapmak için dizayn edilirler. Fakat, bir çok tipte işi yapmak için çok amaçlı eller olarak da yapılabilirler. Robot end-efektörleri, ağır paslı, sıcak

veya keskin ve tehlikeli cisimlerle uğraşırken, daha kullanışlıdırlar. Ancak, karmaşık ve kırılğan parçalarla uğraşırken insan eli kadar kullanışlı değildirler.

Bir robot end-efektörünün kavrama veya tutma fonksiyonunu yerine getirmesi için bir çok farklı teknikler kullanılır. Bilinen teknikler şunlardır (Critchlow, 1985).

- Vakum kapları,
- elektromagnetikler,
- sıkmalar veya mekanik tutucular,
- kancalar,
- kepeçler veya kaplar,
- üç veya daha çok parmaklı eller.

End-efektörlerin karşılaması gereken özelliklerin listesi aşağıda verilmiştir.

- Parçalar hasarsız kavranmalı ve tutulmalıdır.
- İşlemler devam ederken, parçalar sıkıca pozisyonlanmalıdır.
- Eller ve tutucular farklı büyüklükteki parçaları yerleştirebilmelidir.
- Çeneler yükün merkezlemesini kendi kendine yapabilmelidir.

3.3. Tahrik Ediciler

Robotik sistem tahrik edicileri, hidrolik, pnömatik tahrik ediciler, doğru akım motorları, step motorlarıdır.

Tahrik edici tipi seçimi gereken güce, elde bulunan güç kaynaklarına ve istenen dinamik karakteristiklere bağlıdır. Step motorlarının gücü ve torku sınırlıdır ve bunlar sadece küçük robotlar için uygundur. Step motorları açık devre kontrol sistemlerinde kullanılabilirler.

Geri besleme elemanı gerekmediği için sistem kapalı devreden daha ucuzdur. Ayrıca, sistemin hassaslığı, girdisine gönderilen sinyallerin kesin sayısına göre adım adım hızını arttırma yeteneğine bağlıdır. Ayrıca, step motorlarının torkları düşüktür ve gürültülüdürler.

Doğru akım motorları, mükemmel hız ayarı, yüksek tork ve yüksek verimlidir. Bu nedenle, bunlar kontrol uygulamaları için gayet uygundur (Koren, 1983). Bu motorlar, geniş bir güç isteğini karşılayacak şekilde dizayn edilirler. Çoğunlukla, küçük ve orta büyüklükteki robotlarda kullanılırlar.

Hidrolik sistemler nispeten küçük olup, yüksek güç üretebildiklerinden, yüksek güç isteyen endüstri robotlarında geniş olarak kullanılırlar. Bunlar, aynı maksimum güce sahip olan doğru akım motorlarından çok daha yüksek maksimum açısal ivme üretebilirler. Bunların zaman sabitleri küçüktür ve bu da sessiz çalışmaya neden olur. Fakat hidrolik sistemler, taşıma hatlarındaki yağ sızıntısı ve sistem elemanları bakımından bazı problemler gösterirler. Yağ temiz tutulmalı ve kirlenmeye karşı korunmalıdır. Diğer istenmeyen özellikler ise transmisyon hatları ve yağ sıcaklığıyla viskozite değişimleri tarafından ortaya çıkan dinamik yüklerdir. Hidrolik tahrik edicilerin maliyeti, güç isteği ile orantılı değildir. Bu yüzden, küçük ve orta büyüklükteki robotlar için pahalıdırlar.

3.4. İletim (Transmisyon) Sistemleri

Transmisyon sistemleri, esas olarak motorların eklemlere, hareketi transfer etmek için veya torku yükseltirken hızı düşürmek için kullanılırlar. Transmisyon sistemlerinin bir diğer faydası dönel hareketi, lineer harekete geçirmek veya tersi hareketi yaptırmaktır. Transmisyon sistemlerinin, robotun dinamik davranışını etkileyen ve umulmadık etkiler yapan bazı hataları vardır (Yani, iç boşluk, kuru veya viskoz sürtünme,

esneklik, ağırlık). Bunlar, end-efektörün pozisyonlamasındaki hassasiyeti azaltır veya yapıda gürültü ve titreşim yaratır. Dişliler ve ayarlama kayışları gibi standard mekanik transmisyon sistemleri robotlarda kullanılabilir. Ama, bazılarının istenmeyen karakteristikleri vardır.

3.5. Sensör Sistemleri

Robotlar, insanlar gibi verimli olarak, fonksiyonel biçimde çalışabilmek için, kendi durumları ve içinde buldukları ortam hakkında geniş bilgi almak zorundadırlar. Sensörler, bu işlemi yapan geri besleme (feedback) aletleridir. Bir robot iki tip sensörle techiz edilebilir (Coiffet and Chirouze, 1983).

İç sensörler : robotların kendi koordinat sistemlerinde robotların konfigürasyonunu oluştururlar ve dış sensörler : robotu kendi ortamına göre pozisyonlamada kullanırlar. En çok kullanılan tipteki iç sensörler hareket, hız, ivme ve gerilme ölçerler. Dış sensörlerin fonksiyonu insan hislerine benzer (görme, dokunma, gerilimi ortaya çıkarma, işitme).

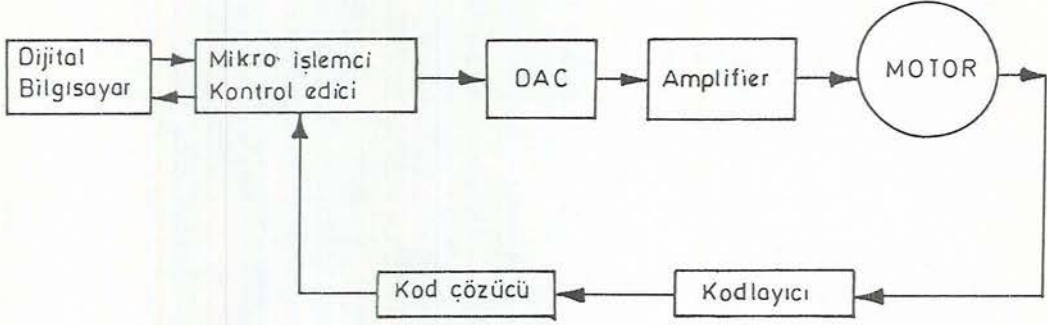
En çok kullanılan robot geri besleme aletlerinden birisi, motor milinin pozisyonunu ölçmede kullanılan arttırımlı kodlayıcılardır. Kodlayıcı, motor mili üzerinde monte edilmiş bir cam disk içerir. Çevresinde açık veya koyu çizgilerden oluşan hassas bir daire vardır. Diskin bir tarafında sabit bir ışık kaynağı ve diğer tarafta bir fotosel vardır. Motor mili döndüğünde, ışık periyodik olarak fotosel üzerine düşer. Bu da, milivolt olarak sinüzoidal bir çıktı sinyali verir. Bu sinyal ayrıca, uygun bir yükseltme ile bir kare dalgaya dönüştürülebilir ve düşüş zamanları da özel bir devre vasıtasıyla belirtilebilir. Dönüş yönü, iki fotoseli olan bir kodlayıcı kullanarak hissedilebilir. Fotoseller, çıktıları

birbirlerine 90° olacak şekilde ayarlanmışlardır. Dönme yönü, bu iki sinyal tarafından beslenen dış mantık devresi ile belirlenebilir.

3.6. Kontrol Ediciler

Bir robot kontrol sisteminin karmaşıklığı, yapılacak olan işin karmaşıklığı ile doğru orantılıdır. Sınırlı-sıralı robotlarda hareketi kontrol etmek için pnömomatik, mekanik veya basit elektrik mantığı kullanılır. Bu sistemler açık-devre hareketin kontrolünü sağlarlar. Karmaşık endüstri robotlarında her eklemin pozisyonu veya hareket eksenini bir kapalı-devre servo sistemi ile kontrol edilir. Bu tür kontrol ediciler, eklemlerin hareketini kontrol etmek için, pozisyon ölçme sensörlerinden gelen sürekli geri beslemeyi kullanırlar. Tipik bir dijital sistemi fonksiyonel elemanları Şekil 3.1'deki blok diyagramı ile tanımlanmıştır.

Bilgisayar kontrol ediciye, motorun istenen pozisyon değerlerini dijital sinyaller halinde gönderir. Bu pozisyon değerleri bir bilgisayar programıyla da hesaplanabilir veya önceden hafızada saklanmış veri formunda olabilir. Kodlayıcıdan gelen pozisyon geri beslemesinin pozisyonunu, referans girdisi ile kıyaslamak ve pozisyon hatasını belirlemek için ayarlar. Motorun pozisyon hatasına göre, kontrol edici, motora bir emir gönderir. Bu emir, dijital analog dönüştürücüsüne, dijital şekilden analog şekle dönüştürmek için gönderilir. Analog emri, motoru çeviren amplifikatöre uygulanır. Motor pozisyonu bir pozisyon sensörü tarafından geri beslenir. En çok kullanılan pozisyon sensörü, her motor dönmesinde belirli sayıda sinyal üreten bir arttırımlı kodlayıcıdır. Hareketin yönünü hissetmek için, iki kanallı bir arttırımlı kodlayıcı kullanılır. Arttırımlı kodlayıcının çıktısı, kodlayıcı sinyallerini sayan ve kodlayıcı ile kontrol edici arasında elastikliği sağlayan pozisyon kod çözücüsüne uygulanır (Balkan, 1988).



Şekil 3,1 Tipik Motor Kontrol Sisteminin Elemanları
(Balkan, 1988)

4. ROBOT KOLU KİNEMATİĞİ

4.1. Giriş

Bir mekanik manipülatör, tahrik ediciler tarafından tahrik ettirilen döner veya prizmatik eklemlerle birbirine seri olarak bağlanmış, birden fazla uzuvu olan bir açık devre mekanizması olarak düşünülebilir. Mekanizmanın bir ucu bir temele (zemine) bağlanmış olup, diğer ucu boşta ve bu uca, nesnelere hareket ettirmeye veya belirli işlemleri yapmaya yarayan ve end-efektör diye adlandırılan bir takım monte edilmiştir. Eklemlerin birbiri ile olan bağıl hareketi, kolu istenen herhangi bir pozisyona getiren uzuvların hareket etmesini sağlar. Robot uygulamalarında genellikle, end-efektörün hareketinin, sabit bir referans koordinat sistemine göre tanımlanması gerekir.

Robot kolu kinematığı, bir robot kolunun sabit bir referans koordinat sistemine göre, zamana bağlı olarak yapmış olduğu hareketin geometrisinin, hareket sebebi ile doğan momentler ve kuvvetler hesaplanmaksızın, analitik olarak incelenmesidir. Böylece robot kolu kinematığı, robotun zamana bağlı olarak yaptığı uzaydaki hareketinin analitik tanımı ile, özellikle eklemlerin uzayda yapmış olduğu bağıl hareketlerle, robot kolu end-efektörünün dönmesi ve pozisyon değişimi ile ilgilenir. Teori ve pratikte, robot kolu kinematığında karşımıza çıkan iki temel sorun vardır:

1. Herhangi bir robot kolu için eklem açısal vektörü

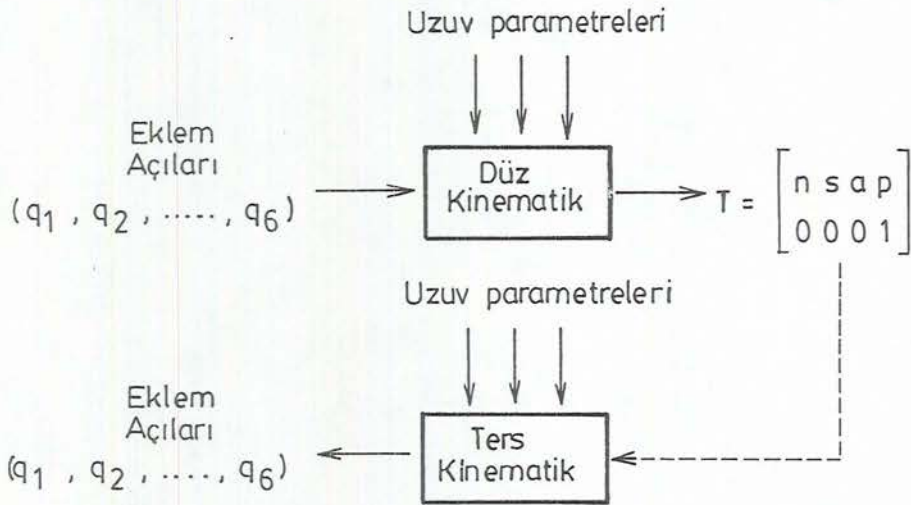
$$q(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t))^T$$

ve uzuvların geometrik parametreleri verilmiş olsun (n ; hareketin serbestlik derecesi sayısını belirtmektedir). Bu durumda manipülatör end-efektörünün sabit bir referans koordinat sistemine göre yapmış olduğu pozisyon değişimini ve dönme hareketini nasıl tanımlarız ?

2. Manipülator end-efektörünün herhangi bir durumdaki pozisyonu, oryantasyonu ve geometrik uzuv parametreleri, sabit bir referans koordinat sistemine göre verilmiş olsun, manipülator istenen pozisyona gelip istenen açısal hareketi yapabileceyse, bu pozisyona ulaşmak kaç farklı şekilde mümkün olabilir?

Birinci soru genellikle, düz kinematik sorusu olarak bilinir, fakat ikinci soru ters kinematik denilen bir yöntemle çözülür. Bu çalışmada, beşinci bölümdeki uygulamaya temel olması açısından düz kinematik problemi üzerinde durulacaktır.

Şekil 4,1'de ters ve düz kinematik problem arasındaki ilişki bir şema ile gösterilmiştir.



Şekil 4,1 Düz ve Ters Kinematik Problemler (Balkan, 1988)

Bir robot kolunun uzuvları, dönebileceğinden ve bir referans koordinat eksen takımında hareket edebileceğinden end-efektörün uzaydaki hareketi; uzuvların doğrusal hareketleri ve açısal dönmelerden oluşur. Denavit ve Hartenberg (1955), robot kolu uzuvlarının sabit bir referans koordinat sistemine göre, uzaydaki geometrisini tanımlamak için, matris cebiri kullanılan genel ve sistematik bir

yöntem önermişlerdir. Bu metod ile birbirini izleyen iki uzvun arasındaki ilişkiyi tanımlamak için, 4×4 homojen bir transformasyon matrisi kullanılır. Bu metodla, düz kinematik problemde el koordinat sistemini, referans koordinat sistemine dönüştüren 4×4 bir eşdeğer homojen transformasyon matrisi bulunur. Robot kolu hareketinin dinamik eşitsizliklerinin türetilmesinde bu homojen transformasyon matrisleri kullanılır.

4.2. Düz Kinematik Problemi

Sabit bir referans koordinat sistemine göre, bir robot kolu uzuvlarının hareketlerini tanımlamak için, sistematik ve genel bir yaklaşım elde etmede vektör ve matris cebiri kullanılır. Uzuvların hareketi, ötelenme ve dönme hareketlerinden oluştuğundan dolayı, her uzuv için, eklem eksenine doğrultusunda bir referans koordinat sistemi alınacaktır. Böylece düz kinematik problemi, bu bahsedilen koordinat sistemini temel koordinat sistemine çeviren bir transformasyon matrisi bulma problemine dönüşmüştür. Uzuv eksenine göre alınan referans koordinat sistemindeki dönme hareketlerini temel koordinat sistemine göre tanımlayabilmek için bir 3×3 dönme matrisi kullanılır. Daha sonra, üç boyutlu uzaydaki pozisyon vektörlerinin tanımı için homojen koordinatlar kullanılır ve dönme matrisleri, eklem eksenine göre koordinat sistemindeki ötelenmeyi içeren 4×4 homojen transformasyonlara dönüştürülür (Asada, 1986).

Robot kolunun uzay geometrisini tanımlamada kullanılan mekanik uzuvların bu matris gösterimi, ilk defa Denavit ve Hartenberg tarafından kullanılmıştır. Bu matrisi kullanmanın avantajı, bir robot kolunun kinematik formüllerinin çıkarılmasındaki esnekliğidir.

4.2.1. Dönme matrisleri

Bir 3x3 dönme matrisi, üç boyutlu uzayda, bir pozisyon vektörü üzerindeki işlemleri yapan bir transformasyon matrisi olarak tanımlanabilir ve eklem eksenine göre alınan koordinatları OUVW, cisme-bağlı referans koordinat sistemindeki koordinatlara (OXYZ) dönüştürür. Şekil 4,2'de OUVW ve OXYZ şeklinde iki ayrı koordinat sistemi gösterilmiş olup, OU, OV, OW ve OX, OY, OZ koordinat eksenleridir. Her iki koordinat sisteminin orijini O'dadır. OXYZ koordinat sistemi üç boyutlu uzayda sabit referans sistemi olarak alınmıştır. OUVW koordinat sistemi ise OXYZ koordinat sistemi içersinde dönmektedir. OUVW koordinat sistemi fiziksel olarak, her bir uzuv üzerinde uzuvla birlikte hareket eden bir koordinat sistemi olarak düşünülebilir (i_x, j_y, k_z) ve (i_u, j_v, k_w) vektörleri OXYZ ve OUVW sistemlerindeki eksenler boyunca birim vektörler olsun. Uzayda bir (P) noktası her iki koordinat sistemine göre de gösterilebilir. Kolaylık olması açısından, (P) noktasının uzuvlar üzerinde hareket ettiği kabul edilen OUVW koordinat sistemi içersinde sabit bir nokta olduğunu kabul edelim. Ü zaman (P) noktası her iki koordinat sistemine göre şu şekilde ifade edilir (Paul, 1981).

$$\begin{aligned} P_{uvw} &= (P_u, P_v, P_w)^T \\ P_{xyz} &= (P_x, P_y, P_z)^T \end{aligned} \quad (4.1)$$

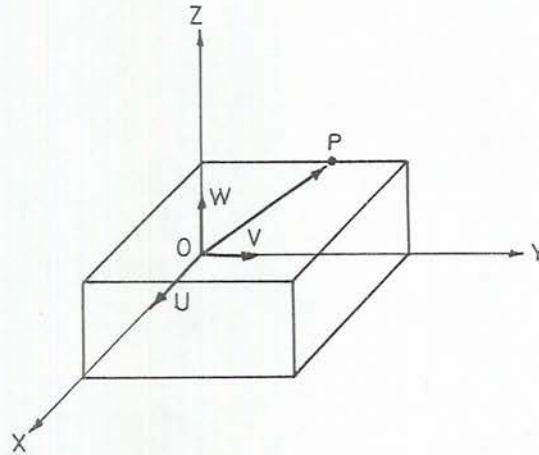
P_{xyz} ve P_{uvw} , uzaydaki P noktasını, farklı koordinat sistemlerine göre tanımlamaktadır ve T tranzpoze işlemini ifade etmektedir. OUVW koordinat sistemi döndürüldükten sonra, P_{uvw} koordinatlarını OXYZ sistemindeki koordinatlara dönüştüren ve 3x3 formunda bir R transformasyon matrisi bulunmak isteniyor. Yani,

$$P_{xyz} = R \cdot P_{uvw} \quad (4.2)$$

P_{uvw} noktasının fiziksel olarak UUVW koordinat sistemi ile birlikte döndüğüne dikkat edilmelidir. Vektör elemanlarının tanımına göre,

$$P_{uvw} = P_u \cdot i_u + P_v \cdot j_v + P_w \cdot k_w \quad (4.3)$$

yazılır.



Şekil 4,2 Referans ve Cisme Bağlı Koordinat Sistemi
(Fu et. al., 1987)

P_u , P_v , P_w ; P vektörünün OX , OY , OZ eksenleri boyunca elemanlarıdır. Böylece skaler çarpımın tanımı ve (4.3) nolu eşitlik kullanılarak,

$$\begin{aligned} P_x &= i_x \cdot P = i_x \cdot i_u \cdot P_u + i_x \cdot j_v \cdot P_v + i_x \cdot k_w \cdot P_w \\ P_y &= i_y \cdot P = i_y \cdot i_u \cdot P_u + i_y \cdot j_v \cdot P_v + i_y \cdot k_w \cdot P_w \\ P_z &= i_z \cdot P = i_z \cdot i_u \cdot P_u + i_z \cdot j_v \cdot P_v + i_z \cdot k_w \cdot P_w \end{aligned} \quad (4.4)$$

veya matris formu haline getirilirse;

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_x \cdot i_u & i_x \cdot j_v & i_x \cdot k_w \\ j_y \cdot i_u & j_y \cdot j_v & j_y \cdot k_w \\ k_z \cdot i_u & k_z \cdot j_v & k_z \cdot k_w \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_u \\ P_v \\ P_w \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

aynı şey, denklem (4.3)'deki R matrisi için yapılırsa,

$$R = \begin{bmatrix} i_x \cdot i_u & i_x \cdot j_v & i_x \cdot k_w \\ j_y \cdot i_u & i_x \cdot j_v & j_y \cdot k_w \\ k_z \cdot i_u & i_x \cdot j_v & k_z \cdot k_w \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Benzer şekilde P_{uvw} 'nin koordinatlarını P_{xyz} 'nin koordinatlarından elde etmek mümkündür.

$$P_{uvw} = Q \cdot P_{xyz} \quad (4.7)$$

veya

$$\begin{bmatrix} P_u \\ P_v \\ P_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_u \cdot i_x & i_u \cdot j_y & i_u \cdot k_z \\ j_v \cdot i_x & j_v \cdot j_y & j_v \cdot k_z \\ k_w \cdot i_x & k_w \cdot j_y & k_w \cdot k_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

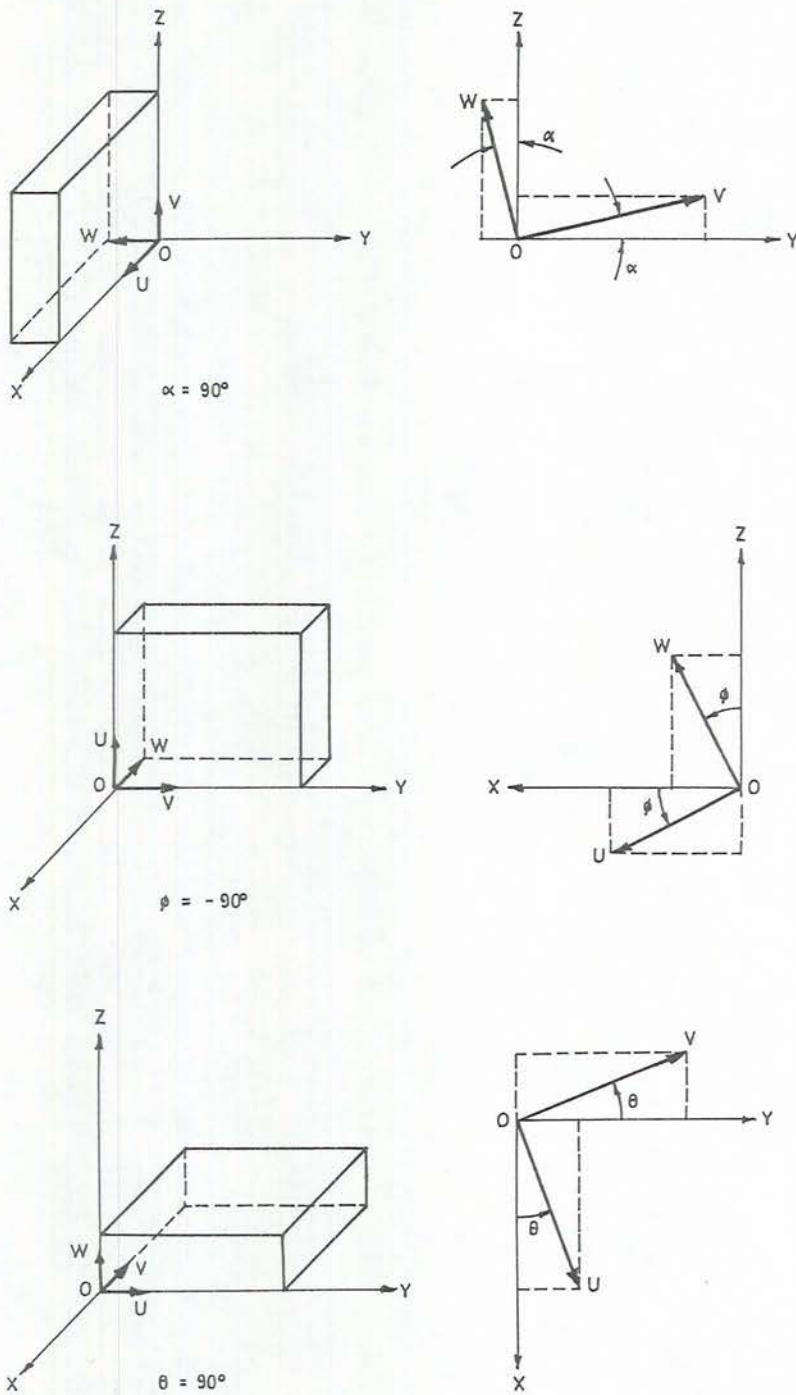
Skaler çarpımın dağılıma özelliği dolayısıyla (4.6) ve (4.8)'de görülebilir ki;

$$Q = R^{-1} = R^T \quad (4.9)$$

ve

$$Q \cdot R = R^T \cdot R = R^{-1} \cdot R = I_3 \quad (4.10)$$

Burada, I_3 ; 3x3 birim vektördür. Denklem (4.3)'de verilen transformasyon veya (4.7) ortogonal transformasyon olarak bilinir ve skaler çarpımda bütün vektörler birim vektörleri olduğundan buna ortogonal transformasyon da denir. Yukarıdaki transformasyon matrisi çıkarmadaki esas gaye, UUVW koordinat sisteminin OXYZ sistemindeki üç eksen boyunca yapmış olduğu dönel hareketleri tanımlayan dönme matrislerini bulmaktır. Eğer UUVW koordinat sistemi OX eksenini etrafında α açısı kadar döndürülecek olursa, UUVW sistemine göre $(P_u, P_v, P_w)^T$ olan P noktasının koordinatları, OXYZ sistemine göre $(P_x, P_y, P_z)^T$ koordinatlarına dönüşmüş olur. Bu işlem için gerekli olan $R_{x,\alpha}$ transformasyon matrisine OX eksenini etrafında α açısı kadar dönme matrisi denir. $R_{x,\alpha}$ yukarıdaki transformasyon matrisi tarafından türetilebilir. Yani,



Şekil 4,3 Dönme Koordinat Sistemleri (Paul, 1981)

$$P_{xyz} = R_{x,\alpha} \cdot P_{uvw}$$

(4.11)

$$i_x = i_u$$

ve

$$R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} i_x \cdot i_u & i_x \cdot j_v & i_x \cdot k_w \\ j_y \cdot i_u & j_y \cdot j_v & j_y \cdot k_w \\ k_z \cdot i_u & k_z \cdot j_v & k_z \cdot k_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha & -S\alpha \\ 0 & S\alpha & C\alpha \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Benzer şekilde, OY eksenini etrafında ϕ açısı kadar dönme matrisi ve OZ eksenini etrafında θ açısı kadar 3×3 dönme matrisi yukarıda verilmiştir (Şekil 4,3).

$$R_{y,\phi} = \begin{bmatrix} C\phi & 0 & S\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\phi & 0 & C\phi \end{bmatrix} \quad (4.13.a)$$

$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13.b)$$

Burada $C\theta = \cos\theta$; $S\theta = \sin\theta$; $C\phi = \cos\phi$; $S\phi = \sin\phi$ dir. $R_{x,\alpha}$, $R_{y,\phi}$, $R_{z,\theta}$ matrislerine, temel dönme matrisleri adı verilir. Diğer matrisler bunlardan türetilebilir.

4.2.2. Bileşik dönme matrisi

Temel dönme matrisleri, OXYZ koordinat sisteminin eksenleri etrafındaki sınırlı dönmeleri bir dizi halinde göstermek için, birbiri ile çarpılabilir. Matris çarpımının dağılma özelliği olmadığından dönme sırası önemlidir. Örneğin, OX eksenini etrafında α kadar, OZ eksenini etrafında θ kadar, OY eksenini etrafında ise ϕ kadar bir dönme yapıldığı düşünülün. Bu dönmeleri ifade eden matris;

$$R = R_{y,\phi} \cdot R_{z,\theta} \cdot R_{x,\alpha}$$

$$R = \begin{bmatrix} C\phi & 0 & S\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\phi & 0 & C\phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha & -S\alpha \\ 0 & S\alpha & C\alpha \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} C\phi \cdot C\theta & S\phi \cdot S\alpha - C\phi \cdot S\theta \cdot C\alpha & C\phi \cdot S\theta \cdot S\alpha + S\phi \cdot C\alpha \\ S\theta & C\theta \cdot C\alpha & -C\theta \cdot S\alpha \\ -S\phi \cdot C\theta & S\phi \cdot S\theta \cdot C\alpha + C\phi \cdot S\alpha & C\phi \cdot C\alpha - S\phi \cdot S\theta \cdot S\alpha \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Bu matris OY etrafında ϕ , OZ etrafında θ , OX etrafında α kadar dönmeyi gösteren bir matristir. Sonuç olarak dönme matrisi;

$$R = R_{x,\alpha} \cdot R_{z,\theta} \cdot R_{y,\phi}$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & C\alpha & -S\alpha \\ 0 & S\alpha & C\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C\phi & 0 & S\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\phi & 0 & C\phi \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} C\theta \cdot C\phi & -S\theta & C\theta \cdot S\phi \\ C\alpha \cdot S\theta \cdot C\phi + S\alpha \cdot S\phi & C\alpha \cdot C\theta & C\alpha \cdot S\theta \cdot S\phi - S\alpha \cdot C\phi \\ S\alpha \cdot S\theta \cdot C\phi - C\alpha \cdot S\phi & S\alpha \cdot C\theta & S\alpha \cdot S\theta \cdot S\phi + C\alpha \cdot C\phi \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

OXYZ referans sisteminin eksenleri etrafında döndürülmüş olan OUVW sistemi, kendi eksenleri etrafında da döndürülebilir. Bu durumda bileşik dönme matrisi aşağıdaki basit kurallarla elde edilebilir (Fu et. al., 1987). Başlangıçta her iki koordinat sistemi çakışık durumdadır, bu yüzden de dönme matrisi I_3 , 3x3 bir birim matristir.

Eğer döndürülen koordinat sistemi OUVW, OXYZ sisteminin eksenlerinden birinin etrafında dönüyorsa, o zaman en son elde edilen dönme matrisinin uygun bir temel dönme matrisi ile önceden çarpılması gerekir.

Eğer döndürülen koordinat sistemi OUVW, kendi eksenlerinden biri etrafında dönüyorsa, o zaman en son elde edilen dönme matrisinin uygun bir temel dönme matrisi ile sonradan çarpılması gerekir.

4.2.3. Homojen koordinatlar ve transformasyon matrisi

Bir 3x3 dönme matrisi, bize hareket ve ölçek hakkında hiç bir şart öne sürmediği için, bir $P = (P_x, P_y, P_z)^T$ pozisyon vektörüne bir dördüncü koordinat veya eleman eklenir. Böylece pozisyon vektörü $\tilde{P} = (\omega P_x, \omega P_y, \omega P_z, \omega)^T$ ye

dönüşür. Bu durumda P vektörü homojen koordinatlarda ifade edilmiş olur. P üzerindeki ω işareti homojen koordinatları ifade eder.

Noktaların üç boyutlu uzayda bu şekilde homojen koordinatlarla gösterimi, dönme, öteleme, ölçek faktörü ve üç boyutlu transformasyonları içeren transformasyon matrislerinin çıkarılmasında önem taşır. Genelde, N elemanlı bir pozisyon vektörünün, $N+1$ elemanlı bir vektörle gösterilmesine, homojen koordinat gösterimi adı verilir. Bu gösterimde N elemanlı bir vektörün transformasyonu, $N+1$ boyutlu bir uzayda yapılır ve fiziksel olarak N boyutlu vektör, homojen koordinatları, $N+1$ boyutuna yani, W 'ye bölerek elde edilir. Böylece üç boyutlu uzayda, $P=(P_x, P_y, P_z)^T$ gibi bir vektör homojen koordinat sisteminde $(\omega P_x, \omega P_y, \omega P_z, \omega)^T$ şeklinde gösterilir. Fiziksel koordinatlarla homojen koordinatlar arasındaki ilişki ise şöyledir.

$$P_x = \frac{W_{px}}{W} \quad P_y = \frac{W_{py}}{W} \quad P_z = \frac{W_{pz}}{W}$$

Üç boyutlu uzayda, bir pozisyon vektörü için tek homojen koordinat gösterimi yoktur. Örneğin, $\hat{P}_1=(W_1 \cdot P_x, W_1 \cdot P_y, W_1 \cdot P_z, W_1)^T$ ve $\hat{P}_2=(W_2 \cdot P_x, W_2 \cdot P_y, W_2 \cdot P_z, W_2)^T$ aynı pozisyon vektörü $P=(P_x, P_y, P_z)^T$ 'yi gösteren homojen koordinatlardır. Böylece dördüncü eleman olan W bir ölçek faktörüdür. $W=1$, bir pozisyon vektörünün, dönüşüme uğramış homojen koordinatları, vektörün fiziksel koordinatları ile aynıdır. Robot uygulamalarında bu ölçek faktörü W , daima bire eşittir.

Homojen transformasyon matrisi, homojen koordinatlardaki bir pozisyon vektörünü, bir koordinat sisteminden bir başkasına taşıyan 4×4 bir matristir.

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & 1 \times 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Dönme matrisi} & \text{Pozisyon vektörü} \\ \text{Uçboyutlu transformasyon} & \text{Ölçek faktörü} \end{bmatrix}$$

$R_{3 \times 3}$, dönme matrisini gösterir. $P_{3 \times 1}$, referans koordinat sistemine göre, döndürülmüş koordinat sistemi orijininin pozisyon vektörünü, $f_{1 \times 3}$ üç boyutlu transformasyonu ve dördüncü diyagonal eleman da, ölçek faktörünü gösterir. Homojen transformasyon matrisi, gövde üzerinde bulunan OUVW sistemi ile, referans koordinat sistemi OXYZ arasındaki geometrik ilişkiyi açıklamada kullanılabilir (Lee, 1982).

Eğer bir P pozisyon vektörü (üç boyutlu uzayda) homojen koordinatlarda ifade edilirse [yani, $\hat{P} = (P_x, P_y, P_z, 1)^T$] o zaman transformasyon matrisi kavramını kullanarak, 3x3 bir dönme matrisi, dönme işlemleri için bir 4x4 homojen transformasyon matrisi $T_{r.o.}$ haline dönüştürülebilir.

Böylece, (4.12) ve (4.13) nolu eşitlikler (homojen dönme matrisleri olarak ifade edilmiş) şuna dönüşür.

$$T_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha & -S\alpha & 0 \\ 0 & S\alpha & C\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17.a)$$

$$T_{y,\phi} = \begin{bmatrix} C\phi & 0 & S\phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S\phi & 0 & C\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17.b)$$

$$T_{z,\theta} = \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17.c)$$

Bu 4x4 dönme matrisi, temel homojen dönme matrisleri olarak bilinir. Homojen transformasyon matrisindeki $P_{3 \times 1}$ alt matrisinin işlevi, referans koordinat sistemi OXYZ'e paralel eksenleri bulunan ve orijini referans koordinat sisteminin (dx, dy, dz)'sinde olan, OUVW koordinat sisteminin dönüşümünü yapmaktır.

$$T_{tran} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 1 & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Bu 4x4 transformasyon matrisine, temel homojen ötelenme matrisi adı verilir. $f_{3 \times 1}$, transformasyonu gösterir. Diyagonal elemanlar, yerel (lokal) ölçeklendirme vazifesini görürler. Üç boyutlu transformasyonu gösteren homojen transformasyon matrisinin $f_{1 \times 3}$ alt matrisi, bilgisayarın görmesi ve kameranın kalibrasyonu için faydalıdır. Burada, bu alt matrisin elemanları, sıfır üç boyutlu transformasyonu göstermek için, sıfıra eşitlenmiştir.

İlk üç diyagonal eleman, yerel ölçeklendirme vazifesi görürler

$$\begin{bmatrix} a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cdot x \\ b \cdot y \\ c \cdot z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Böylece koordinat değerleri, a, b, c gibi sayılarla genişletilmiş olur. Temel dönme matrislerinin T_{rot} , hiç bir ölçeklendirme işlevi olmadığına dikkat edilmelidir.

Dördüncü diyagonal eleman aşağıdaki ölçeklendirmeyi yapmaktadır.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ s \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Burada, $S > 0$ Vektörünün fiziksel kartezyen koordinatları:

$$P_x = \frac{x}{S} \quad P_y = \frac{y}{S} \quad P_z = \frac{z}{S} \quad W = \frac{S}{S} - 1 \quad (4.21)$$

Bu yüzden, dördüncü diyagonal elemanın etkisi, koordinatları eğer $S > 1$ ise küçültmek, $0 < S < 1$ ise büyültmektir.

Özet olarak, 4x4 homojen transformasyon matrisi, homojen koordinatlarda UUVW koordinat sistemine göre verilmiş olan bu vektörü, referans koordinat sistemi OXYZ'ye taşımaktadır.

Yani, $W=1$ ise;

$$\hat{P}_{xyz} = T \hat{P}_{uvw} \quad (4.22.a)$$

ve

$$T = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & P_x \\ n_y & s_y & a_y & P_y \\ n_z & s_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & s & a & P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.22.b)$$

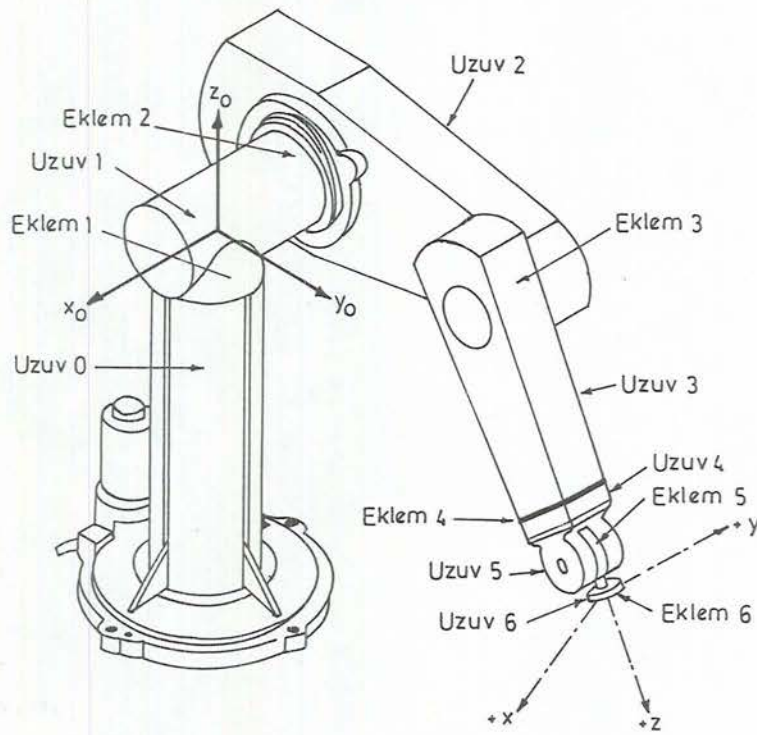
4.2.4. Uzuvlar, eklemler ve parametreleri

Bir mekanik robot, dönen veya prizmatik eklemlerle birleştirilmiş bir dizi uzuvlardan oluşur (Şekil 4,4). Her eklem uzuv çifti bir serbestlik derecesine sahiptir. Bundan dolayı, N serbestlik dereceli bir robot için, N adet eklem-uzuv çifti bulunur. Bu uzuvların bağlı olduğu bir de gövde vardır ve son uzuva bir takım monte edilmiştir. Eklem ve uzuvlar, gövdeden itibaren numaralandırılır. Böylece, bir nolu eklem, bir nolu uzuv ile gövde arasındaki eklemdir.

Genelde, iki uzuvun birbirine bağlandığı eklemin birbiri üzerinde kayan iki yüzey vardır (Fu et. al., 1987). Altı çeşit eklem çifti vardır. Bunlar dönele, prizmatik (kayan), silindirik, küresel, vidalı ve yüzeysel eklem çiftleridir (Şekil 4,5).

Robot uygulamalarında, bunlardan dönele ve prizmatik olan eklemler kullanılır. Eklem ekseninin iki adet uzuvdan oluşan iki adet normalı vardır (Şekil 4,6). İki uzuv

arasındaki bağıl pozisyon ($i-1$ uzvu ve i uzvu) normaller arasındaki eklem eksenini boyunca ölçülen mesafe olan (d_i) ile belirtilir. Normaller arasındaki eklem açısı θ_i , eklem eksenine dik bir düzlemde ölçülür. Bundan dolayı d_i ve θ_i sırasıyla, birbirini izleyen iki uzuv arasındaki mesafe ve açı olarak adlandırılabilir. Komşu uzuvların bağıl pozisyonlarını bunlar belirler.



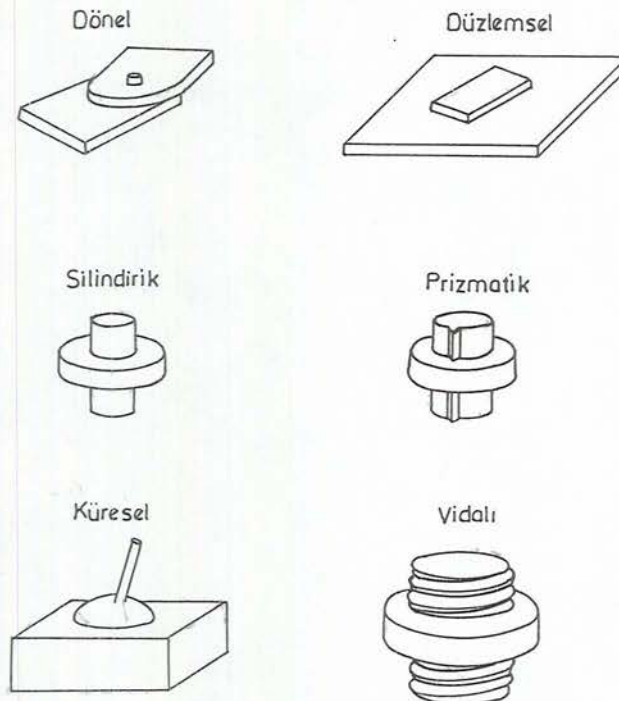
Şekil 4,4 Eklem ve Uzuvları Gösteren bir PUMA Robot Kolu
(Lee, 1982)

i uzvu ($i=1,2,\dots,6$) diğer iki uzva ($i-1$ ve $i+1$) bağlanmıştır. Böylece bir bağlantının iki ucunda iki adet eklem eksenini vardır. Uzuvlar, a_i ve α_i gibi iki parametre ile karakterize edilirler. a_i ; eklem eksenleri arasında ölçülen en kısa uzunluktur. (i ekleminin eksenini z_{i-1} , $i+1$ ekleminin eksenini z_i) ve α_i ; a_i 'ye dik bir düzlemde ölçülen eklem eksenleri arasındaki açıdır. Böylece, a_i ve α_i sırasıyla i uzvunun uzunluğu ve büküm açısı olarak adlandırılırlar ve bu parametreler i uzvunun konstrüksiyonunu belirler.

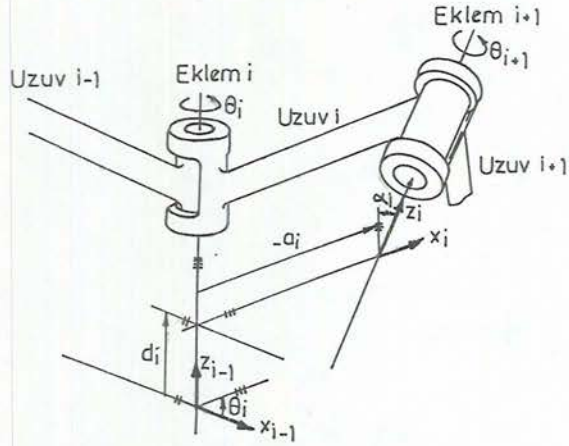
Özet olarak, a_i , α_i , d_i ve θ_i bir uzvu tanımlayan parametrelerdir. Eğer bu parametrelere bir +, - işaret sistemi uygulanırsa, bu parametreler bir robot uzvunu tamamiyle tanımlar. Burada a_i ve α_i 'nin uzvu tanımlayan, d_i ve θ_i 'nin ise uzvun eklemine tanımlayan parametreler olduğuna dikkat edilmesi gerekir.

4.2.5. Denavit-Hartenberg gösterimi

Birbirini izleyen uzuvların yaptığı ötelenme ve dönel hareketler arasındaki ilişkiyi tanımlamak için Denavit ve Hartenberg (1955), manipülatörün her uzvuna bir koordinat sistemi yerleştiren bir matris metodu önermişlerdir. Denavit-Hartenberg (D-H) gösteriminde, her uzvun koordinat sistemini, ekleme bir önceki uzvun koordinat sistemine göre gösteren bir 4x4 transformasyon matrisi kullanılır. Böylece, bir dizi transformasyondan sonra, el koordinatlarında belirtilen end-efektör, temel koordinatlarda ifade edilebilir.



Şekil 4,5 Eklem Çiftleri (Balkan, 1988).



Şekil 4,6 Uzun Koordinat Sistemi ve Parametreleri (Fu et. al., 1987)

Her uzuv için, eklem eksenlerinde ortonormal bir kartezyen koordinat sistemi (x_i, y_i, z_i) düzenlenebilir. Burada, $i=1,2,\dots,n$ ve n hareketin serbestlik derecesi sayısıdır. Dönel bir eklem serbestlik derecesi bir olduğu için, bir robot kolunun her (x_i, y_i, z_i) koordinat sistemi, i uzvunda sabit olup $i+1$ eklemine tekabül eder. Eklem motoru çalıştığında eklem, i uzvunu $i-1$ uzvuna göre hareket ettirir. i 'nci koordinat sistemi i uzvunda sabit olduğundan i uzvuyla birlikte hareket eder. Temel koordinatlar, sıfırıncı koordinat sistemi (x_0, y_0, z_0) olarak tanımlanır. Böylece, altı eksenli PUMA robot kolu için, yedi koordinat sistemi gösterilir. Yani, (x_0, y_0, z_0) , $(x_1, y_1, z_1), \dots, (x_6, y_6, z_6)$ dir.

Her koordinat sistemi aşağıdaki üç kurala göre belirlenir ve düzenlenir.

1. Z_{i-1} eksenini i 'nci eklem hareket eksenini boyunca uzandır.
2. X_i eksenini Z_{i-1} eksenine dik olup, bu eksenin dışarı doğru çıkar.
3. y_i eksenini, sağ-el koordinat sistemini istenildiği gibi tamamla.

Bu kurallara göre 0 'nci koordinat sistemi, manipülâtörün gövdesinde herhangi bir yerde seçilebilir (Z_0 eksenini ilk eklem hareket eksenini boyunca uzanacak şekilde). Son koordinat sistemi (n 'nci sistem), X_n eksenini Z_{n-1} eksenine dik olacak şekilde, manipülâtör elinin herhangi bir yerine konulabilir (Balkan, 1988).

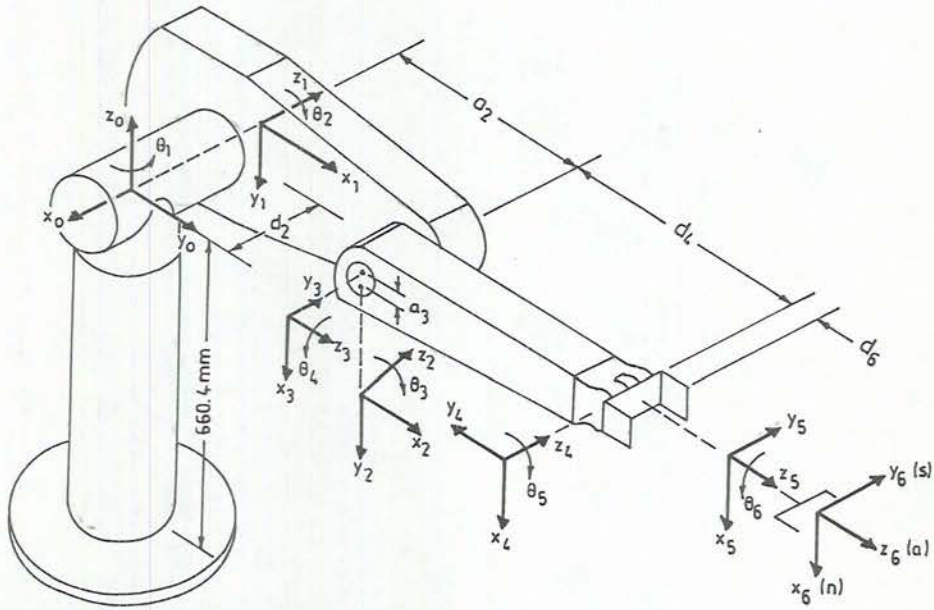
Bir uzvun D-H gösterimi, her uzuvla ilgili dört geometrik parametreye bağlıdır. Bu dört parametre herhangi bir dönel veya prizmatik eklemi tamamiyle tanımlar. Şekil 4,6'ya göre, bu dört parametre şöyle tanımlanır:

- θ_i ; X_{i-1} ekseninden X_i eksenine Z_{i-1} eksenini etrafında alınan eklem açısıdır (sağ el kuralını kullanarak).
- d_i ; $i-1$ 'nci koordinat sisteminin orijininin Z_{i-1} ekseninin, Z_{i-1} eksenini boyunca, X_i eksenini ile kesiştiği noktaya olan uzaklıktır.
- a_i ; Z_{i-1} ve Z_i eksenleri arasındaki en kısa mesafedir.
- α_i ; X_i eksenini etrafında, Z_{i-1} ekseninden Z_i eksenine olan açıdır (sağ el kuralını kullanarak).

Bir dönel eklem için; d_i , α_i ve a_i eklem parametreleridir ve bir robotta sabit olan değerlerdir. Fakat θ_i ; i uzvu $i-1$ uzvuna göre ötelendiğinde veya döndüğünde değişen eklem değişkenidir. Prizmatik eklemde θ_i , α_i ve a_i eklem parametreleri olup, bir robotta sabit olan değerlerdir ve d_i eklem değişkenidir. Buradan itibaren θ_i ve d_i eklem değişkeni olarak adlandırılacaktır. Yani, değişken

miktarlar ve geriye kalan üç geometrik sabit [dönel eklem için (d_i , α_i ve a_i), prizmatik eklem için (θ_i , α_i ve a_i)] eklem parametreleri olarak isimlendirilir.

Yukarıdaki kurallara göre, bir robot kolunun koordinat sistemlerini yerleştirme metodu, algoritmada verilmiştir. Bu algoritmanın bir altı eksenli PUMA robot koluna uygulamaları Şekil 4,7'de verilmiştir.



Şekil 4,7 Bir PUMA Robot Kolu için Uzun Koordinat Sisteminin Oluşturulması (Denavit and Hartenberg, 1955).

Algoritma: Uzun koordinat sisteminin oluşturulması:

n serbestlik derecesine sahip bir robot kolu verilmiş olsun, bu algoritma ile verilen kol şekillerine göre robot kolunun her uzvunda bir koordinat sistemi oluşturulmaktadır. Koordinat sistemlerinin etiketlenmesi, gövdeden başlayıp, end-efektörde bitmektedir. Birbirini izleyen uzuvlar arasındaki bağıntılar, 4×4 homojen transformasyon matrisi ile gösterilebilir.

1. Temel koordinat sistemi oluşturulur. Z_0 eksenini bir nolu eklemin hareket eksenini boyunca uzanacak şekilde ve kolun omuzuna doğru giden gövde üzerinde sağ el kuralına göre bir (x_0, y_0, z_0) ortanormal sistemi oluşturulur. x_0, y_0 eksenleri z_0 eksenine dik olup istenildiği gibi seçilebilir.

Tablo 4,1 PUMA Manipülâtörünün Denavit-Hartenberg Parametreleri (Uzuv koordinat parametreleri) (Denavit and Hartenberg, 1955).

Eklem i	θ_i	α_i	a_i	d_i	Eklem sınırları
1	90°	-90°	0	0	-160/+160
2	0°	0°	431,8 mm	149,09 mm	-215/45
3	90°	90°	-20,32 mm	0	-45/225
4	0°	-90°	0	433,07 mm	-110/170
5	0°	90°	0	0	-100/100
6	0°	0°	0	56,25 mm	-266/266

2. Her i için $i=1, \dots, n-1$ 3'den 6'ya kadar olan adımlar uygulanır.

3. Eklem eksenini oluşturulur. Z_i eksenini, dönel veya kayan $i+1$ ekleminin hareket eksenini boyunca alınır. Sağ-sol kol konfigürasyonları olan robotlar için Z_i ve Z_2 eksenleri omuzdan dışarı doğru çıkar.

4. i 'nci koordinat sisteminin orijini oluşturulur. i 'nci koordinat sisteminin orijini, Z_i ve Z_{i-1} eksenlerinin kesiştiği noktaya veya Z_i ve Z_{i-1} eksenleri ile Z_i eksenini arasındaki ortak dik eksene yerleştirilir.

5. x_i eksenini oluşturulur. $x_i = \pm(Z_{i-1} \cdot Z_i) / \|Z_{i-1} \cdot Z_i\|$ oluşturulur veya paralel olduklarından Z_{i-1} ve Z_i eksenleri arasındaki ortak dikme boyunca oluşturulur.

6. Y_i eksenini oluşturulur. $Y_i = +(Z_i \cdot x_i) / \|Z_i \cdot x_i\|$ şeklinde sağ el kuralına göre koordinat sistemi tamamlanır (θ 'dan 12'ye kadar olan adımlar için gerekiyorsa Z_i ve x_i eksenleri uzatılır).

7. El koordinat sistemi oluşturulur. Genellikle n 'nci eklem dönel bir eklemdir. Z_n , Z_{n-1} yönünde ve robottan dışarı çıkacak şekilde seçilir. X_n , Z_{n-1} yönünde ve robottan dışarı çıkacak şekilde seçilir. X_n , Z_{n-1} ve Z_n eksenlerinin her ikisinde dik olacak şekilde oluşturulur. Y_n 'ne, sağ el koordinat sistemini tamamlamak üzere bir değer verilir.

8. Eklem ve uzuv parametreleri bulunur, her $i=1, \dots, n$ için θ 'dan 12'ye kadar adımlar uygulanır.

9. d_i bulunur. d_i , $(i-1)$ 'nci koordinat sisteminin orijininin, Z_{i-1} eksenini boyunca Z_{i-1} ve X_i ekseninin kesiştiği noktaya kadar olan mesafedir. Bu, eğer i eklemi prizmatik ise, eklem değişkenidir.

10. a_i bulunur. a_i ; Z_i ve X_i eksenlerinin kesiştiği noktadan, X_i eksenini boyunca i 'nci koordinat sisteminin orijinine olan mesafedir.

11. θ_i bulunur. θ_i , Z_{i-1} eksenini etrafında alınan X_{i-1} ekseninden X_i eksenine dönme açısıdır. Bu, i eklemi dönel ise, eklem değişkenidir.

12. α_i bulunur. α_i ; Z_{i-1} ekseninden Z eksenine olan dönme açısıdır.

Her uzuv için D-H koordinat sistemi oluşturulduktan sonra, i 'nci koordinat eksen takımı ile $(i-1)$ 'nci koordinat eksen takımı arasındaki ilişkiyi gösteren bir homojen transformasyon matrisi kolaylıkla türetilebilir. i 'nci koordinat sisteminde ifade edilmiş olan r_i noktasının, aşağıdaki transformasyonlar yapılarak $(i-1)$ 'nci koordinat sisteminde r_{i-1} olarak ifade edilebilir (Şekil 4,6).

1. X_{i-1} eksenini X_i eksenini boyunca yatırmak için Z_{i-1} eksenini etrafında θ_i kadar dönme yapılır.

2. X_{i-1} ve X_i eksenlerini çakıştırmak için, Z_{i-1} eksenini boyunca d_i kadar kaydırma yapılır.

3. İki orijin ile birlikte X eksenini çakıştırmak için X_i eksenini boyunca a_i kadar kaydırma yapılır.

4. İki koordinat sistemini çakıştırmak için X_i eksenini etrafında α_i kadar bir dönme yapılır.

Bu dört işlemten herbiri, bir temel homojen dönme-ötelenme matrisi ile ifade edilebilir ve bu dört temel homojen transformasyon matrisinin çarpımı ile bir bileşik homojen transformasyon matrisi elde edilir (Denavit and Hartenberg, 1955). Bu matris, ${}^{i-1}A_i$ şeklinde gösterilir ve birbirini izleyen i ve $i-1$ koordinat sistemleri için D-H transformasyon matrisi olarak bilinir.

Böylece;

$${}^{i-1}A_i = T_{x,d} \cdot T_{z,\theta} \cdot T_{x,a} \cdot T_{x,\alpha}$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & -S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i \cdot S\theta_i & S\alpha_i \cdot S\theta_i & a_i \cdot C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i \cdot C\theta_i & -S\alpha_i \cdot C\theta_i & a_i \cdot S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

(4.23) nolu eşitliği kullanarak, bu transformasyonun tersi aşağıdaki gibi bulunur,

$${}^{i-1}A_i^{-1} = {}^iA_{i-1} = \begin{bmatrix} C\theta_i & S\theta_i & 0 & -a_i \\ -C\alpha_i \cdot S\theta_i & C\alpha_i \cdot C\theta_i & S\alpha_i & -d_i \cdot S\alpha_i \\ S\alpha_i \cdot S\theta_i & -S\alpha_i \cdot C\theta_i & C\alpha_i & -d_i \cdot C\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$${}^{i-1}A_i = T_{z,\theta} \cdot T_{z,d} \cdot T_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & -S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{i-1}A_i = T_{z,\theta} \cdot T_{z,d} \cdot T_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i \cdot S\theta_i & S\alpha_i \cdot S\theta_i & 0 \\ S\theta_i & C\alpha_i \cdot C\theta_i & -S\alpha_i \cdot C\theta_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

ve yukarıdaki D-H transformasyon matrisinin tersi aşağıdaki gibidir.

$${}^{i-1}A_i^{-1} = {}^iA_{i-1} = \begin{bmatrix} C\theta_i & S\theta_i & 0 & 0 \\ -C\alpha_i \cdot S\theta_i & C\alpha_i \cdot C\theta_i & S\alpha_i & -d_i \cdot S\alpha_i \\ C\alpha_i \cdot S\theta_i & -S\alpha_i \cdot C\theta_i & C\alpha_i & -d_i \cdot C\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

${}^{i-1}A_i$ matrisi kullanılarak, i uzvunda sabit ve i koordinat sistemine göre homojen koordinatlarda ifade edilmiş bir p_i noktası ile, $i-1$ uzvunda oluşturulan $(i-1)$ 'nci koordinat sistemi arasında aşağıdaki gibi bağıntı kurulabilir.

$$P_{i-1} = {}^{i-1}A_i \cdot P_i \quad (4.27)$$

Burada, $P_{i-1} = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}, 1)^T$ ve $P_i = (x_i, y_i, z_i, 1)^T$ dir.

Altı eksenli PUMA robot kolu için ${}^{i-1}A_i$ transformasyon matrisi, Şekil 4.7'de verilen koordinat sistemleri baz alınarak bulunmuş olur.

4.2.6. Manipülâtörler için kinematik denklemler

i 'nci koordinat sisteminin yerini, temel koordinat sistemine göre tanımlayan, homojen 0T_i matrisi, ${}^{i-1}A_i$ koordinat transformasyon matrislerinin çarpımı ile bulunur ve şöyle tanımlanır.

$${}^0T_i = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot \dots \cdot {}^{i-1}A_i = \prod_{j=1}^i {}^{j-1}A_j$$

$i=1, 2, \dots, n$ için

$${}^0T_i = \begin{bmatrix} x_i & y_i & z_i & P_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0R_i & {}^0P_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Burada, $[x_i, y_i, z_i] =$ temel koordinat sistemine göre, i uzvunda oluşturulmuş i 'nci koordinat sisteminin oryantasyon matrisidir ve $R_{3 \times 3}$, 0T_i 'nin kısmı matrisidir.

PUMA uzuv koordinat transformasyon matrisleri aşağıda verilmiştir.

$$[{}^{i-1}A_i]^{-1} = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i \cdot S\theta_i & S\alpha_i \cdot S\theta_i & a_i \cdot C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i \cdot C\theta_i & -S\alpha_i \cdot C\theta_i & a_i \cdot S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_2 \cdot C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & a_2 \cdot S_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} C_3 & 0 & S_3 & a_3 \cdot C_3 \\ S_3 & 0 & -C_3 & a_3 \cdot S_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & -S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} C_5 & 0 & S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & -C_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^5A_6 = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

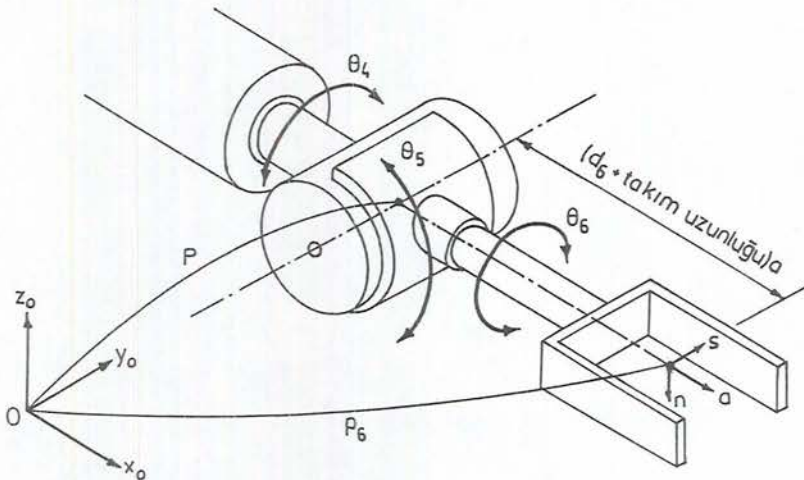
$$T_1 = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3 = \begin{bmatrix} C_1 \cdot C_{23} & -S_1 & C_1 \cdot S_{23} & a_2 \cdot C_1 \cdot C_2 + a_3 \cdot C_1 \cdot C_{23} - d_2 \cdot S_1 \\ S_1 \cdot C_{23} & C_1 & S_1 \cdot S_{23} & a_2 \cdot S_1 \cdot C_2 + a_3 \cdot S_1 \cdot C_{23} + d_2 \cdot C_1 \\ -S_{23} & 0 & C_{23} & -a_2 \cdot S_2 - a_3 \cdot S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$T_2 = {}^3A_4 \cdot {}^4A_5 \cdot {}^5A_6 = \begin{bmatrix} C_4 \cdot C_5 \cdot C_6 - S_4 \cdot S_6 & -C_4 \cdot C_5 \cdot S_6 - S_4 \cdot C_6 & C_4 \cdot S_5 & d_6 \cdot C_4 \cdot S_5 \\ S_4 \cdot C_5 \cdot C_6 + C_4 \cdot S_6 & -S_4 \cdot C_5 \cdot S_6 + C_4 \cdot C_6 & S_4 \cdot S_5 & d_6 \cdot S_4 \cdot S_5 \\ -S_6 \cdot C_6 & S_6 \cdot S_6 & C_6 & d_6 \cdot C_6 + d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Burada,

$$C_i = \cos \theta_i; \quad S_i = \sin \theta_i; \quad C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j); \quad S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$$

$i=6$ için $T = {}^0A_6$ matrisi elde edilir. Bu matris, manipülâtörün uç noktasının, temel koordinat sistemine göre, pozisyon ve oryantasyonunu tanımlar.



Şekil 4,8 El-Koordinat Sistemi ve $[n, s, a]$ (McCarthy, 1987)

$$T = \begin{bmatrix} x_6 & y_6 & z_6 & P_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0R_6 & {}^0P_6 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & s & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & P_x \\ n_y & s_y & a_y & P_y \\ n_z & s_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

n = Elin normal vektörü. Bu vektör robot kolu parmaklarına diktir.

s = Elin kayan vektörü. Bu vektör kavrayıcı açılıp kapanırken parmak hareketi yönündedir.

a = Elin yaklaşma vektörü. Bu vektör el aynasına diktir (kolun takım monte düzlemine diktir).

p = Elin pozisyon vektörü. Bu vektör, temel koordinat sistemi orijininin el koordinat sistemi orijinine doğru uzanır ve genellikle tamamen kapanmış parmakların merkezinde bulunur.

Eğer manipülatör bir B transformasyonu ile bir referans koordinat sistemine bağlanırsa ve H ile tanımlanan son eklem montaj düzlemine bağlanmış bir takıma sahip olursa, B , 0T_6 ve H matrisleri ile birlikte çarpılarak, takım ucu ile referans koordinat sistemi bağıntılandırılabilir.

$${}^{ref}T_{tool} = B \cdot {}^0T_6 \cdot H, H = {}^6A_{tool} \text{ ve } B = {}^{ref}A_0 \quad (4.32)$$

olduğu not edilmelidir

Altı uzuvlu bir manipülatörün direk kinematik problemi şöyle çözülür. Altı adet ${}^{i-1}A_i$ matrisi çarpılarak $T = {}^0A_6$ hesaplanır ve T matrisindeki her eleman hesaplanır. $q = (q_1, q_2, \dots, q_6)^T$ ve koordinat sistemleri verildiğinde, düz kinematik çözümü ile yalnızca bir tek T matrisi bulunduğuna dikkat edilir (dönel eklem için $q_i = \theta_i$ ve prizmatik eklem için $q_i = d_i$ dir) (McCarthy, 1987). Tek sınırlama, robot kolunun her eklemi için θ_i 'nin sınırlarıdır. Tablo 4,1'de, PUMA 560 serisi bir robotun, Şekil 4,7'de verilmiş koordinat sistemine göre eklem sınırları gösterilmiştir.

Bir robot kolu için, bütün ${}^{i-1}A_i$ koordinat transformasyon matrisleri bulunduğundan sonraki iş, T'yi bilgisayarda hesaplamak için uygun bir yöntem bulmaktır. En uygun yöntem, bütün altı adet ${}^{i-1}A_i$ matrislerini elle çarpıp, T matrisinin elemanlarını da bir bilgisayar programı ile hesaplamaktır. Bu metodun dezavantajları;

(1) Matrislerin çarpımları uzun sürer, (2) Kol matrisi, sadece özel bir koordinat sistemi için özel bir robota uygulanabilir (yeterince esnek değildir).

Ayrıca bir diğer metod ise, altı ${}^{i-1}A_i$ matrisleri bilgisayarda çarpılabilir. Bu metod esnektir. Fakat ${}^{i-1}A_i$ 'in dördüncü satır elemanlarının çoğu sıfır olduğundan, hesaplama zamanı uzun sürer (Paul et. al., 1981).

Yeterince hızlı ve esnek metod ise, $T_1 = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3$ oluşturmak için ${}^{i-1}A_i$ 'in ilk üç matrisini; $T_2 = {}^3A_4 \cdot {}^4A_5 \cdot {}^5A_6$ 'yi oluşturmak için ise son üç ${}^{i-1}A_i$ matrisini elle çarpmaktır. Oldukça kolay bir işlemdir. Daha sonra T_1 ve T_2 elemanları bir bilgisayar programına verilir ve verilen matrisleri bilgisayarda çarparak, $T = T_1 \cdot T_2$ kol matrisi bulunur.

Bir PUMA 560 serisi robot için, T_1 aşağıdaki gibi bulunur.

$$T_1 = {}^0A_3 = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} C_1 \cdot C_{23} & -S_1 & C_1 \cdot S_{23} & a_2 \cdot C_1 \cdot C_2 + a_3 \cdot C_1 \cdot C_{23} - d_2 \cdot S_1 \\ S_1 \cdot C_{23} & C_1 & S_1 \cdot S_{23} & a_2 \cdot S_1 \cdot C_2 + a_3 \cdot S_1 \cdot C_{23} + d_2 \cdot C_1 \\ -S_{23} & 0 & C_{23} & -a_2 \cdot S_2 - a_3 \cdot S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

ve T_2 matrisi de aşağıdaki gibi bulunur.

$$T_2 = {}^3A_6 = {}^3A_4 \cdot {}^4A_5 \cdot {}^5A_6$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} C_4 \cdot C_5 \cdot C_6 - S_4 \cdot S_6 & -C_4 \cdot C_5 \cdot S_6 - S_4 \cdot C_6 & C_4 \cdot S_5 & d_6 \cdot C_4 \cdot S_5 \\ S_4 \cdot C_5 \cdot C_6 + C_4 \cdot S_6 & -S_4 \cdot C_5 \cdot S_6 + C_4 \cdot C_6 & S_4 \cdot S_5 & d_6 \cdot S_4 \cdot S_5 \\ -S_5 \cdot C_6 & S_5 \cdot S_6 & C_5 & d_6 \cdot C_5 + d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Şekil 4,7'de gösterilen PUMA robot kolu için, T kol matrisi aşağıdaki gibi bulunur.

$$T = T_1 \cdot T_2 = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3 \cdot {}^3A_4 \cdot {}^4A_5 \cdot {}^5A_6 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Burada;

$$\begin{aligned} n_x &= C_1 \cdot [C_{23} \cdot (C_4 \cdot C_5 \cdot C_6 - S_4 \cdot S_6) - S_{23} \cdot S_5 \cdot C_6] - S_1 \cdot (S_4 \cdot C_5 \cdot C_6 + C_4 \cdot S_6) \\ n_y &= S_1 \cdot [C_{23} \cdot (C_4 \cdot C_5 \cdot C_6 - S_4 \cdot S_6) - S_{23} \cdot S_5 \cdot C_6] + C_1 \cdot (S_4 \cdot C_5 \cdot C_6 + C_4 \cdot S_6) \\ n_z &= -S_{23} \cdot [C_4 \cdot C_5 \cdot C_6 - S_4 \cdot S_6] - C_{23} \cdot S_5 \cdot C_6 \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$\begin{aligned} s_x &= C_1 \cdot [-C_{23} \cdot (C_4 \cdot C_5 \cdot S_6 + S_4 \cdot C_6) + S_{23} \cdot S_5 \cdot S_6] - S_1 \cdot (-S_4 \cdot C_5 \cdot S_6 + C_4 \cdot C_6) \\ s_y &= S_1 \cdot [-C_{23} \cdot (C_4 \cdot C_5 \cdot S_6 + S_4 \cdot C_6) + S_{23} \cdot S_5 \cdot S_6] + C_1 \cdot (-S_4 \cdot C_5 \cdot S_6 + C_4 \cdot C_6) \\ s_z &= S_{23} \cdot (C_4 \cdot C_5 \cdot S_6 + S_4 \cdot C_6) + C_{23} \cdot S_5 \cdot S_6 \end{aligned} \quad (4.37)$$

$$\begin{aligned} a_x &= C_1 \cdot (C_{23} \cdot C_4 \cdot S_5 + S_{23} \cdot C_5) - S_1 \cdot S_4 \cdot S_5 \\ a_y &= S_1 \cdot (C_{23} \cdot C_4 \cdot S_5 + S_{23} \cdot C_5) + C_1 \cdot S_4 \cdot S_5 \\ a_z &= -S_{23} \cdot C_4 \cdot S_5 + C_{23} \cdot C_5 \end{aligned} \quad (4.38)$$

$$\begin{aligned} p_x &= C_1 \cdot [d_6 \cdot (C_{23} \cdot C_4 \cdot S_5 + S_{23} \cdot C_5) + S_{23} \cdot d_4 + a_3 \cdot C_{23} + a_2 \cdot C_2] - S_1 \cdot (d_6 \cdot S_4 \cdot S_5 + d_2) \\ p_y &= S_1 \cdot [d_6 \cdot (C_{23} \cdot C_4 \cdot S_5 + S_{23} \cdot C_5) + S_{23} \cdot d_4 + a_3 \cdot C_{23} + a_2 \cdot C_2] + C_1 \cdot (d_6 \cdot S_4 \cdot S_5 + d_2) \\ p_z &= d_6 \cdot (C_{23} \cdot C_5 - S_{23} \cdot C_4 \cdot S_5) + C_{23} \cdot d_4 - a_3 \cdot S_{23} - a_2 \cdot S_2 \end{aligned} \quad (4.39)$$

sağlama yapılırsa,

$$\theta_1 = 90^\circ, \quad \theta_2 = 0^\circ, \quad \theta_3 = 90^\circ, \quad \theta_4 = 0^\circ, \quad \theta_5 = 0^\circ, \quad \theta_6 = 0^\circ$$

o zaman, T matrisi aşağıdaki gibi bulunur.

$$T = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & -149,09 \\ 0 & 0 & 1 & 921,12 \\ -1 & 0 & 0 & 20,32 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

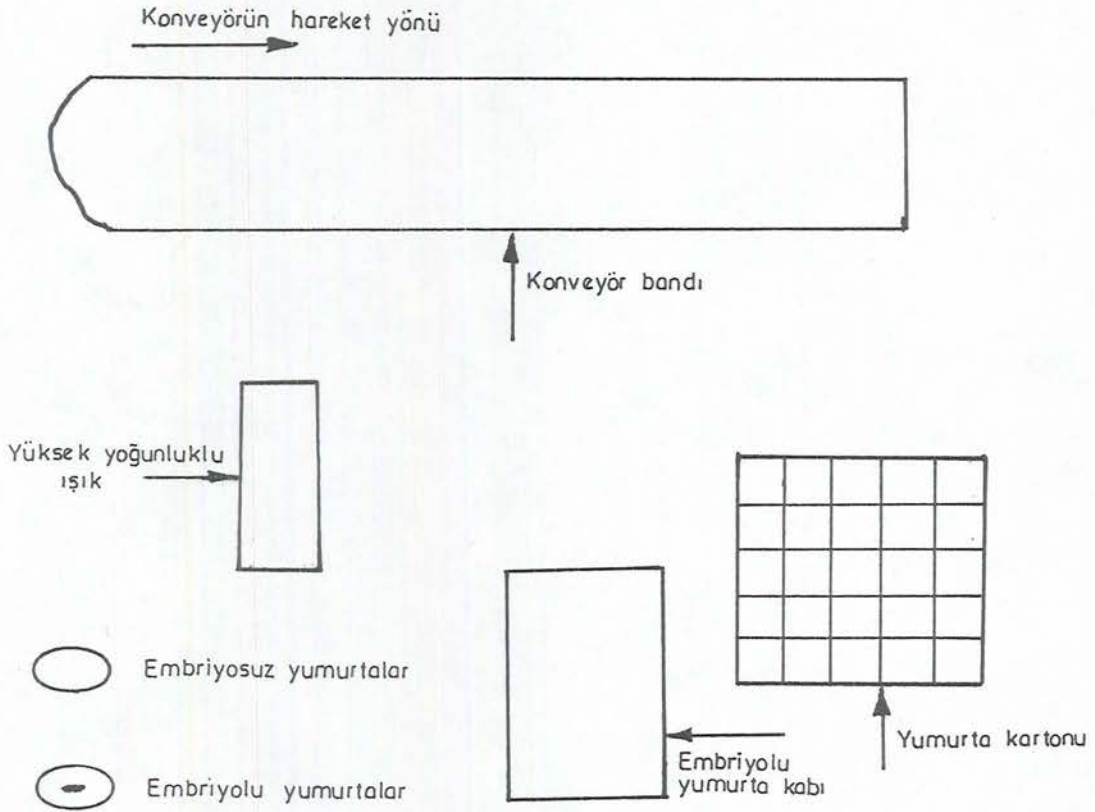
Bu matris, Şekil 4,7'de verilen koordinat sistemlerine uymaktadır. (4.36) ve (4.39) nolu eşitliklerden, T kol matrisini hesaplamak için, kullanılan bilgisayarda, 20 toplama işlemi yapılır (sadece T'nin üst sağdaki 3x3 alt matrisini hesaplar ve n normal vektörü $n = sxa$ vektörel çarpımıyla bulunursa). Ayrıca, eğer d_6 takım uzunluğuyla birleştirilirse, $d_6 = 0$ olur ve yeni takım uzunluğu d_6 birim artmış olur. Bu da fonksiyon çağırma sayısını 12, çarpma sayısını 35 ve toplamayı 16'ya düşürür.

5. DÖRT SERBESTLİK DERECELİ BİR ROBOT MANİPÜLATORÜ İLE YUMURTA KONTROLU VE PAKETLEME İŞLEMİ

5.1. Yumurta Kontrol ve Paketleme İşleminin İş Akışı

Böyle bir sistemin işlem sırası (hareket akışı) aşağıda verilmiştir.

1. Konveyör bandından bir yumurtanın alınması .
2. Yumurtanın parlak bir ışığa tutularak, embriyolu olup olmadığının saptanması. Bu işlem "candling" olarak bilinmektedir. Candling; yumurtanın yüksek yoğunluklu ışığa tutularak, embriyolu olup olmadığının belirlenmesi işlemine verilen isimdir.



Şekil 5,1 Bir Yumurta Paketleme Sisteminin Genel Yerleşimi.

3. Yumurtanın, embriyolu olup olmama durumuna göre, embriyolu yumurta kabına veya yumurta kartonuna konulması.

Şekil 5,1 bir yumurta kontrolü ve paketlenme işlemi için genel şematik yerleşimi göstermektedir. Yumurta kontrolü ve paketlenme işleminin gerçekleştirilebilmesi için, önce bazı kabuller ve tanımlamalar yapılmalıdır. Bu kabuller, konveyör hızı, yumurta ağırlığı, karton boyutu, robot geometrisi, sensörlerin tipi ve tutucu geometrisidir.

Yumurta kontrol ve paketlenme işleminin yapılabilmesi için aşağıda verilenler gerçekleştirilmelidir.

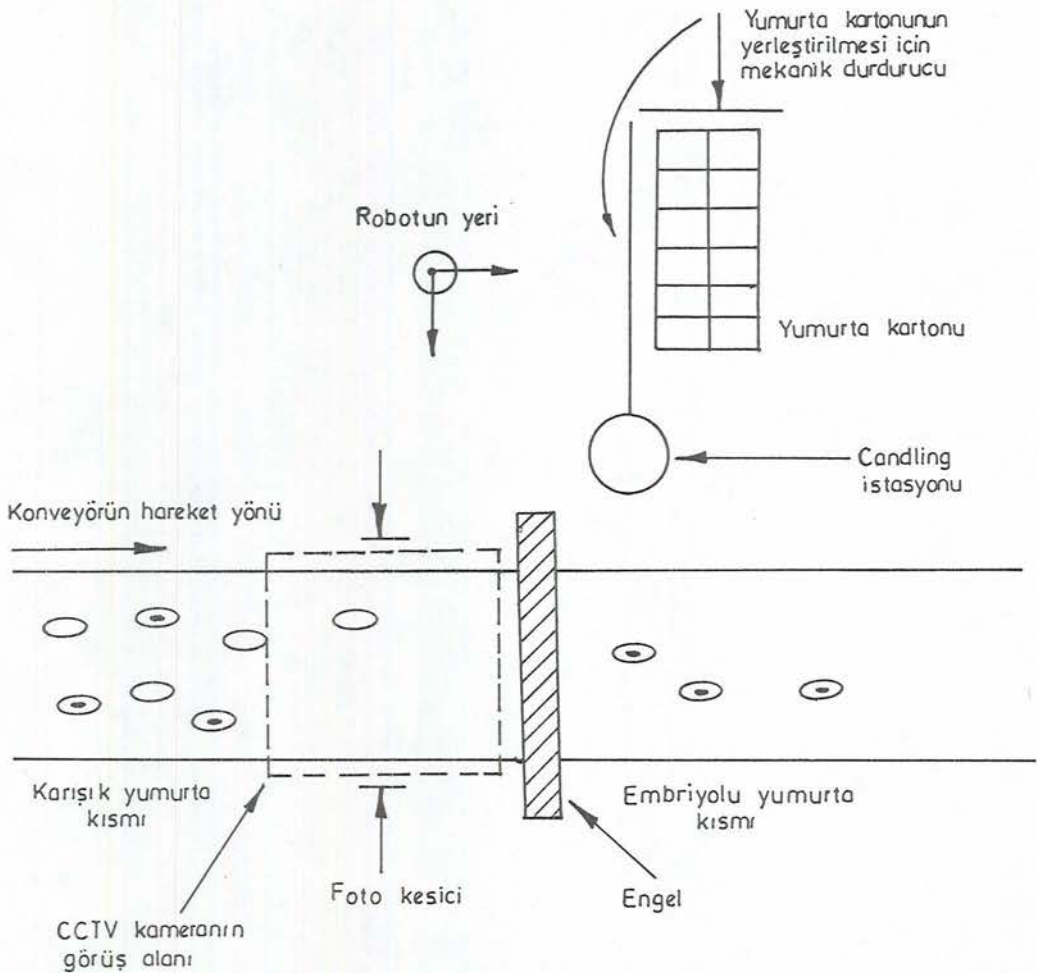
1. Robot dizaynı ve işlem tanımlamaları.
2. Motor kontrol sırası.
3. Tüm eksenler için motor ve tahrik mekanizmasının seçimi.
4. Kodlayıcı seçimi.
5. Bilgisayar şekli ve kontrol yapısı.
6. Kamera seçimi, foto optik kesicilerin kullanımı, renk/yoğunluk ölçme donanımı ve kalibrasyonu (ayar edilmesi).

Şekil 5,2 yumurta kontrolü ve paketlenme işlemi için daha detaylı bir genel yerleşimi göstermektedir.

Bu sistemde:

1. Bir yumurta, ışıkla karşılaştığı zaman, foto kesici konveyörün otomatik olarak durduracaktır.
2. Görüş alanındaki yumurtanın incelenmesi için bir CCTV kamera kullanılacaktır.

3. Yumurtanın embriyolu olup olmadığının kontrolü, yumurtayı parlak bir ışıkla şeffaf olarak aydınlatmayla, ardından da yumurtanın yoğunluğunu ve rengini okumak için bir görme sensörünün kullanılmasıyla gerçekleştirilecektir.
4. Yumurta incelendikten sonra, eğer embriyosuz ise yumurta kartonuna, embriyolu ise embriyolu yumurta kabına yerleştirilecektir.



Şekil 5,2 Yumurta Kontrolü ve Paketleme Sisteminin Genel Yerleşimi.

5.2. Yumurta Kontrol ve Paketleme İşleminin Özellikleri

Robot manipülatörünün θ , r , ϕ ve z olmak üzere dört serbestlik dereceli olduğunu kabul ediyoruz. Yumurta kontrol ve paketleme işleminin özellikleri aşağıda verilmiştir.

1. Çevrim süresi \leq maksimum 3,0 s.
2. Bir çevrimde üç ayrı hareket.
 - a. Konveyörü hareket ettirmek ve bir yumurtanın konveyör üzerinden alınması .
 - b. Candling istasyonuna hareket.
 - c. Candling istasyonundan, yumurtayı kartona veya embriyolu yumurta kabına koymak için hareket.
3. Bir çevrim esnasında üç duraklama,
 - a. Tutucunun kapanması veya açılması için 0,2 s. (yumurtayı kavramada),
 - b. Candling işleminin yapılması için 0,05 s.,
 - c. Tutucunun açılmasıyla, yumurtayı kartona yerleştirmek için 0,2 s.
4. Yumurtanın ağırlığı \leq 65 gr. (0,637 N).
5. Tutucu ağırlığı \leq 3,614 N.
6. Pozisyon kararlılığı : en az 1,27 mm.
7. Tüm eksenler aynı anda hareket etmeli ve aynı anda hareketi bitirmeli (yani, koordineli hareket gereklidir).

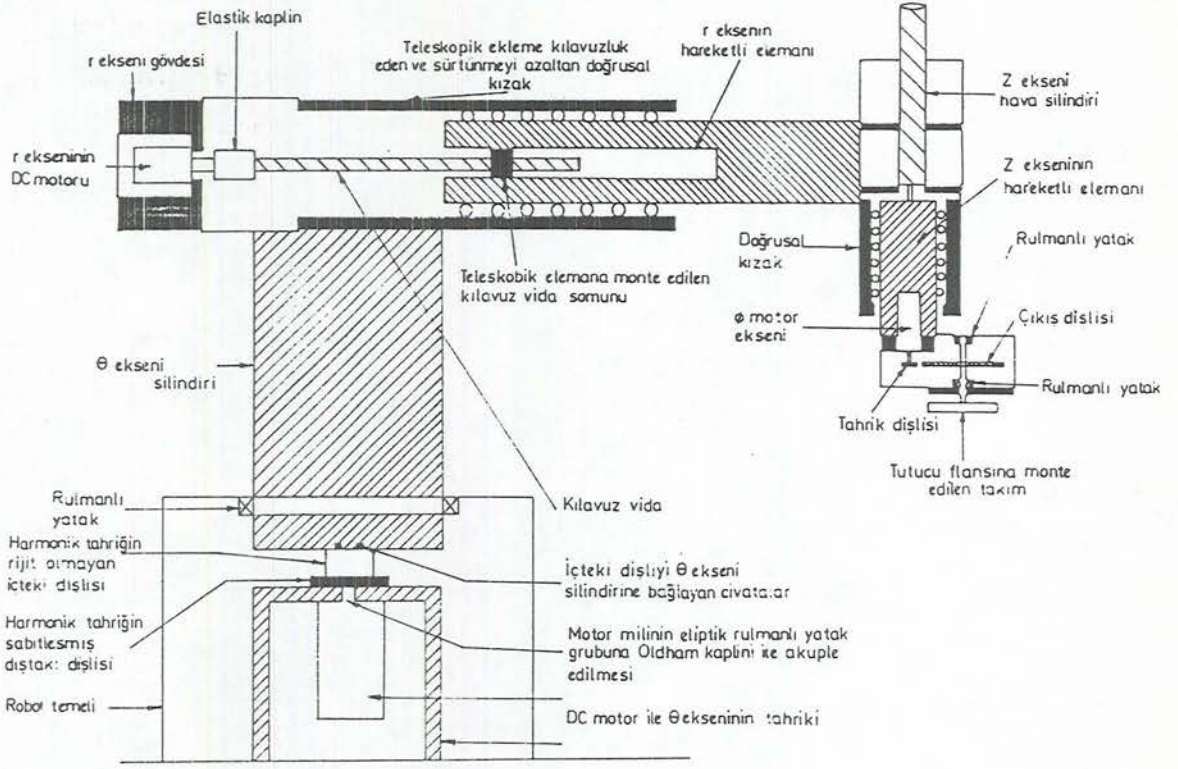
5.3. Robotun Mekanik Tanımı

Verilen özellikleri sağlayacak bir robot, sürekli hareket halinde olmalı ve iki prizmatik ekleme sahip olmalıdır. Gerçekte, kol hareket ederken, incelenecek yumurtanın oryantasyonuna izin verecek bir dönел eksene gerek vardır. Böylece, bir θ - r - z manipülatörü yumurtayı

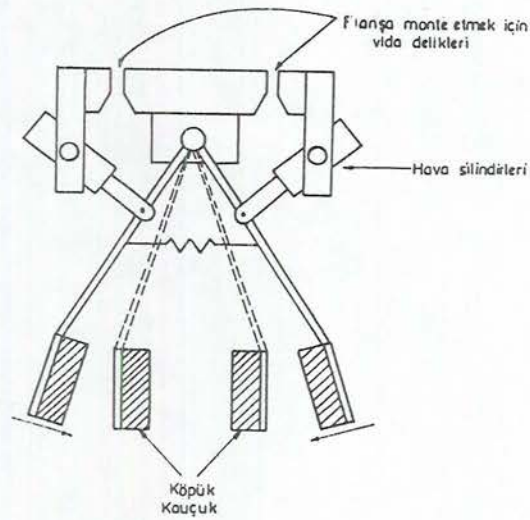
yakalayıp kaldırabilir. Ekseni etrafında dönen ve Θ eksenine paralel olan ϕ eklemine de ayrıca gerek vardır. Bu eksenlerin özellikleri aşağıda verilmiştir.

- a. r : 457,2 - 609.6 mm.
- b. Θ : $\pm 90^\circ$ belin dönmesi,
- c. ϕ : 360°
- d. z : 50,8 mm. düşey hareket şeklindedir.

Robotun asıl eksenini, yükün dayandığı noktada bütün robot mekanizmasını (diğer eklemleri içeren), tutucuyu ve yükü (yumurta) taşıdığından Θ olacaktır. Bu eklemi tahrik etmek için daha büyük servomotor gerekmektedir. Bu tahrik edicinin, kendi ağırlığını hareket ettirmesi gerekmediğinden, tahrik edici harmonik bir tahrike ve sabit bir temele monte edilen bütün gruba (assemble) akuple edilecektir. "r" eksen hareketi, omuz grubuna monte edilmiş bir servomotorla elde edilecek ve 177,8 mm. uzunluğundaki kılavuz vidaya akuple edilecektir. "z" eksenini ise; kendi uç hızı, r eksen hareketine dik olduğundan r bağlantısının sonuna (ucuna) yerleştirilecektir. "z" ekseninin hareketi, yalnızca iki farklı dikey pozisyon gerekli olduğundan, bir pnömatik silindirin kullanılması ile elde edilecektir. ϕ eklemi, z ekseninin karşı ucuna yerleştirilecek ve basit bir dişli sistemine akuple edilmiş küçük bir servomotorla tahrik edilecektir. Üç motordan herbirisi, mil pozisyonlarının gözlenebilmesine izin veren, kendi yatak plakalarına monte edilen farklı optik kodlayıcılara sahip olacaktır (Groover, 1989). Θ ekseninde hareket etmesi gerekli robot kısmının toplam ağırlığının 26,68 N. (yük dahil) olduğu kabul edilecektir. Ağırlık dağılımı Tablo 5,1'de gösterilmiştir. Bu manipülatör ve tutucu Şekil 5,3 ve Şekil 5,4'de gösterilmiştir.



Şekil 5,3 Yumurta Kontrolü ve Paketleme İşleminde kullanılan Dört Serbestlik Dereceli Robot Manipülatörü. (Klafter et. al., 1989)



Şekil 5,4 Yumurta Yakalamada Kullanılan Tutucu (Klafter et. al., 1989)

Tablo 5,1 Manipölatör Eksen yüklerinin dağılımı.

1.	Navlun (faydalı yük, yumurta) ≤ 65 gr. (0,637 N.)
2.	Tutucu (açma-kapama mekanizması dahil) $\leq 3,614$ N.
3.	ϕ eksenini dişli kutusu $\leq 5,004$ N.
4.	ϕ eksenini motoru $\leq 1,946$ N.
5.	z eksenini tahrik edicisi $\leq 1,946$ N.
6.	r eksenini yapısı (609,4 mm uzunluğunda) $\leq 6,95$ N.
7.	r eksenini kılavuz vida mili $\leq 4,45$ N.
8.	r eksenini motoru $\leq 1,946$ N.

5.4. Robotun Hareket Sırası

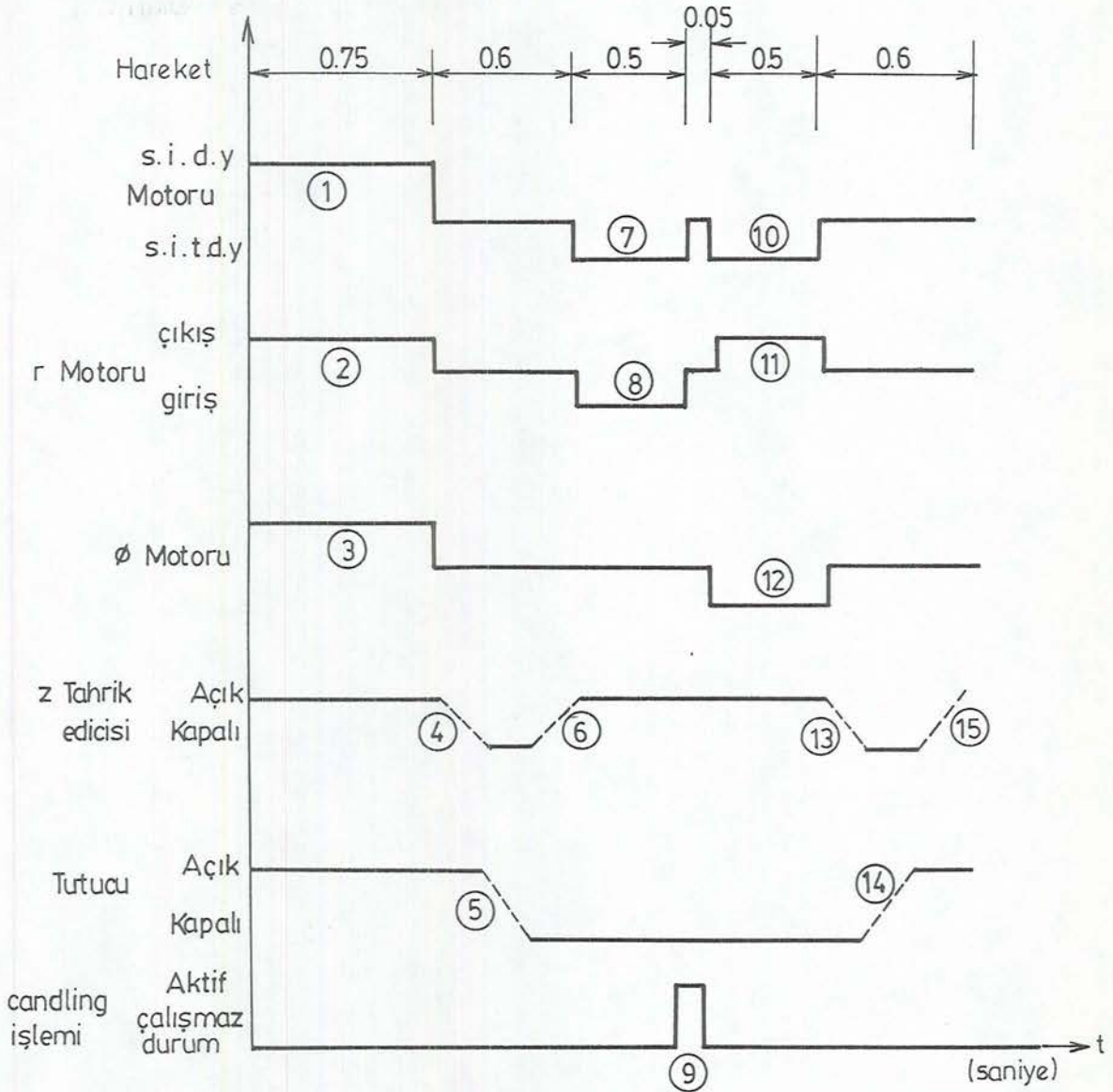
Robot tutucusu, başlangıçta yumurta kartonunun üzerinde bulunsun. Eksenlerin herbiri hareket ederken ayrıca candling işlemi ve tutucu hareketi de hareket-zaman diyagramlarında gösterilmiştir. Şekil 5,5'de her büyüklüğünün durumları gösterilmektedir. Eksenlerin hareketleri esnasında, hareket sırasındaki durumlardan iki veya üç işlemi içerdiği görülmektedir. Belirsiz durumlar da, kesik çizgiyle gösterilmiştir. Bir eksen, hareketini belirtilenden daha kısa zaman periyodunda bitirebilmesine rağmen, koordineli harekette en uzun zamanda işlemi tamamlayan eksenin, diğer eksenlerle birlikte hareket ettiği görülmektedir.

Robotun hareket sırası aşağıdaki gibidir.

1. Yumurtayı yakalamak için θ eksenini etrafında, saat ibresinin dönüş yönünde hareket (maksimum 150°).

2. Yumurtayı yakalamak için r ekseninin hareketi (maksimum 76,2 mm.)
3. Yumurta uzunlamasına yakalandığı için, tutucunun ϕ eksenini etrafında dönme hareketi (maksimum 360°).
1, 2, 3 durumlar için maksimum 750 ms.
4. z ekseninde aşağı doğru hareket, 200 ms.
5. Tutucunun kapanması, yumurtanın yakalanması, 200 ms.
6. z ekseninde yukarı hareket, 200 ms.
7. Yumurtanın candling istasyonuna getirilmesi için θ eksenini etrafında saat ibresinin tersi dönüş yönünde dönme hareketi (maksimum 75°).
8. Yumurtanın candling istasyonuna getirilmesi için, r ekseninin geriye doğru hareketi (maksimum 76,2 mm.).
7'nci ve 8'nci durumlar için maksimum 500 ms.
9. Yumurtanın candling istasyonunda beklemesi, görme işlemi için 50 ms.
10. Yumurtayı, kartona koymak için saat ibresinin tersi dönüş yönünde veya yumurtayı embriyolu yumurta kabına koymak için saat ibresinin dönüş yönünde θ eksenini etrafında dönme hareketi (maksimum 75°).
11. Yumurtayı kartona veya embriyolu yumurta kabına koymak için r ekseninde ileri hareket (maksimum 76,2 mm.).
12. Yumurtayı kartona veya embriyolu yumurta kabına koymak için, ϕ eksenini etrafında geri dönme hareketi (maksimum 360°).
10'dan 12'nci adıma kadar toplam süre 500 milisaniyedir.
13. Yumurtayı kartona veya embriyolu yumurta kabına koymak için z ekseninde aşağı doğru hareket, 200 ms.

14. Tutucunun candling edilmiş yumurtayı depo etmesi için açılması 200 ms.
15. Gelecek çevrime hazır olmak için, z ekseninde yukarı doğru hareket, 200 ms.



Şekil 5,5 Embriyosuz Yumurta için Hareket-Zaman Diyagramı

5.5. Motor Ve Tahrik Mekanizması Seçimi

θ , r , z , ϕ eksenlerinin dizaynı ayrı ayrı ele alınarak yapılacaktır. z ekseninin ve tutucunun aşağı-yukarı hareketi, bir pnömatik silindir ile elde edilecektir. z ekseninin amacı, tutucu tarafından kavranmış olan yumurtanın, konveyör bandına çarpmadan, candling istasyonuna taşınmasıdır. z eksenini sayesinde, manipülatörün takım ucuna monte edilecek olan servomotor elimine edilerek ağırlık ve maliyetten tasarruf edilmiş olur.

θ ilk servo kontrollü eksen olarak seçilir. Çünkü, en büyük yükü θ eksenini hareket ettirecektir. Daha sonra, eksenleri tahrik edecek motor seçimi yapılacaktır.

Motor seçimi için hesaplama işlemi dört bölüme ayrılmıştır (Klafter et. al., 1989).

- a. maksimum moment ve maksimum sürekli moment hesabı,
- b. maksimum akımın hesabı,
- c. rotor sıcaklığı hesabı,
- d. güç kaynağı için gerekli maksimum voltaj hesabı.

Eğer, bu bölümlerin herhangi birinde, özel bir şart sağlanmaz ise, Tablo 5,2'ye geri dönüp, ya tablodaki başka bir motor seçilerek ya da aynı motor için başka bir sarım seçilerek, motor parametrelerinin hepsi veya bazıları değiştirilmelidir.

Motor seçim işleminde yapılacak ilk iş, aşağıdaki özelliklerin belirlenmesidir.

Tablo 5,2 Robot Eklemlerini Tahrik Etmede Kullanılan Motor Listesi (Klafter et. al., 1989)

Motor No	I_N	B 10^{-3}	T_e	T_{pk}	$(T_{\text{const.}})_{\text{max}}$	K_t	I_{dessa}	R_e^b	$R_{t,k}$	Ψ	Θ_{armmax}	K_E	Sarımsayı
540	,0038	9,55	3	240	29	10,02	24	1,61	5,0	,00393	155	7,41	A = 1
	,0038	9,55	3	240	29	12,63	19	2,39	5,0	,00393	155	9,34	B = 2
	,0038	9,55	3	240	29	15,91	15	3,55	5,0	,00393	155	11,76	C = 3
	,0038	9,55	3	240	29	20,04	12	5,39	5,0	,00393	155	14,82	D = 4
541	,005	1,43	3	282	38	11,77	24	1,44	4,6	,00393	155	8,70	A = 1
	,005	1,43	3	282	38	14,83	19	2,31	4,6	,00393	155	10,96	B = 2
	,005	1,43	3	282	38	18,64	15	3,66	4,6	,00393	155	13,81	C = 3
	,005	1,43	3	282	38	23,54	12	5,81	4,6	,00393	155	17,40	D = 4
2115	,0044	2,86	3	150	30	6,12	24,5	,469	5,0	,00393	155	4,5	A = 1
	,0044	2,86	3	150	30	7,48	20,1	,718	5,0	,00393	155	5,5	B = 2
	,0044	2,86	3	150	30	9,52	16,2	1,14	5,0	,00393	155	7,0	C = 3
	,0044	2,86	3	150	30	11,9	12,6	1,84	5,0	,00393	155	8,8	D = 4
	,0044	2,86	3	150	30	15	10,0	2,87	5,0	,00393	155	11,1	E = 5
	,0044	2,86	3	150	30	18,7	8,0	4,52	5,0	,00393	155	13,8	F = 6
	,0044	2,86	3	150	30	23	6,5	7,01	5,0	,00393	155	17,0	G = 7
	,0044	2,86	3	150	30	29	5,2	11,08	5,0	,00393	155	21,5	H = 8
E-532	4,4487 10^{-5}	6,743 10^{-4}	,02118	2,566	,353	,10458	50	2,04	4,18	0,00393	155	10,95	a=1
Pitman 9432	4,1663 10^{-4}	2,0196 10^{-4}	,002824	,0975	,02231	,015535	12	1,84	22,7	0,00393	155	1,93	A=1

Ayrıca, motor seçimi hesaplamalarında kullanılan notasyonların anlamları aşağıda verilmiştir.

ω_{pk} = Motor milinin maksimum açısal hızı (rad/s)

α_{pk} = Motor milinin maksimum açısal ivmesi (rad/s²)

t_a = İvme (hızlanma) süresi (s)

$t_{c.v}$ = Sabit hız süresi (s)

t_d = Durma süresi (s)

J_L = Efektif atalet momenti (kg.m²)

BL = Yükün viskoz sönümlenmesi (N.m.s/rad)

T_L = Efektif statik moment (N.m) (ataletsiz viskoz olmayan ve sabit kabul edilen)

Θ_{amb} = Çevre sıcaklığı (°C)

$(I_{ps})_{\text{max}}$ = Güç kaynağının maksimum akımı (A)

$(V_{ps})_{\text{max}}$ = Güç kaynağının maksimum voltajı (V)

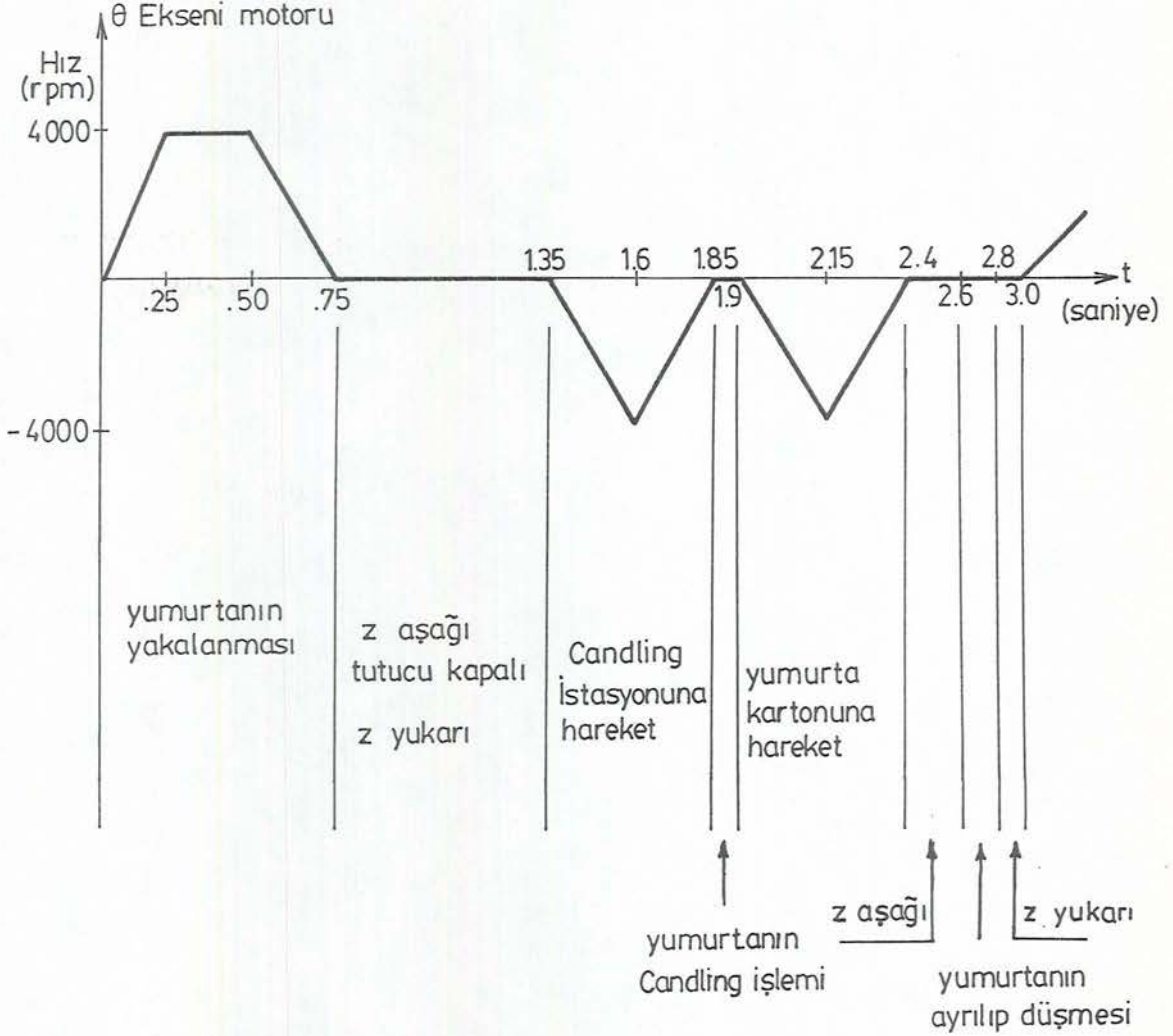
5.5.1. Θ Ekseni için motor ve tahrik mekanizması seçimi

Her çevrim başına üç ayrı açısal harekete gerek vardır. Θ ekseni için ilk açısal hareket, saat ibrelerinin dönüş yönünde tutucu parmaklarının (yumurta kartonundan veya embriyolu yumurta kabının 75° konumundan) yumurtaya göre pozisyonlandırılması için 150° 'lik bir dönme hareketidir. Bu anda z ekseni aşağıya doğru hareket eder ve tutucu kapanır. Bu hareket, yaklaşık 0,4 saniyede olur. Z ekseni yukarı doğru hareket eder ve manipülatör, yumurtayı candling istasyonuna getirmek için saat ibrelerinin tersi dönüş yönünde yaklaşık olarak 75° döndürülür. Bu, ikinci açısal harekettir. 0,05 s. duraklamadan sonra kol; yumurta embriyosuz ise saat ibrelerinin tersi dönüş yönünde 75° dönerek yumurtayı kartona yerleştirir. Embriyolu ise, saat ibrelerinin dönüş yönünde 75° dönerek, yumurtayı embriyolu yumurta kabına bırakır.

Bu hareketler Şekil 5,6'da gösterilmiştir. Burada, trapez (veya üçgen) hız profilinin kabul edildiği, hızlanma ve yavaşlama sürelerinin her ikisinde 0,25 s. olduğu görülmektedir. Bu süreler, Tablo 5,1'deki spesifikasyonların yerine getirilmesine izin verecek şekilde seçildiği halde, tek bir çevrim esnasında gerekli üç hareketin herbirisi için uygun başlama ve durma sürelerini saptamak amacıyla Şekil 5,5'de hareket-zaman diyagramına ayrıca yer verilmiştir.

Harmonik tahrik hız azalma oranı N'nin seçimi son derece önemlidir. N'nin değeri büyük olursa, efektif kütle ataleti azalacaktır (N'nin karesi ile ters orantılı olarak). Bu, yükü hızlandırmak ve yavaşlatmak için daha küçük motor kullanılacağı anlamına geldiğinden bir avantajdır. Ancak, oran artarken, tahrik edicinin arzu edilen konuma ulaşması için yön değişimleri gerekli olacaktır. Ayrıca, güç kaynağı voltajının daha büyük olması gerekir. Harmonik tahrik redüksiyon oranını 80:1 olarak almak yeterli olacaktır. Buna ilaveten, harmonik tahriğin dinamik

veriminin %70 olduğu kabul edilmiştir (harmonik tahrik için verim aralığı genellikle, %40-80 arasındadır ve giriş hızına bağlıdır) (Klafter et. al., 1989).



Şekil 5,6 θ Ekseni Hız Profili (Bir Tam Çevrim)

5.5.1.1. Θ Ekseni için adım-adım motor seçimi

- Ön hesaplamalar

a. Efektif atalet momenti :

$$J_L = \frac{m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2}{9.81 \eta N^2}$$

$$W_1 = 13,3448 \text{ N}$$

$$W_2 = 13,3448 \text{ N}$$

$$r_1 = 0,3048 \text{ m}$$

$$r_2 = 0,6096 \text{ m}$$

η : Harmonik tahriğin verimi = 0,70

N = Harmonik tahriğin redüksiyon oranı = 80:1

r ekseninin ileri hareketinin yarısında omuz grubu ağırlığı ($W_1=13,3448 \text{ N.}$) kabul edilir. r eksenini, (yani $r_1=0,3048 \text{ m.}$). Ayrıca, ϕ ve z eksenlerinin tutucu ve yüklerle birlikte ağırlığı ($W_2=13,3448 \text{ N.}$), verilen uç noktada yerleştirilecek şekilde kabul edilmiştir. (yani, $r_2=0,6096 \text{ m.}$) Bir nokta kütle yaklaşımı yapılır. Böylece, efektif atalet momenti;

$$J_L = \frac{13,3448 \cdot [(0,3048)^2 + (0,6096)^2]}{9,81 \cdot 0,70 \cdot 80^2} = 1,4105 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$$

$$J_L = 1410,5 \text{ gr.cm}^2$$

$$b. \quad w_{pk} = \frac{rpm \cdot 2\pi}{60} = \frac{4000 \cdot 2\pi}{60} = 418,87 \text{ rad/s}$$

c. $t_s=0,25 \text{ s.}$ $B_L=0,$ $T_L=0$ (efektif statik moment).

Bu eksen için ağırlık, moment oluşturmadığı yataklar ve harmonik tahrik sürtünmeleri bağıl olarak küçük olduğu için $T_L=0$ kabul edilir.

MOTOR SEÇİMİ

a. maksimum ve maksimum sürekli moment hesabı

1. Motor parametrelerinin hepsinin sıfır olduğu varsayılır (yani, $J_M = T_f = B = 0$).

$$T_a = \frac{J_L \cdot \omega_{pk}}{t_a} + T_L + B_L \cdot \omega_{pk} = \frac{1,4105 \cdot 10^{-4} \times 418,87}{0,25} = 23,632 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_d = \frac{-J_L \cdot \omega_{pk}}{t_s} + T_L = \frac{-1,4105 \times 10^{-4} \cdot 418,87}{0,25} = -23,632 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_{cv} = T_L + B_L \cdot \omega_{pk}$$

$T_L = 0$ ve $B_L = 0$ olduğundan $T_{cv} = 0$ olur.

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{t_a \cdot T_a^2 + t_s \cdot T_d^2 + t_{cv} \cdot T_{cv}^2 + t_d \cdot T_{d\omega}^2}{t_a + t_s + t_{cv} + t_d}}$$

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{3 \cdot 0,25 \cdot (23,632)^2 + 3 \cdot 0,25 \cdot (-23,632)^2}{3}}$$

$$T_{rms} = 16,710 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

2. Tablo 5.2'ye bakılır ve aşağıdaki şartların hepsini sağlayan en ucuz motor seçilir.

$$(a) T_{pk} > T_a$$

$$(b) T_{pk} > T_d$$

$$(c) (T_{cont})_{max} > T_{rms}$$

$$T_{pk} = 166,50 > T_a \text{ ve } |T_d|$$

$$(T_{cont})_{max} = 20,50 > T_{rms}$$

3. Adım ikide seçilen motor için, Tablo 5,2'den J_M , T_f ve B alınır. T_a , T_d , T_{cv} ve T_{rms} tekrar hesaplanır.

$$J_M = 2,6833 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$T_f = 0,02118 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$B = 6,743 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$$

$$T_a = (J_M + J_L) \cdot \frac{\omega_{pk}}{t_a} + T_f + (B + B_L) \cdot \omega_{pk} + T_L$$

$$T_a = (2,6833 \cdot 10^{-5} + 1,4105 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{418,87}{0,25} + 0,02118 + 6,743 \cdot 10^{-5} \cdot 418,87$$

$$T_a = 0,3307 \text{ N.m} = 33,07 \text{ N.cm}$$

$$T_a = (J_m + J_L) \cdot \frac{\omega_{pk}}{t_s} - T_f - T_L$$

$$T_a = (2,6833 \cdot 10^{-5} + 1,4105 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{418,87}{0,25} - 0,02118$$

$$T_a = 0,26 \text{ N.m} = 26,01 \text{ N.cm}$$

$$T_{cv} = T_f + (B + B_L) \cdot \omega_{pk} + T_L$$

$$T_{cv} = 0,02118 + 6,743 \cdot 10^{-5} \cdot 418,87$$

$$T_{cv} = 0,04942 \text{ N.m} = 4,9424 \text{ N.cm}$$

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{t_a \cdot T_a^2 + t_s \cdot T_a^2 + t_{cv} \cdot T_{cv}^2 + t_a \cdot T_{aw}^2}{t_a + t_s + t_{cv} + t_a}}$$

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{3 \cdot 0,25 \cdot (33,07)^2 + 3 \cdot 0,25 \cdot (26,01)^2 + 0,25 \cdot (4,942)^2}{3}}$$

$$T_{rms} = 21,084 \text{ N.cm}$$

4. Adım 2'deki eşitsizlikler kontrol edilir. Eger, J_s , B ve T_f 'nin yeni değerleri bir motor değiştirmesini gerektirmiyorsa, bu motor maksimum sürekli moment şartlarını yerine getirmektedir. Daha sonra adım 5'e geçilir. Eger adım 2'deki eşitsizlikler sağlanmıyorsa,

Tablo 5,2'deki diğer bir motora geçilir. Motor değişimi gerekmeyinceye kadar, 3 ve 4'ncü adımlar tekrar edilir. Daha sonra 5'nci adıma geçilir.

$$T_{pk} = 169,50 > T_a \text{ ve } |T_d|$$

$$(T_{cont})_{max} = 20,50 < T_{rms}$$

Adım 2'deki eşitsizlik sağlanamadığından Tablo 5,2'deki bir diğer motora geçilir ve 3'ncü adım tekrar edilir.

$$\begin{aligned} 3. \quad J_M &= 4,4487 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ T_f &= 0,02118 \text{ N} \cdot \text{m} \\ B &= 6,743 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad} \end{aligned}$$

$$T_a = (J_M + J_L) \cdot \frac{\omega_{pk}}{t_a} + T_f + (B + B_L) \cdot \omega_{pk} + T_L$$

$$T_a = (4,4487 \cdot 10^{-5} + 1,4105 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{418,87}{0,25} + 0,02118 + 6,743 \cdot 10^{-6} \cdot 418,87$$

$$T_a = 33,48 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_d = (J_M + J_L) \cdot \frac{\omega_{pk}}{t_s} - T_f - T_L$$

$$T_d = (4,4487 \cdot 10^{-5} + 1,4105 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{418,87}{0,25} - 0,02118$$

$$T_d = 28,968 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_{cv} = T_f + (B + B_L) \cdot \omega_{pk} + T_L$$

$$T_{cv} = 0,02118 + 6,743 \cdot 10^{-6} \cdot 418,87 = 2,399 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{3 \cdot 0,25 \cdot (33,48)^2 + 3 \cdot 0,25 \cdot (28,968)^2 + 0,25 \cdot (2,399)^2}{3}}$$

$$T_{rms} = 22,147 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$4. T_{ph} = 250,68 > T_a \text{ ve } |T_d|$$

$$(T_{cont})_{max} = 35,30 > T_{rms}$$

Adım 2'deki eşitsizlikler sağlanmıştır. Adım 5'e geçilebilir.

b. Maksimum akımın hesaplanması

5. Adım 4'de seçilen motor için, K_T ve I_{dmax} uygun sarım sayısı için elde edilir ve maksimum akım aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$K_T = 0,10458 \text{ N.m/A}$$

$$I_{dmax} = 50 \text{ A}$$

$$I_1 = \frac{T_a}{K_T} = \frac{33,48 \text{ N} \cdot \text{cm}}{10,458 \text{ N} \cdot \text{cm/A}} = 3,20 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{T_{cv}}{K_T} = \frac{2,399}{10,458} = 0,23 \text{ A}$$

$$I_3 = \left| \frac{T_d}{K_T} \right| = \frac{28,968}{10,458} = 2,77 \text{ A}$$

$I_{pk} = \{I_1, I_2, I_3\}$ nin maksimum değeridir.

$$I_{pk} = 3,20 \text{ A}$$

6. Eğer $I_{dmax} > I_{pk}$ ise adım 7'ye geçilebilir. Değilse, Tablo 5,2'deki diğer motora geçilir 3'den 6'ya kadar olan adımlar tekrar edilir.

$$I_{pk} = 3,20 < I_{dmax} = 50$$

Mıknatıs demagnetize değildir. 7'nci adıma geçilebilir.

7. Eger $I_{pk} < (I_{ps})_{max}$ ise 8'nci adıma geçilir. Değilse, adım 6'da seçilen motorda $I_{pk} < (I_{ps})_{max}$ olana kadar kalınır. $I_{pk} < (I_{ps})_{max}$ şartını sağlayan motor seçilir ve 3'den 7'ye kadar olan adımlar tekrar edilir. Sonra, adım 8'e geçilebilir.

$$I_{pk} = 3,20 < \infty$$

Güç kaynağının maksimum akımı henüz belirlenmediğinden, eşitsizlik sağlanmış olur. 8'nci adıma geçilebilir.

c. Rotor sıcaklığının hesaplanması :

8. R_a = Rotor sarım direnci + Kutup direnci (25°C)

$$\psi = 0,00393 \text{ (Bakır tel için)}$$

$$R_{th} = 4,18^\circ\text{C/W}$$

$$K_E = 10,95 \text{ V/1000 rpm (voltaj sabiti)}$$

$$(\theta_{arm})_{max} = 155^\circ\text{C (Rotorun maksimum sıcaklığı)}$$

aşağıda ifadeler hesaplanır.

$$R_a = 2,04 + 0,15 = 2,19 \text{ ohm}$$

$$I_{rms} = \frac{T_{rms}}{K_T} = \frac{22,147}{10,458} = 2,117 \text{ A}$$

$$\theta = \frac{R_a \cdot I_{rms}^2 \cdot R_{th}}{1 - R_a \cdot I_{rms}^2 \cdot R_{th} \cdot \psi}$$

$$\theta_{rise} = \frac{2,19 \cdot (2,117)^2 \cdot 4,18}{1 - 2,19 \cdot (2,117)^2 \cdot 4,18 \cdot 0,00393}$$

$$\theta_{rise} = 49^\circ\text{C}$$

$$\theta_{arm} = \theta_{rise} + \theta_{amb} = 49 + 25 = 74^\circ\text{C}$$

9. $\theta_{arm} < (\theta_{arm})_{max}$ ise adım 10'a geçilir. Değilse, halen kullanılmakta olan motorun bir diğer sarımına geçilir ve $\theta_{arm} < (\theta_{arm})_{max}$ olana kadar, 5'den 9'a kadar olan adımlar tekrarlanır. Sonra adım 10'a geçilir.

$$\theta_{arm} = 74 < (\theta_{arm})_{max} = 155^{\circ}C$$

Motor sürekli operasyonda soğuk çalışır.

d. güç kaynağı için gerekli maksimum voltajın hesaplanması

$$10. R_h = R_a [1 + \psi(\theta_{arm} - 25)]$$

$$R_h = 2,19 [1 + 0,00393(74 - 25)] = 2,61 \text{ ohm}$$

$$N_0 = \frac{\omega_{pk} \cdot 60}{2\pi} = \frac{4000 \cdot 60}{2\pi} = 4,0 \cdot 10^3 \text{ rpm}$$

$$V_1 = R_h \cdot I_1 + K_E \cdot N_0 = 2,61 \cdot 3,20 + 10,95 \cdot 4 = 52,15 \text{ V}$$

$$V_2 = R_h \cdot I_2 + K_E \cdot N_0 = 2,61 \cdot 0,23 + 10,95 \cdot 4 = 44,40 \text{ V}$$

$$V_3 = R_h \cdot I_3 + K_E \cdot N_0 = 2,61 \cdot 2,77 + 10,95 \cdot 4 = 51,04 \text{ V}$$

$V_{pk} = \{V_1, V_2, V_3\}$ nin maksimum değeri alınır.

$$V_{pk} = 52,15 \text{ volt}$$

11. Eğer $V_{pk} < (V_{ps})_{max}$ ise adım 12'ye geçilir. Eğer değilse, Tablo 5,2'deki bir diğer motora geçilir ve 3'den 11'e kadar adımlar tekrar edilir (adım 2'deki eşitsizlikler kontrol edilerek). $V_{pk} < (V_{ps})_{max}$ şartı sağlandığı zaman adım 12'ye geçilebilir.

$V_{pk} = 52,15 < \infty$ güç kaynağının voltajı henüz belirlenmediğinden eşitsizlik sağlanmış olur. Adım 12'ye geçilebilir.

12. sonuç : E-532 D.C. servomotor seçilir. Servomotor 55 volt ve 4 amperlik bir güç kaynağı ile birlikte çalıştırılabilir.

Tablo 5,3 Electrocraft E-532 d.c. servomotorun özellikleri
(Klafter et. al., 1989)

Özellik	Sembol	Değeri
Ağırlık	W	13,3448
Rotor ataleti	J_M	$4,4487 \cdot 10^{-5}$ kg.m ²
Motorun sönüm katsayısı	B	$6,743 \cdot 10^{-6}$ N.ms/rad
Sürtünme momenti	T_f	0,02118 N.m.
Maksimum moment	T_{pk}	2,5068 N.m
Motorun sürekli arızalanmaya neden olan momenti	T_{CONT}	0,353 N.m
Moment sabiti	K_T	0,10458 N.m/A
Demagnetize akımı	I_{demag}	50 A
Rotor fırça direnci	R_a	2,04 ohm
Termal direnç	R_{th}	4,18°C/W
Maksimum rotor sıcaklığı	$(\theta_{arm})_{max}$	155°C
Voltaaj sabiti	K_E	10,95 V/1000 rpm

5.5.1.2. Θ eksenini ile ilgili hesaplamalar

1. Efektif statik moment

Θ eksenini için motor seçiminin ön hesaplamalarında $T_L=0$ olduğu bulunmuştur.

2. Efektif atalet momenti

Efektif atalet momenti, Θ eksenini tahrik edecek motor seçiminin ön hesaplamalarında $J_L=1,4105 \cdot 10^{-4}$ kg.m² olarak belirlenmiştir.

3. Toplam atalet momenti

E-532 motoru için $J_M=4,4487 \cdot 10^{-5}$ kg.m²

Böylece toplam efektif atalet;

$$J_T = J_M + J_L = 4,4487 \cdot 10^{-5} + 1,4105 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$$

$$J_T = 1,855 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$$

Harmonik tahriğin eliptik rulmanlı yatak grubu ve robot gövdesi ataletleri bu hesaplarda ihmal edilmiştir.

4. Açısal ivme (hızlanma ve yavaşlama)

E-532 motorunun maksimum hızı 4000 rpm olarak alınabilir. Böylece maksimum açısal hız;

$$\omega_{pk} = \frac{rpm \cdot 2\pi}{60} = \frac{4000 \cdot 2\pi}{60} = 418,88 \text{ rad/s}$$

Bu durumda açısal hızlanma ve yavaşlama;

$$\alpha = \frac{\omega_{pk}}{t_a} = \frac{418,88}{0,25} = 1675,52 \text{ rad/s}^2$$

5. Katedilen mesafeler : Son pozisyon Şekil 5,6'daki hız egrisinin altındaki alandan bulunabilir.

Böylece:

a. Yumurta kartonu üzerinden, konveyöre harekette, Θ ekseninin dönme açısı (saat ibresi dönüş yönünde) = Θ_1

$$\Theta_1 = \frac{4000 \cdot 0,5/60}{80} \cdot 360^\circ = 150^\circ$$

b. Candling istasyonuna harekette

Θ ekseninin dönme açısı (saat ibresi tersi dönüş yönünde) = Θ_2

$$\Theta_2 = \frac{4000 \cdot 0,25/60}{80} \cdot 360^\circ = 75^\circ$$

olur.

c. Candling istasyonundan yumurta kartonuna harekette, Θ ekseninin dönme açısı (saat ibresi tersi dönüş yönünde).

$$\Theta_3 = \frac{4000 \cdot 0,25/60}{80} \cdot 360^\circ = 75^\circ$$

olur.

Bu açısal mesafeler, çevrim süresine ve mesafe spesifikasyonlarının görülmesine izin vermektedir. Bunu belirtmek önemlidir. Ancak, daha büyük dönmeler veya daha kısa bir çevrim süresi istenirse, çoğu durumda, şüphesiz ihtiyaç duyulabilen daha büyük maksimum hız yüzünden farklı bir motora ihtiyaç duyulabilir.

6. Hızlanma ve yavaşlama momentleri

Hareketin her fazında, hızlanma ve yavaşlama esnasında, motor, toplam ataleti hareket ettirmeli, eklem ve motor sürtünmesini yenmelidir. Profilin sabit hız kısmı (dilimi) için motor sadece sürtünmeyi yenmelidir. Sonuç olarak, bu konfigürasyonda ağırlık olmadığı için, motor momenti ara zamanlarda sıfırdır. Bir örnek olarak, yumurta yakalama noktasından candling istasyonuna hareket göz önüne alındığında, vizkoz sürtünmeler kadar olan eklem sürtünmelerinin sıfır olduğu kabul edilmiştir. Böylece, sürtünme yalnızca motorun kendisinde olacaktır (yani, $T_f = 2,118 \text{ N.cm}$).

$$T_a = J_T \cdot \alpha_a + T_f + (B + B_L) \cdot \omega_a + T_L$$

$$T_a = 1,855 \cdot 10^{-4} \cdot 1675,52 + 0,02118 + 6,743 \cdot 10^{-6} \cdot 418,88$$

$$T_a = 33,48 \text{ N.cm}$$

$$T_a = J_T \cdot \alpha + T_f + T_L$$

$$T_a = 1,855 \cdot 10^{-4} \cdot 1675,52 + 0,0218$$

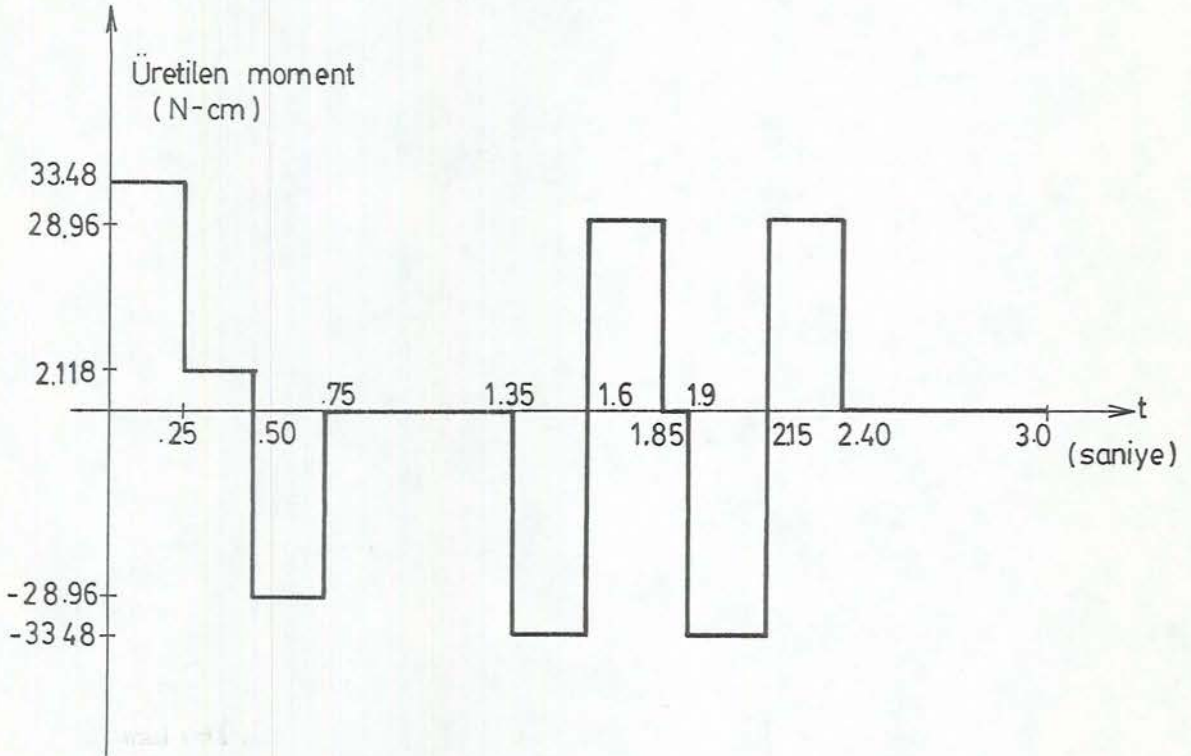
$$T_a = -28,96 \text{ N.cm}$$

$T_{cv} = T_f$ (sabit hız kısmı için motor sadece sürtünmeyi yenmelidir).

$$T_{cv} = 2,118 \text{ N.cm}$$

Bu deęerlerden hiç birisi $T_{p,k}$ maksimum momentine tekabül etmedięinden (250,68 N.cm) motor magnetlenmeyecektir. Toplam moment profili Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

Hesapları yukarıda yapılmış olan T_a ve T_d , herhangi bir çevrim esnasında diğer iki hareket için belirlidir.



Şekil 5,7 Θ Ekseninin Moment-Zaman Diyagramı
(Bir Tam evrim İçin).

7. RMS momenti : AŞırı ısınmadan korunmak için geliştirilen rms moment, sürekli arızalanmaya neden olan momentinden daha az olmalıdır. Trapez veya üçgen hız profili için hesap; moment profilinin sabit yapısından dolayı ileri doğrudur (Şekil 5,7). Her moment dilimi karelerinin, bu karelere tekabül eden zaman ile çarpımları toplamının, toplam çevrim süresine oranının karekökü "rms" momentine eşittir (Klafter et. al.. 1989).

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{t_a \cdot T_a^2 + t_s \cdot T_s^2 + t_{cv} \cdot T_{cv}^2 + t_d \cdot T_{dw}^2}{t_a + t_s + t_{cv} + t_d}}$$

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{3 \cdot 0,25 \cdot (33,48)^2 + 3 \cdot 0,25 \cdot (28,96)^2 + 0,25 \cdot (2,118)^2}{0,75 + 0,75 + 0,25 + 1,25}}$$

$$T_{rms} = 22,142 \text{ N.cm}$$

Bu, motorun sürekli arızalanmaya neden olan moment değerinden küçük olduğundan motor aşırı ısınmayacaktır. Bu ifade ile, hızlanma (veya yavaşlama) sürelerinin, hareket profiline üç kısmının hepsi için aynı olduğu gerçeği ortaya çıkmaktadır. Ayrıca 3,0 s'lik toplan çevrim süresine bölmemiz gerekir. Bu, candling işlemleri esnasında hiç gecikme olmadığını kabul etmektir. Eğer varsa, çevrim süresi ona göre arttırılmalı ve sonuç olarak "rms" momenti azaltılmalıdır.

8. Güç kaynağının büyüklüğü

Bu eksenin servo amplifier gücü için gerekli d.c. kaynağı motorun ürettiği zıt e.m.k.'ni çalıştıracak büyüklükte olmalıdır. E-532'nin 4000 rpm'lik bir maksimum devirde çalışması için, minimum voltaj;

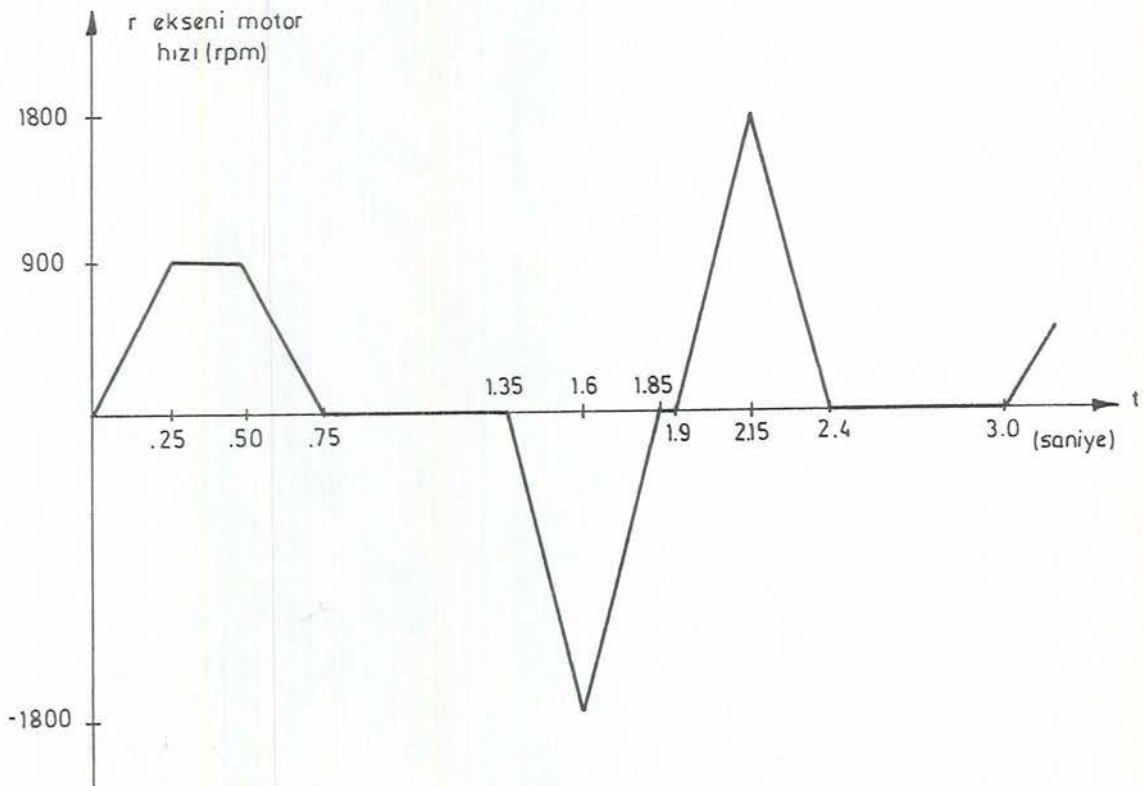
$$V_{min} = \frac{4000}{1000} \cdot K_f = 4 \cdot 10,95 = 43,8 \text{ V}$$

İlave olarak, kaynak; rotor ve devredeki direnç düşmelerinin yenebilmelidir. 33,48 N.cm'lik bir maksimum momentte, $33,48/10,454 = 3,2$ A'lik bir akım gerekmektedir. Bu yüzden, en azından $V=3,2 \cdot 2,04 = 6,53$ V'luk bir düşme olacaktır. Netice itibariyle, $43,8 + 6,53 = 50,33$ Volttan daha büyük bir güç kaynağı bu spesifikasyonları yerine getirmek için gereklidir. Bu pratik değilse, düşük devirli, böylece daha küçük moment ve sabit zıt e.m.k. verebilen farklı sargılı bir motor kullanılabilir. Bu tabiatıyla, daha büyük bir maksimum akım (burada problem değil) gerektirecektir. Gerçek güç kaynağı

voltajı, devrelerin kendisi ve diğer bağlı güç harcayan elemanları, baskı devre panolarında ve kablolardaki omik kayıpları yüzünden daha fazla olacaktır. Sonuç olarak, Θ eksenini için motor seçiminde de belirtildiği gibi, d.c. servomotor 55 Volt ve 3,5 Amperlik bir güç kaynağı ile birlikte, uyumlu bir şekilde çalışır.

5.5.2. r Eksenini motor ve tahrik mekanizması seçimi

İleri eksen hareketi, "Acme" tip kılavuz vidayı tahrik eden bir servomotor ile sağlanacaktır. Üç doğrusal hareketin her birinin ortalamasının 76,2 mm olduğunu kabul ediyoruz. Bu eksenin hız profili Şekil 5,8'de gösterilmiştir. Eklemin daha kısa bir zamanda aynı mesafeye hareket etmesi istendiğinde, bu profilin daha kısa olan iki bölümü, daha yüksek maksimum açısal hızı gerektirecektir.



Şekil 5,8 r Eksenini Hız Profili (Bir Tam Çevrim)

5.5.2.1. r eksenini için adım-adım motor seçimi

- Ön Hesaplamalar

a. Efektif atalet momenti

Tahrik edici, yalnızca tutucu, yük ve ϕ eksenini (yani 13,3448 N)'luk ağırlığını hareket ettirecektir. Buradan; η %50 (kılavuz vidanın dinamik verimi) (Martin, 1969). $p=98,25$ devir/m (kılavuz vidanın adımı)

$$J_L = \frac{W}{g \cdot \eta \cdot (2\pi \cdot P)^2} = \frac{13,3448}{9,81 \cdot 0,50 \cdot (2\pi \cdot 98,25)^2}$$

$$J_L = 7,139 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$b. \omega_{pk} = \frac{rpm \cdot 2\pi}{60} = \frac{1800 \cdot 2\pi}{60} = 188,50 \text{ rad/s}$$

$$t_a = 0,25 \text{ s}, t_s = 0,25 \text{ s}, B_L = 0$$

c. $T_L = 0$ (r yönünde ağırlık yoktur)

- Motor Seçimi

a. Maksimum moment ve maksimum sürekli moment hesabı

1. Motor parametrelerinin hepsinin sıfır olduğu varsayılır (yani, $J_M = T_r = B = 0$) (Klafter et. al., 1989).

$$T_a = \frac{J_L \cdot \omega_{pk}}{t_a} + T_L + B_L \cdot \omega_{pk} = \frac{7,1395 \cdot 10^{-2} \cdot 188,5}{0,25} = 0,5382 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_s = \frac{-J_L \cdot \omega_{pk}}{t_s} + T_L = \frac{-7,139 \cdot 10^{-2} \cdot 188,5}{0,25} = 0,5382 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_{cv} = T_L + B_L \cdot \omega_{pk}$$

$T_L = 0$ ve $B_L = 0$ olduğundan $T_{cv} = 0$ olur.

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{t_a \cdot T_a^2 + t_s \cdot T_d^2 + t_{cv} \cdot T_{cv}^2 + t_d \cdot T_{dw}^2}{t_a + t_s + t_{cv} + t_d}}$$

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{3 \cdot 0,25 \cdot (0,5382)^2 + 3 \cdot 0,25 \cdot (-0,5382)^2}{3}} = 0,3805 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

2. Tablo 5,2'ye bakılır ve aşağıdaki şartların hepsini sağlayan en ucuz motor seçilir (sarımı 1 olan)

$$T_{pk} = 9,75 > T_a \text{ ve } |T_d|$$

$$(T_{cont})_{max} = 2,23 > T_{rms}$$

3. Adım 2'de seçilen motor için, Tablo 5,2'den J_M , B ve T_f alınır T_a , T_d , T_{cv} ve rms tekrar hesaplanır.

$$J_M = 4,1663 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$B = 2,0196 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$$

$$T_f = 0,2824 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_a = (J_M + J_L) \cdot \frac{\omega_{pk}}{t_a} + T_f + (B + B_L) \cdot \omega_{pk} + T_L$$

$$T_a = (4,1663 \cdot 10^{-6} + 7,139 \cdot 10^{-6}) \cdot \frac{188,5}{0,25} + 2,824 \cdot 10^{-3} + 2,096 \cdot 10^{-6} \cdot 188,5$$

$$T_a = 1,1728 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_d = (J_M + J_L) \cdot \frac{\omega_{pk}}{t_s} - T_f - T_L$$

$$T_d = (4,1663 \cdot 10^{-6} + 7,139 \cdot 10^{-6}) \cdot \frac{188,5}{0,25} - 2,824 \cdot 10^{-3}$$

$$T_d = 0,570 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_{cv} = T_f + (B + B_L) \cdot \omega_{pk} + T_L$$

$$T_{cv} = 2,824 \cdot 10^{-3} + 2,0196 \cdot 10^{-6} \cdot 188,5$$

$$T_{cv} = 0,3204 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{3 \cdot 0,25 \cdot (1,1728)^2 + 3 \cdot 0,25 \cdot (0,57)^2 + 0,25 \cdot (0,3204)^2}{3}}$$

$$T_{rms} = 0,6585 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

4. Adım 2'deki eşitsizlikler kontrol edilir. Eger, J_M , B ve T_a 'nin yeni değerleri bir motor değiştirmesini gerektirmiyorsa, bu motor maksimum sürekli moment şartlarını yerine getirmektedir. Daha sonra adım 5'e geçilir. Eger adım 2'deki eşitsizlikler sağlanmıyorsa, Tablo 5,2'deki bir diğer motora geçilir. Motor değişimi gerekmedinceye kadar, 3 ve 4'ncü adımlar tekrar edilir. Daha sonra adım 5'e geçilebilir.

$$T_{pk} = 9,75 > T_a \text{ ve } |T_a|$$

$$(T_{cont})_{max} = 2,23 > T_{rms}$$

Eşitsizlikler sağlandığından dolayı adım 5'e geçilebilir.

b. Maksimum akimin hesaplanması

5. Adım 4'de seçilen motor için, K_T , I_{dmax} uygun sarım sayısı için Tablo 5,2'den elde edilir ve maksimum akım aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$K_T = 1,5535 \text{ N} \cdot \text{m/A}$$

$$I_{dmax} = 12 \text{ A}$$

$$I_1 = \frac{T_a}{K_T} = \frac{1,1728}{1,5535} = 0,75 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{T_{cv}}{K_T} = \frac{0,3204}{1,5535} = 0,206 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{T_d}{K_T} = \frac{0,57}{1,5535} = 0,367 \text{ A}$$

$I_{pk} = \{I_1, I_2, I_3\}$ nin maksimum değeri alınır.

$$I_{pk} = 0,75 \text{ A}$$

6. Eğer $I_{d_{maks}} > I_{pk}$ ise adım 7'ye geçilebilir. Değilse, Tablo 5,2'deki diğer motora geçilir ve 3'den 6'ya kadar olan adımlar tekrar edilir.

$$I_{pk} = 0,75 < I_{d_{maks}} = 12$$

Mıknatıs demagnetize değildir. 7'nci adıma geçilebilir.

7. Eğer $I_{pk} < (I_{ps})_{maks}$ ise 8'nci adıma geçilir. Değilse, adım 6'da seçilen motorda $I_{pk} < (I_{ps})_{maks}$ olana kadar kalınır. $I_{pk} < (I_{ps})_{maks}$ eşitsizliğini sağlayan motor seçilir, 3'den 7'ye kadar olan adımlar tekrar edilir.

$$I_{pk} < \infty, 0,75 < \infty$$

Güç kaynağının maksimum akımı henüz belirlenmediğinden, yukarıdaki eşitsizlik sağlanmış olur. Adım 8'e geçilebilir.

c. Rotor sıcaklığının hesaplanması

8. $\psi = 0,00393$ (bakır tel için)

$$R_{th} = 22,7^\circ\text{C/W}$$

$$K_E = 1,93 \text{ V/1000 rpm}$$

$$(\theta_{arm})_{maks} = 155^\circ\text{C}$$

$$R_a = 1,84 + 0,15 = 1,99 \text{ ohm}$$

$$I_{rms} = \frac{T_{rms}}{K_T} = \frac{0,6585}{1,5535} = 0,42 \text{ A}$$

$$\theta_{rsg} = \frac{R_a \cdot I_{rms}^2 \cdot R_{th}}{1 - R_a \cdot I_{rms}^2 \cdot R_{th} \cdot \psi}$$

$$\theta_{rsg} = \frac{1,99 \cdot (0,42)^2 \cdot 22,7}{1 - 1,99 \cdot (0,42)^2 \cdot 22,7 \cdot 0,00393} = 8,2^\circ\text{C}$$

$$\Theta_{arm} = \Theta_{rise} + \Theta_{amb} = 8,2 + 25 = 33,2^{\circ}C$$

9. $\Theta_{arm} < (\Theta_{arm})_{max}$ ise adım 10'a geçilir. Değilse, halen kullanılan motorun bir diğer sarımına geçilir ve $\Theta_{arm} < (\Theta_{arm})_{max}$ olana kadar, 5'den 9'a kadar olan adımlar tekrarlanır. Sonra adım 10'a geçilir.

$$\Theta_{arm} = 33,2^{\circ}C < 155^{\circ}C$$

Motor sürekli operasyonda "soğuk" çalışır.

d. Güç kaynağı için gerekli maksimum voltajın hesaplanması

$$10. R_h = R_a [1 + \psi(\Theta_{arm} - 25)]$$

$$R_h = 1,99 [1 + 0,00393 \cdot (33,2 - 25)] = 2,05 \Omega$$

$$N_0 = \frac{188,5 \cdot 60}{2\pi} = 1,8 \cdot 10^3 \text{ rpm}$$

$$V_1 = R_h \cdot I_1 + K_E \cdot N_0 = 2,05 \cdot 0,75 + \frac{1,93}{1000} \cdot 1,8 \cdot 10^3 = 5,01 \text{ V}$$

$$V_2 = R_h \cdot I_2 + K_E \cdot N_0 = 2,05 \cdot 0,206 + 1,93 \cdot 1,8 \cdot 10^3 = 3,89 \text{ V}$$

$$V_3 = R_h \cdot I_3 + K_E \cdot N_0 = 2,05 \cdot 0,367 + 1,93 \cdot 1,8 \cdot 10^3 = 4,23 \text{ V}$$

$V_{pk} = \{V_1, V_2, V_3\}$ nin maksimum değeri alınır.

$$V_{pk} = 5,01 \text{ volt}$$

11. Eger $V_{pk} < (V_{pk})_{max}$ ise adım 12'ye geçilir. Eger değilse, Tablo 5,2'deki bir diğer motora geçilir ve 3'den 11'e kadar adımlar tekrar edilir (adım 2'deki eşitsizlikleri her seferinde kontrol ederek). Sonra adım 12'ye geçilebilir.

$V_{pk} = 5,01 < \infty$ güç kaynağının voltajı, henüz belirlenmediğinden, yukarıdaki eşitsizlik sağlanmış olur. Adım 12'ye geçilebilir.

12. Sonuç : PITMAN 9432 D.C. servomotoru seçilir. d.c. Servomotor 6 volt 1 amperlik bir güç kaynağı ile birlikte çalıştırılabilir.

5.5.2.2. r eksenini ile ilgili hesaplamalar

r eksenini tahrik edecek olan motor PITMAN 9432 dir (bir sarım) ve bu motorun özellikleri Tablo 5,4'de verilmiştir. Ayrıca, çapı 40,64 mm dir 98,25 dev/m hatveli kılavuz vidanın istenen sonuçları sağlayacağı bilinmektedir. Bu eleman için dinamik verim %50 kabul edilmiştir (normalde ACME kılavuz vida için % 25-% 80 verim öngörülmektedir) (Engelberger, 1980).

Tablo 5,4 Pitman 9432 d.c. servomotorun özellikleri (Klafter et. al., 1989)

Özellik	Sembol	Değeri
Ağırlık	W	1,946 N
Rotor ataleti	J_M	$4,2663 \cdot 10^{-6}$ kg m ²
Motorun sönüm katsayısı	B	$2,0196 \cdot 10^{-6}$ N.ms/rad
Sürtünme momenti	T_f	$2,824 \cdot 10^{-3}$ N.m
Maksimum moment	T_{pk}	0,0975 N.m
Motorun sürekli arızalanmaya neden olan momenti	T_{CONT}	0,02231 N.m.
Moment sabiti	K_T	0,015535 N.m/A
Demagnetize akımı	I_{dema}	12 A.
Rotor fırça direnci	R_a	1,84 ohm
Termal direnç	R_{th}	22,7 °C/W
Maksimum rotor sıcaklığı	Θ_{armmax}	155 °C
Voltaj sabiti	K_E	1,93 V/1000rpm.

r eksenindeki hesaplamalar, Θ eksenindeki benzer olarak aşağıda verilmiştir.

1. Efektif statik moment $T_L = 0$ (r yönünde ağırlık yoktur).

2. Efektif atalet momenti, r eksenini tahrik edecek motor seçiminin ön hesaplamalarında belirlenmiştir.

$$J_L = 7,137 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

3. Toplam atalet momenti

$$J_T = J_M + J_L \text{ PITMAN 9432 motoru için } J_M = 4,1663 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_T = 4,1663 \cdot 10^{-6} + 7,137 \cdot 10^{-6} = 1,1303 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

$$J_T = 0,113 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

4. Açısal ivmeler (hızlanma ve yavaşlama)

a. Yumurtanın yakalanması için r eksenini motorunun hızlanması

$$\omega_a = \frac{900 \cdot 2\pi}{60} = 94,24 \text{ rad/s}$$

$$\omega_d = \frac{900 \cdot 2\pi}{60} = 94,24 \text{ rad/s}$$

$$\alpha_a = \frac{\omega_a}{t_a} = \frac{94,24}{0,25} = 377 \text{ rad/s}^2$$

$$\alpha_d = \frac{\omega_d}{t_s} = \frac{94,24}{0,25} = 377 \text{ rad/s}^2$$

b. Candling istasyonuna harekette, r eksenini motorunun hızlanması (ve yavaşlaması).

$$\omega_a = \frac{rpm \cdot 2\pi}{60} = \frac{1800 \cdot 2\pi}{60} = 188,5 \text{ rad/s}$$

$$\omega_d = \frac{1800 \cdot 2\pi}{60} = 188,5 \text{ rad/s}$$

$$\alpha_a = \frac{\omega_a}{t_a} = \frac{188,5}{0,25} = 754 \text{ rad/s}^2$$

$$\alpha_d = \frac{\omega_d}{t_s} = \frac{188,5}{0,25} = 754 \text{ rad/s}^2$$

c. Yumurta kartonuna harekette, r eksenini motorunun hızlanma ve yavaşlaması:

$$\omega_a = \frac{rpm \cdot 2\pi}{60} = \frac{1800 \cdot 2\pi}{60} = 188,5 \text{ rad/s}$$

$$\omega_d = \frac{1800 \cdot 2\pi}{60} = 188,5 \text{ rad/s}$$

$$\alpha_a = \frac{\omega_a}{t_a} = \frac{188,5}{0,25} = 754 \text{ rad/s}^2$$

$$\alpha_d = \frac{\omega_d}{t_s} = \frac{188,5}{0,25} = 754 \text{ rad/s}^2$$

5. Katedilen mesafeler:

Son pozisyonlar Şekil 5,8'de verilen hız egrisinin altındaki alandan bulunabilir.

a. Yumurta kartonu üzerinden, konveyöre harekette r ekseninin ileri doğru hareket miktarı;

$$S_1 = rpm \cdot \left(\frac{t_{cv} + t_s + t_a + t_{cv}}{2 \cdot 60 \cdot P} \right) = \frac{900 \cdot (0,25 + 0,75)}{2 \cdot 60 \cdot 98,25} = 76,2 \text{ mm}$$

b. Konveyör üzerinden, candling istasyonuna harekette, r ekseninin geriye doğru hareket miktarı;

$$S_2 = \frac{rpm \cdot (t_a + t_s)}{2 \cdot 60 \cdot P} = \frac{1800 \cdot (0,25 + 0,25)}{2 \cdot 60 \cdot 98,25} = 76,2 \text{ mm}$$

c. Candling istasyonundan, yumurta kartonuna harekette, r ekseninin ileri doğru hareket miktarı;

$$S_3 = \frac{rpm \cdot (t_a + t_s)}{2 \cdot 60 \cdot P} = \frac{1800 \cdot (0,25 + 0,25)}{2 \cdot 60 \cdot 98,25} = 76,2 \text{ mm}$$

6. Hızlanma ve yavaşlama momentleri

a. Yumurta kartonu üzerinden konveyör üzerine, r ekseninin ileri doğru hareketinde oluşan momentlerin hesabı;

$$T_a = J_T \cdot \alpha_a + T_f + (B + B_L) \cdot \omega_a + T_L$$

$$T_a = 1,1303 \cdot 10^{-5} \cdot 377 + 2,824 \cdot 10^{-3} + 2,0196 \cdot 10^{-6} \cdot 94,24$$

$$T_a = 0,7275 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_d = -J_T \cdot \alpha_d + T_f + T_L$$

$$T_d = 1,1303 \cdot 10^{-5} \cdot 377 + 2,824 \cdot 10^{-3}$$

$$T_d = -0,1437 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_{cv} = T_f \Rightarrow T_{cv} = 2,824 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_{cv} = 0,2824 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

Sabit hız kısmı için motor, sadece sürtünmeleri yenmelidir.

b. Candling istasyonuna harekette, r ekseninin geriye doğru hareketinin (hızlanma ve yavaşlama) oluşturduğu momentlerin hesabı.

$$T_a = J_T \cdot \alpha_a + T_f + (B + B_L) \cdot \omega_a + T_L$$

$$T_a = 1,1303 \cdot 10^{-5} \cdot 754 + 2,824 \cdot 10^{-3} + 2,0196 \cdot 10^{-6} \cdot 188,5$$

$$T_a = 1,173 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_d = -J_T \cdot \alpha_d + T_f + T_L$$

$$T_d = -1,1303 \cdot 10^{-5} \cdot 754 + 2,824 \cdot 10^{-3}$$

$$T_d = -0,5698 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

c. Candling istasyonundan yumurta kartonuna harekette, r ekseninin ileri hareketinin (hızlanma ve yavaşlama) oluşturduğu momentlerin hesabı.

$$T_a = J_T \cdot \alpha_a + T_f + (B + B_L) \cdot \omega_a + T_L$$

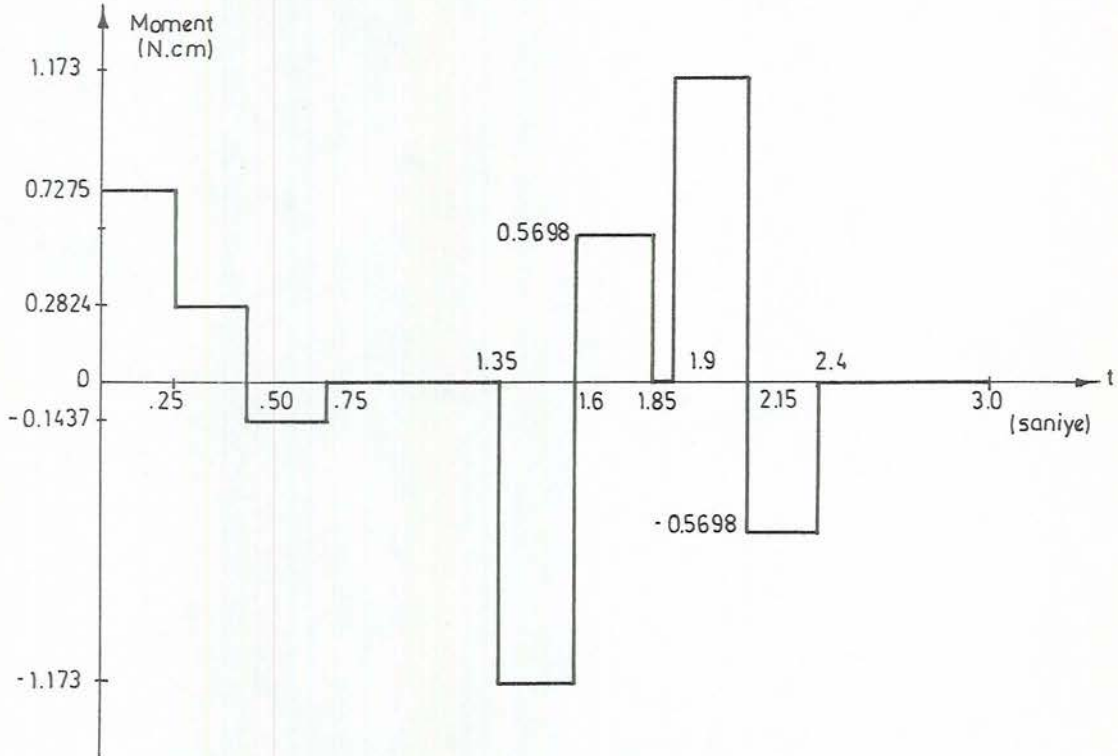
$$T_a = 1,1303 \cdot 10^{-5} \cdot 754 + 2,824 \cdot 10^{-3} + 2,0196 \cdot 10^{-6} \cdot 188,5$$

$$T_a = 1,173 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_a = -J_T \cdot \alpha_a + T_f + T_L$$

$$T_a = -1,1303 \cdot 10^{-5} \cdot 754 + 2,824 \cdot 10^{-3}$$

$$T_a = -0,5698 \text{ N} \cdot \text{cm}$$



Şekil 5,9 r Ekseninin Moment-Zaman diyagramı (Bir Tam Çevrim)

7. RMS momenti

Motoru aşırı ısınmadan korumak için geliştirilen rms momenti, motorun sürekli arızalanmaya neden olan momentinden daha az olmalıdır. Trapez veya üçgen hız profili için (Şekil 5,8)'de görüldüğü gibi hesap; moment profilinin sabit yapısından dolayı ileri doğrudur. Her moment dilimi karelerinin, bu karelere tekabül eden zaman ile çarpımları toplamının, toplam çevrim süresine oranının karekökü "rms" momentine eşittir (Klafter et. al., 1989).

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{t_a \cdot T_a^2 + t_s \cdot T_s^2 + t_{cv} \cdot T_{cv}^2 + t_d \cdot T_d^2}{t_a + t_s + t_{cv} + t_d}}$$

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{0,25 \cdot (0,7275)^2 + 2 \cdot 0,25 \cdot (1,172)^2 + 0,25 \cdot (0,1437)^2 + 2 \cdot 0,25 \cdot (0,5698)^2 + 0,25 \cdot (0,2824)^2}{3}}$$

$$T_{rms} = 0,5792 \text{ N.cm}$$

Bu, sürekli en az moment kapasitesinin altında iken motor aşırı ısınmayacaktır.

8. Güç kaynağının büyüklüğü

Bu eksenin servo amplifier gücü için gerekli d.c. kaynağı, motorun ürettiği zıt e.m.k'ni çalıştıracak büyüklükte olmalıdır. Pitman 9432'nin 1800 rpm'lik bir maksimum devirde çalışması için, minimum voltaj;

$$V_{min} = \frac{1800 \cdot K_E}{1000} = 1800 \cdot \frac{1,93}{1000} = 3,47 \text{ V}$$

$$V_{min} = 3,47 \approx 3,50 \text{ V}$$

İlave olarak, kaynak; rotor ve devredeki direnç düşmelerini yenebilmelidir. 1,172 N.cm'lik bir maksimum momentte.

$$I = \frac{T_{pk}}{K_T} = \frac{1,172}{1,553} = 0,754 \text{ A}$$

0,754 amperlik akım gerekmektedir. Bu yüzden en azından

$$V = I \cdot R_a = 0,754 \cdot 1,84 = 1,39 \text{ V}$$

gerilim düşmesi olacaktır.

Güç kaynağının gerilimi $V = 3,5 + 1,39 = 4,89 \text{ V}$ olacaktır. Gerçek güç kaynağı voltajı, devrelerin kendisi ve diğer bağlı güç harcayan elemanları, baskı devre panolarında ve kablolardaki omik kayıpları yüzünden daha fazla olacaktır. Buna ilaveten, r eksenini tahrik motoru seçiminde maksimum voltaj $V_{p,k} = 5,01$ olarak elde edildi. Akım şiddetinde $I_{p,k} = 0,75 \text{ A}$ olarak belirlendi. Dolayısıyla, motor ile beraber çalışacak güç kaynağının voltajı $V_{p,k} = 5,01 \text{ V}$ ve $I_{p,k} = 0,75$ amperden daha fazla olması gerekir.

Motor seçiminde de belirtildiği gibi, Pitman 9432 d.c servomotoru, 6 volt, 1 amperlik bir güç kaynağı ile uyumlu bir şekilde çalışabilir. Ayrıca, Θ eksenindeki istekleri yerine getirebilecek büyüklükte bir güç kaynağı, r eksenini için daha da uygun olacaktır.

Yapılan hesaplamalarda kodlayıcı disk, kılavuz vida ve herhangi bir mekanik kaplin yüzünden oluşan aletler ihmal edilmiştir.

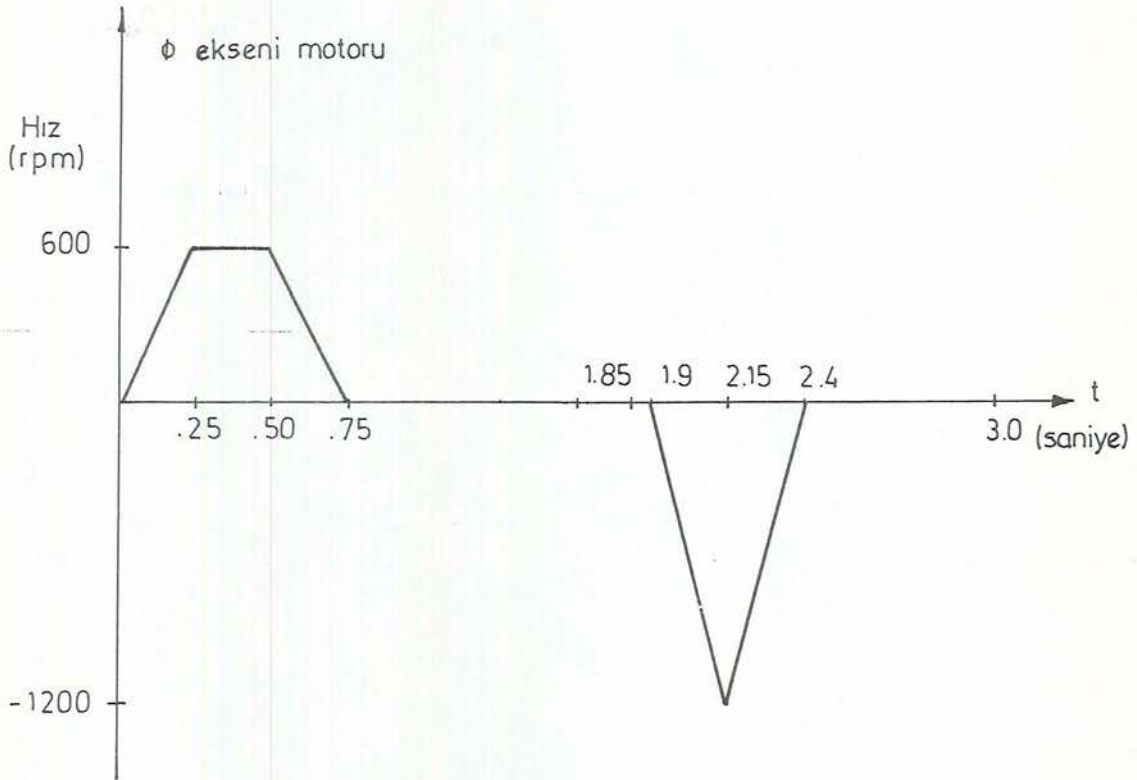
Şekil 5,8'den, diğer iki hareket için 1800 rpm'lik bir maksimum hız gerekirken, konveyördeki yumurtayı yakalamak için kartonun üzerinden konveyöre hareket esnasında 900 rpm'lik bir maksimum açısal hıza gerek duyulduğu görülmektedir. Bu bilgiden yararlanarak, moment ve zaman ilişkisi Şekil 5,9'da gösterilmiştir. Diyagramdan rms momentinin eşdeğerini hesaplamak oldukça basittir.

5.5.3. ϕ Eksenini motor ve tahrik mekanizması seçimi

Yumurta kendi uzun ekseninde yakalandığından, tutucuyu döndürmek için ϕ dönme eksenine gerek duyulmaktadır. Candling işlemi sırasında açısal pozisyon

önemli olmadığı halde, geniş uç, kartondaki uygun konumun kenarına yerleştirildiği için yumurtanın döndürülmesi gerekmektedir.

Hata üçgenleri yaklaşımını kullanarak, minimum verimi yaklaşık olarak % 50 redüksiyonu 10:1 olan basit bir dişli tertibi saptanır. Dişli tertibi Şekil 5,11'de gösterilmiştir. Bu şekilden, toplam efektif atalet momenti hesaplanabilir.

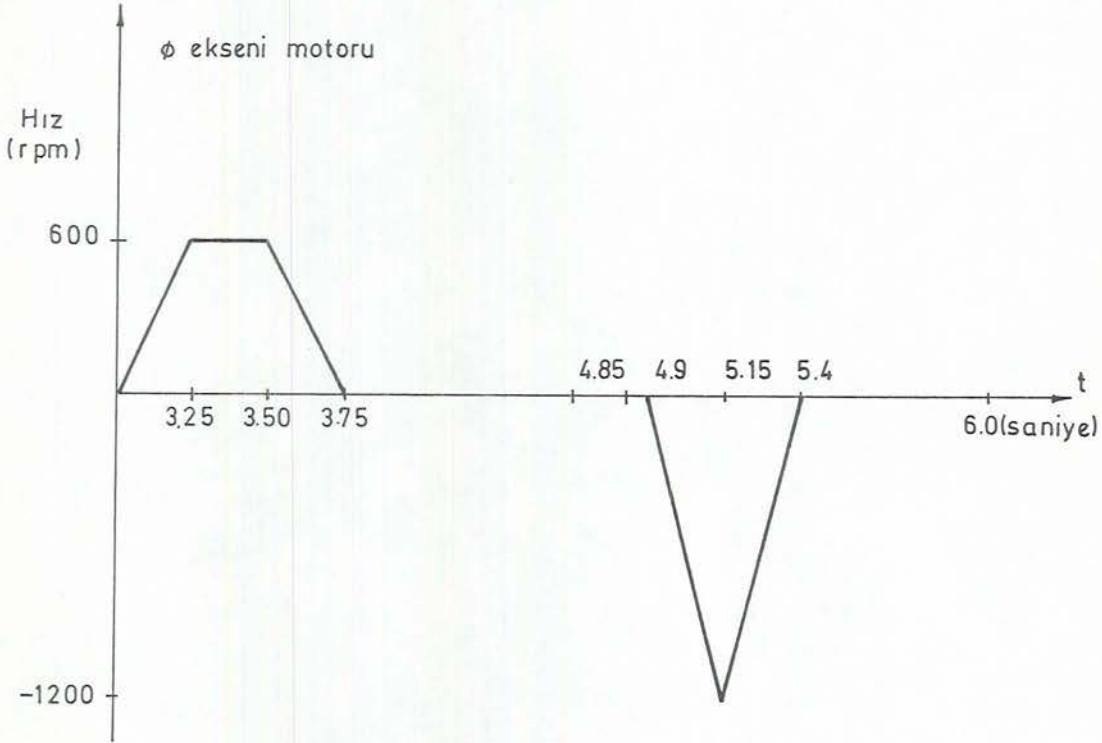


Şekil 5,10aφ Ekseni Hız Profili (Bir Tam Çevrim).

$$J_L = J_{gear1} + \frac{J_{gear2} + J_{artppar} + J_{egg}}{\eta \cdot N^2}$$

Sadeleştirmek için dişlilerin yarı çapları 25,4 mm ve 2,54 mm, ağırlıkları 0,5 N ve 5×10^{-3} N alınmıştır. Ataletleri " $0,5 \times m \times r^2$ " ifadesiyle verildiği

için, dişlilerin katı ince diskler olduğu kabul edilir. İlave olarak, tutucu ağırlığı 3,614 N'dur ve tutucu, aralarında maksimum 50,8 mm mesafe bulunan ayrı iki diskten oluşmuştur. (disklerin her birinin yarı çapı 38,1 mm) ve atalet momentleri paralel eksenler teoreminden hesaplanabilir (McLean and Nelson, 1978). Son olarak, yumurtanın ataleti $\frac{2}{5} m r^2$ formülü ile hesaplandığı için, 0,637 N ağırlığında katı bir küre olduğu kabul edilir.



Şekil 5, 10bφ Ekseni Hız Profili

5.5.3.1. φ Ekseni için adım-adım motor seçimi

- Ön hesaplamalar

a. Efektif atalet momenti

J_L = Efektif atalet momenti

$$J_L = J_{gear1} + \frac{J_{gear2} + J_{gripper} + J_{egg}}{\eta \cdot N^2}$$

J_{gear1} = pinyon dişlinin atalet momenti (kg-m²)

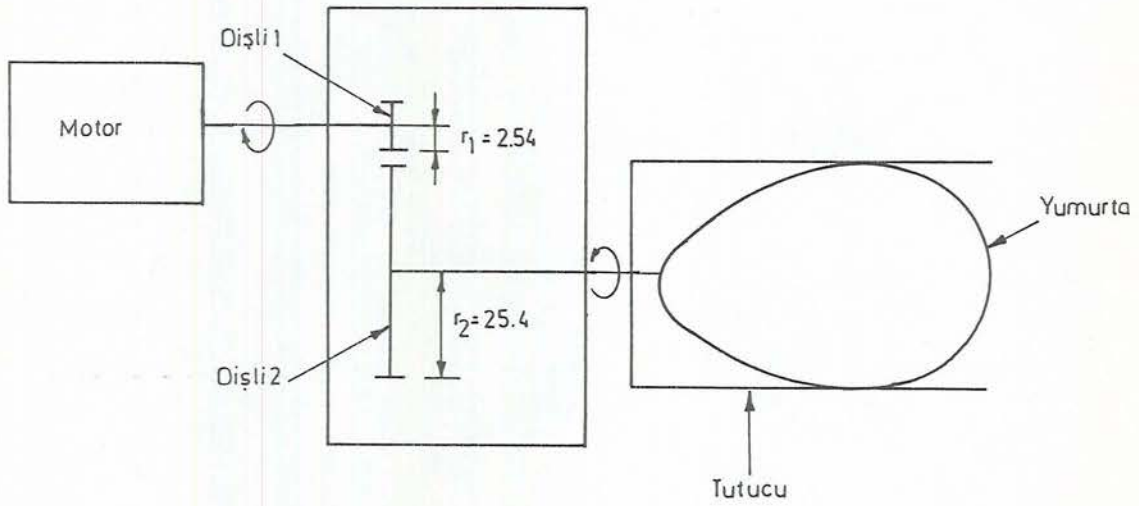
J_{gear2} = Karşılık dişlisinin atalet momenti (kg-m²)

$J_{gripper}$ = Tutucunun atalet momenti (kg-m²)

J_{egg} = Yumurtanın atalet momenti (kg-m²)

η = Dişli tertibinin verimi (% 50)

N = Dişli tertibinin redüksiyon oranı (10:1)



Sekil 5,11 ϕ Ekseninin Gösterimi

$$J_{gear1} = 0,5 \cdot m \cdot r^2 = \frac{0,5 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot (2,54 \cdot 10^{-3})^2}{9,81} = 1,644 \cdot 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{gear2} = 0,5 \cdot m \cdot r^2 = \frac{0,5 \cdot 0,5 \cdot (25,4 \cdot 10^{-3})^2}{9,81} = 1,644 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{gripper} = 2 \cdot \left(\frac{m \cdot r^2}{4} \right) = 2m \left(\frac{r^2}{4} + d^2 \right)$$

$$J_{gripper} = \frac{2 \cdot 1,807}{9,81} \left[\frac{(38,1 \cdot 10^{-3})^2}{4} + (25,4 \cdot 10^{-3})^2 \right] = 3,714 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{\text{eşer}} = \frac{2}{5} \cdot m \cdot r^2 = \frac{2}{5} \cdot 0,065 \cdot (25,4 \cdot 10^{-3})^2 = 1,677 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_L = 1,644 \cdot 10^{-9} + \frac{1,644 \cdot 10^{-5} + 3,714 \cdot 10^{-4} + 1,677 \cdot 10^{-5}}{0,50 \cdot (10)^2} = 8,094 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_L = 8,094 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$b. \quad \omega_{pk} = \frac{rpm \cdot 2\pi}{60} = \frac{1200 \cdot 2\pi}{60} = 125,66 \text{ rad/s}$$

$$t_a = 0,25 \text{ s} , t_s = 0,25 \text{ s}$$

c. Efektif statik moment :

Bu eksen için ağırlık olmadığından $T_L = 0$ alınır.

$T_a = T_L = 0$, $B_L = 0$ alınır.

Motor seçimi

a. Maksimum moment ve maksimum sürekli moment hesabı

1. Motor parametrelerinin hepsinin sıfır olduğu varsayılır
($J_M = T_f = 0$).

$$T_a = \frac{J_L \cdot \omega_{pk}}{t_a} + T_L + B_L \cdot \omega_{pk} = \frac{8,094 \cdot 10^{-6} \cdot 125,66}{0,25}$$

$$T_a = 0,4068 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_a = \frac{-J_T \cdot \omega_{pk}}{t_s} + T_f = \frac{8,094 \cdot 10^{-6} \cdot 125,66}{0,25}$$

$$T_a = -0,4068 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_{cv} = T_L + B_L \cdot \omega$$

pk

$$T_L = 0, \quad B_L = 0 \text{ olduğundan } T_{cv} = 0 \text{ olur.}$$

$$T_d = T_L = 0$$

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,25 \cdot (0,4068)^2 + 2 \cdot 0,25 \cdot (-0,4068)^2}{3}} = 0,2349 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$2. \quad T_{pk} = 9,75 > T_a \text{ ve } |T_d|$$

$$(T_{cont})_{max} = 2,23 > T_{rms}$$

Eşitsizlikler sağlandığından dolayı adım 3'e geçilir.

$$3. \quad J_M = 4,1663 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$T_f = 2,824 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$B = 2,0196 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$$

$$T_a = (J_M + J_L) \cdot \frac{\omega_{pk}}{t_a} + T_f + (B + B_L) \cdot \omega_{pk} + T_L$$

$$T_a = (4,1663 \cdot 10^{-6} + 8,094 \cdot 10^{-6}) \cdot \frac{125,66}{0,25} + 2,824 \cdot 10^{-3} + 2,0196 \cdot 10^{-6} \cdot 125,66$$

$$T_a = 9,240 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_d = (J_M + J_L) \cdot \frac{\omega_{pk}}{t_s} + T_f - T_L$$

$$T_d = (4,1663 \cdot 10^{-6} + 8,094 \cdot 10^{-6}) \cdot \frac{125,66}{0,25} - 2,824 \cdot 10^{-3}$$

$$T_d = 3,339 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_{cv} = T_f + (B + B_L) \cdot \omega_{pk} + T_L = 2,84 \cdot 10^{-3} + 2,0196 \cdot 10^{-6} \cdot 125,66$$

$$T_a = (J_M + J_L) \cdot \frac{\omega_{pk}}{t_a} + T_f + (B + B_L) \cdot \omega_{pk} + T_L$$

$$T_{cv} = 3,077 \cdot 10^{-3} N \cdot m = 0,3077 N \cdot cm$$

$$T_{rms} = \sqrt{2 \cdot 0,25 \cdot (0,924)^2 + 2 \cdot 0,25 \cdot (0,33388)^2 + 0,25 \cdot \frac{(0,3077)^2}{3}} =$$

$$T_{rms} = 0,4108 N \cdot cm$$

$$4. \quad T_{pk} = 9,75 > T_a \text{ ve } |T_d| \\ (T_{cont})_{max} = 2,23 > T_{rms}$$

5'nci adıma geçilebilir.

Maksimum akımın hesaplanması

$$5. \quad K_T = 1,5535 \quad N \cdot cm / A$$

$$I_{demag} = 12 \quad A$$

$$I_1 = \frac{T_a}{K_T} = \frac{0,924}{1,5535} = 0,595 \quad A$$

$$I_2 = \frac{T_{cv}}{K_T} = \frac{0,3077}{1,5535} = 0,198 \quad A$$

$$I_3 = \frac{T_d}{K_T} = \frac{0,3338}{1,5535} = 0,215 \quad A$$

$I_{pk} = \{I_1, I_2, I_3\}$ nin maksimum değeri alınır.

$$I_{pk} = 0,595 \quad A = 0,6 \quad A$$

$$6 \quad I_{pk} < I_{demag} \quad \text{ise}$$

. 7. adıma geçilir.

$$I_{pk} = 0,595 < I_{demag} = 12$$

Mıknatıs demagnetize değildir. 7. adıma geçilebilir.

$$7. \quad I_{pk} < I_{ps(max)} \quad \text{ise 8. adıma geçilir.}$$

$$I_{pk} = 0,595 < \infty$$

Güç kaynağının maksimum akımı henüz belirli olmadığından dolayı eşitsizlik sağlanmış olur ve 8. adıma geçilir.

c. Rotor sıcaklığının hesabı

$$\begin{aligned} 8. \quad \Psi &= 0,00393 \text{ (Bakır tel için)} \\ R_{th} &= 22,7^\circ\text{C/W} \\ K_E &= 1,93 \text{ V/1000 rpm} \\ \theta_{arm_{max}} &= 155^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Aşağıdaki ifadeler hesaplanır.

$$T_{rms} = \frac{T_{rms}}{K_T} = \frac{0,4108}{1,5535} = 0,264 \text{ A}$$

$$\theta_{rise} = \frac{R_a \cdot I_{rms}^2 \cdot R_{th}}{1 - R_a \cdot I_{rms}^2 \cdot R_{th} \cdot \Psi}$$

$$\theta_{rise} = \frac{1,99 \cdot (0,264)^2 \cdot 22,7}{1 - 1,99 \cdot (0,264)^2 \cdot 22,7 \cdot 0,00393}$$

$$\theta_{rise} = 3,20^\circ\text{C}$$

$$\theta_{arm} = \theta_{rise} + \theta_{amb} = 3,20 + 25 = 28,20^\circ\text{C}$$

9. $\theta_{arm} < \theta_{arm_{max}}$ ise 10'ncü adıma geçilir.

$$\theta_{arm} = 28,20 < \theta_{arm_{max}} = 155^\circ\text{C}$$

Motor sürekli operasyonda soğuk çalışır.

d. Güç kaynağını için gerekli maksimum voltajın hesaplanması.

$$10. \quad R_h = R_a [1 + \Psi(\theta_{arm} - 25)]$$

$$R_h = 1,99 [1 - 0,00393(28,20 - 25)] = 2,015 \text{ ohm}$$

$$N_0 = \frac{\omega_{pk} \cdot 60}{2\pi} = \frac{125,66 \cdot 60}{2\pi} = 1,2 \cdot 10^3 \text{ rpm}$$

$$V_1 = R_h \cdot I_1 + K_E \cdot N_0 = 2,015 \cdot 0,595 + 1,93 \cdot 1,2 = 3,51 \text{ V}$$

$$V_2 = R_h \cdot I_2 + K_E \cdot N_0 = 2,015 \cdot 0,198 + 1,93 \cdot 1,2 = 2,71 \text{ V}$$

$$V_3 = R_h \cdot I_3 + K_E \cdot N_0 = 2,015 \cdot 0,215 + 1,93 \cdot 1,2 = 2,75 \text{ V}$$

$V_{pk} = \{V_1, V_2, V_3\}$ nin maksimum degeri.

$$V_{pk} = 3,51 \text{ Volt}$$

11. $V_{pk} < V_{pk\max}$ ise 12'nci adıma geçilir.

$V_{pk} < \infty$ güç kaynağının voltajı henüz belirli değildir. Böylece, eşitsizlik sağlanmış olur. 12'nci adıma geçilebilir.

Sonuç : PITMAN 9432 d.c. servomotor seçilir. Servomotor, 5 volt ve 1 amperlik bir güç kaynağı ile uyumlu olarak çalışabilir.

5.5.3.2. Φ Ekseni ile ilgili hesaplamalar

Φ Eksenindeki hesaplamalar, r eksenine benzer olarak aşağıda verilmiştir.

1. Efektif statik moment

Φ Ekseni motor seçiminde belirlendiği gibi $T_L = 0$ olmaktadır.

2. Efektif atalet momenti

Efektif atalet momenti, Φ ekseni motor seçiminin ön hesaplamalarında belirlenmiştir.

$$J_L = 8,094 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

3. Toplam atalet momenti

$$J_T = J_M + J_L$$

PITMAN 9432 motoru için $J_M = 4,1663 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

$$J_T = J_M + J_L = 4,1663 \cdot 10^{-6} + 8,094 \cdot 10^{-6} = 1,226 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

4. Açısal ivmeler (Hızlanma ve yavaşlama)

a. Yumurta kartonu üzerinden yumurta konveyörüne harekette ϕ eksenini motorunun açısal ivmeleri (hızlanma ve yavaşlama saat ibresi dönüş yönünde).

$$\omega_a = \frac{rpm \cdot 2\pi}{60} = \frac{600 \cdot 2\pi}{60} = 62,83 \text{ rad/s}$$

$$\omega_a = \frac{600 \cdot 2\pi}{60} = 62,83 \text{ rad/s}$$

$$\alpha_a = \frac{\omega_a}{t_a} = \frac{62,83}{0,25} = 251,32 \text{ rad/s}$$

$$\alpha_a = \frac{\omega_a}{t_s} = \frac{62,83}{0,25} = 251,32 \text{ rad/s}^2$$

b. Candling istasyonundan, yumurta kartonuna harekette, ϕ eksenini motoruna açısal ivmeleri (hızlanma ve yavaşlama, saat ibresinin tersi dönüş yönünde).

$$\omega_a = \frac{rpm \cdot 2\pi}{60} = \frac{1200 \cdot 2\pi}{60} = 125,66 \text{ rad/s}$$

$$\omega_a = \frac{1200 \cdot 2\pi}{60} = 125,66 \text{ rad/s}$$

$$\alpha_a = \frac{\omega_a}{t_a} = \frac{125,66}{0,25} = 502,64 \text{ rad/s}^2$$

$$\alpha_d = \frac{\omega_d}{t_s} = \frac{125,66}{0,25} = 502,64 \text{ rad/s}^2$$

5. Katedilen açısal mesafeler

a. Karton üzerinden yumurta konveyörüne harekette ,
 ϕ eksenini dönme açısı = Trapez alanı

$$S_1 = \frac{rpm \cdot [(t_a + t_s + t_{cv}) + t_{cv}]}{2 \cdot 60 \cdot N} \cdot 360^\circ$$

N:10:1 (Dişli tertibinin redüksiyon oranı)

$$S_1 = \frac{600 \cdot [(0,25 + 0,25 + 0,25) + 0,25]}{2 \cdot 60 \cdot 10} \cdot 360^\circ = 180^\circ$$

b. Candling istasyonundan, yumurta kartonuna harekette, ϕ
 ekseninin dönme açısı = Üçgen alanı.

$$S_2 = rpm \cdot \left(\frac{t_a + t_s}{2 \cdot 60 \cdot N} \right) \cdot 360^\circ$$

$$S_2 = 1200 \cdot \left(\frac{0,25 + 0,25}{2 \cdot 60 \cdot 10} \right) \cdot 360^\circ = 180^\circ$$

6. Hızlanma ve yavaşlama momentleri

a. Yumurta kartonu üzerinden, konveyöre harekette ϕ eksenini
 motorunun oluşturduğu momentlerin hesabı (Saat ibresi dönüş
 yönünde).

$$T_a = J_T \cdot \alpha_a + T_f + (B + B_L) \omega_a + T_L$$

$$T_a = 1,226 \cdot 10^{-5} \cdot 251,32 + 2,824 \cdot 10^{-3} + 2,0196 \cdot 10^{-6} \cdot 62,83$$

$$T_a = 6,032 \cdot 10^{-3} = 0,603 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$$T_a = -J_T \cdot \alpha_a + T_f + T_L = -1,226 \cdot 10^{-5} \cdot 251,32 + 2,824 \cdot 10^{-3}$$

$$T_d = -2,572 \cdot 10^{-4} = 0,0257 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

$T_{cv} = T_f$ (motor sabit hızda iken sadece sürtünmeleri yenmelidir).

$$T_{cv} = 0,2824 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

b. Candling istasyonundan, yumurta kartonuna harekette ϕ eksenini motorunun oluşturduğu momentlerin hesabı (saat ibresinin tersi yönünde dönüş):

$$T_d = J_T \cdot \alpha_d + T_f + (B + B_L) \omega_d + T_L$$

$$T_d = 1,226 \cdot 10^{-5} \cdot 502,64 + 2,824 \cdot 10^{-3} + 2,0196 \cdot 10^{-6} \cdot 125,66$$

$$T_d = 9,24 \cdot 10^{-3} = 0,924 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_d = -J_T \cdot \alpha_d + T_f + T_L = -1,226 \cdot 10^{-5} \cdot 502,64 + 2,824 \cdot 10^{-3}$$

$$T_d = -3,338 \cdot 10^{-3} = 0,338 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

7. RMS momenti

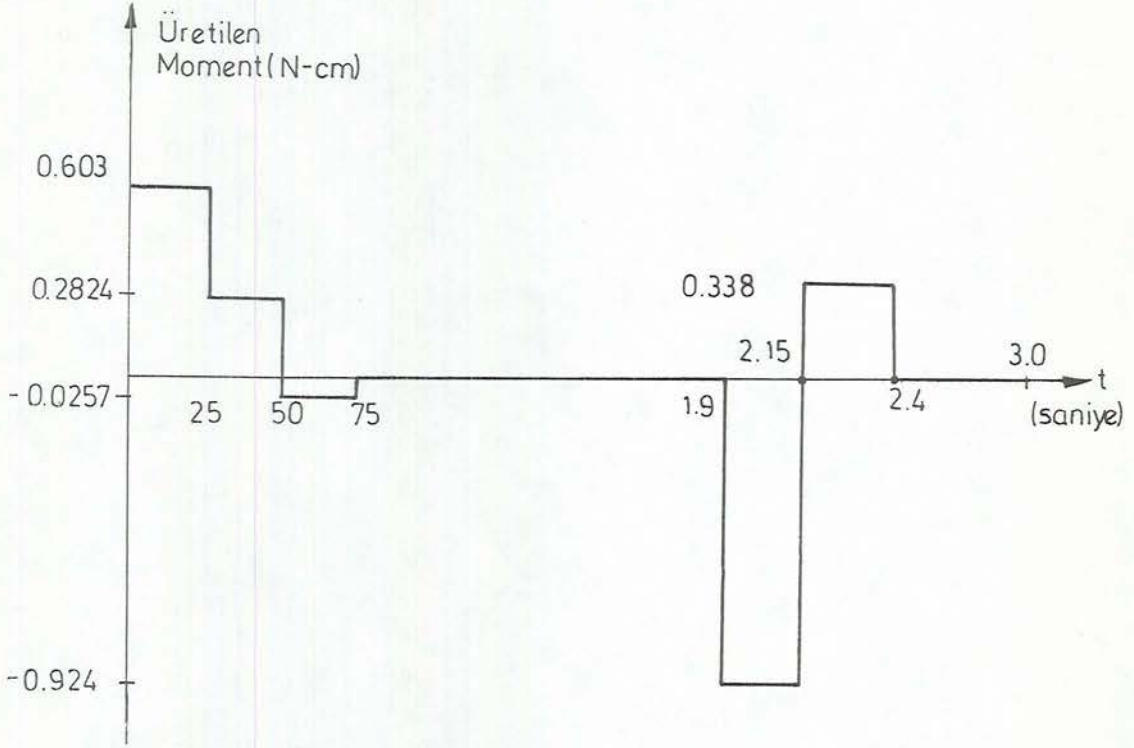
Motoru aşırı ısınmadan korumak için geliştirilen rms momentini motorun, sürekli arızalanmaya neden olan momentinden daha az olmalıdır (Klafter et. al., 1989).

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{t_d \cdot T_d^2 + t_s \cdot T_s^2 + t_{cv} \cdot T_{cv}^2 + t_a \cdot T_a^2}{t_d + t_s + t_{cv} + t_a}}$$

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{0,25 \cdot (0,603)^2 + 0,25 \cdot (0,924)^2 + 0,25 \cdot (0,0257)^2 + 0,25 \cdot (0,338)^2 + 0,25 \cdot (0,2824)^2}{3}}$$

$$T_{rms} = 0,343 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

Hesaplanmış olan $T_{r.m.s}$ momentı, motorun arızalanmaya neden olan momentinden küçük olduğundan, motor aşırı ısınmayacaktır.



ŞEKİL 5,12 ϕ Ekseninin Moment-Zaman Diyagramı (bir tam çevrim).

8. Güç kaynağının büyüklüğü

Bu eksenin servo amplifier gücü için gerekli d.c. kaynağı, motorun ürettiği zıt e.m.k'ni çalıştıracak büyüklükte olmalıdır. Seçilmiş olan Pitman 9432'nin 1200 rpm'lik bir maksimum devirde çalışması için minimum voltajı,

$$V_{\min} = 1200 \cdot K_g = 1200 \cdot \frac{1.93}{1000} = 2,32 \text{ V}$$

olur. İlave olarak kaynak; rotor ve devredeki direnç düşmelerini yenebilmelidir. 0,924 N.cm'lik bir maksimum momentte;

$$I = \frac{T_{pk}}{K_T} = \frac{0,924}{1,553} = 1.595 \text{ A}$$

akım gerekir. Bu yüzden en azından,

$$V = I \cdot R_a = 0,595 \cdot 1,84 = 1,10 \text{ V}$$

gerilim düşmesi olacaktır.

Güç kaynağının gerilimi, $V = 2,32 + 1,10 = 3,42 \text{ V}$ olacaktır.

Gerçek güç kaynağı gerilimi, devrelerin kendisi ve diğer bağlı güç harcayan elemanları, baskı devre panoları ve kadrolardaki omik kayıplar yüzünden daha fazla olacaktır.

Motor seçimde de belirtildiği gibi, Pitman 9432 d.c servomotoru, 5 volt ve 1 amper bir güç kaynağıyla uyumlu bir şekilde çalışabilir. 5 volt değeri motor kutuplarına verilmesi gereken gerilimdir.

Tablo 5,5 Yumurta Kontrolü ve Paketleme Uygulaması için Robot Dizaynı Özeti.

Parametre	θ	r	ϕ	z
Toplam atalet momenti (kg.m ²)	$1,854 \cdot 10^{-5}$	$1,1303 \cdot 10^{-5}$	$1,226 \cdot 10^{-5}$	U
Max. açısal ivme (rad/s ²) (hızlanma)	1676	754	502,64	U
Max. açısal hızı (rpm)	4000	1800	1200	U
Max. moment (N.cm)	33,48	1,72	0,924	U
RMS moment (N.cm)	22,142	0,5792	0,343	U
Dişli redüksiyonu veya kılavuz				
vida adımı (dev/m)	80:1	98,25	10:1	U
Hareketin max. aralığı (mm)	± 90	457,2-609,6	$\pm 180^\circ$	50,8
Güç kaynağının voltaj ihtiyacı (V)	55	6	5	U
Güç kaynağının akım ihtiyacı (A)	3,5	1	1	U

U : Uygulanamaz, uygun değildir. Z eksenini pnömatiktir, servo değildir.

6. SONUÇ

Robot konusu, robotların geometrisi, mekanik yapısı; kinematik, dinamik ve dayanım özellikleri, kontrolü, programlama dilleri, sensörleri ve ekonomiyi içeren çok geniş bir konu olmasından dolayı elektronik, makina, endüstri gibi bir çok mühendislik alanını kapsar.

Bu çalışmada, önce robot kollarının düz kinematiği incelenmiştir. Düz kinematik çözümde, sabit bir referans koordinat sistemine göre, bir uzvun pozisyonunu ve oryantasyonunu belirlemek için, robot kolu uzuv ve eklem parametreleri tanımlanmış ve 4x4 homojen transformasyon matrisi kullanılmıştır. Altı-eklemlili PUMA robot kolu için düz kinematik denklemler türetilmiştir. Uzuv ve eklem parametreleri verilen bir PUMA robot kolunun, birbirini izleyen i ve $i-1$ koordinat sistemlerine ait D-H transformasyon matrislerinin çarpılmasıyla T kol matrisi hesaplanmıştır. Hesaplanan T kol matrisine göre, PUMA robot kolunun pozisyonu, $P_x = -149,09$ mm, $P_y = 921,12$ mm, $P_z = 20,32$ mm ve bileğin oryantasyonu, $n_x = 0$, $n_y = 0$, $n_z = 1$, $S_x = 1$, $S_y = 0$, $S_z = 0$, $a_x = 0$, $a_y = 1$ ve $a_z = 0$ olarak bulunmuştur.

Ayrıca, yumurta kontrolü ve paketleme işlemini gerçekleştiren dört serbestlik dereceli bir robota ait hesaplamalarda, θ ekseninin 55 voltta E-532 d.c. servomotoru, r ekseninin 6 voltta Pitman 9432 d.c. servomotoru, ϕ ekseninin 5 voltta Pitman 9432 d.c. servomotoru ve z ekseninin de bir pnömatik silindir ile tahrik edilebileceği gösterilmiştir. Yumurta kontrolü ve paketleme işlemi yapılırken, θ , r ve ϕ eksenlerinde oluşan momentlerin zamana göre değişimlerini gösteren diyagramlar çizilmiştir. Moment-zaman diyagramlarından yararlanarak hesaplanan rms momentinin, aşırı ısınmasından dolayı motorlarda meydana gelen

arızalanmanın kontrolunda çok faydalı bir parametre olduğu gösterilmiştir. Eksenlerin, servomotorlardan aldıkları hareketleri, manipülatörün diğer uzuvlarına iletmeleri amacıyla, Θ eksenini için redüksiyon oranı 80:1 olan harmonik tahrik edici, r eksenini için adımı 98,25 devir/m olan kılavuz vida ve ϕ eksenini için de redüksiyon oranı 10:1 olan dişli çark mekanizması seçilmiştir. Yapılan hesaplamalarla, seçilen servomotor ve hareket iletim mekanizmaları ile yumurta kontrolu ve paketleme işlemi için gerekli sistem spesifikasyonlarının karşılanacağı gösterilmiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Asimov, I., 1982, The Complete robot, Doubleday and Company, Garden City, pp.209-220
- Asada, H. and Stoline, J.J.E., 1986, Robot analysis and Control, John Wiley and Sons, New York, 612 p.
- Balkan, T., 1988, Modelling, trajectory planning and control of computer controlled manipulators, Doctor of Philosophy Thesis, Mechanical Eng. Dept., METU, 223 p.
- Critchlow, J.A., 1985, Introduction to robotics, Macmillan Publishing Company, New York, 550 p.
- Coiffet, P. and Chirouze, M., 1983, An Introduction to robot technology, Kogan Page, London, 495 p.
- Denavit, J. and Hartenberg, R.S., 1955, A Kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices, Trans. of ASME, J.Applied Mechanics, pp.215-221.
- Elgenberger, J.F., 1980, Robotics, IFS Publications Ltd., Kompston, England, 620 p.
- Fu., K.S., Gazales, R.C. and Lee, C.S.G., 1987, Robotics: Control, sensing, vision and intelligent., Mc Graw-Hill Book Company, 550 p.
- Groover, M.P., 1986, Industrial robotics: Technology, programming and applications, Mc Graw-Hill, Inc., 495 p.
- Hunt, V.D., 1983, Industrial robotics handbook, Industrial Press Inc., 485 p.
- Klafter, R.D., Chmielewski, T.A. and Negin, Mi, 1989, Robotic engineering and integrated approach, Prentice-Hall international, inc., 744 p.
- Koren, Y., 1983, Computer control of manufacturing systems, McGraw-Hill international Book Company, 540 p.
- Lee, C.S.G., 1982, Robot arm kinematics, dynamics and control, computer, Vol.15, No.12, pp.62-80.
- Martin, G.H., Kinematics and dynamics of machines, 1969, McGraw-Hill Book Company, New York, 620 p.
- McClean, W.G. and Nelson, E.W., 1978, Engineering mechanics, McGraw-Hill Book Company, New York, 540 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- McCarthy, J.M., 1987, The Kinematics of robot manipulators, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 635 p.
- Paul, R.P., 1981, Robot manipulators: Mathematics, programming and control, MIT Press, Cambridge, MA, 480 p.
- Paul, R.P., Shimano, B. and Mayer, G.E., 1981, Kinematic Control equations for simple manipulators, IEEE Transactions on systems, Man and Cybernetics, Vol.SMC-11, No.6 p.p.449-460.
- Warnecke, H.J., 1982, Industrial robots, IFS Publications Ltd. Bedford, 450 p.