

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALTI EKSENLİ ENDÜSTRİYEL ROBOT TASARIMI**

Makina Mühendisi Volkan İZGİ

**FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ferhat DİKMEN**

**İSTANBUL, 2006**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	v
KISALTMA LİSTESİ .....	vi
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT .....	xi
1 GİRİŞ.....	1
2 ENDÜSTRİYEL ROBOTLAR .....	2
2.1 Robotun Tanımı .....	2
2.2 Robotun Tarihçesi.....	3
2.3 Robotların Sınıflandırılması .....	4
2.3.1 Kullanım Alanlarına Göre .....	5
2.3.2 Koordinat Sistemlerine Göre .....	5
2.3.2.1 Kartezyen Robot .....	5
2.3.2.2 Silindirik Robot .....	6
2.3.2.3 Küresel Robot .....	6
2.3.2.4 Scara Robot.....	7
2.3.2.5 Sarkaç Robot.....	7
2.3.2.6 Mafsallı (Articulated/Antropomormik) Robot .....	8
2.3.2.7 Paralel Robot .....	8
2.3.2.8 Omurgalı Robot .....	8
2.3.3 Kontrol Türlerine Göre .....	8
2.3.3.1 Pozdan Poza Kumandalı (Ardışık Kontrollü) Robot.....	8
2.3.3.2 Sürekli Yol Kumandalı (Yörünge Kontrollü) Robot.....	9
2.3.3.3 Adaptif Kumandalı Robot .....	9
2.3.4 Tahrik Mekanizmalarına Göre.....	10
2.3.4.1 Elektrik Tahrikli Robotlar .....	10
2.3.4.2 Hidrolik Tahrikli Robotlar .....	10
2.3.4.3 Pnömatik Tahrikli Robotlar .....	10
2.3.5 Yük Kapasitelerine Göre .....	11
2.3.5.1 Düşük Yük Kapasiteli Robotlar.....	11
2.3.5.2 Orta Yük Kapasiteli Robotlar .....	11
2.3.5.3 Yüksek Yük Kapasiteli Robotlar .....	11
2.3.5.4 Çok Yüksek Yük Kapasiteli Robotlar .....	11
3 ROBOTU OLUŞTURAN MODÜLLER VE ROBOTUN MEKANİK YAPISI..	12

3.1	Robotu Oluşturan Modüller .....	12
3.2	Robotlarda Güç İletim Mekanizmaları .....	14
3.2.1	Dişliler .....	15
3.2.2	Kayış-Kasnak Mekanizmaları .....	16
3.2.3	Bilyalı ve Makaralı Vida Mekanizmaları .....	16
3.2.4	Robotik-Otomasyonda Kullanılan Özel Mekanizmalar .....	16
3.2.4.1	Harmonic Drive Mekanizması.....	16
3.2.4.1.1	Harmonic Drive Mekanizmasının Çalışma Prensipleri .....	18
3.2.4.1.2	Harmonik Drive Tipleri .....	19
3.2.4.1.3	Harmonik Drive Mekanizmasının Üstünlükleri .....	19
3.2.4.1.4	Harmonic Drive Mekanizmasına Ait Örnekler .....	20
3.2.4.2	Cyclo Drive Mekanizması .....	22
3.2.4.3	RV Gears Mekanizması.....	23
3.3	Robotun Mekanik Yapısına Ait Örnekler.....	25
4	ROBOT KİNEMATİĞİ VE DİNAMİĞİ .....	29
4.1	Robot Kinematığı .....	29
4.1.1	Geometrik Esaslı Düz Kinematik Analiz Yöntemi .....	30
4.1.2	Homojen Dönüşüm Matris Yöntemi .....	32
4.1.3	Denavit – Hartenberg Yöntemi.....	35
4.2	Robot Dinamiği .....	37
4.2.1	Lagrange-Euler Formülasyonu .....	39
4.2.2	Newton-Euler Formülasyonu .....	40
4.2.3	Genelleştirilmiş d'Alembert Yöntemi .....	40
5	TASARLANAN ROBOTUN TANITIMI.....	41
5.1	Tasarımı Yapılan Robot ile İlgili Ön Bilgiler.....	41
5.2	Robotun Özelliklerinin Belirtilmesi .....	42
6	TASARLANAN ROBOTUN MEKANİK HESAPLAMALARI .....	43
6.1	Mafsal Momentlerinin Bulunması .....	43
6.1.1	Giriş .....	43
6.1.2	Mafsal Momentlerinin Hesap Yöntemi .....	43
6.2	Robotun Mekanik Hesapları ve Boyutlandırma Kontrolü.....	45
6.2.1	6. Eksen Parçalarının Hesapları .....	45
6.2.1.1	6. Eksen Harmonic Drive Seçimi .....	45
6.2.1.2	6. Eksen Güç Akışı ve Motor Gücü Hesabı.....	51
6.2.1.3	6. Eksen 1. Dişli Çark Grubu Bilgileri .....	54
6.2.1.4	6. Eksen 1. Kayış-Kasnak Grubu Bilgileri .....	55
6.2.1.5	6. Eksen 2. Dişli Çark Grubu Bilgileri .....	55
6.2.1.6	6. Eksen 2. Kayış-Kasnak Grubu Bilgileri .....	55
6.2.2	5. Eksen Parçalarının Hesaplanması.....	56
6.2.2.1	5. Eksen Harmonic Drive Seçimi .....	56
6.2.2.2	5. Eksen Güç Akışı ve Motor Gücü Hesabı.....	61
6.2.2.3	5. Eksen 1. Kayış-Kasnak Grubu Bilgileri .....	62
6.2.2.4	5. Eksen Dişli Çark Bilgileri.....	63
6.2.3	4. Eksen Parçalarının Hesaplanması.....	64
6.2.3.1	4. Eksen Harmonic Drive Hesabı .....	64
6.2.3.2	4. Eksen Güç Akışı ve Motor Gücü Hesabı.....	69
6.2.3.3	4. Eksen Kayış-Kasnak Grubu Hesabı .....	70

6.2.4	3. Eksen Parçalarının Hesaplanması.....	71
6.2.4.1	3. Eksen Harmonic Drive Hesabı .....	71
6.2.4.2	3. Eksen Güç Akışı ve Motor Gücü Hesabı.....	74
6.2.5	2. Eksen Parçalarının Hesaplanması.....	75
6.2.5.1	2. Eksen Harmonic Drive Hesabı .....	75
6.2.5.2	Dengeleyici Yay Bilgileri .....	80
6.2.5.2.1	Dış Yay Bilgileri.....	80
6.2.5.2.2	İç Yay Bilgileri .....	80
6.2.5.3	2. Eksen Güç Akışı ve Motor Gücü Hesabı.....	81
6.2.6	1. Eksen Parçalarının Hesaplanması.....	81
6.2.6.1	1. Eksen Harmonic Drive Hesabı .....	81
6.2.6.2	1. Eksen Güç Akışı ve Motor Gücü Hesabı.....	84
6.2.6.3	1. Eksen Kayış-Kasnak Grubu Bilgileri .....	85
6.2.7	Kullanılan Rulmanların Kodları ve Ömürleri.....	85
7	TASARLANAN ALTI EKSENLİ ROBOTUN KONUM MATRİSİNİN BULUNMASI .....	89
8	SONUÇLAR.....	94
	KAYNAKLAR.....	95
	EKLER.....	96
Ek 1	Tasarımı Yapılan Robotu Genel Yapısı.....	97
Ek 2	6. 5. 4. Eksenlerin Konstrüksiyon Yapıları .....	98
Ek 3	3. 2. 1. Eksenlerin Konstrüksiyon Yapıları .....	99
	ÖZGEÇMİŞ.....	100

## SİMGE LİSTESİ

A	Homojen Transformasyon Matrisi
b	Dişli kayış diş genişliği
B	Dişli çark diş genişliği
$E_k$	Kinetik enerji
$E_p$	Potansiyel enerji
$F_a$	Eksenel kuvvet
$F_n$	Normal kuvvet
$F_r$	Radyal kuvvet
$F_t$	Dişli kayış için toplam germe kuvveti
i	Çevrim oranı
I	Atalet Momenti
k	Yay katsayısı
m	Modül
$M_{av}$	Harmonicdrive'a gelen ortalama moment
$M_{max\ tek}$	Sistemin ihtiyacı olan maksimum tekrarlanabilir moment değeri
$M_M$	Harmonicdrive'ın izin verdiği maksimum moment değeri
$M_R$	Harmonicdrive'ın izin verdiği maksimum tekrarlanabilir moment değeri
$n_{av}$	Harmonicdrive için izin verilen ortalama giriş devri
$n_{in\ av}$	Harmonicdrive için ortalama giriş devri
$n_{in\ max}$	Harmonicdrive için izin verilen maksimum giriş devri
$n_k$	Acil duruş öncesi devir
$n_{out\ av}$	Harmonicdrive için ortalama çıkış devri
$N_{k\ maz}$	Acil Duruş Sayısı
p	Kayış adımı
P	Üç Boyutlu uzayda pozisyon vektörü
$P_{hes}$	Dişli kayış için hesaplanan güç
$P_1$	Dişli kayış için aktarılabilir güç
R	Rotasyon matrisi
$R_e$	Malzemenin Akma dayanımı
$R_m$	Malzemenin kopma Dayanımı
$S_{Diş\ kırılması}$	Dişli çark için, diş dibi kırılmasına göre emniyet katsayısı
$S_{yüzey\ aşınması}$	Dişli çark için, yüzey aşınmasına göre emniyet katsayısı
$t_k$	Acil duruş süresi
$\eta$	Verim
$\alpha$	Açısal ivme
$\alpha_o$	Dişli çark kavrama açısı
$\beta$	Dişli çark helis açısı
$\Sigma$	Konik dişli çark gurubu shaft açısı
$\omega$	Açısal hız
$\varphi$	$z_o$ eksenine göre dönme
$\theta$	Bir sonraki eksen takımına göre dönme
$\theta_0$	Mafsal Momenti
$\psi$	$z_1$ eksenine göre dönme

## KISALTIMA LİSTESİ

L-E	Lagrange-Euler
N-E	Newton-Euler
D-H	Denavit-Hartenberg
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu
HTM	Homojen Transformasyon Matrisi

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Kartezyen koordinatlı robotun yapısı (TS EN ISO 8373, 1999).....	5
Şekil 2.2 Silindirik koordinatlı robotun yapısı (TS EN ISO 8373, 1999).....	6
Şekil 2.3 Küresel koordinatlı robotun yapısı (TS EN ISO 8373, 1999).....	6
Şekil 2.4 Scara robotun yapısı (TS EN ISO 9787, 2005).....	7
Şekil 2.5 Sarkaç robotun yapısı (TS EN ISO 8373, 1999).....	8
Şekil 2.6 Mafsallı robotun yapısı (TS EN ISO 8373, 1999).....	8
Şekil 3.1 ABB firmasına ait IRB6600 model robot.....	12
Şekil 3.2 Dişli Çeşitleri.....	15
Şekil 3.3 Kayış ve zincir mekanizması.....	16
Şekil 3.4 Harmonicdrive firmasına ait HFUC komponent seti (Harmonicdrive).....	17
Şekil 3.5 Harmonic drive parçaları (Harmonicdrive).....	18
Şekil 3.6 Harmonicdrive mekanizmasının çalışma prensibi (Harmonicdrive).....	19
Şekil 3.7 Robotun bileğinde Harmonic drive kullanım örneği (Engineering Handbook).....	21
Şekil 3.8 Robotun omzunda Harmonic drive kullanım örneği (Engineering Handbook).....	22
Şekil 3.9 Cyclo Drive mekanizmasının çalışma prensibi (Sumitomo).....	23
Şekil 3.10 RV Gears mekanizmasının konstrüktif yapısı (Teijin-Seiki).....	24
Şekil 3.11 RV Gears mekanizmasının çalışma prensibi (Teijin Seiki).....	24
Şekil 3.12 RV Gears mekanizmasının, mekanizma blok diyagramı (Teijin-Seiki).....	25
Şekil 3.13 Robotların Mekanik Yapısı Ait Örnek ( USPTO 5456132, 1995).....	26
Şekil 3.14 Robotların Mekanik Yapısı Ait Örnek ( USPTO 5456132, 1995).....	27
Şekil 3.15 Robotların Mekanik Yapısı Ait Örnek ( USPTO 6014909, 2000).....	28
Şekil 4.1 S rijit cismine ait eksen takımı.....	30
Şekil 4.2 Euler açıları.....	32
Şekil 4.3 Denavit-Hartenberg parametreleri.....	36
Şekil 4.4 Ters ve Düz Dinamik.....	38
Şekil 6.1 Mafsal momentinin bulunmasının şematik gösterimi.....	44
Şekil 6.2 Bileğe monte edilmiş aparatın ağırlık merkezi kabulü.....	46
Şekil 6.3 6. eksen mafsalına gelen kuvvetler.....	49
Şekil 6.4 Bileğe monte edilmiş aparatın ve 6. eksenin ağırlık merkezi kabulü.....	56
Şekil 6.5 Bileğe monte edilmiş aparatın ve diğer parçaların ağırlık merkezi kabulü.....	65
Şekil 6.6 3.Eksen ağırlık merkezi kabulü.....	71
Şekil 6.7 3.Eksen ağırlık merkezi kabulü.....	75
Şekil 6.8 3.Eksen ağırlık merkezi kabulü.....	81
Şekil 7.1 Tasarımı yapılan robotun mafsallarına yerleştirilen eksen takımları.....	89

## ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 Tasarlanan robot için D-H parametreleri.....	90
--	----



## ÖNSÖZ

Gelişen teknolojiyle birlikte, tüm dünya endüstrilerinde robot kullanımı hızla artmaktadır. Robotlu sistemlerin sağlamış olduğu esnek ve kaliteli üretim, günümüz rekabet ortamında firmalara büyük avantajlar sağlamaktadır. Üretimde kullanılan robot adetlerinin artışı, robotlardan beklenenleri değiştirmiştir. Günümüzde daha az enerji harcayan, bakım periyodları daha uzun olan robotlara ihtiyaç duyulmaktadır. Beklentileri karşılayabilmek için, robotun konstrüksiyonunda kullanılan mekanizmaların kalitelerinin yükseltilmesi, optimizasyona gidilmesi, yük kapasitesi/ağırlık oranının artırılması ve robot kontrolünün iyileştirilmesiyle enerji sarfiyatı azaltılmaya çalışılmaktadır. Tez çalışmamda, robotların belli kriterlere göre sınıflandırılması yapılmış, iç mekanizmaları tanıtılmış ve günümüzün beklentilerine cevap verebilecek altı eksenli, 150kg yük kapasiteli bir robot tasarımı yapılmıştır.

Çalışmalarım sırasında beni destekleyen ve deneyimlerini benimle paylaşan değerli danışmanım Sn.Doç.Dr. Ferhat DİKMEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında yardımlarını benden esirgemeyen Sn.Dr. Tamer KEPÇELER'e, iş arkadaşlarım Sn.Mak.Müh. Sedat AKSU ve Sn.Mak.Müh. Metin AĞAYA'ya, Teknodrom Robotik ve Otomasyon Ar-Ge şefi Sn.Mak.Yük.Müh. Ürün DOĞAN'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

## **ÖZET**

Hazırlamış olduğum bu çalışmada, altı eksenli mafsallı (articulated/antropomormik) robot tasarımı yapılmıştır. Konuyla ilgili olarak endüstriyel robotların tanımı, sınıflandırılması yapıp konstrüktif yapıları örneklerle açıklanmıştır. Ayrıca robot kinematiği ve dinamiği hakkında bilgiler verilip, tasarımı yapılan robotun uç konum matrisi bulunmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Robot, konstrüksiyon, antropomormik, mafsal, kinematik, dinamik.

## **ABSTRACT**

In this study, six degree of freedom articulated robot was designed. In addition to this, describing and classification of robots were described and the structure of robots was explained with the samples. Moreover, the kinematics and dynamics of robots were mentioned and the position matrix of designed robot was calculated.

**Keywords:** Robot, construction, articulated, joint, kinematics, dynamics.

## 1 GİRİŞ

Son yıllarda endüstride artan rekabet, üretimde otomasyona geçişi zorunlu hale getirdi. Bunun doğal bir sonucu olarak da, otomasyonun vazgeçilmez bir unsuru olan robotlar büyük önem kazandı. Üzerlerinde yapılan ufak eklentilerle, her türlü işi yapabilen robotlar, üretimin her safhasın rol almaya başladılar. Fabrikalardada artan robot sayısıylabirlikte, daha az enerji harcayan ve daha uzun bakım periyodu gereksinimi olan robotlara ihtiyaç duyulmaya başlandı. Bunun üzerine robot üreticileri robotlarda enerji sarfiyatını azaltıp ömür arttırmak için bazı çalışmalar yapmaya başladılar. Bu çalışmalar iki kısımda yapıldı. Biri robot kontrolünde yapılan iyileştirmeler diğeri ise robot konstrüksiyonunda yapılan iyileştirmelerdir. Robot kontrolünde yapılan iyileştirmeler neticesinde, daha iyi bir yörünge planlaması ile enerji sarfiyatı azaltılmaya çalışılmıştır. Robot konstrüksiyonunda yapılan iyileştirmeler ise tasarımın hafifletilmesi, kullanılan malzemenin kalitesinin artırılması ve robotun iç mekanizmalarının optimizasyonudur. Bu tip iyileştirmeler ile yük kapasitesi/ağırlık oranı artırılarak enerji sarfiyatından kısma meydana getirilmektedir. Tasarımın hafifletilmesi, bilgisayarda FEM analizi ile kollarda ve gövde de optimum şartları sağlayarak yapılmaktadır. Robotun iç mekanizmalarının optimizasyonu ise minimum parça sayısıylabaktarım yapmaktan geçer.

Günümüzde, firmaların rekabet ettiği en önemli konulardan biri de tasarımdaki estetikdir. Yapılan ürünün işlevi ne olursa olsun, müşteriler estetiğe büyük önem vermektedir. Yapılan makine her ne olursa olsun, estetik kaygıları olan ve estetiğe önem veren firmalar kazanmaktadır. Yapılan robotun estetiği önemlidir. Tasarımı, imalatı zorlamayacak şekilde estetik yapmak, tasarımdan keskin köşeleri ayıklayıp, yumuşatmak, düz olan kolları hafif eğrisel yapmak müşteriler açısından daha cazip olabilir.

## 2 ENDÜSTRİYEL ROBOTLAR

### 2.1 Robotun Tanımı

Robotlar hakkında, günümüze kadar birçok farklı tanımlama yapılmıştır. Bunun nedeni, robotu tanımlayanın, robota bakış açısıdır. Robotlar hakkında teknik bilgiye sahip olmayan bir kişi robotu, yürüyebilen, konuşabilen, insan gibi hareket edebilen, kısacası mekanik bir insan modeli olarak tanımlar. Endüstride çalışan bir kişi ise robotları, çok hızlı çalışan, yorulmayan, hatasız iş yapan, 24 saat durmadan çalışabilen, maaş, sigorta istemeyen işçi makine olarak tanımlar.

Endüstriyel robotlar konusunda ilgili robot kuruluşlarının yaptığı tanımlar daha da farklıdır. Webster sözlüğünde robot, “genellikle insanların gerçekleştirdikleri işlevleri yerine getiren otomatik araçlar” olarak tanımlanmaktadır. Ancak bu tanıma göre bir çamaşır makinesi de robot sayılabilmektedir.

Robotun, Amerika Robot Enstitüsü tarafından yapılan tanımı ise, “malzemelerin, parçaların ve araçların hareket ettirilebilmesi için tasarlanmış olan çok fonksiyonlu ve programlanabilir manipülatör veya farklı görevleri yerine getirebilmek için değişken programlı hareketleri gerçekleştirebilen özel araç” şeklindedir.

Endüstriyel robotlarla ilgili en kapsamlı tanım ve sınıflandırma TS EN ISO 8373 standardı ile belirtilmiştir. Tanım, “Manipülasyon yapan sanayi robotları – Robot” başlığı altında şu şekilde ifade edilmiştir. Sanayide otomasyon uygulamalarında kullanılmak amacıyla, bir yere tespit edilen veya mobil olan, otomatik olarak kumanda edilen, tekrar programlanabilir, çok amaçlı üç veya daha çok eksenle programlanabilir manipülâtör (TS EN ISO, 1999).

Manipülâtörün tanımı ise ilgili standartta şu şekilde belirtilmiştir, “Mekanizması, genellikle birbirine uyumlu veya eklenmiş bir seri parçadan oluşan; cisimleri (parça veya takımları) genellikle bir kaç serbestlik derecesinde tutmak ve/veya hareket ettirmek amacıyla kullanılan makina (TS EN ISO, 1999).

Robot tanımında kullanılan terimlerin (gerekliliklerin) detaylı açıklamaları ise şöyledir:

- Tekrar programlanabilme, fizikî değişiklik olmaksızın programlanmış hareketlerinin veya yardımcı fonksiyonlarının değişebilir olması (TS EN ISO, 1999). Buna örnek olarak şunu söyleyebiliriz, bir araba fabrikasında, iş hattındaki bir punta kaynak robotunun farklı model

taşıtları sadece program değişikliği ile putalayabilmesi.

- Çok amaçlılık, fiziki değişiklik yapılarak değişik uygulamalara uyarlanabilme kabiliyeti (TS EN ISO, 1999). Araba fabrikasında, iş hattında punta kaynağında kullanılan bir robotun, uç kısmına (gripper) bağlanmış punta kaynak aparatını (tooling) söküp, yerine montaj aparatı bağlayıp montajda kullanımı, bu tanıma uyan bir örnek olabilir.
- Eksen, robotun doğrusal veya dairesel moddaki hareketini belirlemekte kullanılan terim.

## 2.2 Robotun Tarihi

Robot fikrinin hangi tarihlerde başladığını söylemek zor olmakla beraber kullanıma örnek olarak aşağıda belirtilen olaylar gösterilebilir.

Robotların ilk temsilcisi olarak su saatleri gösterilmektedir. Bu CLEPSYDRA denilen bir su saatidir ( Ben-Zion Sandler, 1991). Keşfedildiği tarih milattan önce 250 yıllarında olduğu sanılmaktadır. Ortaçağ Selçuklu Türklerinden Sükman boyundan Cizreli Ebul-İz yalnız suyun potansiyel ve kinetik enerjisinden faydalanarak makineler yaptı.

*Ötücü Kuş*, kurulu düzeneğin tarafından miller ve kaldıraçlar yardımıyla kuşun kanatları, kafası ve gagası kontrol edilebiliyordu. Ayrıca vana ve pistonlar sayesinde kuş sesi çıkartılıyordu. Çalışırken kafası ve kanatları hareket ettirip öterken de gagasını oynatabiliyordu. Bunlardan çok sayıda üretildi ve ev dekorasyonlarında kullanıldı. Kuşun hareketleri belirli bir sırayla yapılıyordu, bu sıra takibi için miller kullanılıyordu, işte bu miller ilk bilinen robot yapısıdır.

*Otomatik Flütçü*, müzisyen kıyafet giydirilmiş otomatik flütçü, dudaklarına yapışık flüte hava pompalanırken, parmaklarıyla da flütün deliklerini açıp kapatarak müzik yapabilmekteydi. Yine millerle sağlanan bir takım hareketlerle işlem gerçekleştirilebiliyordu. Bu flütçü 1738 yılında Jacques de Vaucanson tarafından yapılmıştır ( Ben-Zion Sandler, 1991).

18. yüzyılda Jacquet Droz, oğlu Pierre, büyük oğlu Henry Louis ve Jean Frederic Leshot yazı yazan, çizen ve müzik aleti çalan androidler yaptılar ( Ben-Zion Sandler, 1991).(kam sistem programlı)

Dünya literatüründe ilk defa (Robot) kelimesi 1917 Karel Capek'in kısa hikayesi olan *Opilec* de geçmiştir. Fakat asıl kavram olarak robot anlayışını 1921 yılında yine aynı yazarın *Rossum's Universal Robots (R.U.R)* adlı tiyatro eserinde ortaya atılmıştır (M.Vidyasagar, 1989).

Dünyada ilk olarak robotlarla ilgilenen bilim dalına (Robotik) ifadesini kullanan kişi Issac Asimov'dur. Kelimenin kullanıldığı eser Runaround (1942) adlı hikayesidir, bu eser *I, Robot* adlı kitabında yer almıştır(1950). Ünlü bilimkurgu yazarı hikayelerinde henüz olmayan fakat ileride olması muhtemel sorunlarda ilgili durumları anlatmaktadır.

Sayısal kontrol ve uzaktan kumanda kavramların gelişmesiyle robotic çalışmalarında önemli gelişmeler ortaya çıkmıştır. John Parson tarafından uzaktan kumandalı olarak yapılan makine 1940 yıllarında Amerika Birleşik Devletleri Hava Kuvvetleri tarafından ardında da Atom enerjisi Komisyonu tarafından kullanılmaya başlandı. Radyoaktif maddeler üzerinde yapılan çalışmalarda, önemli işlemlerde kullanıldı. Bu sistem endüstri alanında da kullanılmaya başlandı. Cyril Walter Kenwardla birlikte 1954 ün Mart ayında patentini aldılar. Böylece ilk endüstriyel robot denilebilecek bir sitem tasarlandı.

Belli başlı gelişmelerden biri de fizik müh. Josheph F.Engelberger ve George C.Devol tarafından gerçekleştirildi, parça aktarım robotu yaptılar ve çalışmaları sonucunda "Unitmate" adlı firmayı kurdular(1949). Bu firma ilk robotik üzerine kurulan firmadır.

Bu tarihten sonra dünya üzerinde özellikle Amerika, Avrupa ve Japonyada pek çok firma robotic üzerine çalışmaya başladılar ve bu ilgi gelişmeyi de beraberinde getirdi. Bu gelişmeler arasında göze çarpan ilk uygulama dili olan WAVE Stanford akedemisi tarafından geliştirildi ve robotic bilime kazandırıldı. 1974 de Al ve ticari amaçlı olan Val yapıldı. Val ultimate tarafından geliştirilmişti ve buna bağlı olarak PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly ) geliştirilerek üzerinde uygulandı. Nispetten kısa eklemli bir robottu fakat temel olarak General Motors firmasının montaj hattı baz alınmıştı. 1979 yılında Yamanshi Üniversitesi tarafından montaj amaçlı olan SCARA (Selective Compliance Arm for Robotic Assembly ) geliştirildi. Bu sistem ilk olarak 1981'de piyasaya sürüldü.

90'lı yıllara gelindiğinde robotlar artık çok çeşitli alanlarda ve özellikle insanların rahatlıkla yapamayacağı işleri kusursuz yaparak insanoğlunun yaşam sürecinde yerlerini aldılar. Bu yüzden bir çok farklı alanda kullanabilmektedirler.

### **2.3 Robotların Sınıflandırılması**

Endüstriyel robotlar birçok farklı kategoride sınıflandırılabilir. Aşağıda 5 farklı kategoride sınıflandırmaları verilmiştir. Kullanım alanlarına göre, koordinat sistemlerine göre, kontrol türlerine göre, tahrik mekanizmalarına göre ve yük kapasitelerine göre.

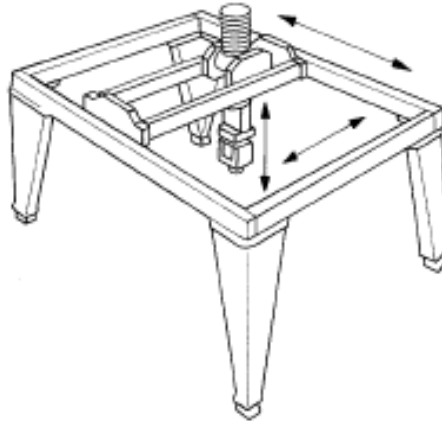
### 2.3.1 Kullanım Alanlarına Göre

- Endüstriyel kullanım amaçlı robotlar;
  - Kaynak robotu
  - Montaj robotu
  - Döküm robotu
  - Malzeme taşıma robotu
  - Paletleme, paketleme robotu
  - Makinede işleme robotu
  - Yüzey kaplama robotu
  - Taşlama, parlatma robotu
- Deneysel, araştırma amaçlı robotlar
- Tıpta kullanılan robotlar
- Bilimsel amaçlı robotlar (uzay ve okyanuslarda)
- Sahne, film amaçlı robotlar
- Savunma ve silah amaçlı robotlar

### 2.3.2 Koordinat Sistemlerine Göre

#### 2.3.2.1 Kartezyen Robot

Eksenleri kartezyen koordinat sistemlerine uyan üç kayar mafsallı kola sahip olan robot (TS EN ISO 8373, 1999). Robotun yapısı Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Kartezyen robot uygulaması olarak, punta kaynağı, ambalajlama gibi örnekleri sayabiliriz.

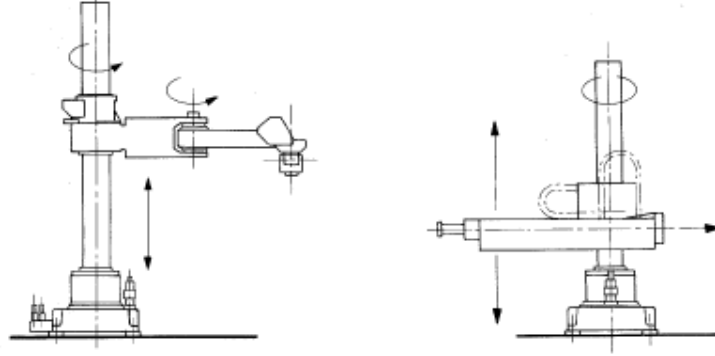


Şekil 2.1 Kartezyen koordinatlı robotun yapısı (TS EN ISO 8373, 1999).



### 2.3.2.2 Silindirik Robot

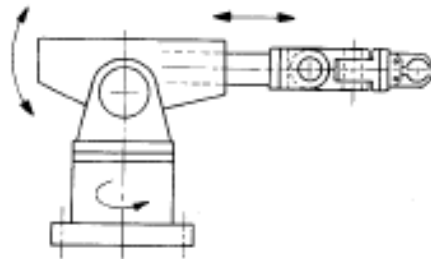
Kolu en az bir döner mafsalsal ve en az bir kayar mafsaldan meydana gelen, eksenleri silindirik koordinat sistemi şeklinde olan robot (TS EN ISO 8373, 1999). Robotun yapısı Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Bu robot tipine ait bir uygulama olarak, iş hatları arasında malzeme transferini söyleyebiliriz.



Şekil 2.2 Silindirik koordinatlı robotun yapısı (TS EN ISO 8373, 1999).

### 2.3.2.3 Küresel Robot

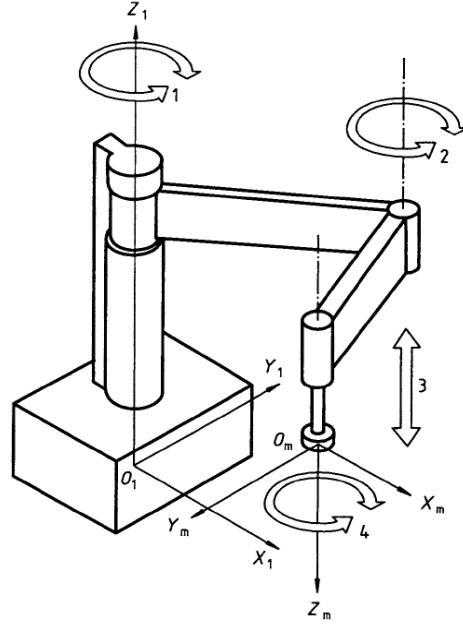
Kolu en az iki döner mafsalsal ve en az bir kayar mafsaldan meydana gelen, eksenleri kutupsal koordinat sistemi şeklinde olan robot (TS EN ISO 8373, 1999). Robotun yapısı Şekil 2.3’de gösterilmektedir. Bu robot tipinin en çok kullanıldığı yerler, sahne ve filmlerdir. Kamerayı değişik açılarda, sürekli hareketli ve titreşim olmadan tutma amacıyla kullanılırlar.



Şekil 2.3 Küresel koordinatlı robotun yapısı (TS EN ISO 8373, 1999).

### 2.3.2.4 Scara Robot

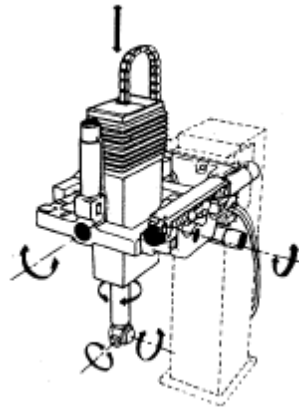
Seçilmiş bir düzlemde uyumu gerçekleştirmek amacıyla, birbirine paralel iki döner mafsala sahip robot. SCARA terimi “Selectively Copmliant Arm for Robotic Assembly” (Robotik sistemi için seçici uyumlu kol) cümlesinin kısaltılmışıdır (TS EN ISO 8373, 1999). Robotun yapısı Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Scara robotun yapısı (TS EN ISO 9787, 2005)

### 2.3.2.5 Sarkaç Robot

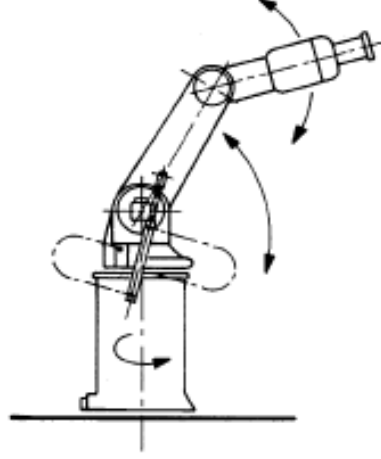
Mekanik yapısı menteşe dönmesini sağlayan bir alt birimi olan üniversal mafsallı küresel robot (TS EN ISO 8373, 1999). Robotun yapısı Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Bu tip robotlar talaşlı imalat işlerinde kullanılırlar.



Şekil 2.5 Sarkaç robotun yapısı (TS EN ISO 8373, 1999).

### 2.3.2.6 Mafsallı (Articulated/Antropomormik) Robot

Kolu üç adet döner mafsaldan meydana gelen robot (TS EN ISO 8373, 1999). Robotun yapısı Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Mafsallı robotlar endüstride en fazla kullanılan robotlardır. Her uygulamaya adapte edilebilirler.



Şekil 2.6 Mafsallı robotun yapısı (TS EN ISO 8373, 1999)

### 2.3.2.7 Paralel Robot

Kolları (birincil eksenleri) senkronize olarak çalışan üç kayar mafsaldan meydana gelen robot. Bu tip robotlar, genellikle iş hatlarında malzeme transportasyonu yapma amaçlı kullanılırlar.

### 2.3.2.8 Omurgalı Robot

Kolu iki veya daha çok küresel mafsaldan meydana gelen robot. Bu tip robotların endüstride kullanım alanları bulunmamaktadır.

## 2.3.3 Kontrol Türlerine Göre

### 2.3.3.1 Pozdan Poza Kumandalı (Ardışık Kontrollü) Robot

Robotun, pozlar arasında takip edeceği sabit bir yol olmaksızın, programlanmış pozlarından (pozisyon) geçirilmesi suretiyle kullanıcı tarafından robota sadece dikte ettirilebilen kumanda işlemi (TS EN ISO 8373, 1999). Robotun kontrol sistemi, makine hareketlerinin birbirini takip eden sıralı bir düzende olmasını sağlar; bir hareket sonlandığında bir sonraki başlar.

Burada robotun hareketi ikilidir, on/off, başla/dur gibi. Robotun bütün konuları ve hareket dizileri, basit bir programlama aletinin yardımıyla programlanabilir. Ardışık kontrollü robotların tipik uygulamaları noktadan noktaya (PTP, point-to-point) ve tekrarlamalı (play-back) uygulamalarıdır.

### **2.3.3.2 Sürekli Yol Kumandalı (Yörünge Kontrollü) Robot**

Robotun, programlanmış pozlar arasında, programlandığı bir hızda takip edeceği yolun, kullanıcı tarafından robota sadece dikte ettirilebildiği kumanda sistemidir (TS EN ISO 8373, 1999). Şimdiki konumundan bir sonraki konumuna ulaşmak için gerekli olan zaman-tabanlı yörüngeyi belirleyen komutlara bağlı olarak, kontrol edilebilen 3 yada daha fazla eksenin birlikte hareket edebilmesini sağlayan robot tipidir (bu hareket normal de interpolasyon ile sağlanır). Bu türdeki robotlar genelde tekrarlamalı, CNC yada sürekli yörünge robotları olarak tanımlanır.

### **2.3.3.3 Adaptif Kumandalı Robot**

Sensör kontrolü, adaptif kontrolü yada öğrenme kontrolüne sahip olan robotlardır. Sensörlerden gelen bilgilere ve geçmiş tecrübelerine dayanarak işleri yada görevleri planlayabilme ve zamanlayabilme, iteratif davranışlar sonucunda öğrenme, bu tür fonksiyonlara birer örnektir. Parçaları toplarken görüntü işleme yardımıyla konumunu düzelten bir robot yada sürekli dikiş takibini sağlayan fonksiyonlarla donatılmış bir kaynak robotu adaptif robotlar için tipik örneklerdir. Bu tanımda geçen bazı terimler ISO 8373 standardında şu şekilde tanımlanmıştır.

- Algılayıcı kumanda : Robot, hareketinin veya kuvvetinin dış algılayıcı çıktılarına göre ayarlandığı kumanda düzeni (TS EN ISO 8373, 1999).
- Uyarlanabilen (Adaptif) kumanda : Kumanda sistemine ait parametrelerin, işlem esnasında algılanan şartlara göre ayarlandığı kumanda düzenidir (TS EN ISO 8373, 1999).
- Öğrenen kumanda : Önceki çevrimler esnasında elde edilen tecrübenin, kontrol parametrelerinin ve/veya algoritmalarının değiştirilmesinde otomatik olarak kullanıldığı kumanda düzenidir (TS EN ISO 8373, 1999)
- Teleoperatörlü robot : Bir operatör tarafından uzaktan kontrol edilen robot tipidir. Bu robotun fonksiyonu insanın sensör-motor fonksiyonlarını uzak mesafelere taşımaktadır ve operatörün davranışlarına göre makinanın vereceği tepkiler programlanabilir. Uzaktan kumandalı robot yada bilgisayar destekli teleoperatör olarak bilinen sistemler bu

kategoriye girerler. Bu tür robotlar basit yada karmaşık kontrol yapısına sahiptirler, fiziksel (kablo, koblakanalı, boru) yada fiziksel olmayan (kablesiz) kanallar ile kumanda edilirler. Sadece mekanik bağlantılarla kumanda edilenler bu tanımın dışındadır.

### **2.3.4 Tahrik Mekanizmalarına Göre**

#### **2.3.4.1 Elektrik Tahrikli Robotlar**

Elektrikle tahrik, robotik sistemlerde en fazla uygulanan tahrik tipidir. Kontrol, hız ve hassasiyet üstünlüğü, ucuzluk, kolay uygulanabilirlik, temizlik gibi avantajlarının yanı sıra dişli sistemlerindeki boşluk nedeni ile düşük hassasiyet ve güç/ağırlık oranının düşüklüğü dezavantajları da vardır. Motor bünyesindeki kıvılcımlanma sebebiyle parlayıcı ortamlarda kullanım sakıncası vardır. Fakat gelişen teknoloji ile dış ortamın kıvılcımdan etkilenmemesi sağlanmıştır. Yakın geçmişe kadar elektrikle tahrik denince yalnız DC motorlar anlaşılırken günümüzde fırçasız ve moment karakteristiklerinin daha düzgün olmasından dolayı AC motorlar daha sık kullanılmaktadır. Ayrıca robottan beklenen konum hassasiyeti çok önemli değilse ve açık çevrimli kontrol sistemi kullanılıyorsa, step motorlar kullanılabilir. Elektriksel tahrik genellikle robotlarda direkt tahrikli olarak uygulanır.

#### **2.3.4.2 Hidrolik Tahrikli Robotlar**

Hidrolik tahriğin başlıca kullanılma sebebi büyük kuvvetlerin gereksinimidir. Hidrolik akışkanın sıkıştırılmaz oluşu sisteme mükemmel bir konum hassasiyeti kazandırır. Sistem kendinden otoblokajlıdır. Herhangi bir güç kesintisinde valfler kapanarak sistemi son durumunda tutar. Hidrolik sistemlerin bu avantajlarının yanı sıra yağ sızdırmazlığının sağlanması, kirlilik, yavaşlık ve yüksek ilk yatırım maliyeti gibi önemli dezavantajları da vardır.

#### **2.3.4.3 Pnömatik Tahrikli Robotlar**

Tahrik sistemleri içinde en ucuz olanıdır. Çok hızlı hareket edilebilir fakat havanın sıkışabilir olmasından kaynaklanan konum problemi vardır. Genellikle strok hareketlerinde kullanılır. Sistemin çok büyük avantajlarından biri temizliğidir. Sistem havayı kullandığı için bulunduğu ortamı fazla bir şekilde kirletmez. Her ne kadar pnömatik tahrik ucuz gibi görülsede, tahrik için gerekli olan kompresörün harcadığı enerji ve sıkışan havayı borularla uzaklara taşıdığımız zaman hava basıncındaki düşüş sistemin maliyetini arttırmaktadır.

### **2.3.5 Yük Kapasitelerine Göre**

Yapılan bu sınıflandırma sadece endüstriyel amaçlı kullanılan robotlar için geçerlidir.

#### **2.3.5.1 Düşük Yük Kapasiteli Robotlar**

Kaldırabildiği maximum yük 3-16kg olan robotlardır. Bu tip robotlar kek olekli işlerde kullanılabilirler. Bunlara rnek olarak, parça testleri, (sürekli açma-kapama, dayanıklılık testi v.s.) ufak parçaların montajı, taşlama, parlatma, yapıştırma uygulamaları söylenbilir.

#### **2.3.5.2 Orta Yük Kapasiteli Robotlar**

Kaldırabildiği maximum yük 30-60kg olan robotlardır. Bu robotlar basit işlerden karmaşık işlere kadar birçok uygulamada kullanılabilirler. rnek olarak, ark kaynağı, kaplama, taşlama parlatma, yapıştırma, lazer kaynağı/kesimi, plazma kesimi, su jeti ile kesim, montaj, paletleme (kek olekli), taşıma (kek olekli) ve ölçüm yapma uygulamaları söylenbilir.

#### **2.3.5.3 Yüksek Yük Kapasiteli Robotlar**

Kaldırabildiği maximum yük 100-240kg olan robotlardır. Bu robot tipi, her türlü uygulamaya müsaittir. Yüksek yük kapasiteleri ile punta kaynağına da olanak sağlamaktadırlar, ayrıca paletleme ve taşıma işlemlerinde yüksek yük kabiliyetleri robotları avantajlı kılmaktadır.

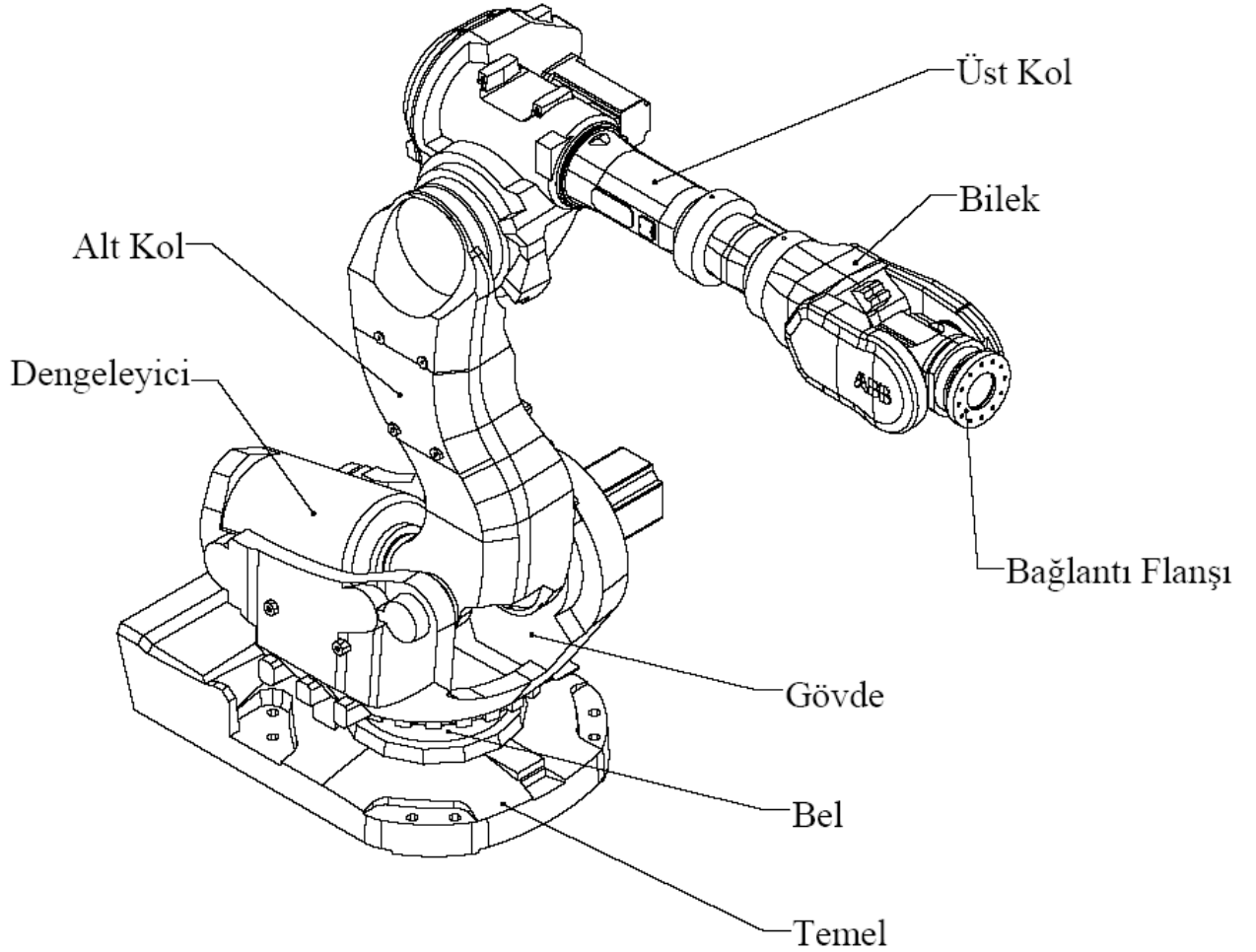
#### **2.3.5.4 çok Yüksek Yük Kapasiteli Robotlar**

Kaldırabildiği maximum yük 360-570kg olan robotlardır. Bu tip robotlar çok yüksek yüklerin taşınmasının gerektiği yerlerde kullanılırlar. Bu robotlara ait uygulama örnekleri, paletleme, taşıma ve paketleme olarak sayılabilir.

### 3 ROBOTU OLUŞTURAN MODÜLLER VE ROBOTUN MEKANİK YAPISI

#### 3.1 Robotu Oluşturan Modüller

Endüstriyel robotlarda, robotun kullanım alanına göre, robotu oluşturan parçalar farklılık gösterebilir. TS EN ISO 8373 standardında, robotların mekanik yapısına ilişkin açıklamalar çok yeterli olmamakla beraber, tanımlarda uyumsuzluk görülmektedir. Örneğin, robotun uç noktasındaki bağlantı flanşının bu standarttaki tanımı, mekanik ara yüz-disk şeklindedir. Her ne kadar mekanik ara yüz ifadesi doğru olsa da, bağlantı kısmına disk yerine flanş denmesi da uygun olacaktır.



Şekil 3.1 ABB firmasına ait IRB6600 model robot.

Robotu oluşturan uzuvları açıklayacak olursak,

- **Kollar** : Robotlarda genellikle en fazla yüke maruz kalan kısımlardır. Genel yapıları, silindirik veya dikdörtgen prizma şeklindedir. Rotasyonel veya lineer hareket kabiliyetleri olup, en az bir ucundan bel'e, diğer ucundan kol veya bilek kısmına mafsallanmışlardır. Bağlanış şekillerine göre serbestlik dereceleri değişmektedir. Kolların içinden hareket aktarımı da yapılabilir. Genellikle üst kolun içinden bileğe hareket aktarımı yapılır. Bu durumda kol, aktarılan hareketi gizler, yataklar ve korur. Günümüzde kollar, bilgisayar ortamında FEM (Finite element method, sonlu elemanlar yöntemi) çok iyi analiz edilerek, ağırlık-mukavemet optimizasyonu ile mafsal momentleri düşürülmektedir.
- **Bilek** : Koldan farklı olarak, kısa bir yapıya sahip olan bilek, robotun uç noktasının istenilen konuma gelmesini sağlar. Bilek uç kısmındaki üç eksenin toplamına denir. Mekanik yapısı diğer kısımlara göre daha karmaşıktır. Hareket aktarımı direk olarak motordan mafasala gidiyor ise, bilek karmaşık bir hal almaz. Fakat, uç kısımlara yerleştirilmiş motorlar, ağırlığı nedeniyle, kablo iletim problemleri ve görsel nedenlerden dolayı dezavantajlıdır. Hareket aktarımı, üst kolun arka kısmından başlayıp bileğin eksenlerinde son bulunduğu zaman ise, kol içerisindeki aktarma organları, dişli çarklar v.s.'den dolayı sistem karmaşık hale gelir. Buna müteakip, motor ağırlıkları dengeleme ağırlığı olarak üst kolun moment ihtiyacını azaltır, uç kısma kadar güç kablosu götürmeye gerek kalmaz ve de günümüzde çok önemli olan bir kavram olan görsellik kaybolmaz. Direk hareket aktarımından bir üstünlüğü ise motorun geometrik şekli tasarımı etkilemez. İstenilen marka motor takılıp sistem çalıştırılabilir.
- **Bağlantı Flanşı** : Robotun işlev görebilmesi için ucuna işlevi yapacak parçaların takılması gerekmektedir. Bu parçalar (tooling) Bağlantı flanşından monte edilirler.
- **Bel** : Tüm robotu taşıyan ve döndüren kısımdır. En yüksek eğilme momenti ve eksenel kuvvet bu kısma gelmektedir. Kısa mesafelerde yüksek eğilme momentini ve eksenel kuvveti karşılayabilmek için, genellikle 4-nokta temaslı rulman, çapraz makaralı rulman veya döner tabla rulmanları kullanılmaktadır.
- **Dengeleyici** : Genellikle orta ve yüksek kapasiteli robotlarda kullanılır. Kullanım amacı, mafsalın ihtiyacı olan momenti paylaşmaktır. Sıklıkla, alt kola hareket veren mafsalın moment ihtiyacını karşılamak için bazen de üst kolun moment ihtiyacını karşılamak için kullanılır. Mafsalın ihtiyacı olan momentten, dengeleyecinin momentini çıkardığımız takdirde motora gelecek momenti buluruz. Robot kolu öne eğildikçe, mafsalın ihtiyaç duyduğu moment miktarı yükselir. Dengeleyiciler 4 değişik tipte yapılabilir.



- 1) **Karşı Ağırlık Tipi Dengeleyeci** : Genellikle robotun omuz ekseninde uygulanır. Alt kol veya üst kolu dengeler. Robot kolunun öne eğilmesiyle birlikte karşı ağırlıkta robotun tam zıttı yönünde aynı açıda eğilir. Dolayısıyla kol eğildikçe artan moment ihtiyacını, karşı ağırlıkta aynı mertebe de eğilerek, karşılar (paylaşır).
- 2) **Mekanik Yaylı Dengeleyeci** : Robot kolu öne eğildikçe yaya sıkıştırma kuvveti uygulamaktadır, yay sıkıştıkça da, yayın kola uyguladığı kuvvet artmaktadır. Mafsalın ihtiyacı olan moment kol öne eğildikçe artmaktadır aynı zamanda yayın uyguladığı kuvvet de artmaktadır dolayısıyla sistem kendini dengelemektedir. Robot kolu öne doğru çok eğilmedikçe yaya ihtiyaç yoktur fakat robot en uç noktasına kadar eğildiğinde moment çok artmaktadır. Eğer sistemde dengeleyici olmazsa, mafsalın moment ihtiyacının hepsini mafsalın motoru karşılayacak, dolayısıyla büyük motor ihtiyacı ve de yüksek enerji sarfiyatı olacaktır.
- 3) **Hidrolik Dengeleyici** : Robot kolunun öne eğilmesiyle birlikte, hidrolik dengeleyecinin içindeki basınç artırılarak, dengeleme kuvveti arttırılmaktadır. Çok yüksek kapasiteli robotlarda kullanılmaktadır. Mekanik yaylı dengeleyiciye göre daha pahalıdır.
- 4) **Elektromanyetik Dengeleyici** : Robot kolunun hareketine ve mafsalın ihtiyacı olan momente göre dengeleyecinin kuvveti manyetik olarak ayarlanmaktadır.

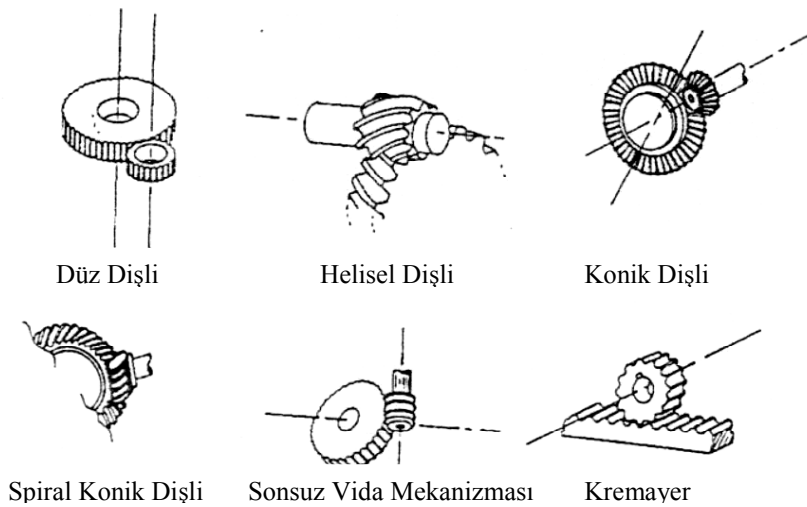
### 3.2 Robotlarda Güç İletim Mekanizmaları

Robotlarda hareket, mafsallara yerleştirilmiş motor ile veya herhangi bir yere yerleştirilmiş motorun hareketinin mafsallara kadar aktarılmasıyla elde edilmektedir. Motorlarda hareket aktarımı iki şekilde sağlanmaktadır.

- **Direkt hareket aktarımı** : Motor mafsala direkt olarak yerleştirilmiştir ve bir redüktör aracılığıyla, moment değeri yükseltilmiş ve de hızı azaltılmış olarak mafsala gücü iletmektedir. Bu tip aktarımın artıları, sistemde hareket aktarımı esnasında ara parça kullanılmadığından, sistem cevabı gecikmez, sistem rijit davranır.
- **Endirekt hareket aktarımı** : Motor herhangi bir yere yerleştirilmiştir ve herhangi bir aktarma mekanizmasıyla, hareket mafsala iletilir. Genellikle bu tip mekanizmalarda redüktör, motorun hemen önüne değil, mafsala monte edilir. Bunun nedeni, redüktörden çıkacak yüksek moment değeri, aktarma mekanizmasının daha büyük boyutlarda üretilmesine neden olacak ve tasarımın ebatı büyüyecek, ağırlığı, enerji sarfiyatı artacaktır.

### 3.2.1 Dişliler

- **Düz Dişliler (Spur Gears)** : Robotlarda sıkça kullanılırlar, genellikle bel eksenini dönüşü için uygulanırlar. Dişler, şaft eksenine paraleldir. Uygulaması kolay ve ucuzdur ancak yük kapasitesi düşüktür ve biraz sesli çalışır.
- **Konik Dişliler (Straight bevel gears)** : Robotlarda paralel olmayan şaft eksenlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Genellikle  $90^\circ$ 'lik eksen çalışmasının olduğu bölgelerde kullanılırlar. Dişler arası temasın doğru olabilmesi için dişlinin şaft ve yataklanması rijit olması gerekmektedir. İki ayrı hareketin, iç içe geçen konik dişli çarklarla yönü değiştirilebilir.
- **Helisel Dişliler (Helical gears)** : Helisel dişliler düz dişlilere nazaran daha pahalıdır ancak yük kapasiteleri daha yüksektir ve daha sessiz çalışırlar. Fakat, monte edildikleri milde aksenal kuvvet oluşturduğundan yataklama şekli değişebilir.
- **Spiral Konik Dişliler (Spiral bevel gears)** : Konik dişlilerin yerine kullanılabilirler. Kavrama birkaç diş üzerinde gerçekleştiğinden daha fazla yük uygulanabilir. Ayrıca imalatı konik dişlilerden daha kolaydır.
- **Hypoid Dişli (Hypoid bevel gears)** : Yük kapasitesi konik dişlilerden fazladır. Şaft eksenleri arasında  $90^\circ$ 'lik açı vardır ancak çakışmazlar, bundan dolayı her şaftın sonuna yataklama yapılabilir. Konik dişlilere göre daha sessiz ve düzgün çalışırlar.
- **Sonsuz Vida Mekanizması (Worm gears)** : Aralarında  $90^\circ$ 'lik açı bulunan şaft eksenlerinde kullanılır, hızı düşürmeye yarar. Çok yüksek redüksiyon oranları sağlayabilir ve yük kapasitesi fazladır. Bütün bu avantajları yanında düşük verimle çalışması ve aşınma olduğunda hassasiyetinden ödün vermesi gibi dezavantajları vardır.



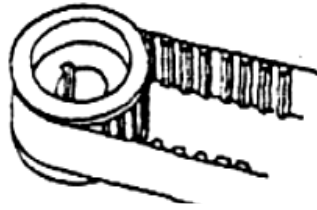
Şekil 3.2 Dişli Çeşitleri

### 3.2.2 Kayış-Kasnak Mekanizmaları

- **Dişli Kayış (Synchronous or timing belt)** : Sessiz çalışırlar, güçlü ve düzgün bir iletim sağlarlar, bazı zincir mekanizmalarında zincir yerine kullanılabilirler. Verimleri yüksektir. Robotlarda aktarma organı olarak kullanılabilirler.
- **Makaralı Zincir (Roller chain)** : Zincirler genellikle dişlilerden daha ucuzdurlar ancak yük kapasiteleri daha düşüktür. Kayış mekanizmalarına göre daha pahalıdır ve kayış mekanizmalarından daha ağırdırlar. Büyük güçlerin iletiminde ve yüksek hızlarda kullanılabilir.



V Kayış



Dişli Kayış Mekanizması



Makaralı Zincir Mekanizması

Şekil 3.3 Kayış ve zincir mekanizması

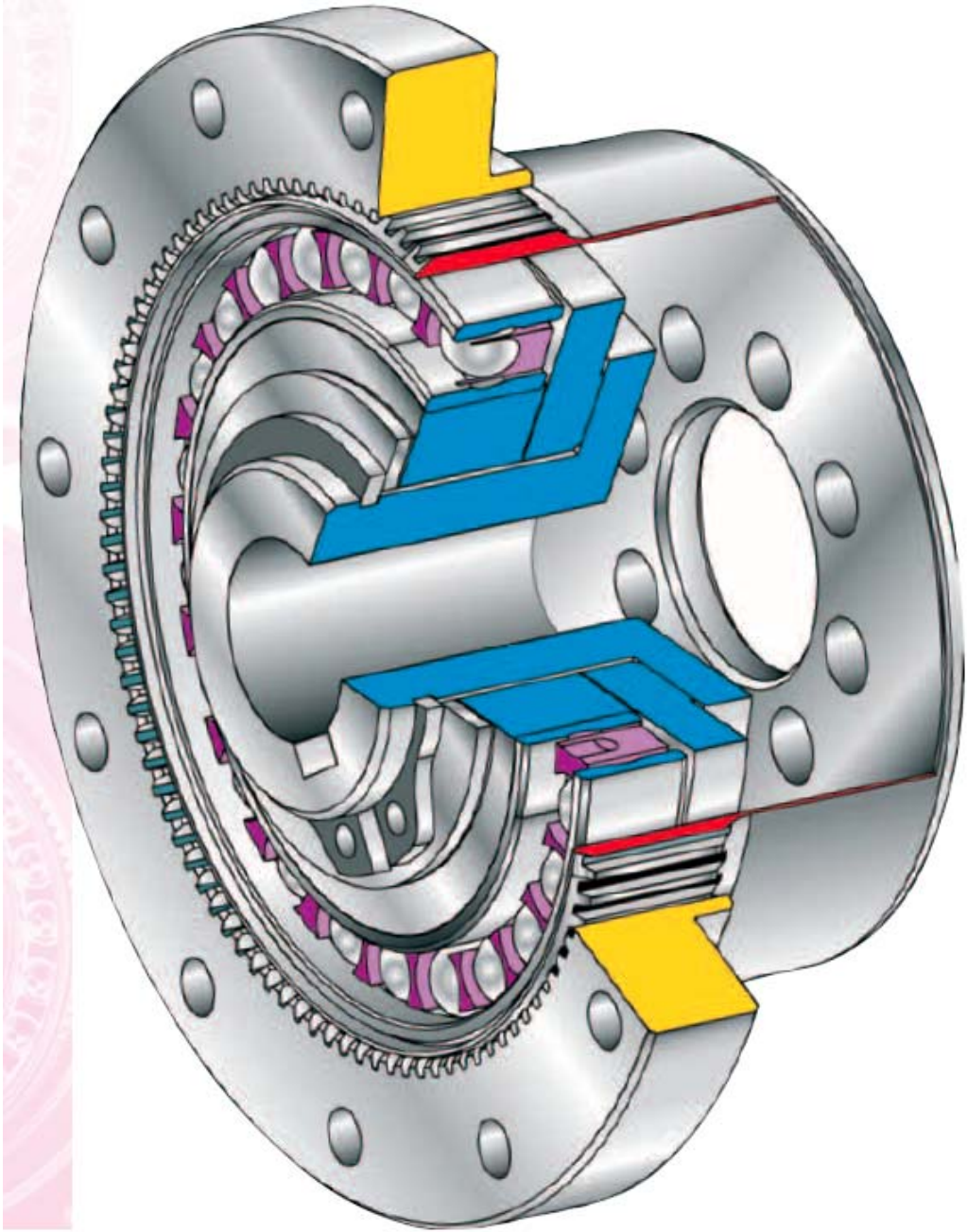
### 3.2.3 Bilyalı ve Makaralı Vida Mekanizmaları

Endüstriyel robotlarda sıkça kullanılan bir diğer yöntemdir. Dönme hareketini lineer harekete çevirerek hızı düşürürler. Bir elektrik servo motorla tahrik edilen vidalı şaftın üzerine bağlanan somun çiftinden oluşur. Bu somunlar genellikle bilyalı yada vida formundadırlar. Şaft dönerken somunda şaft boyunca hareket eder. Rijitliği iyidir. Normal vidalı olanlarında aşınma problemleri oluşabilir. Bunun engellenmesi için sistem önyüklenir. Titreşim dayanıklılığı ve düzgün hareket kabiliyeti vardır.

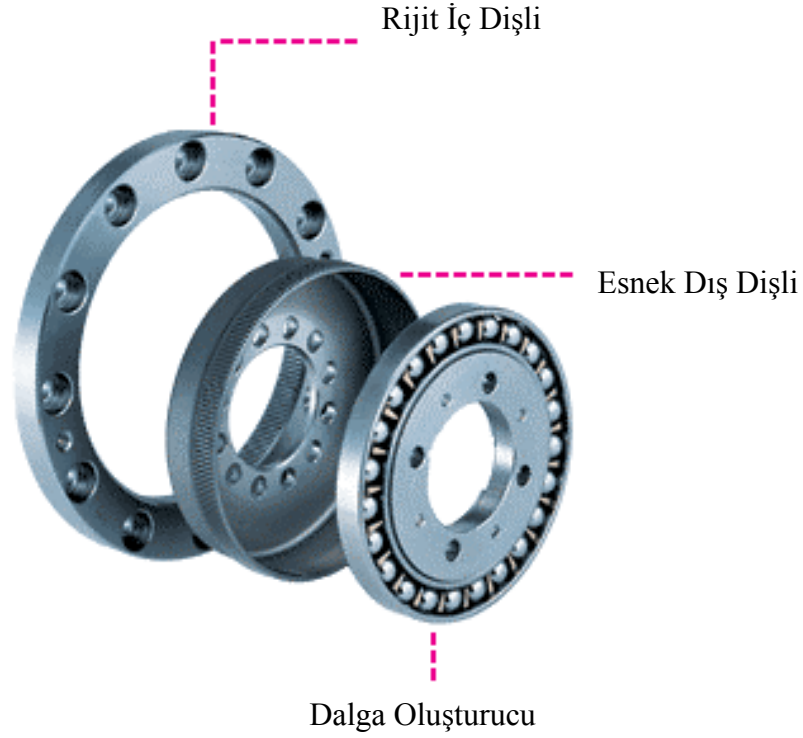
### 3.2.4 Robotik-Otomasyonda Kullanılan Özel Mekanizmalar

#### 3.2.4.1 Harmonic Drive Mekanizması

Harmonic drive firmasına ait bu ürün, ufak hacimlerde çok yüksek çevrim oranı sağlayabildiğinden robotik ve otomasyon makinalarında çok geniş bir kullanım aralığına sahiptir. Çalışma prensibi basit, parça sayısı azdır.



Şekil 3.4 Harmonicdrive firmasına ait HFUC komponent seti (Harmonicdrive)



Şekil 3.5 Harmonic drive parçaları (Harmonicdrive)

Harmonic drive 3 temel parçadan oluşur,

- Rijit İç Dişli (Circular Spline) : İç kısmı dişli olan rijit bileziktir. Genelde sabit olarak kullanılır.
- Esnek Dış Dişli (Flexspline) : Dış kısmında dişli olan esnek bir çelik kovandan ibarettir. Uç kısmında çıkış flanşı bulunmaktadır. Genellikle çıkış elemanı olarak kullanılır.
- Dalga Oluşturucu (Wave Generator) : Elips formunda ince cidarlı bilyalı bir kafesten oluşur. Çıkış elemanı, esnek ince cidarlı çelik bir silindirden oluşur. Genellikle giriş elemanı olarak kullanılır.

#### 3.2.4.1.1 Harmonic Drive Mekanizmasının Çalışma Prensibi



Şekil 3.6 Harmonicdrive mekanizmasının çalışma prensibi (Harmonicdrive).

- Rijit iç dişlideki diş sayısı ile esnek dış dişlideki diş sayısından 2 adet fazladır. Bu farkı, çalışmadaki engel olmaktan kurtaran, giriş elemanının eliptik yapısıdır. Elips ile elipsin girdiği dairesel kısım arasındaki fark 2 dişi tolere eder.
- Giriş elemanı, saat yönünde dönmeye başlayınca, dişlerin temas ettiği bölge de elips eksenini etrafında dönmeye başlar.
- Giriş elemanı saat yönünde  $180^\circ$  döndüğünde çıkış elemanının sabit elemanla olan temas noktası , 1 diş geride kalır.
- Giriş elemanı  $360^\circ$  yi tamamladığı zaman, çıkış elemanının sabit elemanla olan temas noktası , 2 diş geride kalır ve böylelikle her turda 2 diş geriye kalarak sistem bir redüktör gibi çalışır.

#### 3.2.4.1.2 Harmonik Drive Tipleri

Harmonic drive ürünleri 3 değişik şekilde üretilmektedir.

- 1) **Komponent set** : Bu tipde, sadece redüksiyonu yapan kısım satılmaktadır. Tüm dış yataklamalar (giriş, çıkış) müşteriye bırakılmıştır. Seti satın alan, kendi konstrüksiyonuna uygun şekilde yataklayıp kullanır.
- 2) **Ünite** : Bu tipde, redüksiyonu yapan kısım yataklanmıştır. Ürün monte edilip direkt olarak kullanılabilir. Kataloglarında, ürettikleri yatakların hesapları verilmiştir. Çıkış yataklarında, küçük tiplerde “4 nokta temaslı rulman”, büyük tiplerinde ise “çapraz makaralı rulman” kullanılmıştır.
- 3) **Servomotor adapte edilmiş ünite** : Bu tipde, firma kendi yaptığı ürünün üzerine servo motor adapte etmektedir. Adapte edilen servo motor özel olduğu için çok kompakt bir yapı oluşmaktadır. Çıkış kısmı da yatakladığı için, direkt olarak takılıp kullanılabilir.

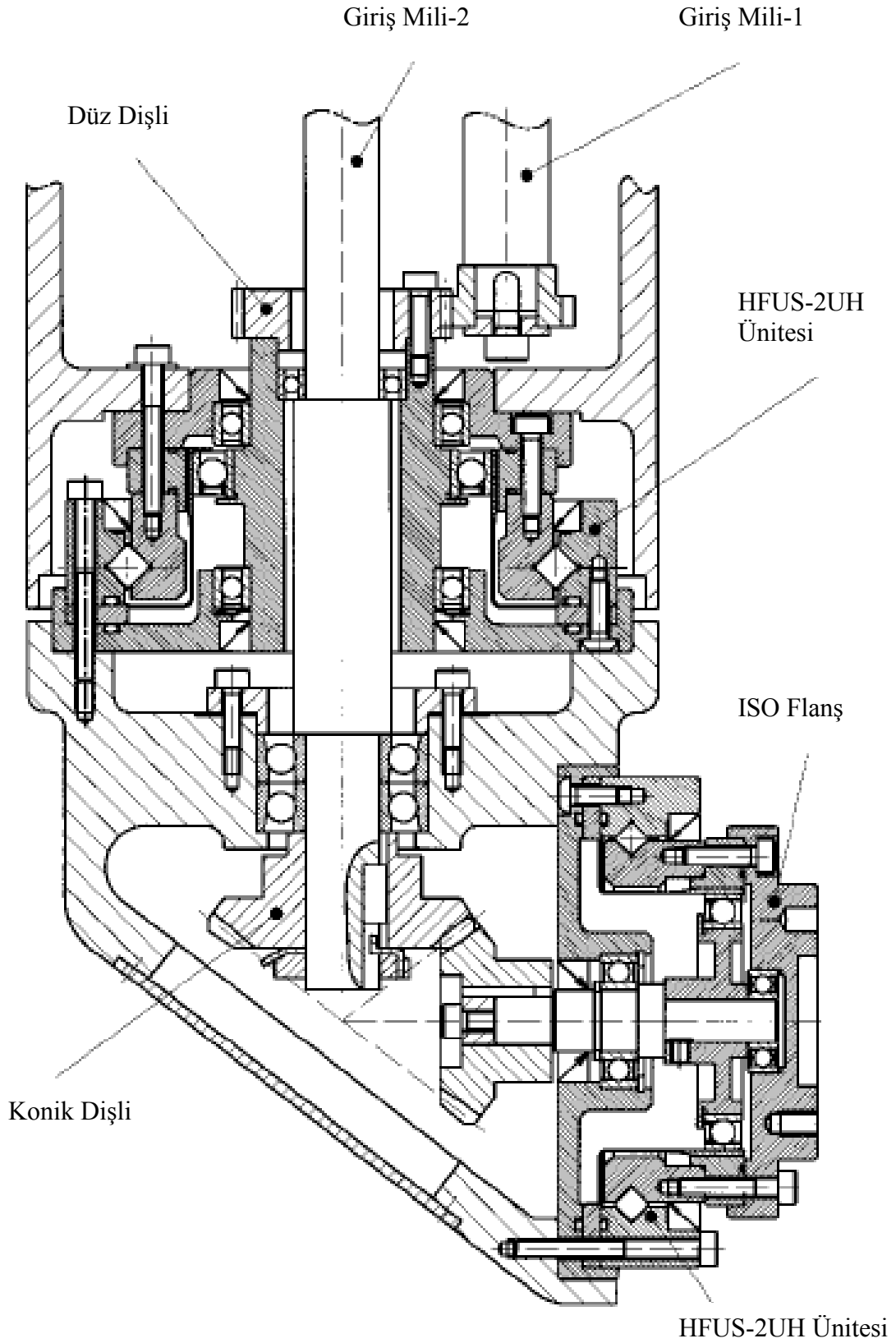
#### 3.2.4.1.3 Harmonik Drive Mekanizmasının Üstünlükleri

- Çok iyi tekrarlanabilirlik
- Yüksek moment kapasitesi. Özel diş yapısı sayesinde ve de aynı anda birkaç dişin temasıyla yüksek moment iletimi yapılabilir.
- Sıfır diş boşluğu
- Yüksek çevrim oranları. Tek çevrimde 1/30'dan 1/320'ye kadar.
- Düşük aşınma, uzun ömür.

- Yüksek burulma rijitliği.
- Bazı modellerde olan ve “hollow shaft” olarak adlandırılan, merkezdeki boylu boyuna delik. Giriş flanş şeklinde yapılp harmonic drive’ın ortası boşluk olarak bırakılır. Dolayısıyla, o boşluktan kablo, herhangi bir hareket aktarımı yapılabilir. Özellikle robotikte çok önemli olan bir ihtiyaçtır.
- %85’e varan yüksek verim.
- Rakiplerine göre daha hafif.
- Harmonicdrive firması ile ilgili olarak , rakipleri ile karşılaştırıldığında, müşterisine daha çok ilgi gösteren, daha çok dökümantasyonu olan, internetten on-line hesaplama yapılabilen ve de en önemlisi ürünlerinin 2 boyutlu ve 3 boyutlu modellerini müşterilerine verebilen bir firmadır. Son yazılan madde günümüzde çok önemlidir. Yapılan makine tasarımları hep 3 boyutlu olduğundan, firmaların, kullanılan ürünlerin 3 boyutlu modellerini vermesi, tasarımcı açısından çok büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Aksi takdirde tasarımcı, 2 boyutlu çizime bakarak kendisine göre 3 boyutlu bir çizim hazırlar ve bu da hataları beraberinde getirir.

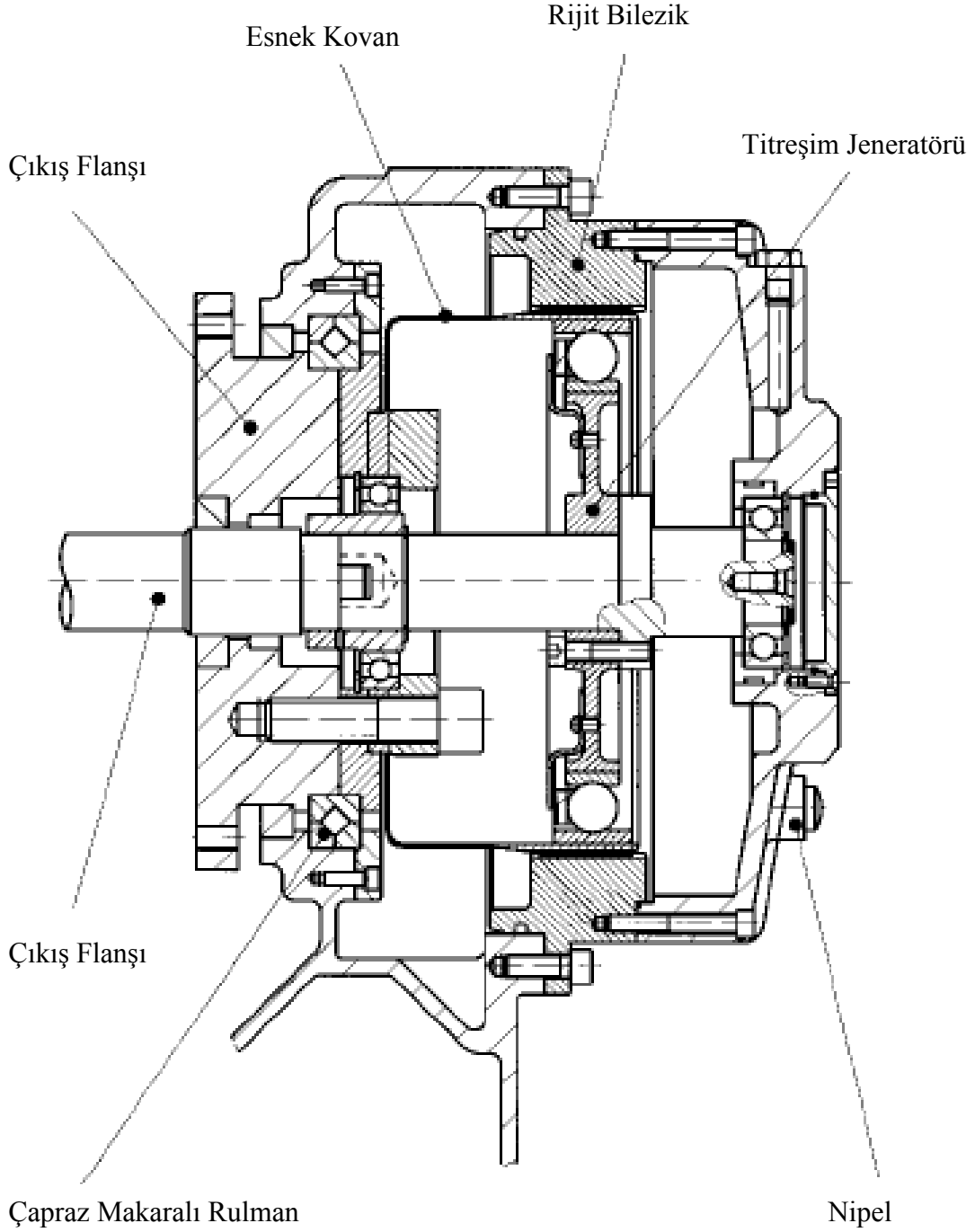
#### **3.2.4.1.4 Dalgalı Tahrik Sistemlerine Ait Örnekler**

Bu bölümde, Harmonic drive firmasının ürün kataloglarıyla birlikte vermiş olduğu, daha önce uygulanmış olan harmonic drive uygulamalarının örneklerini içinde barındıran, “Enginnering Handbook” dan alınmış örnekler bulunmaktadır.



Şekil 3.7 Robotun bileğinde Harmonicdrive kullanım örneği (Engineering Handbook)



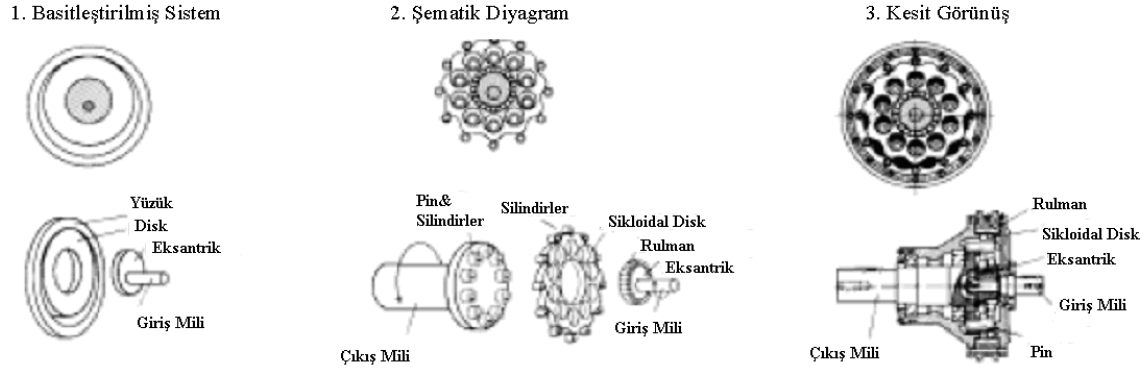


Şekil 3.8 Robotun omzunda Harmonic drive kullanım örneği (Engineering Handbook)

### 3.2.4.2 Cyclo Drive Mekanizması

Sumitomo firmasına ait bu ürün, yüksek güç aktarım kapasitesine sahiptir. Tek kademeli redüksiyon oranı 1/6 dan 1/179'a kadar olabilir. "0" diş boşluklu yada düşük diş boşluklu olabilir. Cyclo drive mekanizmasında olmayan en önemli özellik, "hollow shaft" yani içinden boylu boyuna delik geçen modelinin olmamasıdır. Sadece redüksiyon yapılmış, giriş çıkış

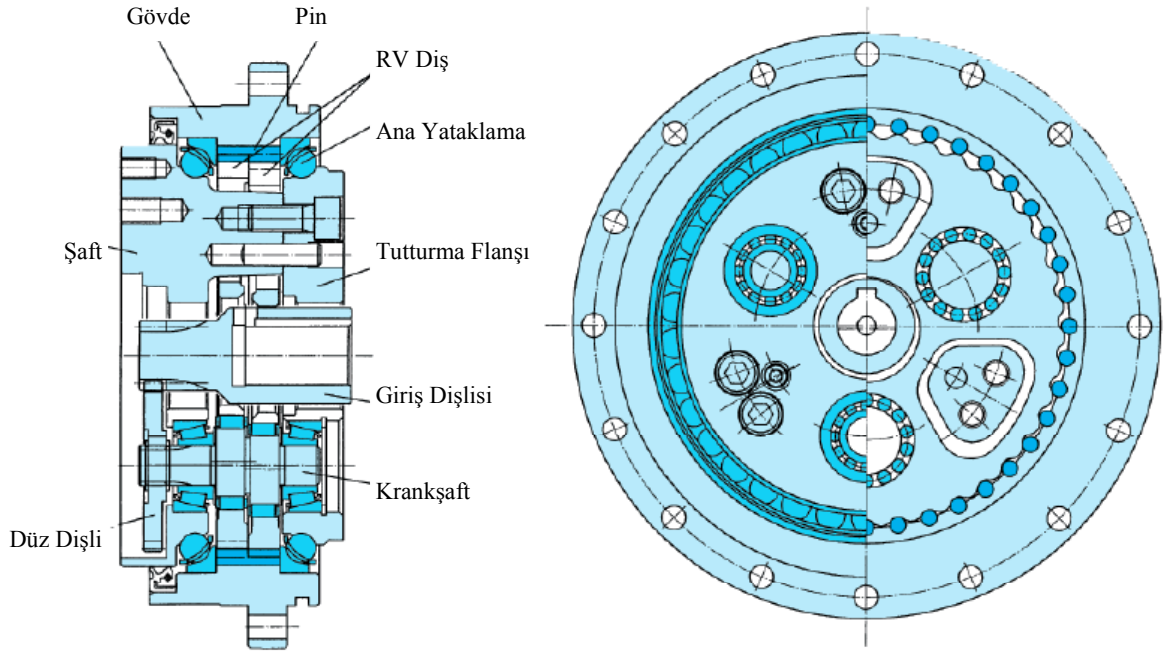
yatakları yapılmamış olarak yada giriş,çıkış yatakları yapılmış olarak üretilmektedir. Yataklaması yapılmış olan sistemde çıkış, çapraz makaralı rulman veya sisteme adapte edilmiş bir çift konik makaralı rulman kullanılmaktadır.



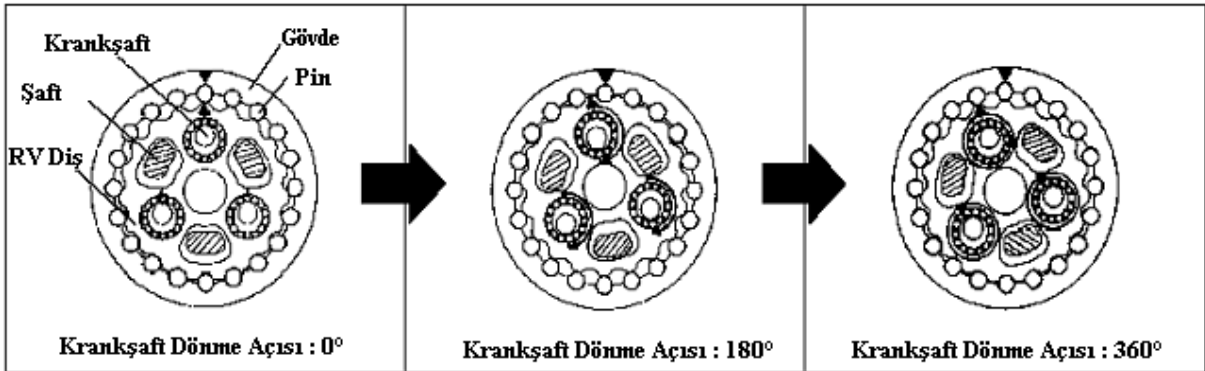
Şekil 3.9 Cyclo Drive mekanizmasının çalışma prensibi (Sumitomo)

### 3.2.4.3 RV Mekanizması

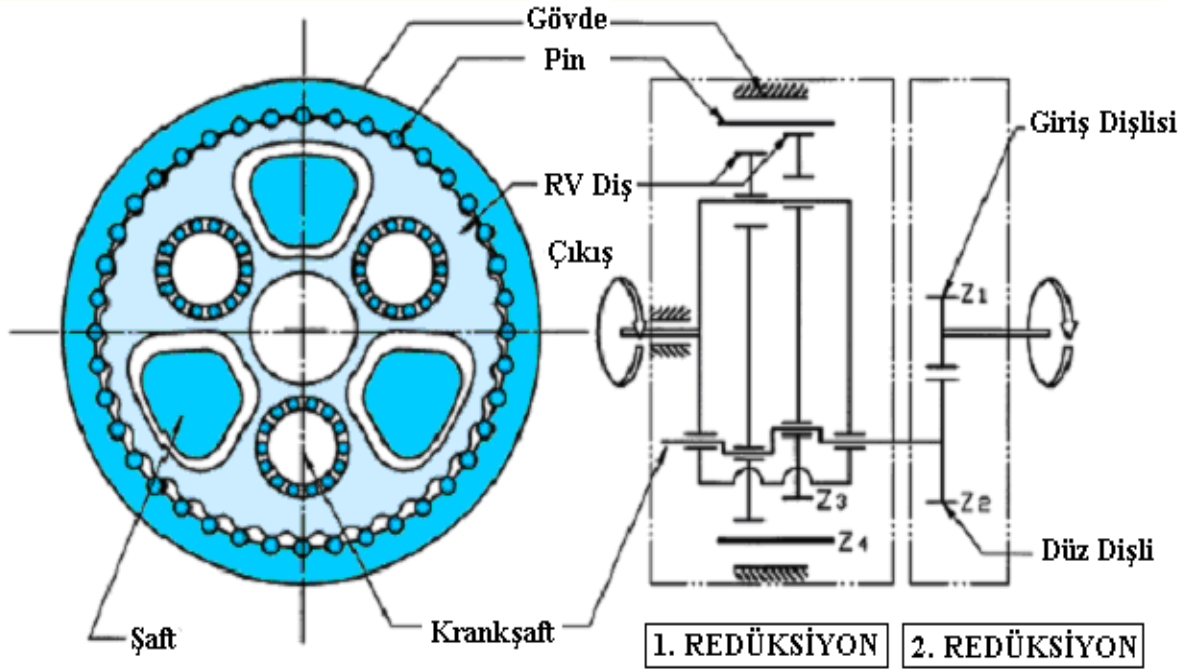
Teijin Seiki firmasına ait ürün, harmonic drive mekanizmasından yüksek, cyclo drive mekanizmasından az güç aktarım kapasitesine sahiptir. Cycle drive mekanizmasının bir çeşit türevidir. Konstrüktif olarak en karmaşık yapıya sahiptir. Kendi içinde iki kademedede redüksiyon yapmaktadır. Tek mekanizmayla 1/30 dan 1/185'e kadar redüksiyon yapılabilir. Çok düşük diş boşluğuna sahiptir (1dak.). "Hollow shaft" modeli vardır fakat giriş eksenini çıkış ekseninden kaçırır. Sadece giriş, çıkış yataklaması yapılmış olarak üretilmektedir. Çıkış yataklaması sisteme adapte edilmiş bir çift sıra omuzlu rulman ile yapılmıştır.



Şekil 3.10 RV mekanizmasının konstrüktif yapısı (Teijin-Seiki)



Şekil 3.11 RV Gears mekanizmasının çalışma prensibi (Teijin Seiki)

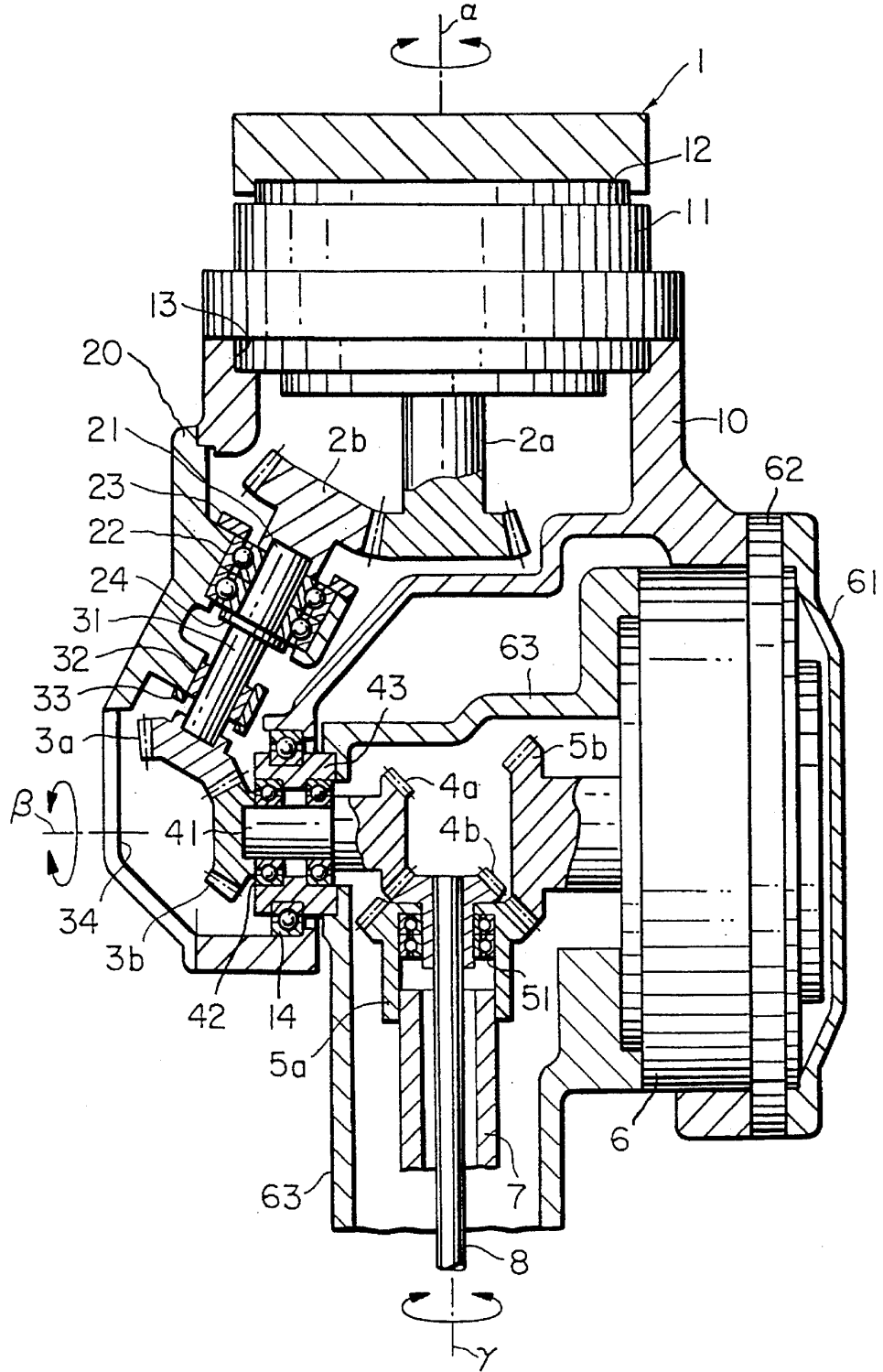


Şekil 3.12 RV Gears mekanizmasının, mekanizma blok diyagramı (Teijin-Seiki)

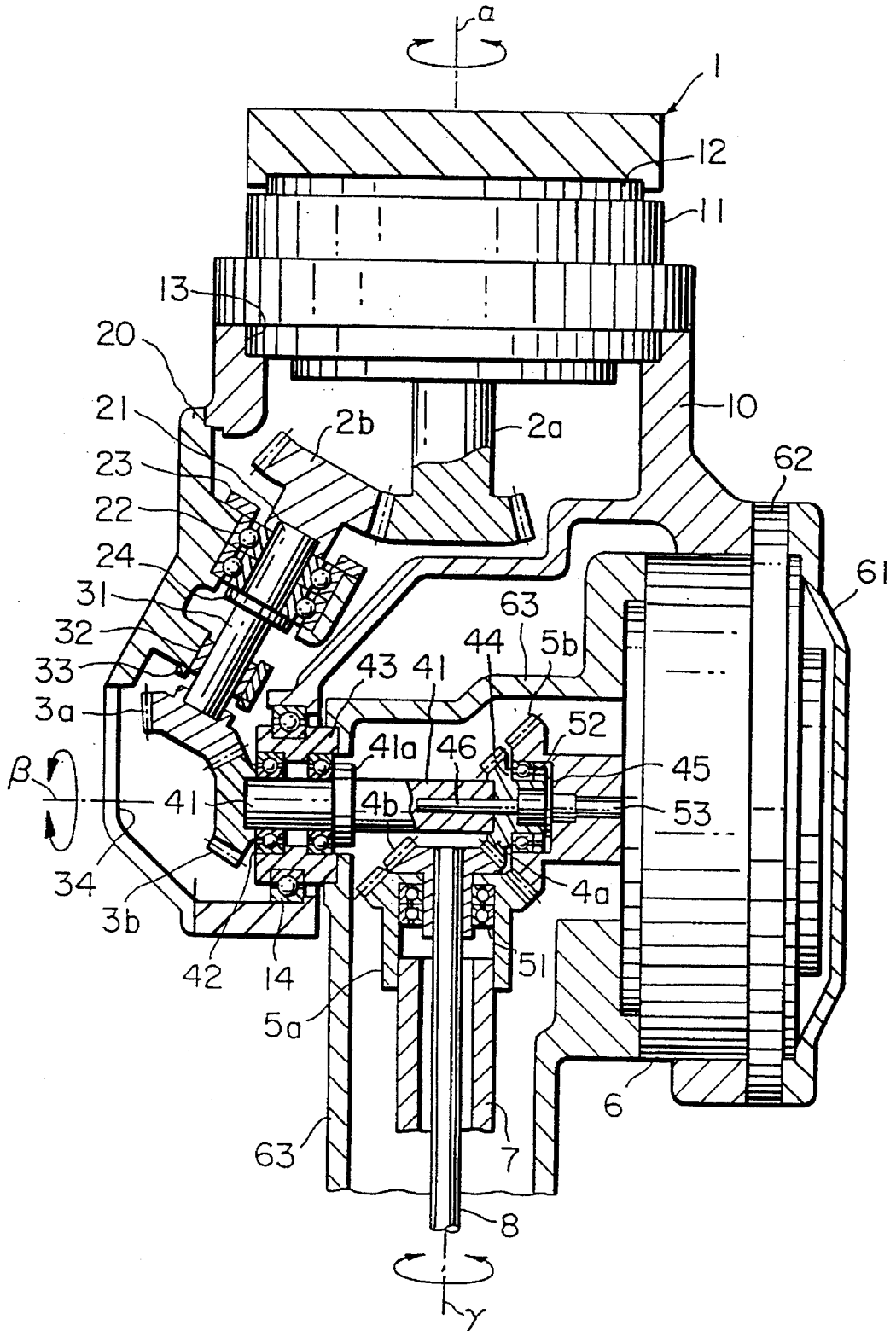
### 3.3 Robotun Mekanik Yapısına Ait Örnekler

Robotların mekanik yapısı, robotun tasarımını yapana göre değişiklik gösterdiğinden ve de sınırların çok geniş olmasından dolayı “robot konstrüksiyonu” şeklinde kitaplar bulunamamaktadır. Her firmanın, her tasarımcının kendine özgü çözümleri vardır. Netice itibariyle, robotun belli konstrüktif mekanizmaların diziliminden meydana gelmesi ve de her tasarımcının bu dizilimi değiştirebilmesi nedeniyle tasarım detayları kitaplarda yer almamaktadır. Bulunabilecek en güzel örnekler alınmış patentlerdir.

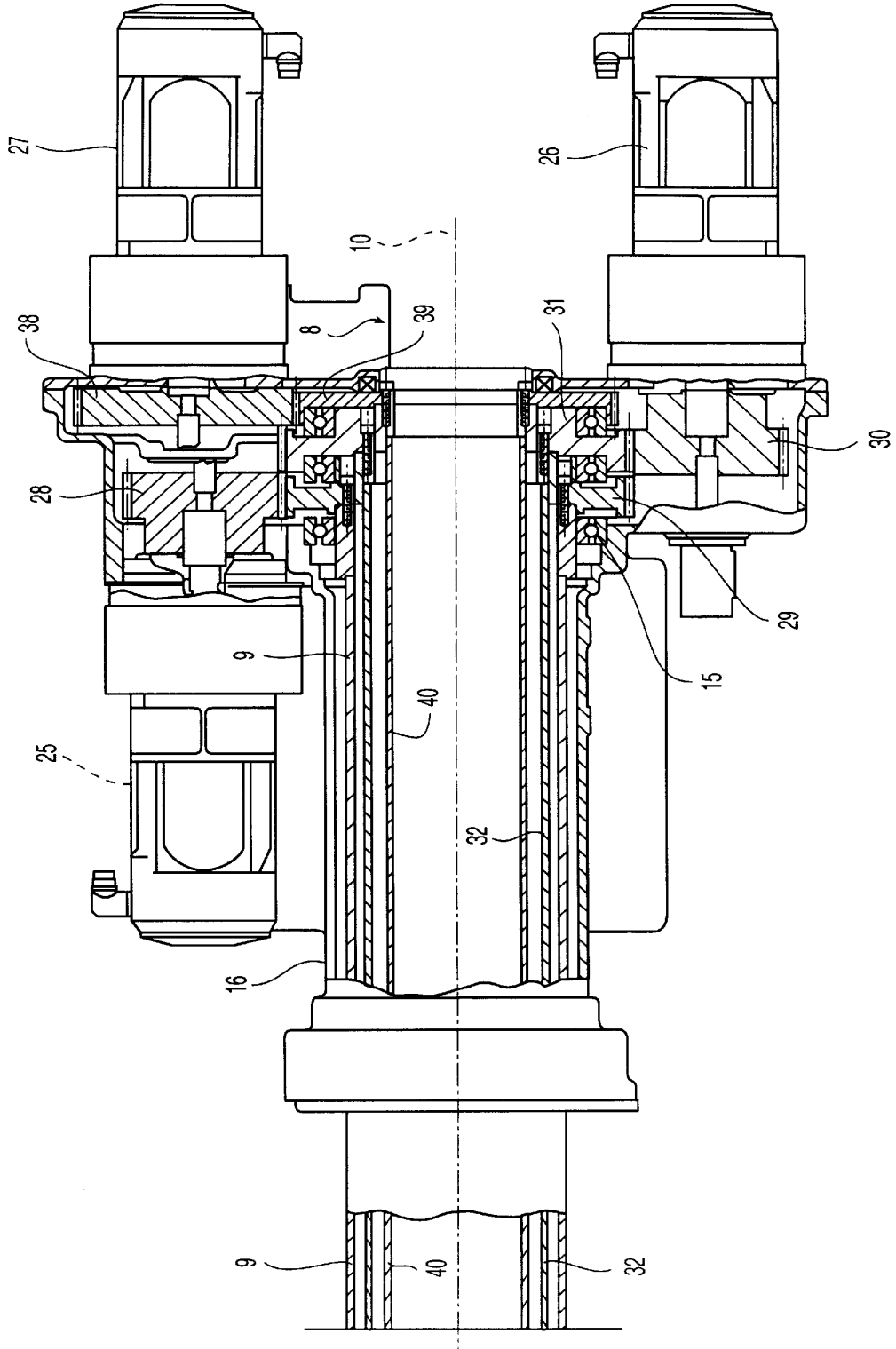
Çalışmanın bu kısmında Amerakan patent enstitüsünden (USPTO) alınan bazı patentler incelenmiştir.



Şekil 3.13 Robotların Mekanik Yapısı Ait Örnek ( USPTO 5456132, 1995)



Şekil 3.14 Robotların Mekanik Yapısı Ait Örnek ( USPTO 5456132, 1995)



Şekil 3.15 Robotların Mekanik Yapısı Ait Örnek ( USPTO 6014909, 2000)

## 4 ROBOT KİNEMATİĞİ VE DİNAMIĞI

### 4.1 Robot Kinematığı

Kinematik, mekanik sistemlerin, geometrik boyutlarına bağılı olarak elemanların konum, hız ve ivmelerini inceler. Robot kolları, birbirlerine mafsallarla bağılı uzuvlardan oluşan açık zincirli mekanizmalardır. Robot kinematığı, bu elemanların mafsal değışkenlerinin konum, hız ve ivmelerinin robot kolun uç noktasının konum, hız ve ivmesinin değışimi arasındaki bağıntıların çıkarılmasıyla ilgilenir. Bu bağıntılar ana koordinat takımı olarak adlandırılan bir temel koordinat takımına bağılı olarak, her bir mafsala yerleştirilen mafsal koordinat takımlarının arasındaki bağıntıların çıkarılmasıyla elde edilir (Tamer Kepçeler, 1999)

Robot kinematığı iki kısımda incelenebilir,

- **Düz Kinematik** : Robota ait herbir mafsal hareketin belirli olduğı durumda, robotun uç noktasının konumunun bulunması işlemidir.
- **Ters Kinematik** : Robot uç noktasının konumu belirli iken mafsal hareketlerinin belirlenmesidir. Sonsuz çözümü vardır.

Araştırmacılar, bir sistemi modellemek için değışik kinematik analiz yöntemlerinden faydalanırlar. Aşağıda literatürde geçen belli başlı kinematik analiz yöntemleri kısaca açıklanmıştır.

- Geometrik esaslı düz kinematik analiz yöntemi.
- Homojen dönüşüm matris yöntemi
- Denavit-Hartenberg yöntemi
- Quaternion ve dönen vektör gösterimi yöntemi

Bu yöntemlerden, geometrik esaslı düz kinematik analiz, basit kinematik yapılar için uygun bir yöntemdir. Fakat, çok serbestlik dereceli mekanizmalarda uygulanması zordur. Homojen dönüşüm matris yöntemi ve Denavit-Hartenberg yöntemi ise, çok serbestlik dereceli mekanizmaların analizi ve özellikle robot kollarının dinamik analizi ve bazı ters kinematik teknikler için uygundur. Dönen vektör gösterim, yöntemi ise, ters kinematik problemin çözümünde uygulanması tercih edilir (Tamer Kepçeler, 1999)



#### 4.1.1 Geometrik Esaslı Düz Kinematik Analiz Yöntemi

Şekil 3.1. S rijit cismine ait  $ox_1 y_1 z_1$  koordinat sistemini göstermektedir. Burada p'nin koordinatlarını sabit eksen takımına ( $ox_0 y_0 z_0$ ) göre yazmak istiyoruz. O halde p,

$$P_o = p_{ox} i_o + p_{oy} j_o + p_{oz} k_o \quad (4.1)$$

Olur.

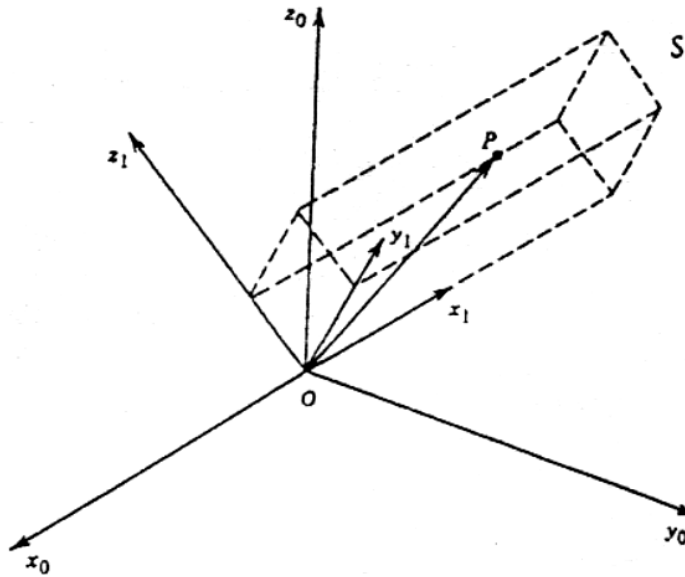
Veya  $ox_1 y_1 z_1$ 'e göre

$$P_1 = p_{1x} i_1 + p_{1y} j_1 + p_{1z} k_1 \quad (4.2)$$

Olur. Ve p noktasının iki koordinat eksenini ile olan ilişkisi aşağıdaki gibidir.

$$P_{ox} = p_o \cdot i_o = p_1 \cdot i_o$$

$$P_{ox} = p_{1x} i_1 \cdot i_o + p_{1y} j_1 \cdot i_o + p_{1z} k_1 \cdot i_o \quad (4.3)$$



Şekil 4.1 S rijit cismine ait eksen takımı

Aynı formüller  $p_{oy}$  ve  $p_{oz}$  için yazılırsa ;

$$P_{oy} = p_{1x} i_1 \cdot j_o + p_{1y} j_1 \cdot j_o + p_{1z} k_1 \cdot j_o \quad (4.4)$$

$$P_{oz} = p_{1x} i_1 \cdot k_o + p_{1y} j_1 \cdot k_o + p_{1z} k_1 \cdot k_o \quad (4.5)$$

Buradan ;

$$P_0 = R_0^{-1} \cdot P_1 \quad (4.6)$$

$$R_0^{-1} = \begin{bmatrix} i_1 \cdot i_0 & j_1 \cdot i_0 & k_1 \cdot i_0 \\ i_1 \cdot j_0 & j_1 \cdot j_0 & k_1 \cdot j_0 \\ i_1 \cdot k_0 & j_1 \cdot k_0 & k_1 \cdot k_0 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

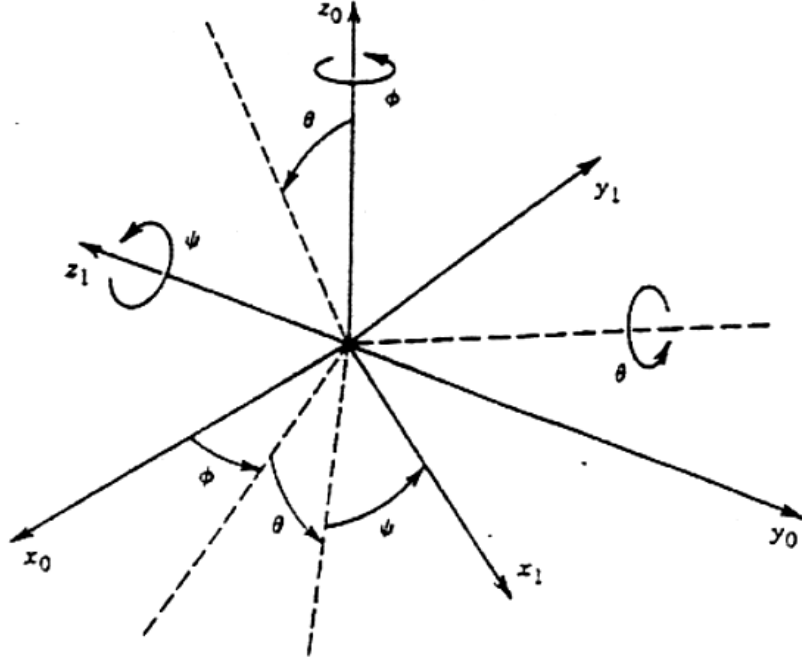
Yazabiliriz. Yukarıdaki rotasyon matrisleri elemanları doğrultman kosinüslerdir.

3x3'lük matris p  $ox_1 y_1 z_1$ 'deki koordinatların  $ox_0 y_0 z_0$  koordinat sistemine göre transformasyon matrisini ifade eder. Bunun yanında  $R_0^{-1}$  matrisinin  $R_1^0$  matrisinin tersi olduğunda görülebilir. Bunun sebebi de rotasyon matrisinin ortogonal matris olmasıdır.

$$R_1^0 = (R_0^{-1})^{-1} = (R_0^{-1})^T \quad (4.8)$$

Euler Açılı Gösterimi (z-y-z) ile Rotasyon Matrisi,

Üç euler Açısı  $(\varphi, \theta, \psi)$  şu şekilde tanımlanmıştır;  $\varphi$   $z_0$  eksenine göre dönme,  $\theta$  kesik çizgilerle gösterilen eksene göre dönme ve  $\psi$   $z_1$  eksenine göre dönme (Şekil4.2). Buradan rotasyon matrisi ;



Şekil 4.2 Euler açıları

$$R = R_{z,\varphi} R_{y,\theta} R_{z,\psi} \quad (4.9)$$

$$= \begin{bmatrix} C\varphi & -S\varphi & 0 \\ S\varphi & C\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\theta & 0 & S\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\theta & 0 & C\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\psi & -S & 0 \\ S\psi & C\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi & -\cos \varphi \cos \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi \sin \theta \\ \sin \varphi \cos \theta \cos \psi + \cos \varphi \sin \psi & -\sin \varphi \cos \theta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi & \sin \varphi \sin \theta \\ -\sin \theta \cos \psi & \sin \theta \sin \psi & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

euler açıları cinsinden bulunmuş olur.

#### 4.1.2 Homojen Dönüşüm Matris Yöntemi

Genel olarak, N bileşenden oluşan pozisyon vektörünün N+1 bileşenle tanımlanmasına

homojen koordinat denir. N-boyutlu vektör (N+1)'inci boyuta bölünmesiyle homojen koordinatlar elde edilir. Böylece üç boyutlu uzayda pozisyon vektörü

$$P = [P_x P_y P_z]^T \quad (4.12)$$

Homojen koordinat vektörü

$$P_H = [W P_x W P_y W P_z W]^T \quad (4.13)$$

Şeklinde ifade edilir.

Homojen transformasyon matrisi (HTM) 4x4 boyutlu bir homojen koordinatta tanımlanmış pozisyon vektörünün diğerinde ifade edilmesini sağlar. HTM, R(3x3), P(3x1), W(1x1) ve F(1x3) boyutlu 4 alt matristen oluşur. Şu yapıdadır.

$$A = \left[ \begin{array}{c|c} \text{Rotasyon matrisi ( R )} & \text{Pozisyon vektörü ( P )} \\ \hline \text{Perspektif transformasyonu ( F )} & \text{Ölçek ( W )} \end{array} \right]$$

$$A = \begin{bmatrix} R & P \\ F & W \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Genellikle ölçek 1, ve perspektif transformasyonu sıfırdan oluşan matrislerdir. Bu nedenle HTM

$$A = \begin{bmatrix} R & P \\ 000 & 1 \end{bmatrix}$$

(4.15)

şeklinde tanımlanır.

Ve HTM'nin tersi

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} R^t & -P^tP \\ 000 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} {}^{i-1}R_i & {}^{i-1}P_i \\ 000 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

${}^{i-1}R_i$  : 3x3 ortogonal matrisi  $o_i$  orjinli eksen takımının  $o_{i-1}$  orjinli eksen takımına göre duruşunu belirtir.

${}^{i-1}P_i$  : 3x1 vektörü  $o_i$  orjinli eksen takımı pozisyonunu  $o_{i-1}$  orjinli eksen takımına göre pozisyonunu belirtir.

Homojen transformasyon matrislerinde ötelenme ve rotasyon matrisleri aşağıdaki gibidir.

Ötelenme matrisleri :

$$\text{Trans}_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$\text{Trans}_{y,b} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$\text{Trans}_{z,c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Rotasyon (dönme) matrisleri :

$$\text{Rot}_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$\text{Rot}_{y,\phi} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \sin \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$\text{Rot}_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

### 4.1.3 Denavit – Hartenberg Yöntemi

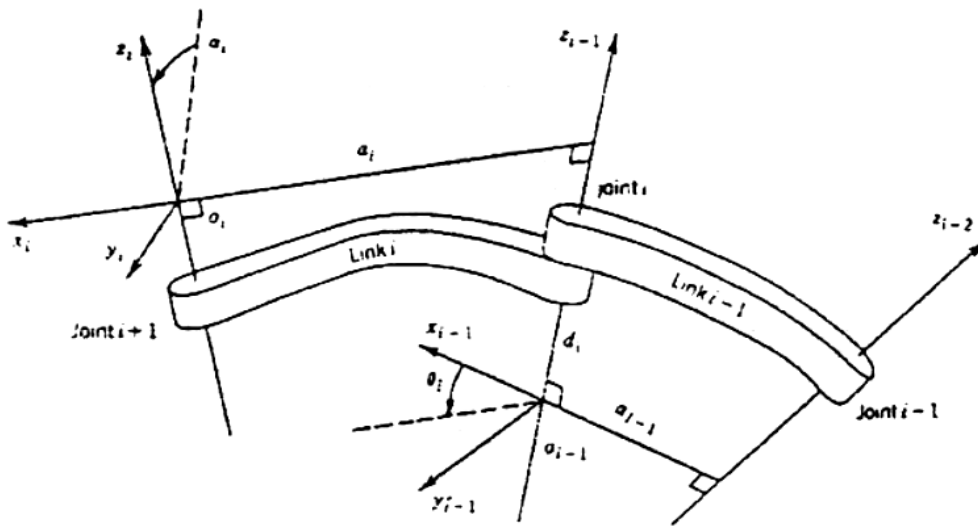
Robot uzuv veya eklemlerine yerleştirilmiş lokal koordinat sistemlerinin merkez eksenleri ile birbirleriyle olan ilişkilerinin rastgele belirlenmesinin doğuracağı karışıklığı önlemek, bu işi sistemlibir şekilde yapmak için Denaviti-Hartenberg aşağıdaki yöntemi benimsemişlerdir.

$\alpha_i$   $x_i$  eksenini çevresinde ölçülen  $z_{i-1}$  ve  $z_i$  eksenleri arasındaki açıdır.

$\theta_i$   $z_{i-1}$  eksenini çevresinde ölçülen  $x_{i-1}$  ve  $x_i$  eksenleri arasındaki açıdır.

$a_i$   $x_i$  eksenini boyunca ölçülen  $i$  koordinat sistemi merkezinden  $x_i$  ve  $z_{i-1}$  eksenlerinin kesişme noktasına olan mesafedir.

$d_i$   $z_{i-1}$  eksenini boyunca ölçülen  $i-1$  koordinat sistemi merkezinden  $x_i$  ve  $z_{i-1}$  eksenlerinin kesişme noktasına olan mesafedir.



Şekil 4.3 Denavit-Hartenberg parametreleri

Koordinat sistemleri yerleştirilirken,  $z$  ekseninin hareket boyunca olmasına dikkat edilmelidir.

Şekil 3.3.'de Denavit-Hartenberg parametreleri görülmektedir.

(4.23) ve (4.24) eşitliklerinden görüldüğü gibi homojen dönüşüm matrisi,  $z$  eksenini etrafında  $\theta_i$  kadar dönme matrisi  $Rot_{z,\theta_i}$ ,  $z$  eksenini boyunca  $d_i$  kadar ötelenme ve  $x$  eksenini boyunca  $a_i$  kadar ötelenme matrisi  $T_{z,d_i,x,a_i}$  ve  $x$  eksenini çevresinde  $\alpha_i$  kadar dönme matrisi  $Rot_{x,\alpha_i}$ 'den oluşmaktadır.

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} \cdot Trans_{z,d_i,x,a_i} \cdot Rot_{x,\alpha_i} \quad (4.24)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & \cos \theta_i a_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & \sin \theta_i a_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

## 4.2 Robot Dinamiği

Dinamiğin, kuvvetler ile neden oldukları hareketler arasındaki ilişkilerin bilimi olduğu bilinmektedir. Bu durumda, robot dinamiği denildiğinde de mafsal motorlarının uyguladığı mafsal kuvvetleri ile robot hareketi arasındaki ilişkilerin incelenmesi anlaşılır.

Robot kol dinamiği, robot kol hareketinin denklemlerinin elde edilmesi ile ilgilenmektedir. Bir robot kolun hareketinin dinamik denklemleri, o kolun dinamik davranışını tanımlayan bir matematiksel denklem takımudur. Bu denklem takımı, robot kolun yapısı ile kinematik tasarımın simülasyonunda ve kolun kontrolünde kullanılacak olan uygun kontrol denklemlerinin elde edilmesinde kullanılır. Genelde, bir robot kolun dinamik performansı doğrudan, kol dinamik modeli ve kontrol algoritmasının etkinliğine bağlıdır.

Mafsal kuvvetlerini  $\tau(t) = \{ \tau_1(t), \tau_2(t), \dots, \tau_n(t) \}^T$  vektörünün temsil ettiğini biliyoruz. Robot hareketlerini de, kuşkusuz  $q(t) = \{ q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t) \}^T$  mafsal koordinatları vektörü ve onun zamana bağlı türevleri olan  $\dot{q}(t) = \{ \dot{q}_1(t), \dot{q}_2(t), \dots, \dot{q}_n(t) \}^T$  mafsal hızları vektörüyle  $\ddot{q}(t) = \{ \ddot{q}_1(t), \ddot{q}_2(t), \dots, \ddot{q}_n(t) \}^T$  mafsal ivmeleri vektörü temsil edecektir.

Bu çerçevede robot dinamiği problem,  $\tau(t)$  ile  $q(t)$  arasında ;

$$\tau(t) = \tau(q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t))$$

şeklinde fonksiyonel ilişkinin belirlenmesi probleminde ibaret olacaktır.

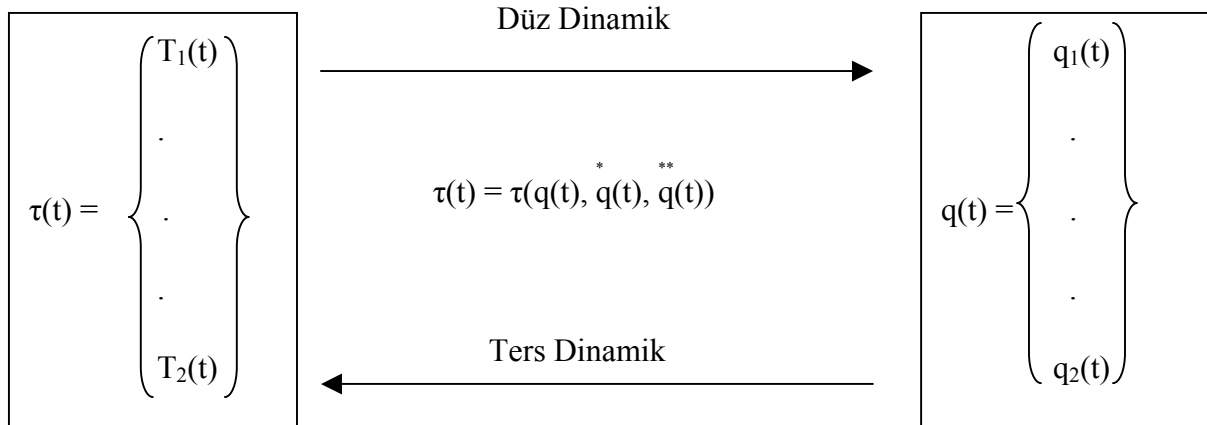


n serbestlik dereceli bir robot söz konusuysen  $q_i(t)$  ;  $i = 1, 2, \dots, n$  mafsall koordinatları için n adet (genel olarak bağılı non-linear) ikinci mertebeden diferansiyel denklemden oluşan bir diferansiyel denklem takımını temsil eden (3.24) denklemleri iki farklı amaç için kullanılabilir.

Verilmiş  $\tau(t)$  için  $q(t)$ 'nin belirlenmesi, yani mafsallara belli kuvvetler uygulandığında buna karşılık robotun yapacağı hareketin bulunması istenebilir. Robotun Düz Dinamik Problemi adı verilen bu problemin çözülmesi demek (3.24) diferansiyel denklem takımının çözülmesi demektir ki bunun analitik olarak gerçekleştirilmesi (genel olarak) olanaksızdır. Bunun yerine bilgisayarda sayısal çözüm elde edilecektir.

Verilmiş  $\tau(t)$  için  $q(t)$ 'nin belirlenmesi, yani robota istenilen bir hareketin yaptırılabilmesi için uygulanması gereken mafsall kuvvetlerinin bulunması istenebilir. Bu probleme de robotun Ters Kinematik Problemi adı verilir. İstenilen robot hareketi yeterince yumuşak ise, ya da matematiksel terimlerle, istenilen  $q(t)$  en az iki kez türetilen bir fonksiyon şeklinde ise  $q(t)$ 'nin yanısıra  $\dot{q}(t)$  ve  $\ddot{q}(t)$  de hesaplanarak (3.24)'de yerine konulur ve  $\tau(t)$  kolayca hesaplanır.

Robot dinamiğinin düz ve ters problemleri Şekil 3.4'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Ters ve Düz Dinamik

Dinamiğin farklı temel prensiplerinden yola çıkılarak robot hareket denklemlerinin farklı yollardan elde edilmesi mümkündür. Elde edilecek denklemlerin, hangi yoldan elde edilmiş olurlarsa olsunlar, robot hareketini temsil etmek bakımından birbirlerinden hiçbir farkları olmayacağı açık olmakla birlikte farklı yollardan elde edilen denklemlerin farklı yapılarda oldukları da bir gerçektir. Bu yapıların birbirlerinden farklı olan temel özellikleri, kullanım amacına göre, aralarında bir tercih yapılmasını gerektirir.

Hareket denklemlerinin sahip olması istenen iki önemli özellik vardır. Bunlardan birincisi denklemlerin kapalı formda olması, yani  $\tau(t)$  ile  $q(t)$  arasındaki ilişkiyi açık ifadeler şeklinde ortaya koyması, ikincisi ise denklemlerin sürele hesaplanabilir yapıda olmasıdır.

Robot kolun dinamik modeli, Newton mekaniği ve Lagrange mekaniği gibi bilinen fiziksel kanunlar yardımıyla elde edilir. Lagrange-Euler (L-E) ve Newton-Euler (N-E) formülasyonları gibi geleneksel yaklaşımlar, robot kolun hareket denklemlerini sistematik olarak çıkarmakta kullanılırlar. Robot kol dinamiğini tanımlamakta kullanılan denklemler farklı yaklaşımlarla elde edilir. Bunlar,

- Lagrange-Euler formülasyonu,
- Newton-Euler formülasyonu,
- Genelleştirilmiş d'Alembert formülasyonu.

Bu formülasyonların hepsi gerçekte birbirine benzerdir. Fiziksel olarak aynı dinamik davranışı tanımlarlar. Bununla beraber bu denklemler, değişik sebep ve amaçlar için oluşturulduklarından dolayı yapılarında da farklılık vardır. Bunlardan bazıları hızlı hesaplama zamanı avantajlarından dolayı servomotorlar tarafından robot kollarının mafsallarına uygulanacak nominal kuvvet/momentlerin hesaplanmasında, diğerleri ise, genelde kontrol analizi ve sentezi ile robot kolun hareketinin bilgisayar simülasyonlarının gerçekleştirilmesinde kullanılır. Yöntemlere kısaca değinecek olursak,

#### 4.2.1 Lagrange-Euler Formülasyonu

Bir robot kolun hareket denklemlerinin Lagrange-Euler formülasyonu yardımıyla çıkarılması yoğun bir matris hesaplama işlemi gerektirir. Bu amaçla, her bir kola yerleştirilen koordinat sistemleri ile bunların yerdeğiştirmeleri ve birbirine göre konumlarını belirleyen Denavit-Hartenberg matris gösteriminden yararlanır. Robot kolunun hareket denklemlerinin çıkarılmasında Denavit-Hartenberg gösterimi kullanılarak sistematik olarak oluşturulan matrisler bilgisayarla hesaplamada kolaylık sağlarlar.

### 4.2.2 Newton-Euler Formülasyonu

Lagrange-Euler formülasyonu kullanılarak çıkartılan ikinci dereceden lineer olmayan diferansiyel denklemler kullanılarak, yörünge üzerindeki her bir nokta için mafsalların konum, hız ve ivmeleri bilinirse nominal mafsal momentleri gerçek zamanda bulunabilir. Ancak bu işlem açık çevrimli kontrolde, problem olmaktadır. Çünkü Lagrange-Euler denklemlerinin çıkarılmasında  $4 \times 4$  homojen dönüşüm matrislerinin kullanılması hesaplama zamanını arttırmaktadır. Hesaplama zamanını azaltmanın bir yolu, Coriolis ve merkezkaç kuvvetlerinin ihmal edilmesidir. Böylece basitleştirilmiş dinamik denklemler kullanılarak mafsal momentleri daha hızlı bir şekilde hesaplanabilir. Ancak basitleştirilmiş model kullanımı yüksek hızlı robot hareketlerinde, arzu edilen mafsal moment değerinden önemli sapmalar meydana getirdiğinden pek kullanışlı bir yöntem değildir. Kapalı çevrim kontrolde düzeltici momentlerin bulunmasında basit model kullanılması durumunda hızlı robot hareketlerinde aşırı düzeltici moment ihtiyacına neden olmaktadır. Bu nedenle, özellikle kontrolde kullanılacak robot kolu, dinamik denklemlerinin çıkarılmasında, Newton'un ikinci kanunundan faydalanarak, açık kinematik zincir mekanizmalarının dinamiği için Newton-Euler denkleminin değişik formları geliştirilmiştir. Newton-Euler formülasyonu uygulanarak bir robot kola ait neticeler vektörel çarpımlı terimlerden oluşan ileri ve geri ardışık tekrarlı denklemler takımı olarak ifade edilir. Bu formülasyonun, gerçek zamanlı kontrolde uygulanacak momentlerin, hesaplama zamanını önemli ölçüde azaltması çok önemli bir yönüdür. Robot kolun temel koordinat takımına göre hareketinin kinematik ilişkileri, d'Alembert prensibine dayanılarak matematik modeli ifade edilir.

### 4.2.3 Genelleştirilmiş d'Alembert Yöntemi

L-E formülasyonu ile hareket denklemlerinin elde edilmesinde,  $4 \times 4$  homojen matris dönüşümlerinin kullanılması hesaplama etkinliğini azaltır. Buna karşın, N-E formülasyonunda hesaplama etkinliği, vektör formülasyonundan ve bu formülasyonun ardışık yapısından kaynaklanır. Hareketin kapalı formdaki denklemlerini elde etmek için, relatif konum vektörü ve dönme matrisi gösterimleri kullanılarak her bir uzvun kinematik bilgileri elde edilir. Robot kolun kinetik ve potansiyel enerji ifadelerinden Lagrange fonksiyonu elde edilerek, hareket denklemleri çıkarılır.

## 5 TASARLANAN ROBOTUN TANITIMI

### 5.1 Tasarımı Yapılan Robot ile İlgili Ön Bilgiler

Robot denilince akla ilk gelen, genellikle bilgisayar, elektronik gelir. Fakat robotlar aslında çok ciddi birer konstrüksiyon örneğidir ve bir çok makinadan daha karmaşıktırlar. Bu projenin de amacı bilinen makine elemanlarının hesaplarını yapmaktan ziyade konstrüksiyon detaylarının incelenmesidir. Ufak hacimlerde güç iletmek, hafif tasarım yapmak ve de görsel olarak güzel bir tasarım yapmak esas hedeftir. Bu yüzden konstrüktif detaylar birinci, hesaplar ikinci plandadır. Ancak bazı mekanizmalar çok sık rastlanmayan türden oldukları için (harmonicdrive) onların hesapları detaylı bir şekilde yapılmıştır.

Tasarlanan robot, mafsallarına hareketin en-direkt olarak aktarıldığı tarz bir robottur. Bunun avantajı motor tipinden bağımsız sistem olması, kablolama kolaylığı ve motorların denge ağırlığı olmasını sayabiliriz. Dezavantajı ise aktarma organlarında kaybolan güç ve aktarma organlarının ağırlığıdır.

Mafsal hesaplarında Lagrange denklemi uygulanarak moment bulunmuştur ve robotun her uzvu birbirinden bağımsız olarak öngörülmüştür. Mafsal hızları, mafsallar arası mesafe v.b. özellikler robot firmalarının uygulamalarından alınmıştır (ABB, KUKA v.s). Mafsal ivmeleri öngörülmüştür ve gereken maksimum kuvvet anında o ivme uygulanarak, mafsal momenti hesaplanmıştır. Dolayısıyla robotun normal çalışması esnasında belirtilen ivme değerlerinin üstüne rahatlıkla çıkılabilir.

Denge mekanizması olarak çift yaylı “Mekanik yaylı dengeleyici” kullanılmıştır. Maksimum uygulama kuvveti “85 kN” dur.

Robotta kullanılacak servo motorlarla alakalı herhangi bir seçim yapılmamıştır. Yalnızca gerekli güç değeri verilmiştir. Zaten robotun motorun şeklinden bağımsız olarak tasarlandığı için, birçok markanın servo motoru ufak bir flanş değişikliğiyle sisteme adapte edilebilir.

Robotun çalışmasına yardımcı olarak herhangi bir mekanizmanın bağlantısı için, biri üst kolda, diğeri de alt kolda olmak üzere iki bağlantı noktası tasarlanmıştır.

Tasarımda dikkat edilen bir husus ise, robotun modüler olmasıdır. Robot eksen sayısında olduğu gibi, ana modül sayısı olarak da 6 modülden oluşmaktadır. Modüllerin birbirlerine olan montajları basittir. Eğer gerekiyorsa üst kol ve bilek arasındaki parça boyu uzatılmak suretiyle ve istiap haddini düşürmek suretiyle robotun uzanma mesafesi arttırılabilir.

## 5.2 Robotun Özelliklerinin Belirtilmesi

<b>İstiap Haddi ( Yükleme Sınırı )</b> .....	150 kg	
<b>Yardımcı Ünite Maksimum Ağırlığı (Üst Kol/Alt Kol)</b> .....	75 / 100 kg	
<b>Serbestlik Derecesi</b> .....	6	
<b>Uç bağlantı Flanşı E6</b> .....	Özel / 135x12xM10	
<b>Montaj Şekli</b> .....	Zemine Montajlı	
<b>Toplam Ağırlık</b> .....	1300 kg	
<b>Yüklü Motor Kapasitesi</b> .....	28 kW	
<b>Eksen Hızları</b> .....	<b>Menzili</b> .....	<b>Mafsal Hızı</b>
Eksen 1 (E1) .....	$\pm 185^\circ$ .....	100°/s
Eksen 2 (E2) .....	$-4^\circ / -146^\circ$ .....	100°/s
Eksen 3 (E3) .....	$+152^\circ / -129^\circ$ .....	100°/s
Eksen 4 (E4) .....	$\pm 350^\circ$ .....	170°/s
Eksen 5 (E5) .....	$\pm 125^\circ$ .....	170°/s
Eksen 6 (E6) .....	$\pm 350^\circ$ .....	240°/s

Ek-1’de robotun genel tanıtımı mevcuttur. Mafsal ölçüleri, taradığı alan v.s. detaylı olarak gösterilmiştir.

Ek-2’de 4. 5. ve 6. eksenlerin (üst kol) detayları gösterilmiştir.

Ek-3’de 1. 2. ve 3. eksenlerin detayları gösterilmiştir.

## 6 TASARLANAN ROBOTUN MEKANİK HESAPLAMALARI

### 6.1 Mafsal Momentlerinin Bulunması

#### 6.1.1 Giriş

Robotlarda, kollara hareket verebilmek için kol mafsallarına moment uygulamamız gerekmektedir. Mafsal momentleri, yörünge planlaması ile karmaşık matrisler sonucunda bulunabilen, sürekli değişen ve robotun çalışma esnasında, bilgisayardan aktarılan bilgilerle hesaplanıp mafsallara uygulanan momentlerdir. Fakat robot, birçok uygulamaya için tasarlanmaktadır, dolayısıyla robot tasarımı esnasında, mafsal momentleri, uygulama bilinmediğinden ötürü bulunamazlar. Robotun konstrüktif hesaplarını, boyutlandırılmasını yapabilmek için ise momentlerin bilinmesi gerekmektedir. Bu durumda robot tasarımı yapabilmek için, ilk başta bazı sınırların koyulması gerekmektedir. Bunlar,

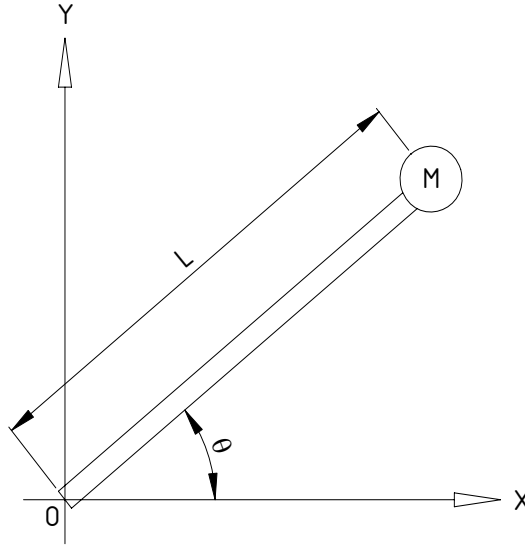
- Robotun kaldırabileceği azami ağırlık ve bu kütlenin ağırlık merkezinin robotun uç noktasına göre koordinatları,
- Mafsalların maksimum hızları,
- Mafsalların maksimum ivmeleri,
- Robotun kol uzunlukları.

Yukarıda yazılı olan sınırlar koyulduktan sonra, robotun mekanik hesaplarını yapabilmek için yörünge planlaması yapılmaksızın, sınır şartları ile, maksimum mafsal momentleri bulunur. Bulunan mafsal momentleri, robot kolunun, sınır şartları ile hesaplanmış, robotun çalışması esnasında hiçbir zaman geçemeyeceği en üst seviye zorlanmalardır. Bununla birlikte, zaten robot kolu sürekli sınır şartlarında çalışmayacağından dolayı, robotun mekanik hesaplarında yanlışlık sözkonusu olmaz. Buradaki en önemli nokta, mukavemet hesaplarında bulunacak olan mafsal momenti, robotun çalışma esnasındaki ulaşabileceği maksimum moment olmasıdır. Bu da mukavemet hesapları için mafsal momentlerini bulmayı kolaylaştırır.

#### 6.1.2 Mafsal Momentlerinin Hesap Yöntemi

Proje için yapılan hesaplamalarda Lagrange denklemi uygulanmıştır. Bu yöntem robot üzerinde şu şekilde uygulanmıştır. Momenti hesaplanacak olan mafsaldan, robotun uç noktasına ve robotun ucuna monte edilen sisteme kadar olan kısmın ağırlığı ve ağırlık merkezi bulunur. Hesaplanacak olan mafsaldan, ağırlık merkezine kadar olan kısım düz, rijit ve ağırlıksız çubuk gibi ve de ucuna hesap edilen ağırlık kadar kütle varmış gibi düşünülür.

Önemli olan nokta, ağırlık merkezinin bulunması esnasında, hesap edilecek mafsalın maximum zorlanma anını yakalamaktır.



Şekil 6.1 Mafsal momentinin bulunmasının şematik gösterimi

$M$  : Mafsaldan, robotun uç noktasına kadar olan kısmın ve uç kısma takılan cisimlerin ağırlıklarının toplamı.

$L$  : Mafsaldan, hesaplanan ağırlık merkezine olan uzaklık.

Burada yükün konumunu bulup, türevlerini alırsak,

$$X_M = L \cdot \cos\theta \quad \dot{X}_M = -L \cdot \sin\theta \cdot \dot{\theta} \quad (6.1)$$

$$Y_M = L \cdot \sin\theta \quad \dot{Y}_M = L \cdot \cos\theta \cdot \dot{\theta} \quad (6.2)$$

$$V_M = \sqrt{(\dot{X}_M^2 + \dot{Y}_M^2)} = \sqrt{((L \cdot \sin\theta \cdot \dot{\theta})^2 + (L \cdot \cos\theta \cdot \dot{\theta})^2)} = \sqrt{L^2 \cdot \dot{\theta}^2 (\sin^2\theta + \cos^2\theta)} = L \cdot \dot{\theta} \quad (6.3)$$

Bu hızlardan yola çıkarak yüklerin kinetik ve potansiyel enerji denklemlerini yazarsak :

$$E_k = \frac{1}{2} M \cdot V_M^2 = \frac{1}{2} M \cdot L^2 \cdot \dot{\theta}^2 \quad (6.4)$$

$$E_p = h \cdot M \cdot g = Y_M \cdot M \cdot g = L \cdot \sin\theta \cdot M \cdot g \quad (6.5)$$

Enerji denklemlerine Lagrange yöntemini uygularsak belirli bir açı için o mafsaldaki momenti bulabiliriz.

$\theta_\theta$  : Mafsal için gereken moment;

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_k}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \theta} + \frac{\partial E_p}{\partial \theta} = \theta_\theta \quad (6.6)$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\theta}} = M.L.\dot{\theta} \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_k}{\partial \dot{\theta}} \right) = M.L.\ddot{\theta} \quad (6.7)$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial \theta} = 0 \quad \frac{\partial E_p}{\partial \theta} = L.M.g.\cos\theta \quad (6.8)$$

$$\theta_\theta = M.L^2.\ddot{\theta} + L.M.g.\cos\theta \quad (6.9)$$

Bulunur.

Mafsal momentleri hesaplanırken yukarıdaki denklemden faydalanılmıştır. Denklem hem statik hemde dinamik momenti içermektedir. Hesap esnasında maksimum zorlanmayı bulabilmek için “ $\theta$ ” açısı “0°” kabul edilmiştir.

## 6.2 Robotun Mekanik Hesapları ve Boyutlandırma Kontrolü

### 6.2.1 6. Eksen Parçalarının Hesapları

#### 6.2.1.1 6. Eksen Harmonic Drive Seçimi

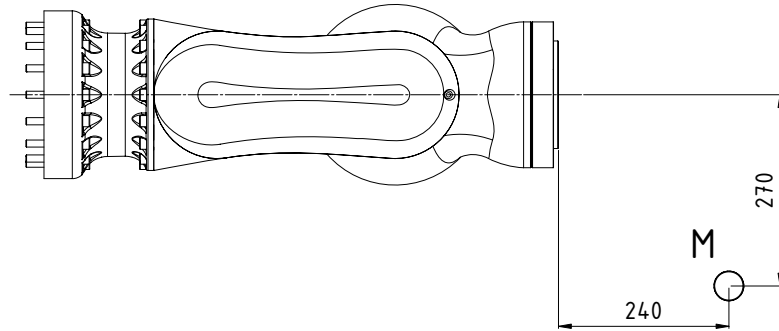
Harmonic drive seçimi yapılırken, harmonic drive firmasına ait “Engineering Catalogue” kitabından yararlanılmıştır. Hesap yapılırken izlenecek yol, kitapda belirtilmiştir.

- Ön seçim yapılması ; Ön seçim olarak, kendinden yataklı, **CPU-45A-80-S** model çevrim oranı 80 olan harmonic drive ünitesi seçilmiştir.
- Ortalama Moment hesabı ; Burada, harmonic drive’ın değişik çalışma koşullarındaki Moment, devir ve çalışma süresinin ortalaması alınır. Ortalama alınırken harmonic drive firmasının verdiği formülden yararlanır.



$$M_{av} = \sqrt[3]{\frac{(n_1 \cdot M_1^2) \cdot t_1 + (n_2 \cdot M_2^2) \cdot t_2 + \dots + (n_n \cdot M_n^2) \cdot t_n}{n_1 \cdot t_1 + n_2 \cdot t_2 + \dots + n_n \cdot t_n}} \quad (6.10)$$

Moment hesabı yapabilmek için, ilk önce gerekli maximum momenti bulmamız gerekmektedir. Bunu, başta yapmış olduğumuz ağırlık, mafsalsal hızı ve ağırlık merkezi kaçıklığı kabulünden bulabiliriz.



Şekil 6.2 Bileğe monte edilmiş aparatın ağırlık merkezi kabulü

Burada, mafsalsal momenti hesabında kullanılacak olan ölçü, “270mm” dir. Ağırlık merkezinin harmonic drive’den kaçıklığını, yani 240mm’yi yataklama hesabında dahil edilecektir.

6. eksen hızı  $\omega = 240^\circ/\text{s}$  (4,188 r/s, 40d/d) ve de bu hıza ulaşması için gereken süre  $t = 0,2$  s kabul edilmiştir. Dolayısıyla da 6. eksen ivmesi  $\alpha = 20,94$  r/s<sup>2</sup> olarak bulunur. Maximum moment için  $\theta = 0^\circ$  alınmıştır.

270 mm’lik kaçıklığa Lagrange denklemini (6.9) uygularsak,

$$\theta_0 = M \cdot L^2 \cdot \ddot{\theta} + L \cdot M \cdot g \cdot \cos \theta$$

$$\theta_0 = 150 \cdot 0,27^2 \cdot 20,94 + 0,27 \cdot 150 \cdot 9,81 \cdot 1$$

$$\theta_0 = 626 \text{ N.m}$$

Bu mafsalsal için gereken maximum moment 626 N.m olarak bulunmuştur ve bu moment 0,2 s için uygulanmaktadır. Bunun nedeni, mafsalsal istenilen hıza çıktıktan sonra dinamik moment

etkisi ortadan kalkacak, sabit hızda sadece statik moment etki edecektir. Statik moment ise açının artmasıyla azalacaktır.

Harmonic drive için, ortalama moment hesabında kullanılmak üzere değişik zamanlarda uygulanacak momentin ve devrin bulunması gerekmektedir. Sistemin hareketi lineer bir hareket olmadığı için hiçbir zaman belli bir süre zarfında sabit moment ihtiyacı olmamaktadır. Bu durumda belli yaklaşımlarla, belli anlardaki moment ve devir değerleriyle hesaplama yapılacaktır.

1. durum, maximum moment ihtiyacı olduğu an,

$$M_1 = 626 \text{ N.m}, \quad n_1 = 20 \text{ d/d} \text{ (0'dan 40 d/d'ya çıktığı için ortalama alınmıştır)}, \quad t_1 = 0,2 \text{ s}$$

2. durum, flanş yere paralel, sadece dinamik moment etkisi var,

$$M_2 = 230 \text{ N.m}, \quad n_2 = 20 \text{ d/d}, \quad t_2 = 0,2 \text{ s}$$

3. durum, statik maximum moment, maximum statik moment etkisindeyken hareketsiz hal,

$$M_3 = 397 \text{ N.m}, \quad n_3 = 0 \text{ d/d}, \quad t_3 = 1 \text{ s}$$

4. durum, 45° sadece statik moment var,

$$M_4 = 281 \text{ N.m}, \quad n_4 = 40 \text{ d/d}, \quad t_4 = 1 \text{ s}$$

Bulunan değerleri, ortalama moment denkleminde (6.10) yerine koyarsak,

$M_{av} = 345 \text{ N.m}$  olarak bulunmaktadır. Ön seçimini yapmış olduğumuz harmonicdrive'ın ortalama moment değeri,

$$M_A = 390 \text{ N.m'dir.}$$

Dolayısıyla ,

$$M_{av} < M_A \text{ sağlanmış olur.}$$

- Ortalama çıkış devri kontrolü ; Burada, değişik anlardaki devirlerin ortalaması bulunarak, önseçimi yapılmış olan hamonic drive ile kıyaslanır. Ortalama çıkış devri formülü katalogdan alınmıştır.

$$n_{outav} = \frac{n_1 \cdot t_1 + n_2 \cdot t_2 + \dots + n_n \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n + t_p} \quad (6.11)$$

buradan

$n_{out\ av} = 14,1\ d/d$  bulunur.

Bulunan devir sayısı harmonic drive'in çıkış devir sayısıdır. Bu devir sayısını çevrim oranı ile çarparsak ortalama giriş devir sayısını buluruz.

$n_{in\ av} = i \cdot n_{out\ av} = 1129,4\ d/d$  bulunur. Ön seçimini yapmış olduğumuz harmonic drive için ortalama giriş devir değeri ,

$n_{av} = 3300\ d/d$  (yağlı kullanım için) olduğundan, çalışma devri emniyetlidir.

- Maksimum giriş devri kontrolü, kullanım esnasındaki en yüksek devrin kontrolüdür.

Maksimum çıkış devri = 40 d/d,

$n_{in\ max} = n_{out\ max} \cdot i = 3200\ d/d$  bulunur.

Katalogda izin verilen maksimum giriş devri ise 5000 d/d (yağlı kullanım için) olduğundan, sistem emniyetlidir.

- Tekrarlanabilir maksimum moment kontrolü, ivmeli hareketler esnasında oluşan maksimum moment değeridir.

Bizim ihtiyacımız olan maximum tekrarlanabilir moment değeri,

$M_{max\ tek} = 626\ N.m$

Harmonic drive'in izin verdiği maksimum tekrarlanabilir moment değeri,

$M_R = 706\ N.m$  olduğundan sistem emniyetlidir.

- Maksimum moment kontrolü, sistemin acil duruşlar (çarpma, elektrik kesintisi v.s) sonucu oluşturduğu moment değeridir. Hesaplayabilmek için, ani duruşlarda oluşacak ivme kabulü yapmak gerekmektedir.

Ani duruşlar için geçen süreyi  $t=0,1\ s$  olarak kabul edersek, mafsalın maksimum hızını en başta  $240^\circ/s$  olarak kabul ettiğimize göre, duruş esnasında oluşan açısal ivme,

$\alpha = 41,9\ r/s^2$  bulunur. İvme değerini de Lagrange denkleminde (6.9) yerine koyarsak,

$M_{max} = 855\ N.m$  bulunur.

Harmonic drive'in izin verdiği maksimum moment değeri,

$M_M = 1270\ N.m$  olduğundan sistem emniyetlidir.

- İzin verilebilir maksimum moment sayısı, sistemde olabilecek acil duruşların sisteme

zarar vermeden tekrarlanabileceği maksimum sayıdır.

Katalogdan alınan formüle göre, maksimum moment sayısı

$$N_{k_{\max}} = \frac{10^4}{2 \cdot \frac{n_k \cdot i}{60} \cdot t_k} \quad (6.12)$$

Acil Duruş süresi ( $t_k$ ) = 0,1 s ,

Acil Duruş Öncesi Devir ( $n_k$ ) = 40 d/d ,

Acil Duruş Sayısı ( $N_{k_{\max}}$ ) = 937 bulunur.

- Wave Generator için ömür kontrolü, Harmonic drive’da giriş elemanı olan wave generator’un içindeki rulmanın ömür hesabıdır. Formül katalogda mevcuttur.

Harmonic drive kataloğundan  $L_n = 35000$  h

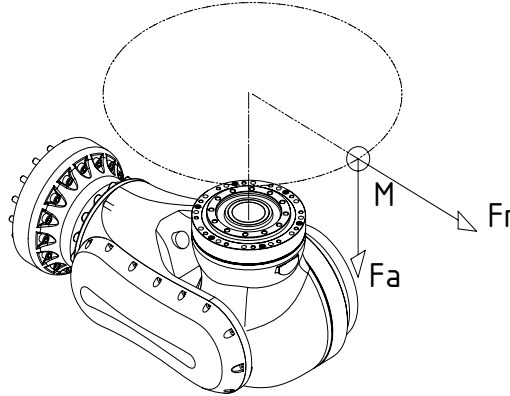
Bizim beklediğimiz ömür 30000 h

$$L_{50} = L_n \cdot \frac{\text{Ortalama Giriş Devri}}{n_{\text{inav}}} \cdot \left( \frac{\text{Ortalama Tork}}{T_{\text{av}}} \right)^3 \quad (6.13)$$

$L_{50} = 46259$  h bulunur. Ve

$L_{50} = 46259$  h  $>$  30000 h olduğundan sistem emniyetlidir.

- Harmonic Drive mekanizmasının çıkış yatağının kontrolü: Harmonic drive, bu üründe çıkış yatağında “Çapraz makaralı rulman” kullanmıştır ve bu rulmana ait hesaplamaları kendi kataloğunda belirtmiştir. Robotta yatağa gelen kuvvetler şekildeki gibidir.



Şekil 6.3 6. eksen mafsalına gelen kuvvetler

$$M = F_r \cdot (L_r + R) + F_a \cdot L_a \quad (6.14)$$

$$L_r = 240 \text{ mm}$$

$$L_a = 270 \text{ mm}$$

$$F_a = m \cdot g = 150 \cdot 9,81 = 1471,5 \text{ N}$$

$$F_r = m \cdot \omega^2 \cdot r = 150 \cdot 4,19^2 \cdot 0,27 = 711 \text{ N}$$

$R = 0,024 \text{ m}$  (Harmonicdrive, engineering data kataloğundan CPU-45A-80-S için bulunan değer)

Değerleri 6.14 nolu denklemde yerlerine koyarsak,

$M = 585 \text{ N}$  olarak bulunur.

$$P_c = x \cdot \left( F_r + \frac{2 \cdot M}{d_p} \right) + y \cdot F_a \quad (6.15)$$

yukarıdaki formülün sonucunu bulabilmemiz için “x” ve “y” değerlerini bulmamız gerekmektedir. Bu değerleri ise 6.16 numaralı formülden bulabiliriz.

$$\frac{F_a}{F_r + 2 \cdot M / d_p} = 0,17 \quad \text{Bulunur.} \quad (6.16)$$

$d_p = 0,15$  (Harmonicdrive, engineering data kataloğundan CPU-45A-80-S için bulunan değer)

6.14 denkleminde bulunan “0,17” değeri katalogta yerine konarak “x=1” , “y=0,45” sonucunu verir. Değerleri 6.15 numaralı denklemde yerine koyarsak,

$P_c = 9173$  Bulunur.

Bulunan tüm değerler, aşağıdaki denklemde (6.17) yerine koyulduğunda, çıkış yatağının ömrü bulunmuş olur.

$$L_{10} = \frac{10^6}{60 \cdot n_{\text{outav}}} \cdot \left( \frac{C}{f_w \cdot P_c} \right)^B \quad (6.17)$$

$B = 10/3$  (Harmonic drive, engineering data kataloğunda, seçimini yaptığımız harmonic drive’in çıkış yatağında kullanılan rulmanın makaralı olmasından ötürü gelen katsayı)

$C = 77600 \text{ N}$  (Harmonic drive, unit kataloğunda, CPU-45A-80-S için, çıkış yatağındaki rulmanın dinamik yük katsayısı)

$f_w = 3$  (Harmonic drive, engineering data kataloğunda, yükleme durumuna ait katsayı. En zor çalışma koşulları için ani yükleme, titreşim v.s. seçildi)

değerleri formülde yerine koyarsak çıkış yatağının çalışma ömrünü saat cinsinden bulabiliriz,

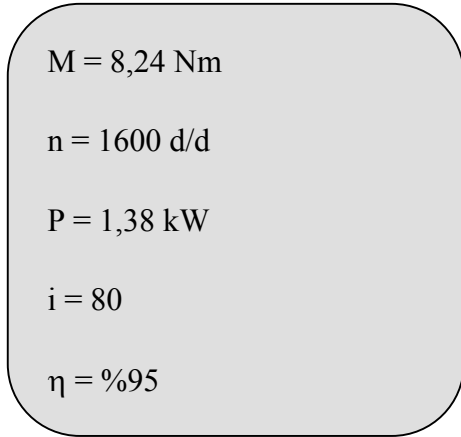
$L_{10} = 144661$  saat olarak bulunur.

### 6.2.1.2 6. Eksen Güç Akışı ve Motor Gücü Hesabı

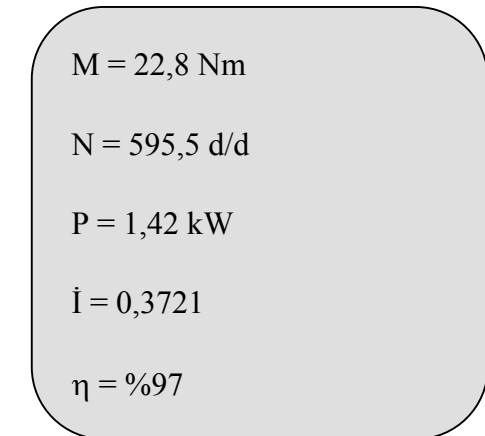
Robotun üst kolunun arkasında bulunan motordan, robotun ucuna güç aktarılırken, aktarma organlarında bazı kayıplar meydana gelir. Bununla beraber aktarma organlarının ataletlerinden doğan bazı güç kayıpları da mevcuttur. Dolayısıyla motorun güç ihtiyacı, bizim uç noktayı hareket ettirmek için bulduğumuz güçten fazla olacaktır. Bu aktarımı diyagram olarak yazarsak,

Uç noktada (Harmonic drive çıkışı) gerekli olan,

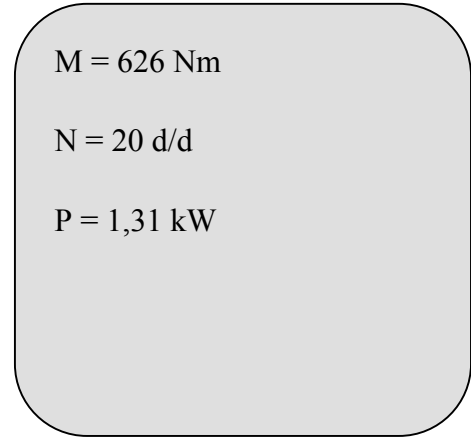
Harmonic Drive Girişi



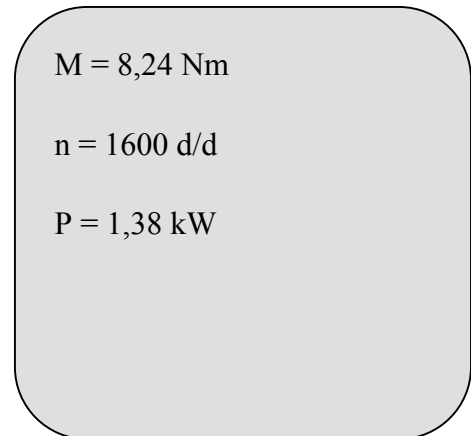
1. Dişli Grubu Girişi



Harmonic Drive Çıkışı



1. Dişli Grubu Çıkışı (Harmonic Drive Girişi)



## 1. Kayış-Kasnak Girişi

$$M = 23,41 \text{ Nm}$$

$$n = 595,5 \text{ d/d}$$

$$P = 1,46 \text{ kW}$$

$$i = 1$$

$$\eta = \%97$$

## 1. Kayış-Kasnak Çıkışı (Dişli Grubu girişi)

$$M = 22,8 \text{ Nm}$$

$$N = 595,5 \text{ d/d}$$

$$P = 1,42 \text{ kW}$$

## 2. Dişli Grubu Girişi

$$M = 8,98 \text{ Nm}$$

$$n = 1600 \text{ d/d}$$

$$P = 1,505 \text{ kW}$$

$$i = 2,6874$$

$$\eta = \%97$$

## 2. Dişli Grubu Çıkışı (1. Kayış-Kasnak Girişi)

$$M = 23,41 \text{ Nm}$$

$$N = 595,5 \text{ d/d}$$

$$P = 1,46 \text{ kW}$$

## 2. Kayış-Kasnak Girişi

$$M = 9,25 \text{ Nm}$$

$$n = 1600 \text{ d/d}$$

$$P = 1,55 \text{ kW}$$

$$i = 1$$

$$\eta = \%97$$

## 2. Kayış-Kasnak Çıkışı (2. Dişli Grubu Girişi)

$$M = 8,98 \text{ Nm}$$

$$n = 1600 \text{ d/d}$$

$$P = 1,505 \text{ kW}$$

Sistemdeki aktarma organlarının verim kayıplarıyla beraber motor gücünün  $P = 1,505$  kW olması gerekmektedir. Bulduğumuz değere, aktarma organlarının ataletlerini de eklersek daha doğru bir güç değeri elde edebiliriz.

Bu doğrultuda, sistemdeki aktarma organlarının da kayıplarını hesaplamamız gerekmektedir. Hesaplama yapılacak yöntem, dönen elemanın atalet momentini, o elemanın açısal ivmesiyle çarpılarak gerekli moment bulunur. Bulunan momenti de o elemanın hızıyla çarpığımız takdirde, o elemanda kaybedilen güç bulunmuş olur.

0 d/d'dan 3200 d/d'ya hızlanacak olan elemanların toplam atalet momentleri,

Toplam Atalet Momenti  $I = 5456555 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^2$

$$\alpha = \frac{\frac{\pi \cdot n_1}{30} - \frac{\pi \cdot n_0}{30}}{0,2} = \frac{\frac{\pi \cdot 3600}{30} - \frac{\pi \cdot 0}{30}}{0,2} = 1674,67 \text{ r/s}^2$$

$M = I \cdot \alpha = 9,1379 \text{ N.m}$  gerekli olan moment bulunur.

Bu ivmelenmeyi sağlayacak gerekli moment bulunur. Bulunan moment ve ulaşılan açısal hızın yarısı çarpıldığında ise gerekli olan güç bulunur. Açısal hızın yarısını almamızın sebebi, başlangıç hızında maksimum moment, istediğimiz hıza ulaştığımızda ise düşük moment ihtiyacı vardır. Yaklaşım olarak, momenti sabit, devir sayısının yarısını kullanarak elde ettiğimiz güç daha yakın bir ifade olacaktır.

$$P = \frac{M \cdot n}{9550} = \frac{9,1373 \cdot 1600}{9550} = 1,53 \text{ kW}$$
 Bulunur.

0 d/d'dan 1191 d/d'ya hızlanacak olan elemanların toplam atalet momentleri,

Toplam Atalet Momenti  $I = 5489210 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^2$

$$\alpha = \frac{\frac{\pi \cdot n_1}{30} - \frac{\pi \cdot n_0}{30}}{0,2} = \frac{\frac{\pi \cdot 1191}{30} - \frac{\pi \cdot 0}{30}}{0,2} = 623,29 \text{ r/s}^2$$

$M = 3,42 \text{ N.m}$

$P = 0,21 \text{ kW}$  Bulunur.

Dolayısıyla motor gücü,

$P_{\text{motor}} = 1,55 + 1,53 + 0,21 = 3,29 \text{ kW}$  bulunur.



### 6.2.1.3 6. Eksen 1. Dişli Çark Grubu Bilgileri

Çevrim Oranı (  $i$  ) = 0,3721

Kavrama Açısı (  $\alpha_o$  ) = 20°

Helis Açısı (  $\beta$  ) = 20°

Şaft Açısı (  $\Sigma$  ) = 90°

Modül (  $m$  ) = 3 mm

Diş Genişliği (  $B$  ) = 18 mm

	1. Dişli	2. Dişli
Diş Sayısı ( $z$ )	43	16
Helis Yönü	Sağ	Sol
Yuvarlanma Çapı ( $d$ )	129 mm	48 mm
Koni Tepe Açısı ( $\varphi$ )	69,5901°	20,4099°
Teğetsel Kuvvet ( $F_t$ )	406,15 N	
Normal Kuvvet ( $F_n$ )	495,95 N	
Radyal Kuvvet ( $F_r$ ) 1.Yön	-92,58 N	202,3 N
Radyal Kuvvet ( $F_r$ ) 2. Yön	202,3 N	92,58 N
Eksenel Kuvvet ( $F_a$ ) 1. Yön	202,3 N	-92,58 N
Eksenel Kuvvet ( $F_a$ ) 2. Yön	95,58 N	202,3 N
Çevresel Hız ( $V$ )	3,49 m/s	
Malzeme	37Cr4	37Cr4
Malzeme	37Cr4	37Cr4
Yüzey Sertleştirme	Var	Var
Kopma Mukavemeti ( $R_m$ )	785 N/mm <sup>2</sup>	785 N/mm <sup>2</sup>
Akma Mukavemeti ( $R_e$ )	539 N/mm <sup>2</sup>	539 N/mm <sup>2</sup>

Emniyet Katsayısı ( $S_{Yüzey\ Aşınması}$ ) 2,684 2,537

Emniyet Katsayısı ( $S_{Diş\ Kırılması}$ ) 6,07 6,1

Dişli çark mukavemet hesapları ISO 6336:1996'ya göre MECHSOFT programı ile yapılmıştır.

#### 6.2.1.4 6. Eksen 1. Kayış-Kasnak Grubu Bilgileri

Seçilen Dişli Kayış	Synchronous Belts Gates PowerGrip GT
Standart Kayış Numarası	8M-20
Kayışdaki dişli adedi	97
Kayış Adımı ( p )	8 mm
Kayış Genişliği ( b )	20 mm
Kasnak Dişli Sayısı ( z )	34
Çevrim Oranı ( i )	1
Ortalama Kasnak Çapı ( $d_w$ )	86,58 mm
Toplam Germe Kuvveti ( $F_t$ )	541,75 N
Çevre Hızı ( V )	2,7 m/s
Hesaplanan Güç ( $P_{hes}$ )	2,628 kW
Aktarılabilecek Güç ( $P_1$ )	3,308 kW

#### 6.2.1.5 6. Eksen 2. Dişli Çark Grubu Bilgileri

6. Ekseni tahrik eden 2. dişli çark grubu, boyut olarak 1. dişli çark grubu ile tamamen aynıdır. Bununla birlikte, 2. dişli çark grubuna gelen güç bir miktar daha fazladır. Fakat bu fark mukavemet problemi çıkarmayacak kadar küçük olduğundan, ayrıca bir hesap yapılamıştır.

#### 6.2.1.6 6. Eksen 2. Kayış-Kasnak Grubu Bilgileri

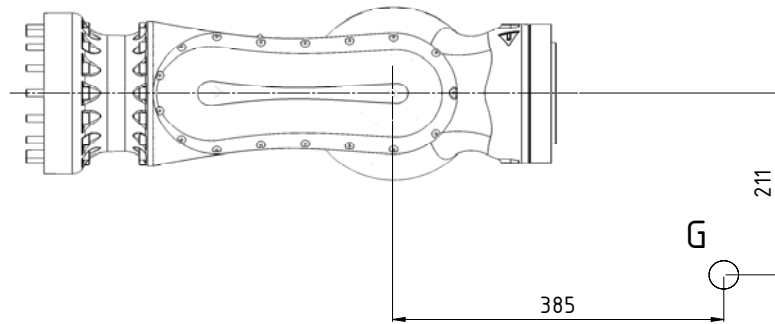
6. Ekseni tahrik eden 2. kayış-kasnak grubu, boyut olarak, 5. eksenin 2. kayış-kasnak grubu ve 4. eksen kayış-kasnak grubu ile aynıdır. Aktardıkları güçler arasında ufak farklar vardır.

En yüksek momenti, 4 eksenin kayış-kasnak grubu aktarmaktadır. Dolayısıyla boyutları ve mukavemet değerler 4. eksen hesaplarında belirtilecektir.

## 6.2.2 5. Eksen Parçalarının Hesaplanması

### 6.2.2.1 5. Eksen Harmonic Drive Seçimi

- Ön seçim yapılması ; Ön seçim olarak, kendinden yataklı, CPU-58A-100-S model çevrim oranı 100 olan harmonic drive ünitesi seçilmiştir.
- Ortalama moment hesabı ; (6.10) numaralı formülden yararlanılarak hesaplanır. Fakat öncelikle, bu mafsal için geçerli olan maksimum moment değerini bulmamız gerekmektedir. Bunun içinde maksimum uzaklık, en yüksek hız ve ivme değerini kullanarak, Lagrange denklemi (6.9) vasıtasıyla çözüme ulaşılır.



Şekil 6.4 Bileğe monte edilmiş aparatın ve 6. eksenin ağırlık merkezi kabulü

Şekil 6.4’de gösterilen G ağırlığı, robotun ucundaki aparatın ve 6. eksen parçalarının ağırlık merkezidir. Burada, mafsal momenti hesabında kullanılacak olan ölçü, “385mm” ve “211mm” nin hipotenüsü olan “439mm” ölçüsüdür. Ağırlık merkezinin harmonic drive’dan kaçıklığını, yani “439mm” yataklama hesabına dahil edilecektir.

5. eksen hızı  $\omega = 170^\circ/\text{s}$  (2,97 r/s, 28,4 d/d) ve de bu hıza ulaşması için gereken süre  $t = 0,2$  s kabul edilmiştir. Dolayısıyla da 5. eksen ivmesi  $\alpha = 14,84$  r/s<sup>2</sup> olarak bulunur. Maximum

moment için  $\theta = 0^\circ$  alınmıştır.

439 mm'lik kaçıklığa Lagrange denklemini (6.9) uygularsak,

$$G = M = 191,7 \text{ kg}$$

$$\theta_0 = M.L^2.\ddot{\theta} + L.M.g.\cos\theta$$

$$\theta_0 = 191,7.0,439^2.14,84 + 0,439.191,7.9,81.1$$

$$\theta_0 = 1373 \text{ N.m}$$

Bu mafsal için gereken maximum moment 1373 N.m olarak bulunmuştur ve bu moment 0,2 s için uygulanmaktadır. Bunun nedeni, mafsal istenilen hıza çıktıktan sonra dinamik moment etkisi ortadan kalkacak, sabit hızda sadece statik moment etki edecektir. Statik moment ise açının artmasıyla azalacaktır.

Harmonic drive için, ortalama moment hesabında kullanılmak üzere değişik zamanlarda uygulanacak torkun ve devrin bulunması gerekmektedir. Sistemin hareketi lineer bir hareket olmadığı için hiçbir zaman belli bir süre zarfında sabit moment ihtiyacı olmamaktadır. Bu durumda belli yaklaşımlarla, belli anlardaki moment ve devir değerleriyle hesaplama yapılacaktır.

1. durum, maximum moment ihtiyacı olduğu an,

$$M_1 = 1373 \text{ N.m}, \quad n_1 = 15 \text{ d/d} \text{ (0'dan 28,4 d/d'ya çıktığı için ortalama alınmıştır)}, \quad t_1 = 0,2 \text{ s}$$

2. durum, şekil 6.4'de olduğu gibi, moment için uygulama mesafesi "385mm" iken,

$$M_2 = 1145 \text{ N.m}, \quad n_2 = 15 \text{ d/d}, \quad t_2 = 0,2 \text{ s}$$

3. durum, statik maximum moment, sabit hızda hareket halindeyken,

$$M_3 = 825 \text{ N.m}, \quad n_3 = 5 \text{ d/d}, \quad t_3 = 2 \text{ s}$$

4. durum, sadece dinamik moment var

$$M_4 = 548 \text{ N.m}, \quad n_4 = 15 \text{ d/d}, \quad t_4 = 0,2 \text{ s}$$

Bulunan değerleri, ortalama moment denkleminde (6.10) yerine koyarsak,

$M_{av} = 989 \text{ N.m}$  olarak bulunmaktadır. Ön seçimini yapmış olduğumuz harmonicdrive'ın ortalama moment değeri,

$M_A = 1060 \text{ N.m}$ 'dir.

Dolayısıyla ,

$M_{av} < M_A$  sağlanmış olur.

- Ortalama çıkış devri kontrolü ; Burada, değişik anlardaki devirlerin ortalaması bulunarak, önseçimi yapılmış olan harmonic drive ile kıyaslanır. Ortalama çıkış devri formülü katalogdan alınmıştır.

6.11 numaralı formülden,

$n_{out\ av} = 7,3 \text{ d/d}$  bulunur.

Bulunan devir sayısı harmonic drive'ın çıkış devir sayısıdır. Bu devir sayısını çevrim oranı ile çarparsak ortalama giriş devir sayısını buluruz.

$n_{in\ av} = i \cdot n_{out\ av} = 730 \text{ d/d}$  bulunur. Ön seçimini yapmış olduğumuz harmonic drive için ortalama giriş devir değeri ,

$n_{av} = 2700 \text{ d/d}$  (yağlı kullanım için) olduğundan, çalışma devri emniyetlidir.

- Maksimum giriş devri kontrolü, kullanım esnasındaki en yüksek devrin kontrolüdür.

Maksimum çıkış devri =  $28,4 \text{ d/d}$ ,

$n_{in\ max} = n_{out\ max} \cdot i = 2840 \text{ d/d}$  bulunur.

Katalogda izin verilen maksimum giriş devri ise  $4000 \text{ d/d}$  (yağlı kullanım için) olduğundan, sistem emniyetlidir.

- Tekrarlanabilir maksimum moment kontrolü, ivmeli hareketler esnasında oluşan maksimum moment değeridir.

Bizim ihtiyacımız olan maximum tekrarlanabilir moment değeri,

$M_{max\ tek} = 1373 \text{ N.m}$

Harmonic drive'ın izin verdiği maksimum tekrarlanabilir moment değeri,

$M_R = 1590 \text{ N.m}$  olduğundan sistem emniyetlidir.

- Maksimum moment kontrolü, sistemin acil duruşlar (çarpma, elektrik kesintisi v.s) sonucu oluşturduğu moment değeridir. Hesaplayabilmek için, ani duruşlarda oluşacak ivme kabulü yapmak gerekmektedir.

Ani duruşlar için geçen süreyi  $t=0,1$  s olarak kabul edersek, mafsalın maksimum hızını en başta  $170^\circ/s$  olarak kabul ettiğimize göre, duruş esnasında oluşan açısal ivme,

$\alpha = 29,7 \text{ r/s}^2$  bulunur. İvme değerini de Lagrange denkleminde (6.9) yerine koyarsak,

$M_{\max} = 1922 \text{ N.m}$  bulunur.

Harmonic drive'in izin verdiği maksimum moment değeri,

$M_M = 3180 \text{ N.m}$  olduğundan sistem emniyetlidir.

- İzin verilebilir maksimum moment sayısı, sistemde olabilecek acil durmaların sisteme zarar vermeden tekrarlanabileceği maksimum sayıdır.

6.12 numaralı formüle göre,

Acil Duruş Süresi ( $t_k$ ) =  $0,1 \text{ s}$  ,

Acil Duruş Öncesi Devir ( $n_k$ ) =  $28,4 \text{ d/d}$  ,

Acil Duruş Sayısı ( $N_{k \text{ maz}}$ ) =  $1056$  bulunur.

- Wave Generator için ömür kontrolü, Harmonic drive'da giriş elemanı olan wave generator'un içindeki rulmanın ömür hesabıdır. Formül katalogda mevcuttur.

Harmonic drive kataloğundan  $L_n = 35000 \text{ h}$

Bizim beklediğimiz ömür  $30000 \text{ h}$

6.13 numaralı denklemden

$L_{50} = 33375 \text{ h}$  bulunur. Ve

$L_{50} = 33375 \text{ h} > 30000 \text{ h}$  olduğundan sistem emniyetlidir.

- Harmonic Drive mekanizmasının çıkış yatağının kontrolü: Harmonic drive, bu üründe çıkış yatağında "Çapraz makaralı rulman" kullanmıştır ve bu rulmana ait hesaplamaları kendi kataloğunda belirtmiştir. 5. eksen mafsalına gelen kuvvetleri harmonic drive tek başına karşılamamaktadır. 5. eksen için, sadece radyal kuvvetleri alacak, yardımcı bir "i bileziksiz makaralı rulman" kullanılmıştır. Dolayısıyla harmonic drive'in kendi yatağı moment etkisinde kalmayıp, radyal olarak yükün yarısını, aksenal olarak ise tamamını taşımaktadır. Sistemin ağırlığının aksenal olarak geldiğini ve santrifüj kuvvetinin de radyal olarak geldiğini düşünürsek

6.14 numaralı formülden,

$$L_r = 0 \text{ mm}$$

$$L_a = 0 \text{ mm}$$

$$F_a = m \cdot g = 191,7 \cdot 9,81 = 1880,5 \text{ N}$$

$$F_r = m \cdot \omega^2 \cdot r = 191,7 \cdot 2,97^2 \cdot 0,439 = 742 \text{ N}$$

$R = 0,029 \text{ m}$  (Harmonicdrive, engineering data kataloğundan CPU-58A-100-S için bulunan değer)

Değerleri 6.14 nolu denklemde yerlerine koyarsak,

$$M = 21,5 \text{ N} \text{ olarak bulunur.}$$

6.15 numaralı denklemi uygulayabilmemiz için “x” ve “y” değerlerini bulmamız gerekmektedir. Bu değerleri ise 6.16 numaralı formülden bulabiliriz.

6.16 numaralı denklemi uygularsak

$d_p = 0,192$  (Harmonicdrive, engineering data kataloğundan CPU-45A-80-S için bulunan değer)

6.14 denkleminde bulunan “1,95” değeri katalogta yerine konarak “ $x=0,67$ ”, “ $y=0,67$ ” sonucunu verir. Değerleri 6.15 numaralı denklemde yerine koyarsak,

$$P_c = 1907 \text{ Bulunur.}$$

Bulunan tüm değerler, aşağıdaki denklemde (6.17) yerine koyulduğunda, çıkış yatağının ömrü bulunmuş olur.

$B = 10/3$  (Harmonic drive, engineering data kataloğunda, seçimini yaptığımız harmonic drive’in çıkış yatağında kullanılan rulmanın makaralı olmasından ötürü gelen katsayı)

$C = 87400 \text{ N}$  (Harmonic drive, unit kataloğunda, CPU-45A-80-S için, çıkış yatağındaki rulmanın dinamik yük katsayısı)

$f_w = 3$  (Harmonic drive, engineering data kataloğunda, yükleme durumuna ait katsayı. En zor çalışma koşulları için ani yükleme, titreşim v.s. seçildi)

değerleri formülde yerine koyarsak çıkış yatağının çalışma ömrünü saat cinsinden bulabiliriz,

$$L_{10} = 20079768 \text{ saat olarak bulunur.}$$

### 6.2.2.2 5. Eksen Güç Akışı ve Motor Gücü Hesabı

Uç noktada (Harmonic drive çıkışı) gerekli olan,

Harmonic Drive Girişi

$$M = 14,46 \text{ Nm}$$

$$n = 1420 \text{ d/d}$$

$$P = 2,15 \text{ kW}$$

$$i = 100$$

$$\eta = \%95$$

Harmonic Drive Çıkışı

$$M = 1373 \text{ Nm}$$

$$N = 14,2 \text{ d/d}$$

$$P = 2,04 \text{ kW}$$

Kayış-Kasnak Girişi

$$M = 14,93 \text{ Nm}$$

$$n = 1420 \text{ d/d}$$

$$P = 2,22 \text{ kW}$$

$$i = 1$$

$$\eta = \%97$$

Kayış-Kasnak Çıkışı (Harmonic Drive Girişi)

$$M = 14,48 \text{ Nm}$$

$$n = 1420 \text{ d/d}$$

$$P = 2,15 \text{ kW}$$

Dişli Grubu Girişi

$$M = 6,05 \text{ Nm}$$

$$n = 3614 \text{ d/d}$$

$$P = 2,29 \text{ kW}$$

$$i = 2,5454$$

$$\eta = \%97$$

Dişli Grubu Çıkışı

$$M = 14,93 \text{ Nm}$$

$$n = 1420 \text{ d/d}$$

$$P = 2,22 \text{ kW}$$



- 0 d/d'dan 2840 d/d'ya hızlanacak olan elemanların toplam atalet momentleri,

Toplam Atalet Momenti  $I = 575536 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^2$

$$\alpha = \frac{\frac{\pi \cdot n_1}{30} - \frac{\pi \cdot n_0}{30}}{0,2} = \frac{\frac{\pi \cdot 2840}{30} - \frac{\pi \cdot 0}{30}}{0,2} = 1486,27 \text{ r/s}^2$$

$M = I \cdot \alpha = 0,8554 \text{ N.m}$  gerekli olan moment bulunur.

$$P = \frac{M \cdot n}{9550} = \frac{0,8554 \cdot 1420}{9550} = 0,1272 \text{ kW}$$
 Bulunur.

- 0 d/d'dan 3614 d/d'ya hızlanacak olan elemanların toplam atalet momentleri,

Toplam Atalet Momenti  $I = 2592130 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^2$

$$\alpha = \frac{\frac{\pi \cdot n_1}{30} - \frac{\pi \cdot n_0}{30}}{0,2} = \frac{\frac{\pi \cdot 3614}{30} - \frac{\pi \cdot 0}{30}}{0,2} = 1891,327 \text{ r/s}^2$$

$M = 4,9 \text{ N.m}$

$P = 0,928 \text{ kW}$  Bulunur.

Dolayısıyla motor gücü,

$P_{\text{motor}} = 2,29 + 0,1272 + 0,928 = 3,345 \text{ kW}$  bulunur.

### 6.2.2.3 5. Eksen 1. Kayış-Kasnak Grubu Bilgileri

Seçilen Dişli Kayış	Synchronous Belts Gates PowerGrip GT
Standart Kayış Numarası	8M-20
Kayışdaki dişli adedi	87
Kayış Adımı ( p )	8 mm
Kayış Genişliği ( b )	20 mm
Kasnak Dişli Sayısı ( z )	24
Çevrim Oranı ( i )	1

Ortaklama Kasnak Çapı ( $d_w$ )	61,12 mm
Toplam Germe Kuvveti ( $F_t$ )	491,18 N
Çevre Hızı ( $V$ )	4,544 m/s
Hesaplanan Güç ( $P_{hes}$ )	3,996 kW
Aktarılabilecek Güç ( $P_1$ )	4,963 kW

#### 6.2.2.4 5 .Eksen Dişli Çark Bilgileri

Çevrim Oranı (  $i$  ) = 2,5455

Kavrama Açısı (  $\alpha_o$  ) = 20°

Helis Açısı (  $\beta$  ) = 20°

Şaft Açısı (  $\Sigma$  ) = 90°

Modül (  $m$  ) = 3 mm

Diş Genişliği (  $B$  ) = 18 mm

	1. Dişli	2. Dişli
Diş Sayısı ( $z$ )	11	28
Helis Yönü	Sağ	Sol
Yuvarlanma Çapı ( $d$ )	33 mm	84 mm
Koni Tepe Açısı ( $\varphi$ )	68,5523°	21,4477°
Teğetsel Kuvvet ( $F_t$ )		458,1 N
Normal Kuvvet ( $F_n$ )		518,8 N
Radyal Kuvvet ( $F_r$ ) 1.Yön	100,3 N	230 N
Radyal Kuvvet ( $F_r$ ) 2. Yön	230 N	-100,3 N
Eksenel Kuvvet ( $F_a$ ) 1. Yön	230 N	100,3 N
Eksenel Kuvvet ( $F_a$ ) 2. Yön	-100,3 N	230 N

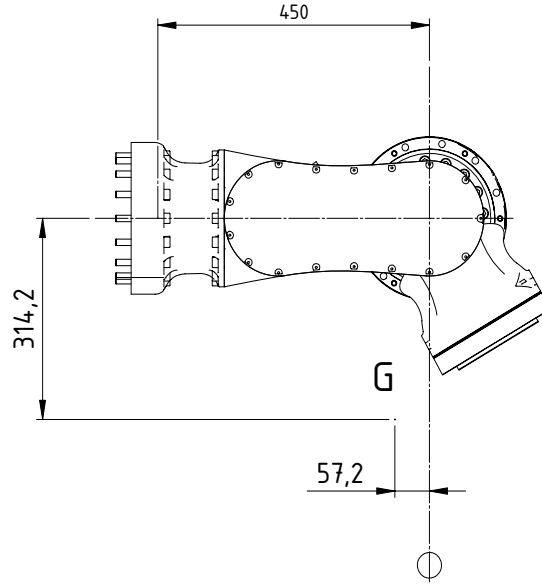
Çevresel Hız ( V )	4,999 m/s	
Malzeme	37Cr4	37Cr4
Malzeme	37Cr4	37Cr4
Yüzey Sertleştirme	Var	Var
Kopma Mukavemeti ( $R_m$ )	785 N/mm <sup>2</sup>	785 N/mm <sup>2</sup>
Akma Mukavemeti ( $R_e$ )	539 N/mm <sup>2</sup>	539 N/mm <sup>2</sup>
Emniyet Katsayısı ( $S_{Yüzey Aşınması}$ )	2,713	2,892
Emniyet Katsayısı ( $S_{Diş Kırılması}$ )	4,74	9,08

Dişli çark mukavemet hesapları ISO 6336:1996'ya göre MECHSOFT programı ile yapılmıştır. Dişli çark mukavemet hesapları ISO 6336:1996'ya göre MECHSOFT programı ile yapılmıştır.

### 6.2.3 4. Eksen Parçalarının Hesaplanması

#### 6.2.3.1 4. Eksen Harmonic Drive Hesabı

- Ön seçim yapılması ; Ön seçim olarak, kendinden yataklı, **SGH-65A-80-2UHY** model çevrim oranı 80 olan harmonic drive ünitesi seçilmiştir.
- Ortalama moment hesabı ; (6.10) numaralı formülden yararlanılarak hesaplanır. Fakat öncelikle, bu mafsal için geçerli olan maksimum moment değerini bulmamız gerekmektedir. Bunun içinde maksimum uzaklık, en yüksek hız ve ivme değerini kullanarak, Lagrange denklemi (6.9) vasıtasıyla çözüme ulaşılır.



Şekil 6.5 Bileğe monte edilmiş aparatın ve diğer parçaların ağırlık merkezi kabulü

Şekil 6.5’de gösterilen G ağırlığı, robotun ucundaki aparatın ve diğer parçaların ağırlık merkezidir. Burada, mafsal momenti hesabında kullanılacak olan ölçü, “314,2mm” ölçüsüdür. Ağırlık merkezinin dönme eksenine en uzak olduğu an şekil 6.5’ deki gibidir. Ağırlık merkezinin harmonic drive’ dan kaçıklığını, yani “314,2mm” yataklama hesabına dahil edilecektir.

4. eksen hızı  $\omega = 170^\circ/\text{s}$  (2,97 r/s, 28,4 d/d) ve de bu hıza ulaşması için gereken süre  $t = 0,2$  s kabul edilmiştir. Dolayısıyla da 5. eksen ivmesi  $\alpha = 14,84$  r/s<sup>2</sup> olarak bulunur. Maximum moment için  $\theta = 0^\circ$  alınmıştır.

314,2 mm’lik kaçıklığa Lagrange denklemini (6.9) uygularsak,

$$G = M = 267,7 \text{ kg}$$

$$\theta_0 = M.L^2.\ddot{\theta} + L.M.g.\cos\theta$$

$$\theta_0 = 267,7.0,3142^2.14,84 + 0,3142.267,7.9,81.1$$

$$\theta_0 = 1217 \text{ N.m}$$

Bu mafsal için gereken maximum moment 1217 N.m olarak bulunmuştur ve bu moment 0,2 s için uygulanmaktadır. Bunun nedeni, mafsal istenilen hıza çıktıktan sonra dinamik moment etkisi ortadan kalkacak, sabit hızda sadece statik moment etki edecektir. Statik moment ise

açının artmasıyla azalacaktır.

Harmonic drive için, ortalama moment hesabında kullanılmak üzere değişik zamanlarda uygulanacak torkun ve devrin bulunması gerekmektedir. Sistemin hareketi lineer bir hareket olmadığı için hiçbir zaman belli bir süre zarfında sabit moment ihtiyacı olmamaktadır. Bu durumda belli yaklaşımlarla, belli anlardaki moment ve devir değerleriyle hesaplama yapılacaktır.

1. durum, maximum moment ihtiyacı olduğu an,

$$M_1 = 1217 \text{ N.m}, \quad n_1 = 14,2 \text{ d/d} \text{ (0'dan 28,4 d/d'ya çıktığı için ortalama alınmıştır)}, \quad t_1 = 0,2 \text{ s}$$

2. durum, sadece dinamik moment, moment için uygulama mesafesi “275,7mm” ,

$$M_2 = 392 \text{ N.m}, \quad n_2 = 14,2 \text{ d/d}, \quad t_2 = 0,2 \text{ s}$$

3. durum, statik maximum moment, sabit hızda hareket halindeyken,

$$M_3 = 825 \text{ N.m}, \quad n_3 = 5 \text{ d/d}, \quad t_3 = 2 \text{ s}$$

4. durum, 5. eksen “0°” iken, maksimum hıza maksimum ivmeyle çıkarken, kaçıklık “151,3mm”

$$M_4 = 487 \text{ N.m}, \quad n_4 = 14,2 \text{ d/d}, \quad t_4 = 0,2 \text{ s}$$

Bulunan değerleri, ortalama moment denkleminde (6.10) yerine koyarsak,

$M_{av} = 846,5 \text{ N.m}$  olarak bulunmaktadır. Ön seçimini yapmış olduğumuz harmonicdrive’ın ortalama moment değeri,

$$M_A = 1352 \text{ N.m'dir.}$$

Dolayısıyla ,

$$M_{av} < M_A \text{ sağlanmış olur.}$$

- Ortalama çıkış devri kontrolü ; Burada, değişik anlardaki devirlerin ortalaması bulunarak, önseçimi yapılmış olan harmonic drive ile kıyaslanır. Ortalama çıkış devri formülü katalogdan alınmıştır.

6.11 numaralı formülden,

$$n_{out \text{ av}} = 7,1 \text{ d/d bulunur.}$$

Bulunan devir sayısı harmonic drive’ın çıkış devir sayısıdır. Bu devir sayısını çevrim oranı ile

çarparsak ortalama giriş devir sayısını buluruz.

$n_{in\ av} = i \cdot n_{out\ av} = 568\ d/d$  bulunur. Ön seçimini yapmış olduğumuz harmonic drive için ortalama giriş devir değeri ,

$n_{av} = 800\ d/d$  (gresli kullanım için) olduğundan, çalışma devri emniyetlidir.

- Maksimum giriş devri kontrolü, kullanım esnasındaki en yüksek devrin kontrolüdür.

Maksimum çıkış devri = 28,4 d/d,

$n_{in\ max} = n_{out\ max} \cdot i = 2272\ d/d$  bulunur.

Katalogda izin verilen maksimum giriş devri ise 2800 d/d (gresli kullanım için) olduğundan, sistem emniyetlidir.

- Tekrarlanabilir maksimum moment kontrolü, ivmeli hareketler esnasında oluşan maksimum moment değeridir.

Bizim ihtiyacımız olan maximum tekrarlanabilir moment değeri,

$M_{max\ tek} = 1217\ N.m$

Harmonic drive'in izin verdiği maksimum tekrarlanabilir moment değeri,

$M_R = 2743\ N.m$  olduğundan sistem emniyetlidir.

- Maksimum moment kontrolü, sistemin acil duruşlar (çarpma, elektrik kesintisi v.s) sonucu oluşturduğu moment değeridir. Hesaplayabilmek için, ani duruşlarda oluşacak ivme kabulü yapmak gerekmektedir.

Ani duruşlar için geçen süreyi  $t=0,1\ s$  olarak kabul edersek, mafsalın maksimum hızını en başta 170°/s olarak kabul ettiğimize göre, duruş esnasında oluşan açısal ivme,

$\alpha = 29,7\ r/s^2$  bulunur. İvme değerini de Lagrange denkleminde (6.9) yerine koyarsak,

$M_{max} = 1610\ N.m$  bulunur.

Harmonic drive'in izin verdiği maksimum moment değeri,

$M_M = 3180\ N.m$  olduğundan sistem emniyetlidir.

- İzin verilebilir maksimum moment sayısı, sistemde olabilecek acil durmaların sisteme zarar vermeden tekrarlanabileceği maksimum sayıdır.

6.12 numaralı formüle göre,

Acil Duruş Süresi (  $t_k$  ) = 0,1 s ,

Acil Duruş Öncesi Devir (  $n_k$  ) = 28,4 d/d acil duruş öncesi devir,

Acil Duruş Sayısı (  $N_{k\ maz}$  ) = 1056 bulunur.

- Wave Generator için ömür kontrolü, Harmonic drive’da giriş elemanı olan wave generator’un içindeki rulmanın ömür hesabıdır. Formül katalogda mevcuttur.

Harmonic drive kataloğundan  $L_n = 35000$  h

Bizim beklediğimiz ömür 30000 h

6.13 numaralı denklemden

$L_{50} = 77133$  h bulunur. Ve

$L_{50} = 77133$  h  $>$  30000 h olduğundan sistem emniyetlidir.

- Harmonic Drive mekanizmasının çıkış yatağının kontrolü: Harmonic drive, bu üründe çıkış yatağında “Çapraz makaralı rulman” kullanmıştır ve bu rulmana ait hesaplamaları kendi kataloğunda belirtmiştir. 5. eksen mafsalına gelen kuvvetleri harmonic drive tek başına karşılamamaktadır. 5. eksen için, sadece radyal kuvvetleri alacak, yardımcı bir “iç bileziksiz makaralı rulman” kullanılmıştır. Dolayısıyla harmonic drive’ın kendi yatağı moment etkisinde kalmayıp, radyal olarak yükün yarısını, aksel olarak ise tamamını taşımaktadır. Sistemin ağırlığının aksel olarak geldiğini ve santrifüj kuvvetinin de radyal olarak geldiğini düşünürsek

6.14 numaralı formülden,

$$L_r = 392,8 \text{ mm}$$

$$L_a = 314,2 \text{ mm}$$

$$F_a = m \cdot g = 267,7 \cdot 9,81 = 2626 \text{ N}$$

$$F_r = m \cdot \omega^2 \cdot r = 267,7 \cdot 2,97^2 \cdot 0,3142 = 742 \text{ N}$$

$R = 0,072$  m (Harmonicdrive, engineering data kataloğundan SGH-65A-80-2UHY için bulunan değer)

Değerleri 6.14 nolu denklemde yerlerine koyarsak,

$M = 1453,7$  N olarak bulunur.

6.15 numaralı denklemi uygulayabilmemiz için “x” ve “y” değerlerini bulmamız gerekmektedir. Bu değerleri ise 6.16 numaralı formülden bulabiliriz.

6.16 numaralı denklemi uygularsak

$d_p = 0,218$  (Harmonicdrive, engineering data kataloğundan SGH-65A-80-2UHY için bulunan değer)

6.14 denkleminde bulununan “0,0464” değeri katalogda yerine konarak “x=1” , “y=0,45” sonucunu verir. Değerleri 6.15 numaralı denklemde yerine koyarsak,

$P_c = 16296,6$  Bulunur.

Bulunan tüm değerler, aşağıdaki denklemde (6.17) yerine koyulduğunda, çıkış yatağının ömrü bulunmuş olur.

$B = 10/3$  (Harmonic drive, engineering data kataloğunda, seçimini yaptığımız harmonic drive’ın çıkış yatağında kullanılan rulmanın makaralı olmasından ötürü gelen katsayı)

$C = 223000$  N (Harmonic drive, unit kataloğunda, SGH-65A-80-2UHY için, çıkış yatağındaki rulmanın dinamik yük katsayısı)

$f_w = 3$  (Harmonic drive, engineering data kataloğunda, yükleme durumuna ait katsayı. En zor çalışma koşulları için ani yükleme, titreşim v.s. seçildi)

değerleri formülde yerine koyarsak çıkış yatağının çalışma ömrünü saat cinsinden bulabiliriz,

$L_{10} = 359319$  saat olarak bulunur.

#### 6.2.3.2 4. Eksen Güç Akışı ve Motor Gücü Hesabı

Uç noktada (Harmonic drive çıkışı) gerekli olan,

Harmonic Drive Girişi

$$M = 15,97 \text{ Nm}$$

$$n = 1136 \text{ d/d}$$

$$P = 1,9 \text{ kW}$$

$$i = 80$$

$$\eta = \%95$$

Harmonic Drive Çıkışı

$$M = 1217 \text{ Nm}$$

$$n = 14,2 \text{ d/d}$$

$$P = 1,8 \text{ kW}$$



## Kayış Kasnak Girişi

$$\begin{aligned}
 M &= 16,51 \text{ Nm} \\
 n &= 1136 \text{ d/d} \\
 P &= 1,96 \text{ kW} \\
 i &= 1 \\
 \eta &= \%97
 \end{aligned}$$

## Kayış-Kasnak Çıkışı (Harmonic Drive Girişi)

$$\begin{aligned}
 M &= 15,97 \text{ Nm} \\
 n &= 1136 \text{ d/d} \\
 P &= 1,9 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

- 0 d/d'dan 2272 d/d'ya hızlanacak olan elemanların toplam atalet momentleri,

Toplam Atalet Momenti  $I = 9494532 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^2$

$$\alpha = \frac{\frac{\pi \cdot n_1}{30} - \frac{\pi \cdot n_0}{30}}{0,2} = \frac{\frac{\pi \cdot 2272}{30} - \frac{\pi \cdot 0}{30}}{0,2} = 1189 \text{ r/s}^2$$

$M = I \cdot \alpha = 11,289 \text{ N.m}$  gerekli olan moment bulunur.

$$P = \frac{M \cdot n}{9550} = \frac{11,289 \cdot 1136}{9550} = 1,343 \text{ kW} \text{ Bulunur.}$$

Dolayısıyla motor gücü,

$$P_{\text{motor}} = 1,96 + 1,343 = \mathbf{3,303 \text{ kW}} \text{ bulunur.}$$

#### 6.2.3.3 4. Eksen Kayış-Kasnak Grubu Hesabı

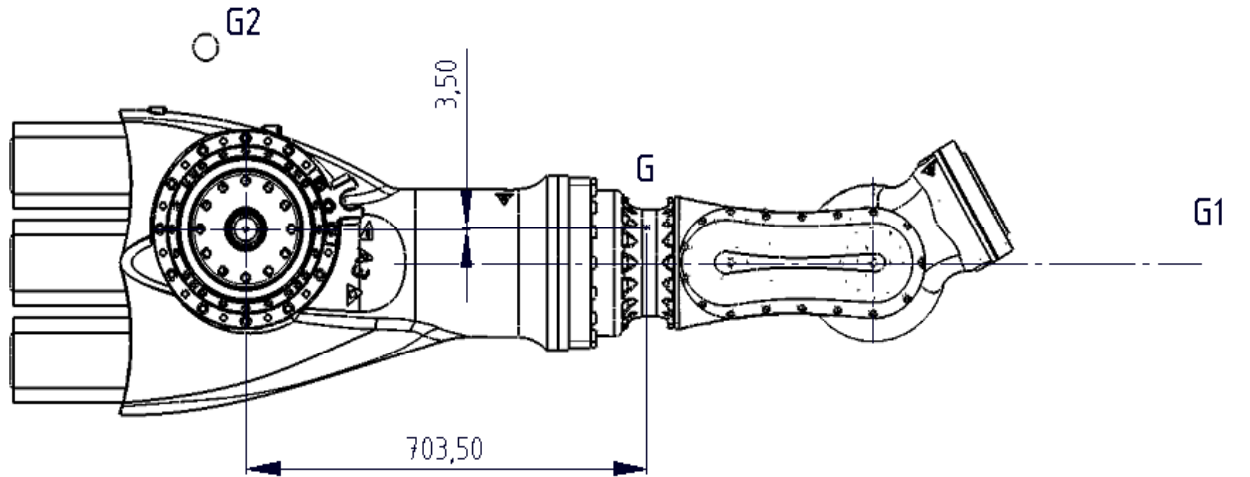
Seçilen Dişli Kayış	Synchronous Belts Gates PowerGrip GT
Standart Kayış Numarası	8M-20
Kayışdaki dişli adedi	78
Kayış Adımı ( p )	8 mm
Kayış Genişliği ( b )	20 mm
Kasnak Dişli Sayısı ( z )	38

Çevrim Oranı ( $i$ )	1
Ortalama Kasnak Çapı ( $d_w$ )	96,77 mm
Toplama Germe Kuvveti ( $F_t$ )	578,1 N
Çevre Hızı ( $V$ )	5,756 m/s
Hesaplanan Güç ( $P_{hes}$ )	5,945 kW
Aktarılabilecek Güç ( $P_1$ )	6,752 kW

### 6.2.4 3. Eksen Parçalarının Hesaplanması

#### 6.2.4.1 3. Eksen Harmonic Drive Hesabı

- Ön seçim yapılması ; Ön seçim olarak, kendinden yataklı, **HFUC-90-120-2UH** model çevrim oranı 120 olan harmonic drive component seti seçilmiştir.
- Ortalama moment hesabı ; (6.10) numaralı formülden yararlanılarak hesaplanır. Fakat öncelikle, bu mafsal için geçerli olan maksimum moment değerini bulmamız gerekmektedir. Bunun içinde maksimum uzaklık, en yüksek hız ve ivme değerini kullanarak, Lagrange denklemi (6.9) vasıtasıyla çözüme ulaşılır.



Şekil 6.6 3.Eksen ağırlık merkezi kabülü.

Şekil 6.6’de gösterilen G ağırlığı, 3.ekseden sonraki kısımların ağırlık merkezidir. Burada, mafsal momenti hesabında kullanılacak olan ölçü, “703,5” ve “3,5” ölçülerinin hipotenüsü olan ölçüdür. Ağırlık merkezinin dönme eksenine en uzak olduğu an şekil 6.5’ deki gibidir. Belirtilen ölçülerin hipotenüsü “703,5mm” bulunduğu için, bu ölçü kullanılacaktır.

3. eksen hızı  $\omega = 100^\circ/\text{s}$  (1,745 r/s, 16,7 d/d) ve de bu hıza ulaşması için gereken süre  $t = 0,3$  s kabul edilmiştir. Dolayısıyla da 3. eksen ivmesi  $\alpha = 5,82$  r/s<sup>2</sup> olarak bulunur. Maximum moment için  $\theta = 0^\circ$  alınmıştır.

703,5 mm’lik kaçıklığa Lagrange denklemini (6.9) uygularsak,

$$G = M = 539,6 \text{ kg}$$

$$\theta_0 = M.L^2.\ddot{\theta} + L.M.g.\cos\theta$$

$$\theta_0 = 539,6.0,7035^2.5,82 + 0,7035.539,6.9,81.1$$

$$\theta_0 = 5277,6 \text{ N.m}$$

Bu mafsal için gereken maximum moment 5277,6 N.m olarak bulunmuştur ve bu moment 0,3 s için uygulanmaktadır. Bunun nedeni, mafsal istenilen hıza çıktıktan sonra dinamik moment etkisi ortadan kalkacak, sabit hızda sadece statik moment etki edecektir. Statik moment ise açının artmasıyla azalacaktır.

Harmonic drive için, ortalama moment hesabında kullanılmak üzere değişik zamanlarda uygulanacak torkun ve devrin bulunması gerekmektedir. Sistemin hareketi lineer bir hareket olmadığı için hiçbir zaman belli bir süre zarfında sabit moment ihtiyacı olmamaktadır. Bu durumda belli yaklaşımlarla, belli anlardaki moment ve devir değerleriyle hesaplama yapılacaktır.

1. durum, maximum moment ihtiyacı olduğu an,

$$M_1 = 5277,6 \text{ N.m}, \quad n_1 = 8,35 \text{ d/d} \text{ (0'dan 16,7d/d'ya çıktığı için ortalama alınmıştır)}, \quad t_1 = 0,3 \text{ s}$$

2. durum, sadece dinamik moment, moment için uygulama mesafesi

$$M_2 = 1553,6 \text{ N.m}, \quad n_2 = 8,35 \text{ d/d}, \quad t_2 = 0,3 \text{ s}$$

3. durum, statik maximum moment, sabit hızda hareket halindeyken,

$$M_3 = 3724 \text{ N.m}, \quad n_3 = 5 \text{ d/d}, \quad t_3 = 3 \text{ s}$$

Bulunan değerleri, ortalama moment denkleminde (6.10) yerine koyarsak,

$M_{av} = 3914 \text{ N.m}$  olarak bulunmaktadır. Ön seçimini yapmış olduğumuz harmonicdrive'ın ortalama moment değeri,

$M_A = 4300 \text{ N.m}$ 'dir.

Dolayısıyla ,

$M_{av} < M_A$  sağlanmış olur.

- Ortalama çıkış devri kontrolü ; Burada, değişik anlardaki devirlerin ortalaması bulunarak, önseçimi yapılmış olan harmonic drive ile kıyaslanır. Ortalama çıkış devri formülü katalogdan alınmıştır.

6.11 numaralı formülden,

$n_{out\ av} = 5,5 \text{ d/d}$  bulunur.

Bulunan devir sayısı harmonic drive'ın çıkış devir sayısıdır. Bu devir sayısını çevrim oranı ile çarparsak ortalama giriş devir sayısını buluruz.

$n_{in\ av} = i \cdot n_{out\ av} = 600 \text{ d/d}$  bulunur. Ön seçimini yapmış olduğumuz harmonic drive için ortalama giriş devir değeri ,

$n_{av} = 1300 \text{ d/d}$  (gresli kullanım için) olduğundan, çalışma devri emniyetlidir.

- Maksimum giriş devri kontrolü, kullanım esnasındaki en yüksek devrin kontrolüdür.

Maksimum çıkış devri =  $16,7 \text{ d/d}$ ,

$n_{in\ max} = n_{out\ max} \cdot i = 2004 \text{ d/d}$  bulunur.

Katalogda izin verilen maksimum giriş devri ise  $2000 \text{ d/d}$  (gresli kullanım için) olduğundan, sistem emniyetli olarak kabul edilir (  $4 \text{ d/d}$  fark küçük olduğu için gözardı edilebilir).

- Tekrarlanabilir maksimum moment kontrolü, ivmeli hareketler esnasında oluşan maksimum moment değeridir.

Bizim ihtiyacımız olan maximum tekrarlanabilir moment değeri,

$M_{max\ tek} = 5277,6 \text{ N.m}$

Harmonic drive'ın izin verdiği maksimum tekrarlanabilir moment değeri,

$M_R = 6160 \text{ N.m}$  olduğundan sistem emniyetlidir.

- Maksimum moment kontrolü, sistemin acil duruşlar (çarpma, elektrik kesintisi v.s) sonucu oluşturduğu moment değeridir. Hesaplayabilmek için, ani duruşlarda oluşacak ivme kabulü yapmak gerekmektedir.

Ani duruşlar için geçen süreyi  $t=0,1$  s olarak kabul edersek, mafsalın maksimum hızını en başta  $100^\circ/s$  olarak kabul ettiğimize göre, duruş esnasında oluşan açısal ivme,

$\alpha = 17,45 \text{ r/s}^2$  bulunur. İvme değerini de Lagrange denkleminde (6.9) yerine koyarsak,

$M_{\max} = 8385 \text{ N.m}$  bulunur.

Harmonic drive'in izin verdiği maksimum moment değeri,

$M_M = 9800 \text{ N.m}$  olduğundan sistem emniyetlidir.

- İzin verilebilir maksimum moment sayısı, sistemde olabilecek acil durmaların sisteme zarar vermeden tekrarlanabileceği maksimum sayıdır.

6.12 numaralı formüle göre,

Acil Duruş Süresi ( $t_k$ ) =  $0,1 \text{ s}$  ,

Acil Duruş Öncesi Devir ( $n_k$ ) =  $16,7 \text{ d/d}$  ,

Acil Duruş Sayısı ( $N_{k \text{ maz}}$ ) =  $1497$  bulunur.

- Wave Generator için ömür kontrolü, Harmonic drive'da giriş elemanı olan wave generator'un içindeki rulmanın ömür hesabıdır. Formül katalogda mevcuttur.

Harmonic drive kataloğundan  $L_n = 35000 \text{ h}$

Bizim beklediğimiz ömür  $30000 \text{ h}$

6.13 numaralı denklemden

$L_{50} = 33028 \text{ h}$  bulunur. Ve

$L_{50} = 33028 \text{ h} > 30000 \text{ h}$  olduğundan sistem emniyetlidir.

### 6.2.4.2 3. Eksen Güç Akışı ve Motor Gücü Hesabı

Bu mafsalda hareket direk aktarıldığından, aradaki aktarma organlarının sayısının çok az olmasından dolayı, hareket için gerekli olan gücü, motor gücü olarak düşünebiliriz.

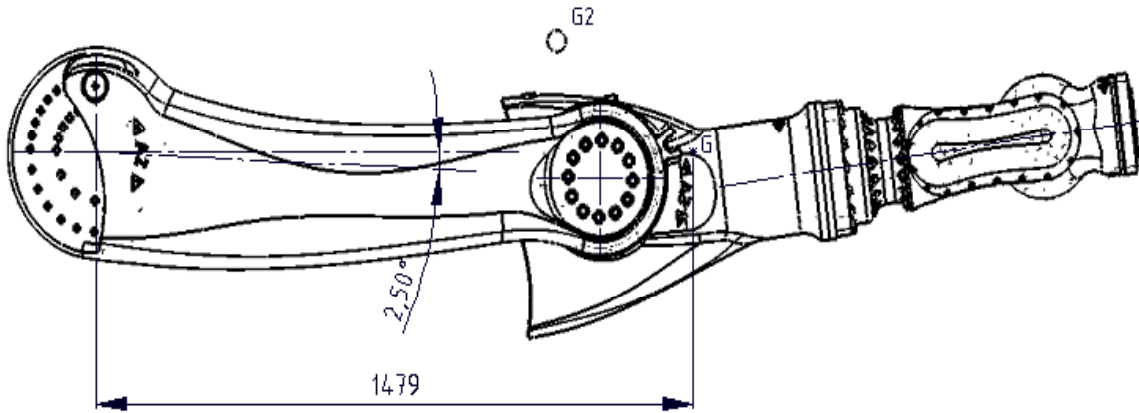
$$P = \frac{M.n}{9500} = \frac{5277,6.8,35}{9500} = 4,6 \text{ kW} \text{ Bulunur.}$$

Bu mafsala da seçilecek motorun gücü 4,6kW'dan küçük olmamalıdır.

## 6.2.5 2. Eksen Parçalarının Hesaplanması

### 6.2.5.1 2. Eksen Harmonic Drive Hesabı

- Ön seçim yapılması ; Ön seçim olarak, kendinden yataklı, **HFUC-100-160-2A-GR** model çevrim oranı 160 olan harmonic drive komponent seti seçilmiştir.
- Ortalama moment hesabı ; (6.10) numaralı formülden yararlanılarak hesaplanır. Fakat öncelikle, bu mafsal için geçerli olan maksimum moment değerini bulmamız gerekmektedir. Bunun içinde maksimum uzaklık, en yüksek hız ve ivme değerini kullanarak, Lagrange denklemi (6.9) vasıtasıyla çözüme ulaşılır.



Şekil 6.7 3.Eksen ağırlık merkezi kabülü.

Şekil 6.5'de gösterilen G ağırlığı, 2.eksenden sonraki kısımların ağırlık merkezidir. Burada, mafsal momenti hesabında kullanılacak olan ölçü, "1473" olan ölçüdür. Ağırlık merkezinin dönme eksenine en uzak olduğu an şekil 6.5' deki gibidir.

2. eksen hızı  $\omega = 100^\circ/\text{s}$  (1,745 r/s, 16,7 d/d) ve de bu hıza ulaşması için gereken süre  $t = 0,5$  s kabul edilmiştir. Dolayısıyla da 3. eksen ivmesi  $\alpha = 3,49 \text{ r/s}^2$  olarak bulunur. Maximum

moment için  $\theta = 0^\circ$  alınmıştır.

1473 mm'lik kaçıklığa Lagrange denklemini (6.9) uygularsak,

$$G = M = 791 \text{ kg}$$

$$\theta_0 = M.L^2.\ddot{\theta} + L.M.g.\cos\theta$$

$$\theta_0 = 791.1,473^2.3,49 + 1,473.791.9,81.1$$

$$\theta_0 = 17421 \text{ N.m}$$

Bu mafsal için gereken maximum moment 17421 N.m olarak bulunmuştur. Bu seviyede moment üretecek bir motor-redüktör ikilisi ebat olarak çok büyük ve ilk yatırım maliyeti olarak pahalı olacağından, bu mafsalda denge ağırlığı uygulanmıştır. Uygulanan denge ağırlığı, mekanik-yaylı denge ağırlığıdır. Robotun alt kolu öne eğildikçe, yay sıkışarak tersine bir kuvvet uygulamaktadır ve motora gelen yükü azaltmaktadır. Dolayısıyla, harmonic drive hesabı yapılırken, gereken moment ile denge ağırlığının ürettiği moment değerlerinin farkını kullanılır.

Harmonic drive için, ortalama moment hesabında kullanılmak üzere değişik zamanlarda uygulanacak torkun ve devrin bulunması gerekmektedir. Sistemin hareketi lineer bir hareket olmadığı için hiçbir zaman belli bir süre zarfında sabit moment ihtiyacı olmamaktadır. Bu durumda belli yaklaşımlarla, belli anlardaki moment ve devir değerleriyle hesaplama yapılacaktır.

1. durum, Alt kol  $-4^\circ$  öne eğik, üst kol zemine paralel,

$$M_{\text{HarmonicDrive}} = M_{\text{Gereken}} - M_{\text{Denge Ağırlığı}} = 17375 - 11143 = 6232 \text{ Nm}$$

$$M_1 = 6232 \text{ N.m}, \quad n_1 = 8,35 \text{ d/d} \text{ (} 0^\circ \text{ dan } 16,7\text{d/d'ya çıktığı için ortalama alınmıştır), } t_1 = 0,5 \text{ s}$$

2. durum, Alt kol  $2,5^\circ$  öne eğik, üst kol, alt kola paralel. Max. Moment,

$$M_{\text{HarmonicDrive}} = M_{\text{Gereken}} - M_{\text{Denge Ağırlığı}} = 17421 - 10670 = 6751 \text{ Nm}$$

$$M_2 = 6751 \text{ N.m}, \quad n_2 = 8,35 \text{ d/d}, \quad t_2 = 0,5 \text{ s}$$

3. durum, Alt kol  $15^\circ$  öne eğik, üst kol zemine paralel,

$$M_{\text{HarmonicDrive}} = M_{\text{Gereken}} - M_{\text{Denge Ağırlığı}} = 16853 - 9243 = 7610 \text{ Nm}$$

$$M_3 = 7610 \text{ N.m}, \quad n_3 = 8,35 \text{ d/d}, \quad t_3 = 0,5 \text{ s}$$

4. durum, Alt kol 45° öne eğik, üst kol zemine paralel,

$$M_{\text{HarmonicDrive}} = M_{\text{Gereken}} - M_{\text{Denge Ağırlığı}} = 13007 - 4411 = 8596 \text{ Nm}$$

$$M_4 = 8696 \text{ N.m}, \quad n_1 = 8,35 \text{ d/d}, \quad t_1 = 0,5 \text{ s}$$

5. durum, Alt kol 60° öne eğik, üst kol zemine paralel,

$$M_{\text{HarmonicDrive}} = M_{\text{Gereken}} - M_{\text{Denge Ağırlığı}} = 10176 - 2277 = 7899 \text{ Nm}$$

$$M_5 = 7899 \text{ N.m}, \quad n_3 = 8,35 \text{ d/d}, \quad t_3 = 0,5 \text{ s}$$

6. durum, Alt kol 90° dik, üst kol zemine paralel,

$$M_{\text{HarmonicDrive}} = M_{\text{Gereken}} - M_{\text{Denge Ağırlığı}} = 4283 - 294 = 3989 \text{ Nm}$$

$$M_6 = 3989 \text{ N.m}, \quad n_1 = 8,35 \text{ d/d}, \quad t_1 = 1 \text{ s}$$

7. durum, Alt kol 110° arkaya eğik, üst kol zemine paralel,

$$M_{\text{HarmonicDrive}} = M_{\text{Gereken}} - M_{\text{Denge Ağırlığı}} = 1042 - (-599) = 1641 \text{ Nm}$$

$$M_7 = 1641 \text{ N.m}, \quad n_3 = 8,35 \text{ d/d}, \quad t_3 = 1 \text{ s}$$

8. durum, Alt kol 120° arkaya eğik, üst kol zemine paralel,

$$M_{\text{HarmonicDrive}} = M_{\text{Gereken}} - M_{\text{Denge Ağırlığı}} = -236 - (-1015) = -780 \text{ Nm}$$

$$M_7 = 780 \text{ N.m}, \quad n_3 = 8,35 \text{ d/d}, \quad t_3 = 1 \text{ s} \text{ (negatif değer Harmonic drive hesabını etkilemez)}$$

9. durum, Alt kol 146° arkaya eğik, üst kol zemine paralel,

$$M_{\text{HarmonicDrive}} = M_{\text{Gereken}} - M_{\text{Denge Ağırlığı}} = -3163 - (-4099) = -936 \text{ Nm}$$

$$M_7 = 936 \text{ N.m}, \quad n_3 = 8,35 \text{ d/d}, \quad t_3 = 0,5 \text{ s} \text{ (negatif değer Harmonic drive hesabını etkilemez)}$$

10. durum, Alt kol 2,5° öne eğik, üst kol, alt kola paralel. Max. Moment,

$$M_{\text{HarmonicDrive}} = M_{\text{Gereken}} - M_{\text{Denge Ağırlığı}} = 14426 - 10670 = 3756 \text{ Nm}$$

$$M_2 = 3756 \text{ N.m}, \quad n_2 = 2,875 \text{ d/d}, \quad t_2 = 2 \text{ s} \text{ (0 r/s'den - 50 °/s'ye ivmelenme)}$$

11. durum, Alt kol 45° öne eğik, üst kol zemine paralel,

$$M_{\text{HarmonicDrive}} = M_{\text{Gereken}} - M_{\text{Denge Ağırlığı}} = 10012 - 4411 = 5601 \text{ Nm}$$



$M_4 = 5601 \text{ N.m}$ ,  $n_1 = 2,875 \text{ d/d}$ ,  $t_1 = 2 \text{ s}$  ( 0 r/s'den – 50 °/s'ye ivmelenme)

12. durum, Alt kol 90° dik, üst kol zemine paralel,

$$M_{\text{HarmonicDrive}} = M_{\text{Gereken}} - M_{\text{Denge Ağırlığı}} = 1288 - 294 = 994 \text{ Nm}$$

$M_6 = 994 \text{ N.m}$ ,  $n_1 = 2,875 \text{ d/d}$ ,  $t_1 = 2 \text{ s}$  ( 0 r/s'den – 50 °/s'ye ivmelenme)

Bulunan değerleri, ortalama moment denkleminde (6.10) yerine koyarsak,

$M_{\text{av}} = 5323 \text{ N.m}$  olarak bulunmaktadır. Ön seçimini yapmış olduğumuz harmonicdrive'ın ortalama moment değeri,

$$M_A = 5720 \text{ N.m'dir.}$$

Dolayısıyla ,

$M_{\text{av}} < M_A$  sağlanmış olur.

- Ortalama çıkış devri kontrolü ; Burada, değişik anlardaki devirlerin ortalaması bulunarak, önseçimi yapılmış olan harmonic drive ile kıyaslanır. Ortalama çıkış devri formülü katalogdan alınmıştır.

6.11 numaralı formülden,

$$n_{\text{out av}} = 7,5 \text{ d/d bulunur.}$$

Bulunan devir sayısı harmonic drive'ın çıkış devir sayısıdır. Bu devir sayısını çevrim oranı ile çarparsak ortalama giriş devir sayısını buluruz.

$n_{\text{in av}} = i \cdot n_{\text{out av}} = 1200 \text{ d/d}$  bulunur. Ön seçimini yapmış olduğumuz harmonic drive için ortalama giriş devir değeri ,

$n_{\text{av}} = 1200 \text{ d/d}$  (gresli kullanım için) olduğundan, çalışma devri emniyetlidir.

- Maksimum giriş devri kontrolü, kullanım esnasındaki en yüksek devrin kontrolüdür.

Maksimum çıkış devri = 16,7 d/d,

$$n_{\text{in max}} = n_{\text{out max}} \cdot i = 2672 \text{ d/d bulunur.}$$

Katalogda izin verilen maksimum giriş devri ise 2700 d/d (gresli kullanım için) olduğundan, sistem emniyetli olarak kabul edilir.

- Tekrarlanabilir maksimum moment kontrolü, ivmeli hareketler esnasında oluşan maksimum moment değeridir.

Bizim ihtiyacımız olan maximum tekrarlanabilir moment değeri,

$$M_{\max \text{ tek}} = 8696 \text{ N.m}$$

Harmonic drive'in izin verdiği maksimum tekrarlanabilir moment değeri,

$$M_R = 9180 \text{ N.m} \quad \text{olduğundan sistem emniyetlidir.}$$

- Maksimum moment kontrolü, sistemin acil duruşlar (çarpma, elektrik kesintisi v.s) sonucu oluşturduğu moment değeridir. Hesaplayabilmek için, ani duruşlarda oluşacak ivme kabulü yapmak gerekmektedir.

Ani duruşlar için geçen süreyi  $t=0,25$  s olarak kabul edersek, mafsalın maksimum hızını en başta  $100^\circ/\text{s}$  olarak kabul ettiğimize göre, duruş esnasında oluşan açısız ivme,

$$\alpha = 6,98 \text{ r/s}^2 \quad \text{bulunur. İvme değerini de Lagrange denkleminde (6.9) yerine koyarsak,}$$

$$M_{\max} = 12743 \text{ N.m} \quad \text{bulunur.}$$

Harmonic drive'in izin verdiği maksimum moment değeri,

$$M_M = 15500 \text{ N.m} \quad \text{olduğundan sistem emniyetlidir.}$$

- İzin verilebilir maksimum moment sayısı, sistemde olabilecek acil durmaların sisteme zarar vermeden tekrarlanabileceği maksimum sayıdır.

6.12 numaralı formüle göre,

$$\text{Acil Duruş Süresi ( } t_k \text{ )} = 0,25 \text{ s} \quad ,$$

$$\text{Acil Duruş Öncesi Devir ( } n_k \text{ )} = 16,7 \text{ d/d} \quad ,$$

$$\text{Acil Duruş Sayısı ( } N_{k \text{ maz}} \text{ )} = 449 \quad \text{bulunur.}$$

- Wave Generator için ömür kontrolü, Harmonic drive'da giriş elemanı olan wave generator'un içindeki rulmanın ömür hesabıdır. Formül katalogda mevcuttur.

$$\text{Harmonic drive kataloğundan } L_n = 35000 \text{ h}$$

Bizim beklediğimiz ömür 30000 h

6.13 numaralı denklemden

$$L_{50} = 32303 \text{ h} \quad \text{bulunur. Ve}$$

$$L_{50} = 32303 \text{ h} > 30000 \text{ h} \quad \text{olduğundan sistem emniyetlidir.}$$

## 6.2.5.2 Dengeleyici Yay Bilgileri

### 6.2.5.2.1 Dış Yay Bilgileri

Ortalama Çap ( $D_{ort}$ )	260 mm
Tel Çapı ( $D$ )	40 mm
Ön Gerilme Kuvveti ( $F_{ön}$ )	7000 N
Maksimum Sıkıştırma Kuvveti ( $F_{max}$ )	45000 N
Açık Boy ( $L_{açık}$ )	534 mm
Ön Yüklenmiş Boy ( $L_{ön yükleme}$ )	500,8 mm
Maksimum Yüklenmiş Boy ( $L_{max kuvvet}$ )	320,8 mm
Maksimum Sıkışmış Boy ( $L_{kapalı}$ )	280 mm
Strok	180 mm
Yay Katsayısı ( $k$ )	211,11 N/mm
Malzeme	X65W9Cr4M.V
Emniyet katsayısı ( $S$ )	3

### 6.2.5.2.2 İç Yay Bilgileri

Ortalama Çap ( $D_{ort}$ )	160 mm
Tel Çapı ( $D$ )	30 mm
Ön Gerilme Kuvveti ( $F_{ön}$ )	1000 N
Maksimum Sıkıştırma Kuvveti ( $F_{max}$ )	40000 N
Açık Boy ( $L_{açık}$ )	530,5 mm
Ön Yüklenmiş Boy ( $L_{ön yükleme}$ )	525,9 mm
Maksimum Yüklenmiş Boy ( $L_{max kuvvet}$ )	345,9 mm
Maksimum Sıkışmış Boy ( $L_{kapalı}$ )	300 mm
Strok	180 mm

Yay Katsayısı ( k )	216,67 N/mm
Malzeme	X65W9Cr4M.V
Emniyet katsayısı ( S )	2,3

### 6.2.5.3 2. Eksen Güç Akışı ve Motor Gücü Hesabı

Bu mafsalda hareket direk aktarıldığından, aradaki aktarma organlarının sayısının çok az olmasından dolayı, hareket için gerekli olan gücü, motor gücü olarak düşünebiliriz.

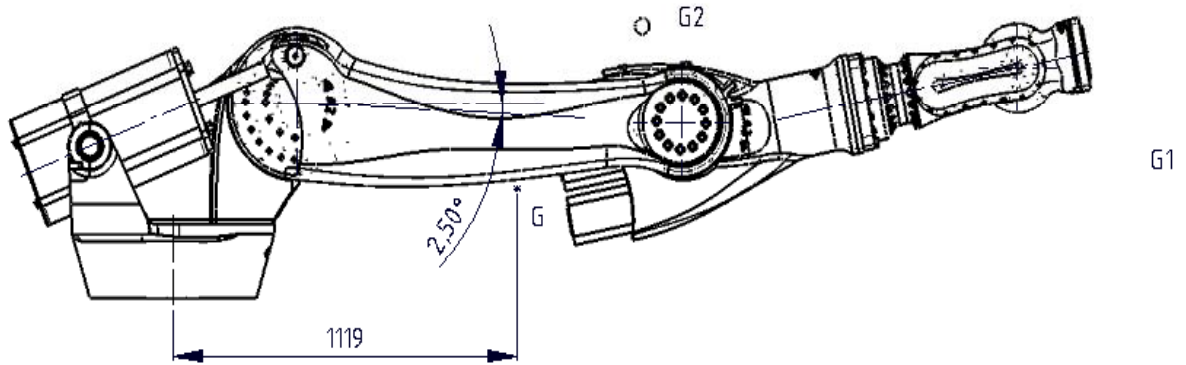
$$P = \frac{M.n}{9500} = \frac{8696.8,35}{9500} = 7,64 \text{ kW Bulunur.}$$

Bu mafsala da seçilecek motorun gücü 7,64 kW'dan küçük olmamalıdır.

### 6.2.6 1. Eksen Parçalarının Hesaplanması

#### 6.2.6.1 1. Eksen Harmonic Drive Hesabı

- Ön seçim yapılması ; Ön seçim olarak, kendinden yataklı, **HFUC-100-100-2A** model çevrim oranı 100 olan harmonic drive komponent seti seçilmiştir.
- Ortalama moment hesabı ; (6.10) numaralı formülden yararlanılarak hesaplanır. Fakat öncelikle, bu mafsal için geçerli olan maksimum moment değerini bulmamız gerekmektedir. Bunun içinde maksimum uzaklık, en yüksek hız ve ivme değerini kullanarak, Lagrange denklemi (6.9) vasıtasıyla çözüme ulaşılır. Bu mafsalda, statik moment etkisi yoktur. Sadece dinamik moment vardır.



Şekil 6.8 3.Eksen ağırlık merkezi kabulü.

Şekil 6.5’de gösterilen G ağırlığı, 1. eksen ve sonrasının ağırlık merkezidir.

1. eksen hızı  $\omega = 100^\circ/\text{s}$  (1,745 r/s, 16,7 d/d) ve de bu hıza ulaşması için gereken süre  $t = 0,5$  s kabul edilmiştir. Dolayısıyla da 1. eksen ivmesi  $\alpha = 3,49$  r/s<sup>2</sup> olarak bulunur.

1119 mm’lik kaçıklığa Lagrange denklemini (6.9) uygularsak,

$$G = M = 1390 \text{ kg}$$

$$\theta_0 = M.L^2.\ddot{\theta} + L.M.g.\cos\theta$$

$$\theta_0 = 1390.1,119^2.3,49 + 0$$

$$\theta_0 = 6075,5 \text{ N.m}$$

Bu mafsal için gereken maximum moment 6075,5 N.m olarak bulunmuştur ve bu moment 0,5 s için uygulanmaktadır.

Harmonic drive için, ortalama moment hesabında kullanılmak üzere değişik zamanlarda uygulanacak torkun ve devrin bulunması gerekmektedir. Sistemin hareketi lineer bir hareket olmadığı için hiçbir zaman belli bir süre zarfında sabit moment ihtiyacı olmamaktadır. Bu durumda belli yaklaşımlarla, belli anlardaki moment ve devir değerleriyle hesaplama yapılacaktır.

1. durum, maximum moment ihtiyacı olduğu an,

$$M_1 = 6075,5 \text{ N.m}, \quad n_1 = 8,35 \text{ d/d} \text{ (0'dan 16,7d/d'ya çıktığı için ortalama alınmıştır)}, \quad t_1 = 0,5 \text{ s}$$

2. durum, alt kolun dik durduğu an , moment için uygulama mesafesi 555mm

$$M_2 = 1494,5 \text{ N.m}, \quad n_2 = 8,35 \text{ d/d}, \quad t_2 = 1 \text{ s}$$

3. durum, alt kol geriye doğru sınırdaki, moment için uygulama mesafesi 80mm,

$$M_3 = 31 \text{ N.m}, \quad n_3 = 8,35 \text{ d/d}, \quad t_3 = 1 \text{ s}$$

4. durum, alt kol ileriye doğru 45° eğik halde, moment için uygulama mesafesi 958mm,

$$M_4 = 4453 \text{ N.m}, \quad n_4 = 8,35 \text{ d/d}, \quad t_3 = 1 \text{ s}$$

Bulunan değerleri, ortalama moment denkleminde (6.10) yerine koyarsak,

$M_{av} = 3875,8 \text{ N.m}$  olarak bulunmaktadır. Ön seçimini yapmış olduğumuz harmonicdrive'ın ortalama moment değeri,

$$M_A = 4630 \text{ N.m' dir.}$$

Dolayısıyla ,

$$M_{av} < M_A \text{ sağlanmış olur.}$$

- Ortalama çıkış devri kontrolü ; Burada, değişik anlardaki devirlerin ortalaması bulunarak, önseçimi yapılmış olan harmonic drive ile kıyaslanır. Ortalama çıkış devri formülü katalogdan alınmıştır.

6.11 numaralı formülden,

$$n_{out \text{ av}} = 8,35 \text{ d/d bulunur.}$$

Bulunan devir sayısı harmonic drive'ın çıkış devir sayısıdır. Bu devir sayısını çevrim oranı ile çarparsak ortalama giriş devir sayısını buluruz.

$n_{in \text{ av}} = i \cdot n_{out \text{ av}} = 835 \text{ d/d}$  bulunur. Ön seçimini yapmış olduğumuz harmonic drive için ortalama giriş devir değeri ,

$n_{av} = 1200 \text{ d/d}$  (gresli kullanım için) olduğundan, çalışma devri emniyetlidir.

- Maksimum giriş devri kontrolü, kullanım esnasındaki en yüksek devrin kontrolüdür.

Maksimum çıkış devri =  $16,7 \text{ d/d}$ ,

$$n_{in \text{ max}} = n_{out \text{ max}} \cdot i = 1670 \text{ d/d} \text{ bulunur.}$$

Katalogda izin verilen maksimum giriş devri ise  $1670 \text{ d/d}$  (gresli kullanım için) olduğundan, sistem emniyetli olarak kabul edilir.

- Tekrarlanabilir maksimum moment kontrolü, ivmeli hareketler esnasında oluşan maksimum moment değeridir.

Bizim ihtiyacımız olan maximum tekrarlanabilir moment değeri,

$$M_{\text{max tek}} = 6075,5 \text{ N.m}$$

Harmonic drive'ın izin verdiği maksimum tekrarlanabilir moment değeri,

$$M_R = 7350 \text{ N.m} \text{ olduğundan sistem emniyetlidir.}$$

- Maksimum moment kontrolü, sistemin acil duruşlar (çarpma, elektrik kesintisi v.s) sonucu

oluşturduğu moment değeridir. Hesaplayabilmek için, ani duruşlarda oluşacak ivme kabulü yapmak gerekmektedir.

Ani duruşlar için geçen süreyi  $t=0,22$  s olarak kabul edersek, mafsalsın maksimum hızını en başta  $100^\circ/s$  olarak kabul ettiğimize göre, duruş esnasında oluşan açısal ivme,

$\alpha = 7,93 \text{ r/s}^2$  bulunur. İvme değerini de Lagrange denkleminde (6.9) yerine koyarsak,

$M_{\max} = 13808 \text{ N.m}$  bulunur.

Harmonic drive'in izin verdiği maksimum moment değeri,

$M_M = 14100 \text{ N.m}$  olduğundan sistem emniyetlidir.

- İzin verilebilir maksimum moment sayısı, sistemde olabilecek acil durmaların sisteme zarar vermeden tekrarlanabileceği maksimum sayıdır.

6.12 numaralı formüle göre,

Acil Duruş Süresi ( $t_k$ ) =  $0,22 \text{ s}$  ,

Acil Duruş Öncesi Devir ( $n_k$ ) =  $16,7 \text{ d/d}$  acil duruş öncesi devir,

Acil Duruş Sayısı ( $N_{k \text{ maz}}$ ) =  $816$  bulunur.

- Wave Generator için ömür kontrolü, Harmonic drive'da giriş elemanı olan wave generator'un içindeki rulmanın ömür hesabıdır. Formül katalogta mevcuttur.

Harmonic drive kataloğundan  $L_n = 35000 \text{ h}$

Bizim beklediğimiz ömür  $30000 \text{ h}$

6.13 numaralı denklemden

$L_{50} = 36585 \text{ h}$  bulunur. Ve

$L_{50} = 36585 \text{ h} > 30000 \text{ h}$  olduğundan sistem emniyetlidir.

### 6.2.6.2 1. Eksen Güç Akışı ve Motor Gücü Hesabı

Bu mafsalda hareket direk aktarıldığından, aradaki aktarma organlarının sayısının çok az olmasından dolayı, sadece kayış-kasnak mekanizmasında meydana gelen kayıpları dahil edebiliriz.

Harmonic drive çıkışında gerekli olan güç,

$$P = \frac{M.n}{9500} = \frac{6075,6.8,35}{9500} = 5,3 \text{ kW Bulunur.}$$

Kayış-Kasnak mekanizması girişinde olması gereken güç,

$$P = 5,3/0,97 = 5,5 \text{ kW Bulunur.}$$

Bu mafsala da seçilecek motorun gücü 5,5 kW'dan küçük olmamalıdır.

### 6.2.6.3 1. Eksen Kayış-Kasnak Grubu Bilgileri

Seçilen Dişli Kayış	Synchronous Belts Gates PowerGrip GT
Standart Kayış Numarası	8M-50
Kayışdaki dişli adedi	70
Kayış Adımı ( p )	8 mm
Kayış Genişliği ( b )	50 mm
Kasnak Dişli Sayısı	36
Çevrim Oranı ( i )	1
Ortalama Kasnak Çapı ( d <sub>w</sub> )	91,67 mm
Toplam Germe Kuvveti ( F <sub>t</sub> )	1377,3 N
Çevre Hızı ( V )	4,008 m/s
Hesaplanan Güç ( P <sub>hes</sub> )	9,9 kW
Aktarılabilek Güç ( P <sub>1</sub> )	13,685 kW

### 6.2.7 Kullanılan Rulmanların Kodları ve Ömürleri

Bu bölümde, tasarımda kullanılan rulmanların üretici firmaları, firmaların vermiş olduğu kodlar ve gerekiyorsa ömürleri ifade edilmiştir. Kullanılan rulmanların bir kısmı belli kuvvetler altında çalıştığı için ömür hesabı yapılmıştır fakat bazı rulmanlar ise herhangi bir yük altında kalmadan, sadece merkezlemek için kullanılmıştır. Bu rulmanlar için ömür hesabı yapılmamıştır. Rulmanlar EK-2 ve EK-3'de görülebilir.

Rulman No: 1



FAG.7206B.TVP

Bu rulman 2 numaralı rulmandan daha az kuvvete maruz kaldığı için bu rulmana ömür hesabı uygulanmamıştır.

Rulman No: 2

FAG.7203B.TVP

$L_h = 69831$  saat.

Rulman No: 3

FAG.6213

$L_h = 31985$  saat

Rulman No: 4

FAG.6203

$L_h = 36015$  saat

Rulman No :5

FAG.NA.4824

Bu rulman konstrüksiyon gereği büyük seçilmiştir. Ömür hesabına gerek yoktur.

Rulman No: 6

FAG.RNA.4902

$L_h = 28049$  saat

Rulman No: 7

FAG.7212B.TVP

$L_h = 43819$  saat

Rulman No: 8

FAG.3205B.TVH

Bu rulmanın üzerine gelen kuvvetler az olduğu için hesap yapılmadı.

Rulman No: 9

FAG.RNA.4911

Bu rulman sadece merkezleme amaçlı kullanılmıştır. Ömür hesabına gerek yoktur.

Rulman No: 10

FAG.NK.24/16

Bu rulman sadece merkezleme amaçlı kullanılmıştır. Ömür hesabına gerek yoktur.

Rulman No: 11

FAG.16017

Bu rulman sadece merkezleme ve çok ufak miktarda aksenal yük amaçlı kullanılmıştır. Ömür hesabına gerek yoktur.

Rulman No: 12

FAG.RNA.4911

Bu rulman sadece merkezleme amaçlı kullanılmıştır. Ömür hesabına gerek yoktur.

Rulman No : 13

FAG.6012

 $L_h = 63283$  saatRulman No : 14

FAG.6005

Bu rulman sadece merkezleme amaçlı kullanılmıştır. Ömür hesabına gerek yoktur.

Rulman No : 15

FAG.6206

 $L_h = 64555$  saatRulman No : 16

FAG.6206

Bu rulman sadece merkezleme amaçlı kullanılmıştır. Ömür hesabına gerek yoktur.

Rulman No: 17

INA.SX.011860

Bu rulmana gelen yük hesaplandı fakat, firma ürettiği rulman için herhangi bir hesap göstermemiş.

Rulman No: 18

FAG.6208

$L_h = 30811$  saat

Rulman No: 19

FAG.N207E.TVP2

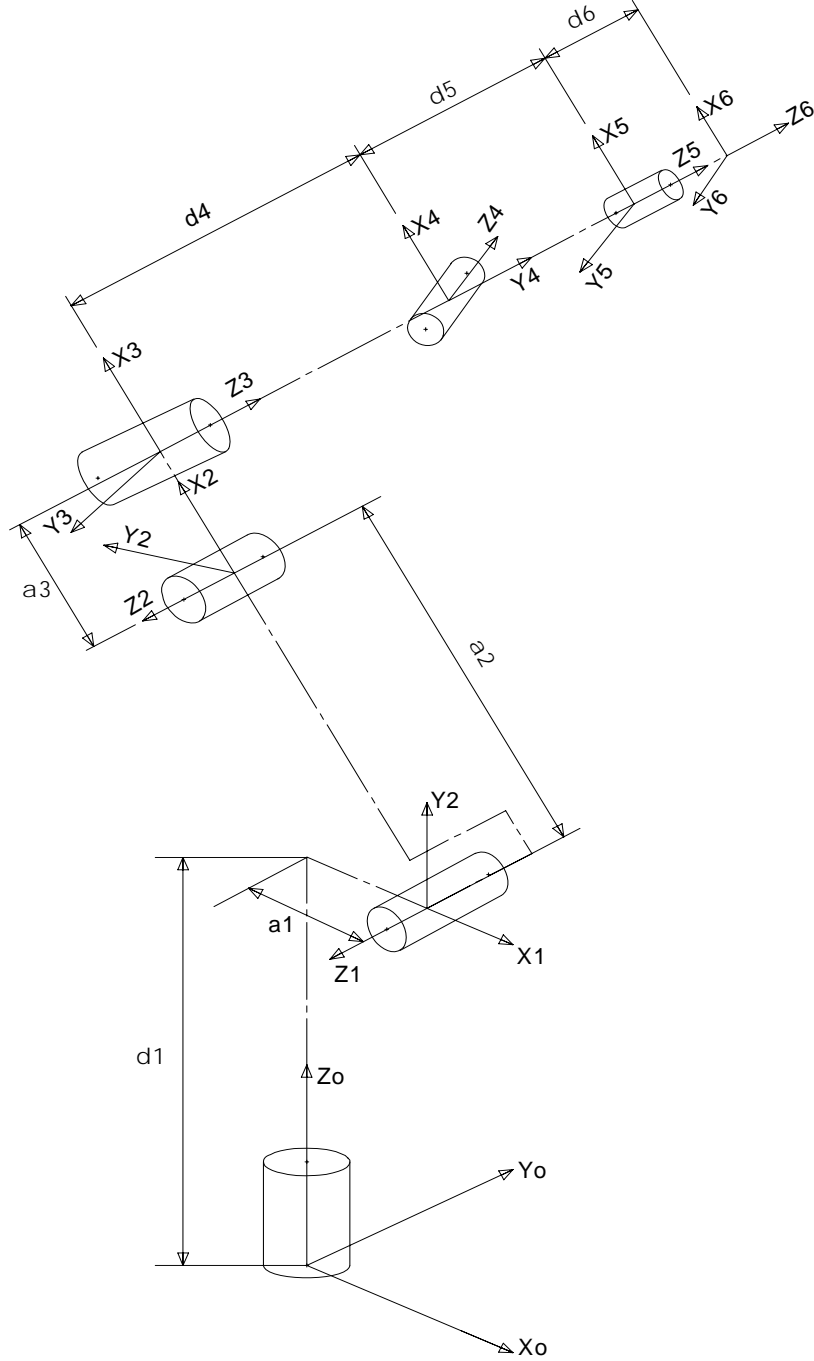
Bu rulmana gelen yük 18 numaralı rulmandan daha azdır. Bu rulmanın makarlı seçilmesinin nedeni, harmonicdrive'a iyi merkezleme yapmasıdır.

Rulman No: 20

INA.ZKLDF.395

Bu rulmana gelen yük hesaplandı fakat, firma ürettiği rulman için herhangi bir hesap göstermemiş.

## 7 TASARLANAN ALTI EKSENLİ ROBOTUN KONUM MATRİSİNİN BULUNMASI



Şekil 7.1 Tasarımı yapılan robotun mafsallarına yerleştirilen eksen takımları.

Robota ait mafsal parametreleri aşağıdaki gibidir. Bu parametreleri Denavit Hartenberg matris

çarpımında yerine koyarsak her mafsal için homojen dönüşüm matrisini bulmuş oluruz. Her mafsalın homojen dönüşüm matrislerini de yan yana çarparsak robotun konum matrisini bulmuş oluruz. Buradaki  $\theta$  açıları, her koordinat takımının z eksenine etrafındaki dönme miktarını verir.

Mafsal	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$\theta_1$	$d_1$	$a_1$	90
2	$\theta_2$	0	$a_2$	0
3	$\theta_3$	0	$a_3$	90
4	$\theta_4$	$d_4$	0	90
5	$\theta_5$	$d_5$	0	-90
6	$\theta_6$	$d_6$	0	0

Çizelge 5.1 Tasarlanan robot için D-H parametreleri.

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

$$T_0^6 = T_0^1 \cdot T_1^2 \cdot T_2^3 \cdot T_3^4 \cdot T_4^5 \cdot T_5^6 \quad (7.2)$$

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 90 & -\sin 90 & 0 \\ 0 & \sin 90 & \cos 90 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \quad (7.3)$$

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \cdot a_1 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & \sin \theta_1 \cdot a_1 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{bulunur.} \quad (7.4)$$

$$T_1^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 0 & -\sin 0 & 0 \\ 0 & \sin 0 & \cos 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \quad (7.5)$$

$$T_1^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \cdot a_2 \\ \sin \theta_2 & 0 & -\cos \theta_2 & \sin \theta_2 \cdot a_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{bulunur.} \quad (7.6)$$

$$T_2^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 90 & -\sin 90 & 0 \\ 0 & \sin 90 & \cos 90 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \quad (7.7)$$

$$T_2^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & \cos \theta_3 \cdot a_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & \sin \theta_3 \cdot a_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{bulunur.} \quad (7.8)$$

$$T_3^4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & 0 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 90 & -\sin 90 & 0 \\ 0 & \sin 90 & \cos 90 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \quad (7.9)$$

$$T_3^4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & \sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & -\cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{bulunur.} \quad (7.10)$$

$$T_4^5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-90) & -\sin(-90) & 0 \\ 0 & \sin(-90) & \cos(-90) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \quad (7.11)$$

$$T_4^5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & -\sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{bulunur.} \quad (7.12)$$

$$T_5^6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 0 & -\sin 0 & 0 \\ 0 & \sin 0 & \cos 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \quad (7.13)$$

$$T_5^6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & 0 & -\sin \theta_6 & 0 \\ \sin \theta_6 & 0 & \cos \theta_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{bulunur.} \quad (7.14)$$

$$T_0^6 = T_0^1 \cdot T_1^2 \cdot T_2^3 \cdot T_3^4 \cdot T_4^5 \cdot T_5^6 \quad (7.15)$$

İşleminin sonucu robotun uç noktasının konum matrisini verir.



## 8 SONUÇLAR

Teori ve tasarımda dayalı bu çalışmada, özellikle robotların konstrüktif yapılarına değinilmiş ve 6 eksenli, endirekt hareket aktarımlı endüstriyel bir robotun tasarımı yapılmıştır. Tasarımda, konstrüktif detaylar incelenmiş, çağımızın gereksinimlerine uygun, kolay monte edilebilir, modüler, güç/ağırlık oranı düşük, hız ve ivme değerleri yüksek ve de görselliğe önem verilmiştir. Çalışma esnasına şu noktalar gözlemlenmiştir,

1. Robotların konstrüktif yapısında yapılan optimizasyonlar, sarfedilen enerji miktarını ve de ilk yatırım maliyetlerini azalttığı görülmüştür.
2. Endirekt aktarımda, üst kol tasarımının daha kompakt olması, kablolamanın kolay olması ve de motordan bağımsız tasarım yapılması gibi üstünlükler görülmüştür.
3. Robotlarda kullanılan redüktörlerin kıyasları yapıp, avantajları ve dezavantajları incelenmiştir. Dalgalı tahrik mekanizmasının diğer mekanizmalara göre daha verimli olduğu, daha kompakt bir yapıya sahip olduğu, aktarılan moment/ağırlık oranının yüksek olduğu fakat yüksek moment ihtiyacında yetersiz kaldığı görülmüştür. Yüksek moment gerektiğinde ise Cyclo drive mekanizmasının ideal olduğu görülmüştür.

**KAYNAKLAR**

Kepçeler, T., (1999), Esnek Robot Kollarında Optimum Hareket Sentezi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

İzgi, V., (2002), Solidworks Programı ile Altı Eksenli Robot Tasarımı, Lisans Tezi, YTÜ Makina Fakültesi.

Fu, K., Gonzalez, R., ve Lee, C., (1987), Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence, McGraw-Hill Book Company, Singapore.

Sandler, B., Sandler, Z., (1991), Robotics, Designing the Mechanisms for Automated Machinery, A Solomon Press Book, USA.

Spong, M., (1989), Robot Dynamics and Control, John Wiley & Dond, Inc., Singapore.

Schilling, R., (1990), Fundamentals of Robotics Analysis and Control, Prentice-Hall International, Inc., USA.

Ed. Kreith F., (1999), Mechanical Engineering Handbook, Boca Raton: CRC Press LLC

Nwokah O., Hurmuzlu Y., (2002), Mechanical Systems Handbook, Boca Raton: CRC Press LLC, USA.

[www.kuka.com](http://www.kuka.com)

[www.Harmonicdrive.de](http://www.Harmonicdrive.de)

[www.abb.com](http://www.abb.com)

[www.ustpo.gov](http://www.ustpo.gov)

[www.teijin-seiki.com](http://www.teijin-seiki.com)

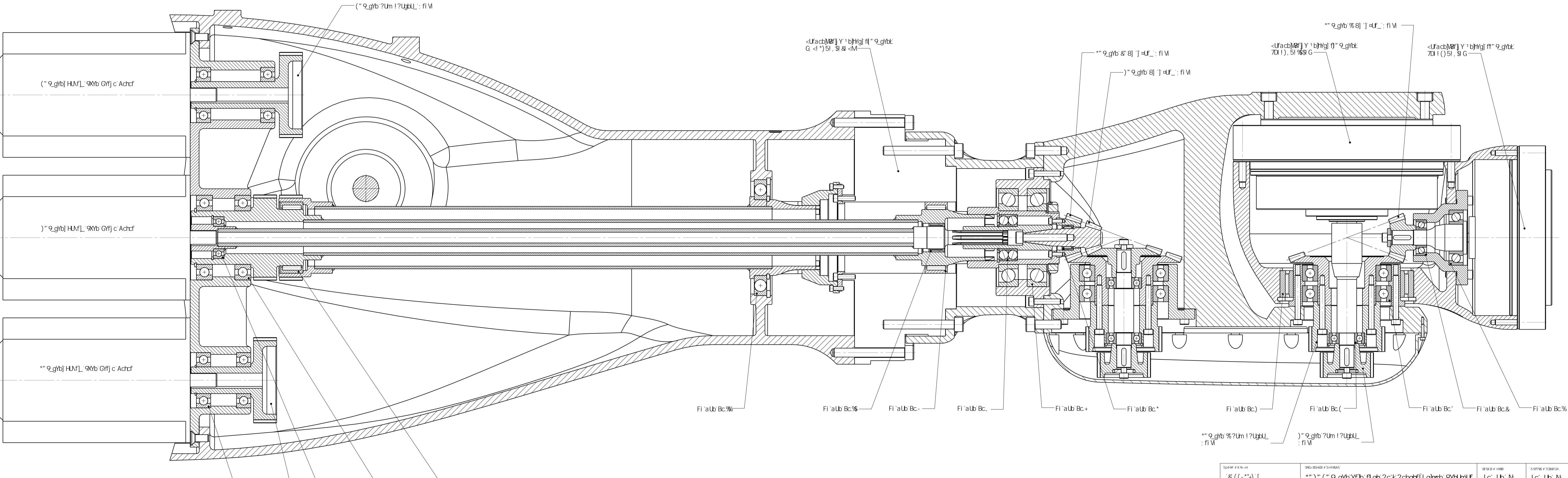
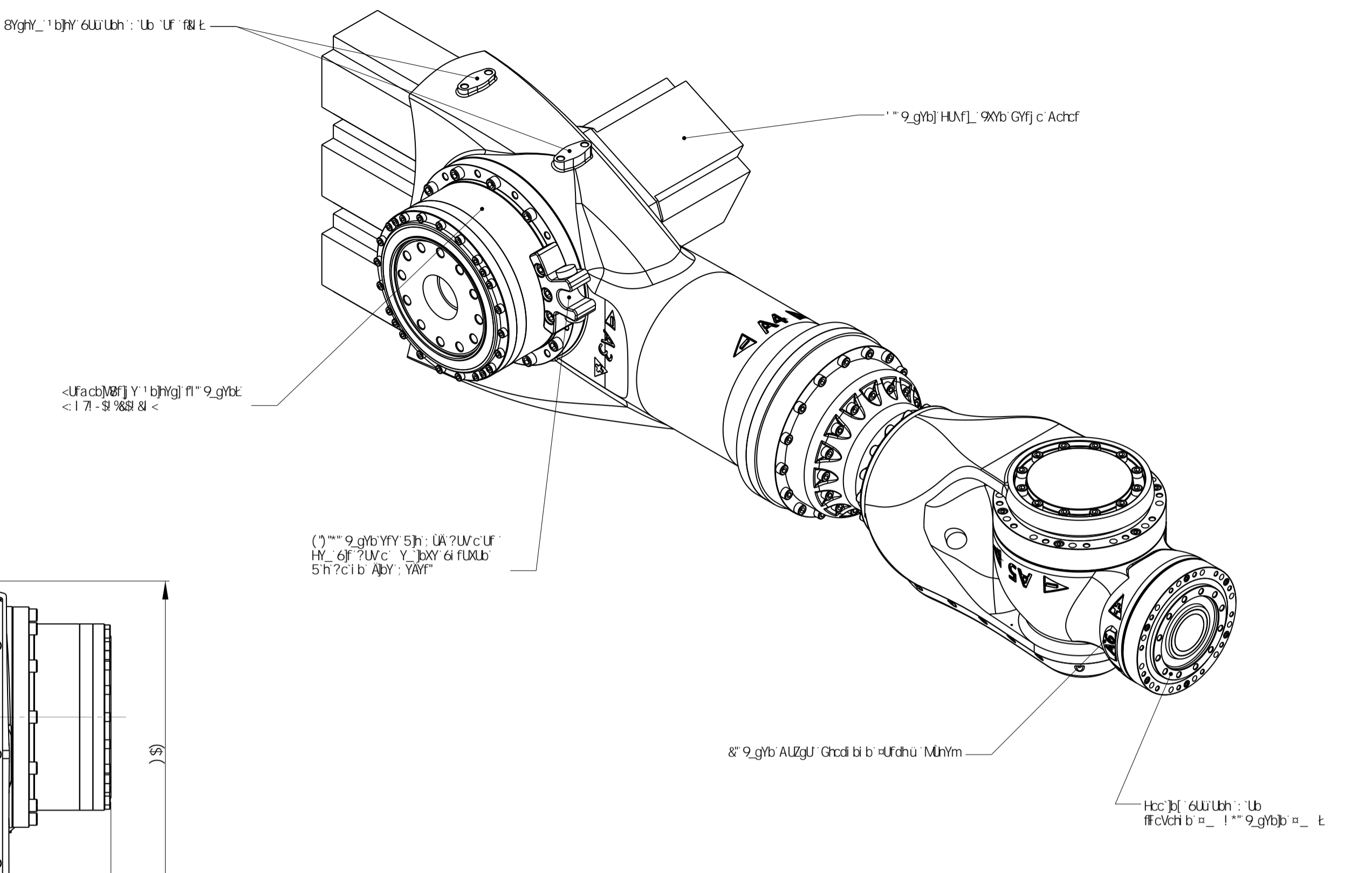
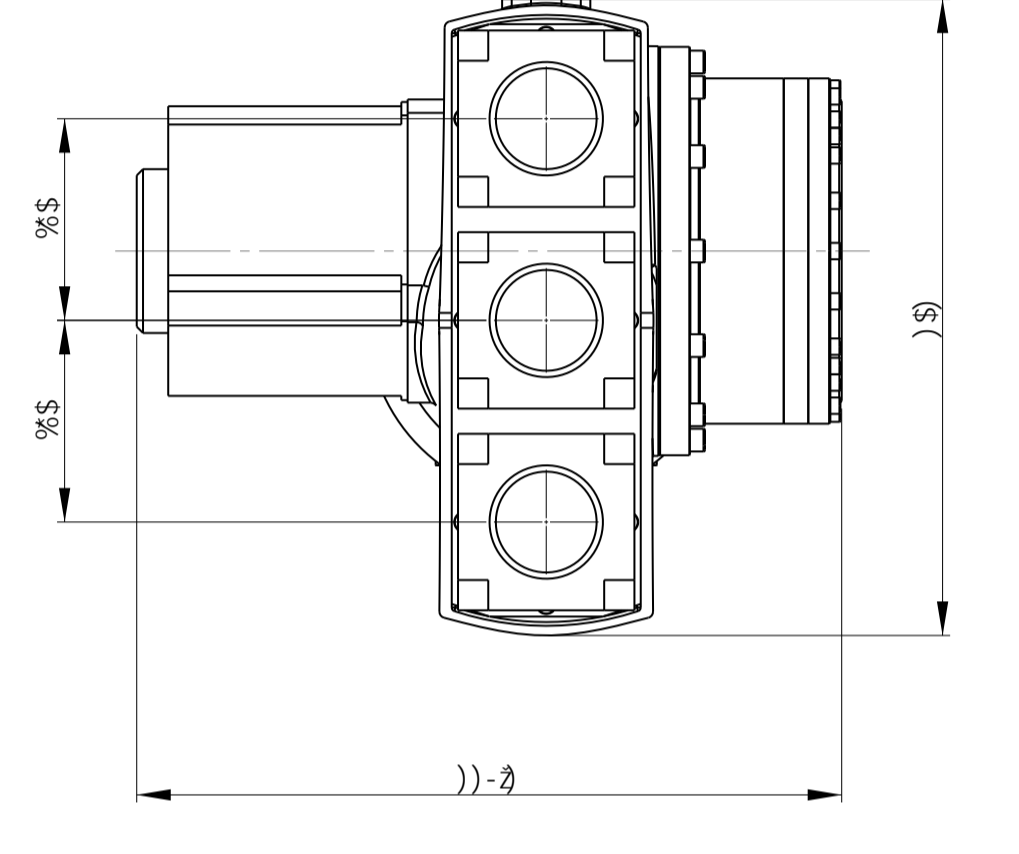
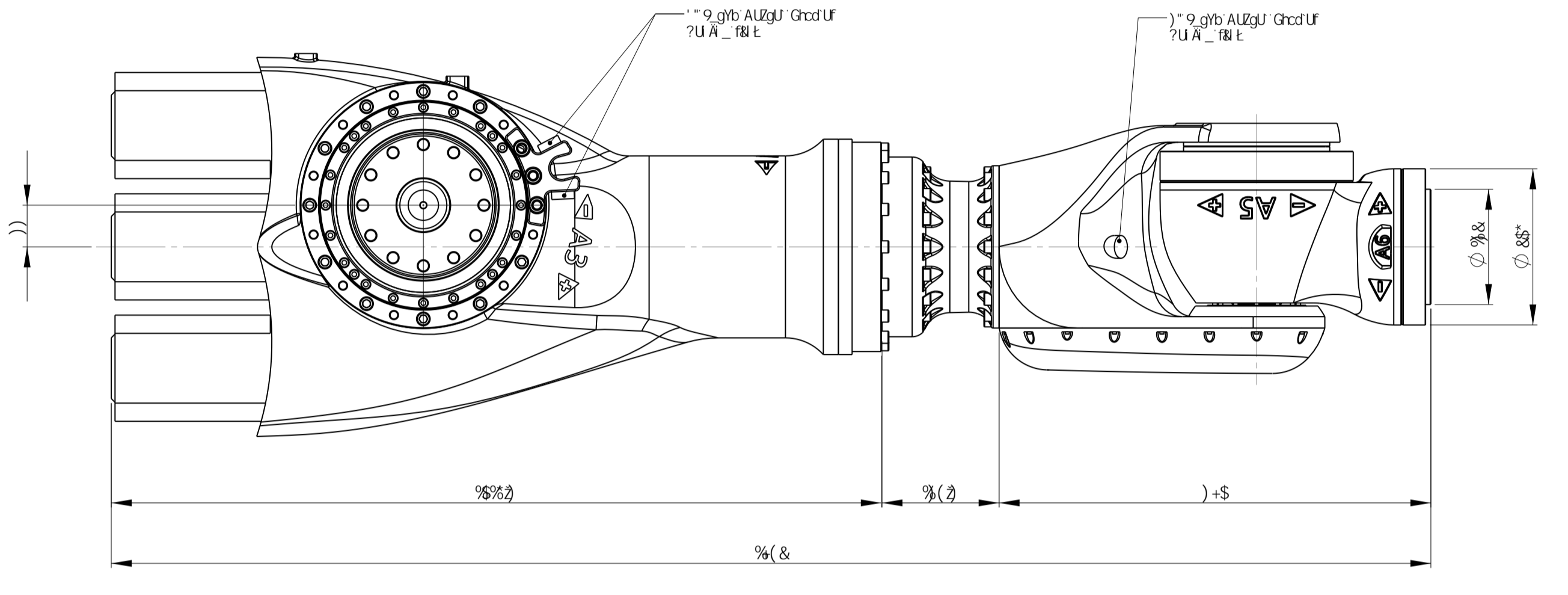
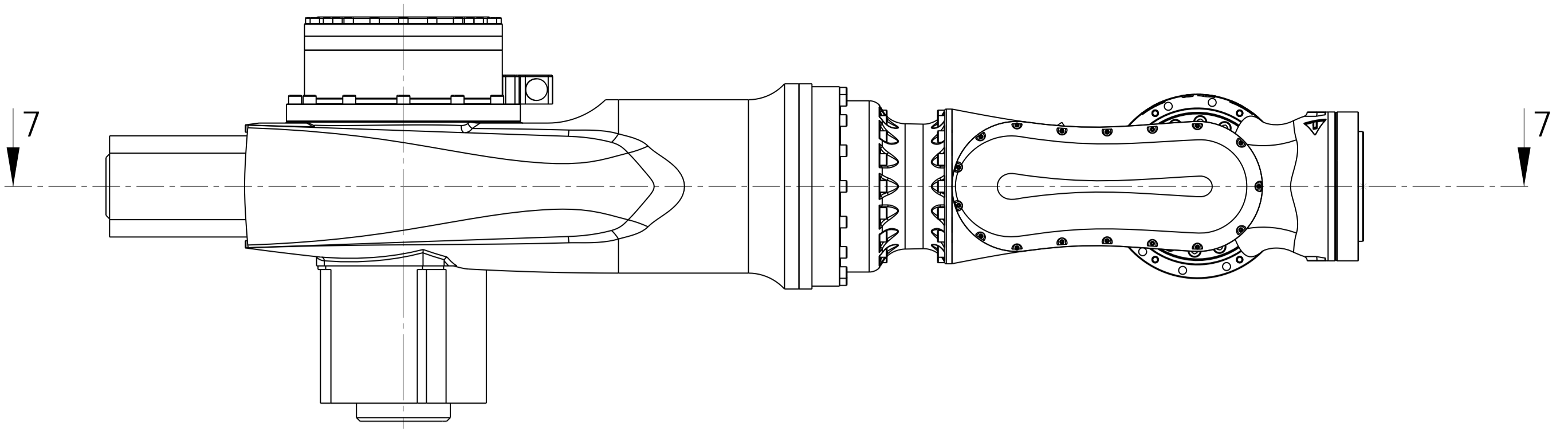
[www.sumitomocyclo.com](http://www.sumitomocyclo.com)

[www.fag.com](http://www.fag.com)

**EKLER**



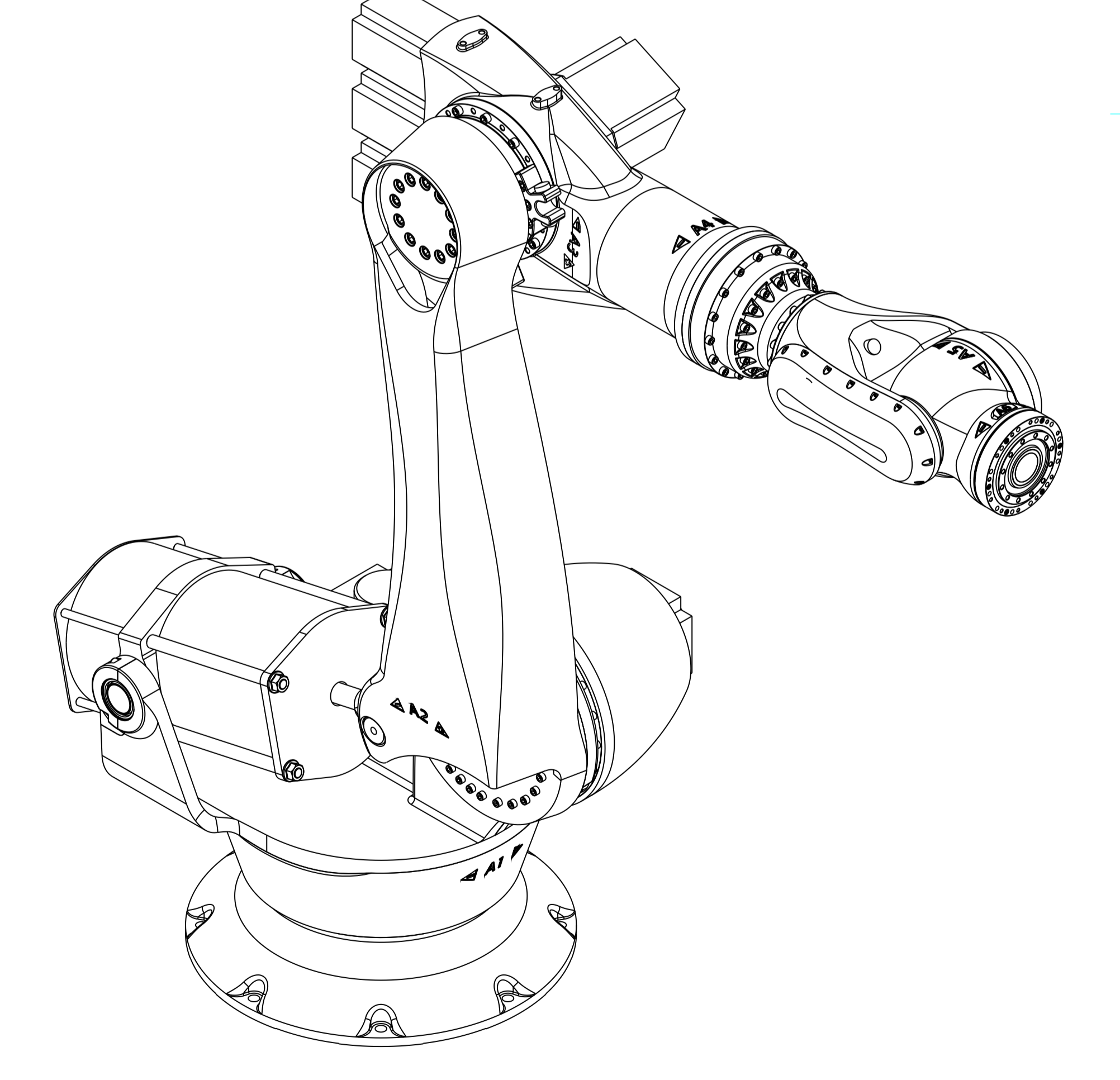
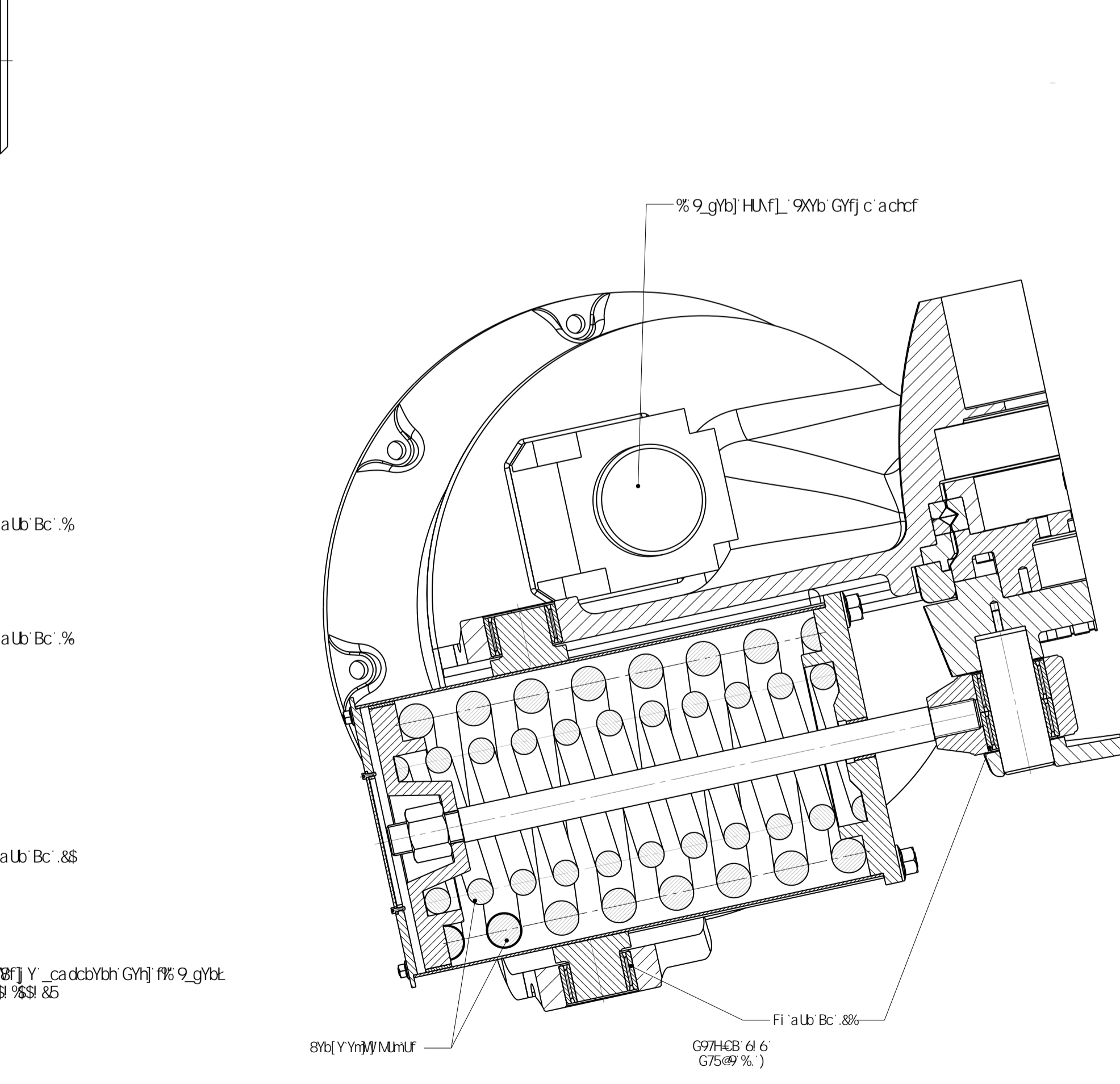
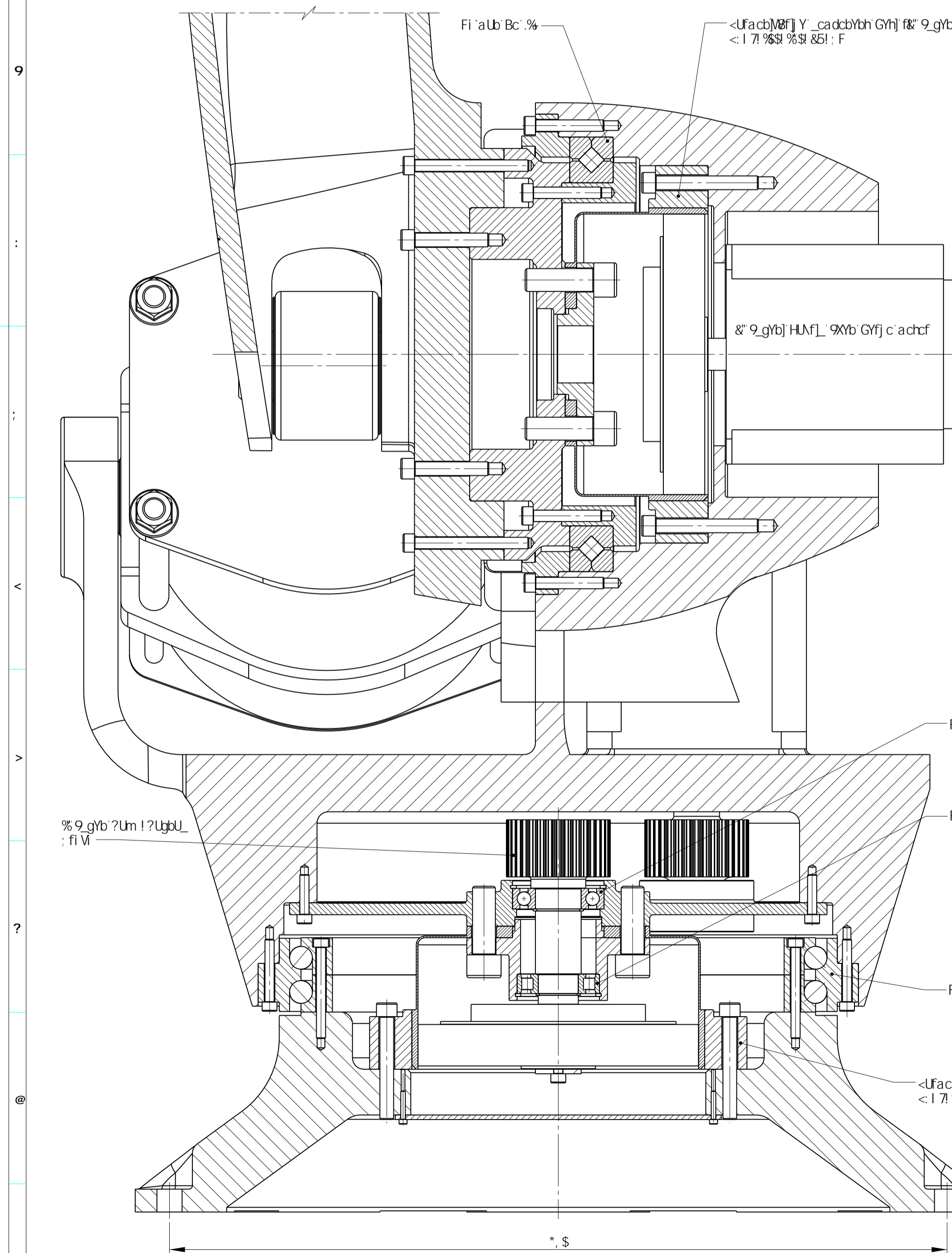
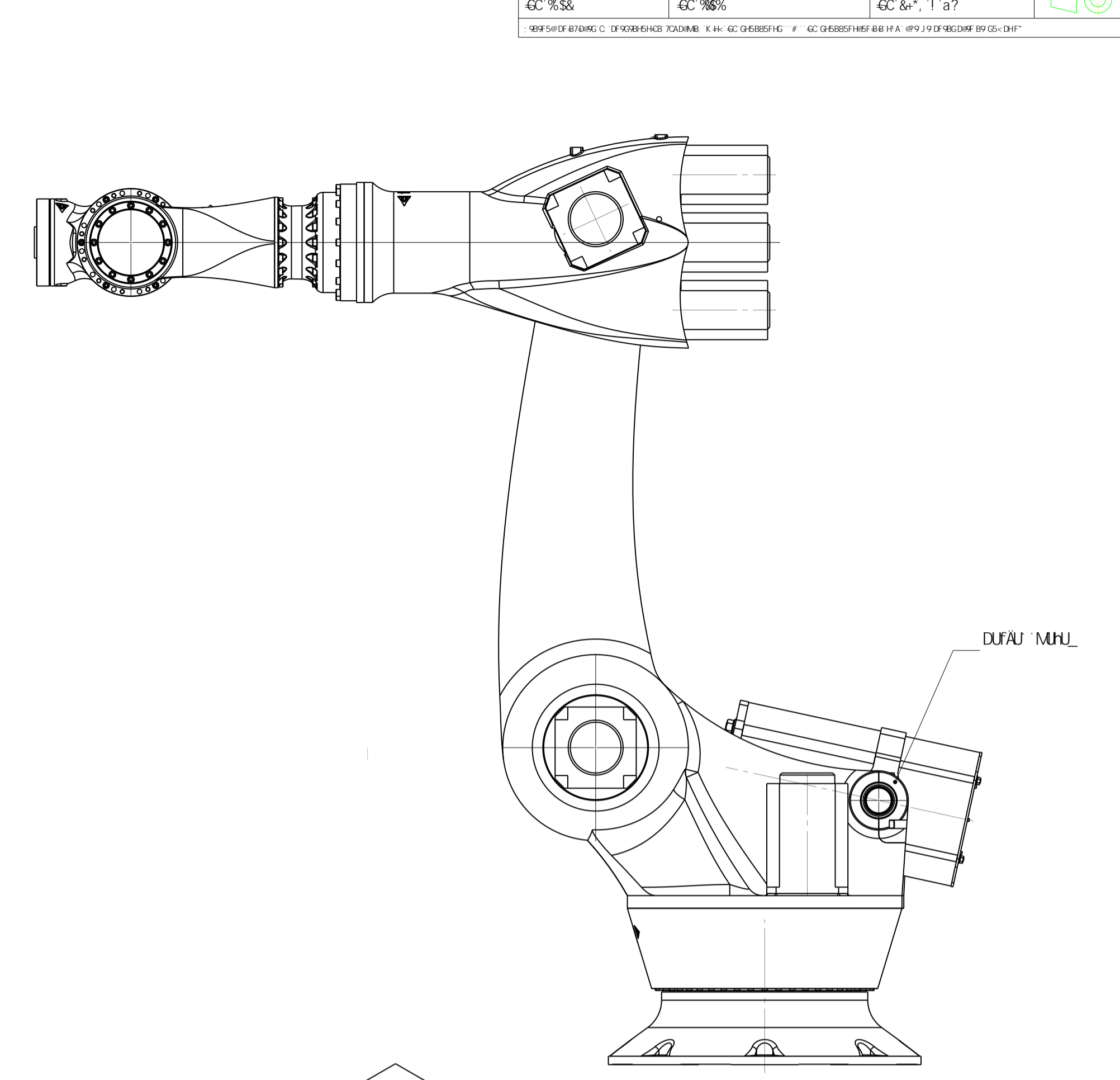
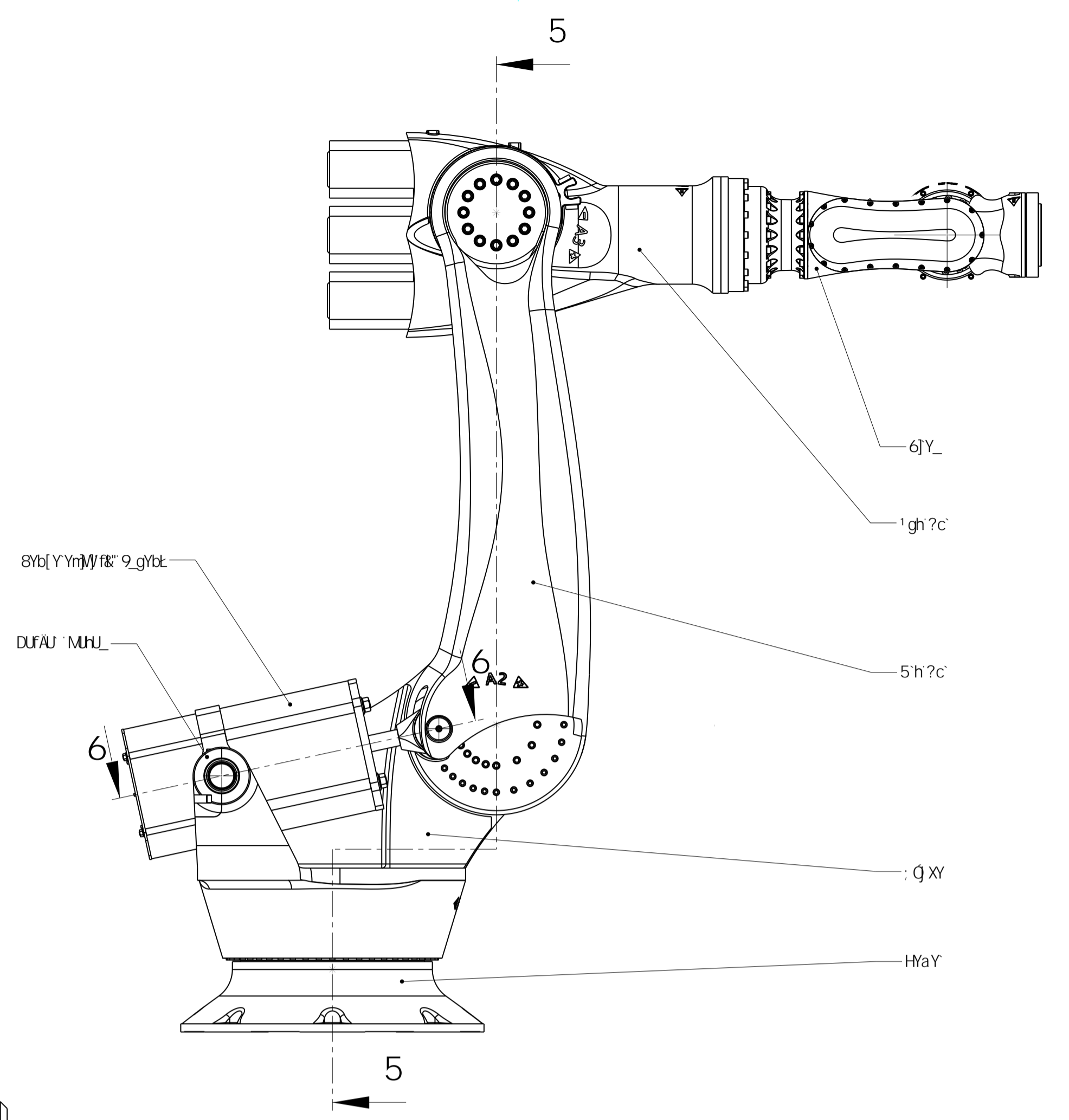
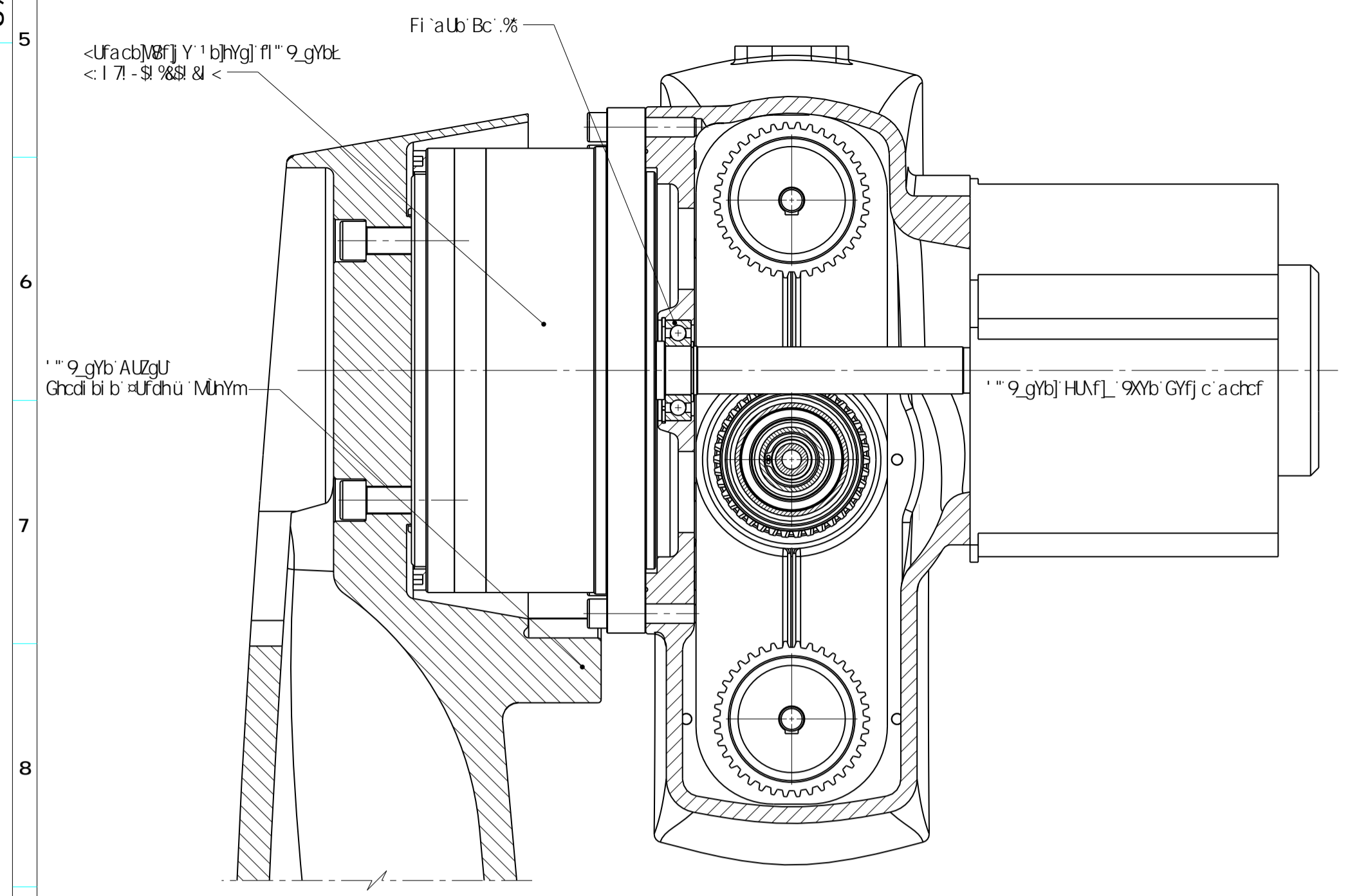




C97HCB 7 7  
G7549 % 8%

G: 5714.H19 MINAMODG: 5044F 251140F50G EC %S&	5044F 2 104F50G EC %S&	5044F 2 104F50G EC %S&	5044F 2 104F50G EC %S&	5044F 2 104F50G EC %S&	5044F 2 104F50G EC %S&	5044F 2 104F50G EC %S&	5044F 2 104F50G EC %S&
Jc_Lb_N		Jc_Lb_N		Jc_Lb_N		Jc_Lb_N	
Mhy		Mhy		Mhy		Mhy	





**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarih	28.07.1981	
Doğum yeri	Samsun	
Lise	1995-1998	Halide Edip Adıvar Lisesi
Lisans	1998-2002	Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Müh. Bölümü
Yüksek Lisans	2002-2005	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Müh. Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Programı

**Çalıştığı kurumlar**

2002-Devam Ediyor Wittur Asansör San.Tic.Ltd.Şti.