

YÜREK MEKANİZMASI İLE
ROBOT KOLLARDA
AĞIRLIK KUVVETLERİNİN DENGELENMESİ

SERPİL YÜCEL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
2009

CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜREK MEKANİZMASI İLE ROBOT
KOLLARDA AĞIRLIK KUVVETLERİNİN
DENGELENMESİ

SERPİL YÜCEL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
DOÇ.DR. KENAN KOSER

SİVAS
2009

Bu çalışma Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanmış ve jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan (Danışman) Doç.Dr. Kenan Koser _____

Üye Yrd.Doç.Dr. H. Ali Ertuş _____

Üye Yrd.Doç.Dr. Yavuz Türkay _____

Üye _____

Üye _____

ONAY

Bu tez çalışması, 27/08/2009 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulu tarafından belirlenen ve yukarıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

.....

Bu tez Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 24.09.2008 tarihli ve 7 sayılı toplantısında kabul edilen Fen ve Sağlık Bilimleri Enstitüleri Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu adlı yönergeye göre hazırlanmıştır

ÖZET

YÜREK MEKANİZMASI İLE ROBOT KOLLARDA AĞIRLIK KUVVETLERİNİN DENGELENMESİ

Serpil YÜCEL

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç.Dr. Kenan KOŞER

2009, 58 sayfa

Bu çalışmada robot kolların ağırlık kuvvetlerini dengelemek üzere bir yürek mekanizması tasarlanmıştır.

Robot kollarının çalışması sırasında eyleyici torkunu önemli ölçüde artırarak gereksiz enerji tüketimine ve konstrüksiyon problemlerine neden olan robot kolların ağırlığından kaynaklanan yerçekimi yüklerini ve bu yüklerin doğurduğu momentleri dengelemek üzere kolay imal edilebilir ve az bakım gerektiren bir kam mekanizması geliştirilmiştir. Mekanizmanın lineer olmayan yerçekimi yüklerini dengelemesi için kamın sahip olması gereken profilin belirlenmesi formülize edilmiş ve bir mekanizma önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Robot kol, manipülatör, yerçekimi dengeleme, kam mekanizmaları.

ABSTRACT

GRAVITY COMPENSATION FOR ROBOT ARMS BY MEANS OF A CAM MECHANISM

Serpil YÜCEL

Master of Science Thesis, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kenan KOSER

2009, 58 pages

Unbalanced gravity forces lead to heavy construction which more powerful actuators and more energy consumption for robot arms. Therefore gravity compensation is very important issue at articulated type industrial robot having links whirling in direction of gravity, especially. In this study, a cam mechanism has been improved gravity compensation for manipulators. A cam profile is formulated from static balancing condition for compensating non-linear gravity forces and torques. Finally, this mechanism is drawn and is illustrated its place on a 3R articulated robot arm.

Key words: Robot arm, manipulators, gravity-balancing, gravity compensation, cam mechanism.

TEŞEKKÜR

Tezin hazırlanması aŐamasında bana her tűrlű desteęi veren danıŐman hocam sayın Doç. Dr. Kenan KOSER'e, dűkűmanları ve gűrűŐleri ile yanımda olan Yrd.Doç.Dr. Hacı Ali ERTAŐ'a, izimlerimde desteęini esirgemeyen aęabeyim Mimar Őmer Faruk ERDOęAN'a, onlarla geirebileceęim vaktimi alıŐmalarımaya ayırmama anlayıŐ gűsteren ocuklarıma, eleŐtiri ve gűrűŐleri ile hep yanımda olan eŐim AraŐtırma Gűrevlisi Ahmet YŪCEL'e ve manevi destekleri ile beni yalnız bırakmayan Orman İŐletme Műdűrlűęű personeline teŐekkűrű bir bor bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER DİZİNİ.....	ix
KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GENEL TANIMI İLE ROBOT	1
1.1. Genel Bilgiler.....	1
1.2. Sınıflandırma	3
1.3. Serbestlik derecesi (SD)	3
1.4. Tahrik Sistemleri.....	4
1.5. Robot Anatomisi	5
1.6. Robot Kolun Çalışma Alanı.....	5
1.7. Robot Kolun Hareketleri	6
1.8. Üç Serbestlik Dereceli RRR Robot Kolda Ağırlık Kuvvetleri	7
2. ROBOT KOLLARINDA YERÇEKİMİ KUVVETİNİN DENGELENMESİ.....	9
2.1. Yerçekimi Kuvvetlerini Dengeleme Yöntemleri	9
2.1.1. Aktif dengeleme yöntemleri	9
2.1.2. Pasif dengeleme yöntemleri.....	10
2.2. Literatürde Dengeleme Çalışmaları	13
3. KAM MEKANİZMALARI GENEL BİLGİLER.....	18
3.1. Avantajları ve Dezavantajları	18
3.2. Kam Mekanizmalarının Sınıflandırılması	19
3.3. Yürek Terimleri.....	21
3.4. Yürek Tasarımı	22

3.5.	Yürek Hareket Eğrileri	22
3.6.	Yürek Boyutunu Belirleme.....	23
4.	AĞIRLIK DENGELENMESİ İÇİN YÜREK MEKANİZMASI TASARIMLARI	24
4.1.	Formüllerin Farklı Değerlerle Denenmesi.....	31
4.2.	Yerçekimi Dengeleme Mekanizması	34
4.2.1.	Üç Serbestlik Dereceli RRR Robot Kola Mekanizmanın Uygulanması...	35
4.3.	Robot Kolda Yerçekimi Dengelenmesi.....	38
5.	SONUÇ.....	41
	KAYNAKLAR	42
	ÖZGEÇMİŞ	44
	EK: YAYLAR HAKKINDA GENEL BİLGİ	45

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Bağlanma şekillerine göre manipülatörler	1
Şekil 1.2 Altı Serbestlik Dereceli mafsallı robot	4
Şekil 1.3 Robot kollarının çalışma alanı [Groover,1992].....	5
Şekil 1.4 Robotlarda kullanılan mafsal tipleri	6
Şekil 1.5 Üç serbestlik dereceli robot kolu	7
Şekil 1.6 Robot kolda ağırlık kuvvetleri.....	7
Şekil 1.7 Ön ve arka kollara etkiyen yerçekimi kuvvetleri ve oluşan torklar.....	8
Şekil 2.1 Pasif dengelemede karşı ağırlık kullanımı	10
Şekil 2.2 Robot arka kolun yay ile dengelenmesi.....	11
Şekil 2.3 KUKA KR 16 L6 robot kolu (3 DOF).....	12
Şekil 2.4 Kablo/makara/yaydan oluşan dengeleme metodu (Ulrich ve Kumar,1991)....	13
Şekil 2.5 Tek uzuvlu torsiyon yayı uygulanmış model (Gopalswamy ve ark,1992).....	13
Şekil 2.6 (a) Tek uzuvlu (b) Çok uzuvlu helisel yaylarla dengeleme	14
Şekil 2.7 Simionescu ve Ciuputi'nin çalışmalarından iki örnek.....	15
Şekil 2.8 İki uzuvlu kam mekanizması ile dengeleme (Umeda,1992).....	15
Şekil 2.9 İki kam içeren dengeleme mekanizması (Chow ve Shi, 2005).....	16
Şekil 2.10 Ağırlık dengeleme mekanizması (Koser,2001).....	17
Şekil 3.1 Kam sınıflandırmasına iki örnek	20
Şekil 3.2 İzleyici temas şekilleri (Söylemez,2000).....	20
Şekil 3.3 Yürek terimleri	21
Şekil 3.4 Kam hareketleri	22
Şekil 3.5 Toparlıklı öteleyen bir kam mekanizmasında basınç açısı.....	23
Şekil 4.1 Dengelenmemiş robot kol - kam mekanizması ve oluşan kuvvetler.....	24
Şekil 4.2 Normal kuvvetin bileşenleri.....	25
Şekil 4.3 Farklı θ açılarında $N(\theta)$ kuvveti ve M_c momenti	26
Şekil 4.4 Kolun açısız yer değiştirmesine bağlı olarak izleyicinin ötelenmesi	27
Şekil 4.5 Nokta uçlu izleyici için yürek profili.....	28
Şekil 4.6 Kolun açısız yer değiştirmesine bağlı olarak basınç açısındaki değişim.....	29
Şekil 4.7 Kolun yerçekimi momenti ile yayın momentinin karşılaştırılması	30
Şekil 4.8 (a)İzleyicinin yolu, basınç açısı ve momentler (b)Kam profili	31
Şekil 4.9 (a)İzleyicinin yolu, basınç açısı ve momentler (b)Kam profili	32
Şekil 4.10 (a)İzleyicinin yolu, basınç açısı ve momentler (b)Kam profili	33
Şekil 4.11 Yerçekimi Dengeleme Mekanizması (YDM)	34
Şekil 4.12 YDM'nin robot kola uygulanması	37
Şekil 4.13 Yerçekimi dengelemede alternatif yöntem	40

SİMGELER DİZİNİ

τ	:	Eyleyici torku
θ	:	Ön/arka kolun düşeyle yaptığı açı
$G(\theta)$:	Yerçekimi kuvveti
$V(\theta)$:	Sistemin potansiyel enerjisi
k	:	Helisel yayın yay katsayısı
s	:	İzleyicinin yer değiştirmesi
m	:	Ön/arka kolun kütlesi
g	:	Yerçekimi ivmesi
l	:	Kütle merkezinin uzaklığı
R	:	Taban dairesi yarıçapı
r_t	:	Toparlak dairesi yarıçapı
τ_1	:	Arka kolun torku
τ_2	:	Ön kolun torku

KISALTMALAR DİZİNİ

SD	:	Serbestlik Derecesi
R	:	Revolve – Dönme hareketi
P	:	Prismatic – Öteleme hareketi
YDM	:	Yerçekimi Dengeleme Mekanizması

GENEL TANIMI İLE ROBOT

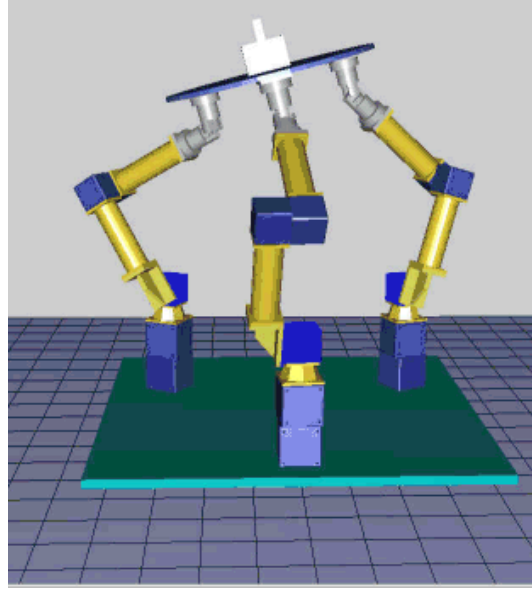
1.1.Genel Bilgiler

En geniş tanımı ile robot; bir takım görevleri yerine getirmek için değişik programlarla tekrar tekrar programlanabilen özel cihazları, aletleri, malzemeleri veya parçaları hareket ettirmek üzere tasarlanmış çok görevli bir manipülâtör olarak tanımlanabilir. Burada bahsi geçen maniple etmek terimi bir kimsenin elini (manu=el) kullanarak nesnelere hareket ettirmesinden gelir ve bu işlemi yerine getiren mekanik sistemlere manipülâtör denir. Bu çalışma boyunca robot terimi ile yukarıda tanımı verilen manipülâtörler kastedilecektir.

Manipülâtörlerde her bir uzuv dönme (R – revolve) veya öteleme (P – prismatic) hareketi yapabilen mafsallarla birbirine bağlanmıştır. Bu bağlanma şekillerine göre manipülâtörler seri veya paralel olarak ele alınabilir (Şekil 1.1). Seri manipülâtörlerde; uç eleman hariç her bir uzuv kendinden önce gelen uzuvla bir mafsal vasıtasıyla bağlıdır ve seri bağlı olmanın doğası gereği bu tür robot kollar her ne kadar sağlam mafsallanmış olsa da konum isabeti düşük, yük taşıma kabiliyetleri azdır. Ayrıca her uzuv bir tahrik elemanınca tahrik edilmelidir.



(a) Seri manipülâtör



(b) Paralel manipülâtör

Şekil 1.1 Bağlanma şekillerine göre manipülâtörler

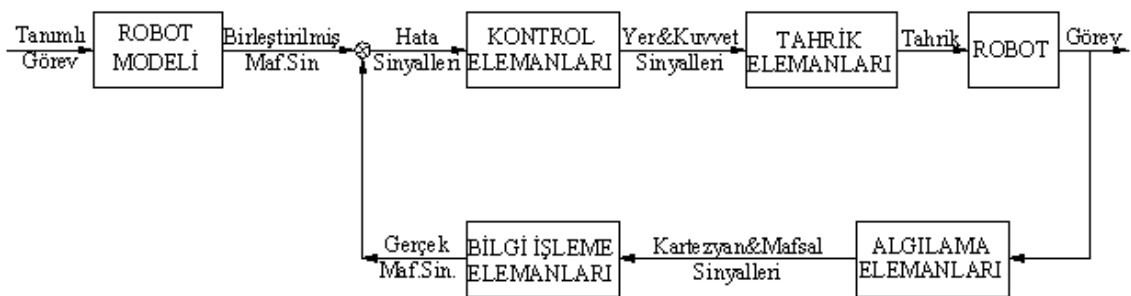
Bu mahsurlar paralel manipülatörlerde bertaraf edilmiştir. Bu tür manipülatörlerde her uzvun tahrik edilmesi gerekmez. Uzuvlar temel tabla ile hareketli tablalar arasına bacaklar gibi yerleştirilmiştir. Paralel manipülatörler seri manipülatörlere oranla daha fazla yükü daha az kütleyle ve daha yüksek isabetle taşırlar. Ancak paralel manipülatörlerin çalışma alanının kısıtlı olması gibi bir mahsuru vardır. Bu yüzden genellikle uçuş similatörleri, yüksek tekrarlanabilirlik, yüksek isabet ve yüksek hassasiyet gerektiren bilimsel çalışmalar gibi alanlarda kullanılmaktadırlar.

Bu arada kablo veya bir radyo sinyali ile uzaktan kumanda edilen benzer elemanlara sahip olduğu için dış görünümü ile robota benzeyen ama programlanamayan telekolların robot olmadığını hatırlatmak gerekir.

Manipülatörler birkaç alt sistemin birleşmesinden oluşur. Bu alt sistemler ana başlıklarıyla;

- Rijid ve rijid olmayan gövde elemanları
- Algılama elemanları
- Tahrik elemanları
- Kontrol elemanları
- Bilgi işleme elemanları

olarak sıralanabilir (Şekil 1.2). Ayrıca bu alt sistemler temel olarak bir ortamdan diğerine aktarılan bilginin işlenebilir hale gelmesini sağlayan arayüzler vasıtasıyla birbirleri ile haberleşirler. (Angeles,2003)



Şekil 1.2 Robotik sistemlerin genel blok diyagramı

1.2.Sınıflandırma

Aslında literatürde bu alanda çalışanlar tarafından üzerinde hemfikir olunmuş bir standardizasyon henüz sağlanamamıştır. Robotlar kontrol sistemlerine, kol geometrilerine, işletim yöntemine vb. göre sınıflandırılabilir.

Kontrol sistemlerine göre robot kollar servo motorlu, motorlu (non-servo) şeklinde sınıflandırılabilir. Servo motorlu olmayan sistemler de döngü kapanmaz. İlk robotlar genellikle bu sınıftan olup hareketleri mekanik durdurucularla kontrol edilirdi. Servo motorlu sistemler de uç elemanın yaptığı harekete göre tekrar bir sınıflandırmaya gidilir. Bu sınıftaki en basit robot **noktadan noktaya** robottur. Genellikle bir pendant aracılığı ile takip edilecek yola ait bir noktalar grubu uç elemana öğretilir ve bu noktalar arasında kalan yol boyunca kontrol yapılmaz. Bu tür robotların kullanım alanları sınırlıdır. **Sürekli yol** robotlarında uç eleman iki nokta arasında kalan düz bir hattı veya bir kenar hattını mesela bir kaynak dikişini izleyebilir. Ayrıca yol boyunca hız ve(ya) ivme kontrolü de yapılabilir.

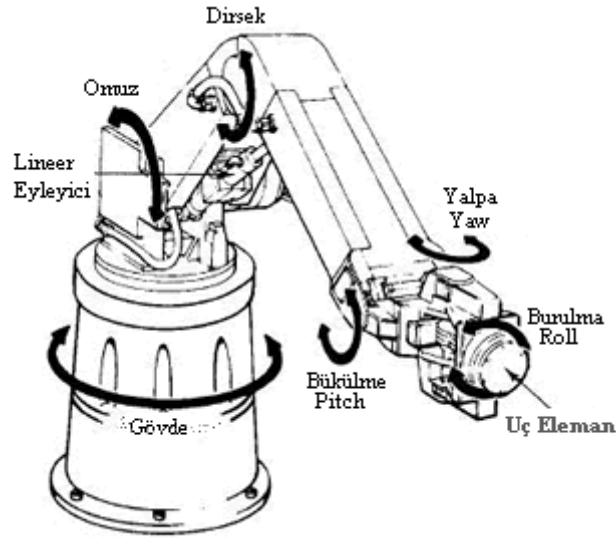
Yine diğer bir sınıflandırma da kullanılan kontrol tekniğine göre yapılabilir. Kontrol tekniğine göre robotlar: Adaptif olmayan robotlar, adaptif robotlar ve akıllı robotlardır. Akıllı robotlarda, adaptif robotlarda bulunan sensör donanımına ek olarak geniş bir bellek ve çevrenin ayrıntılı bir modeli bulunmaktadır.

Günümüzde pek çok manipülatör altı veya daha az serbestlik derecesine sahiptir ve bu manipülatörler genel olarak ilk üç mafsalsının hareket türüne göre; eklemlili (RRR), küresel (RRP), SCARA (RRP), silindirik (RPP) veya kartezyan (PPP) olarak da sınıflandırılır.

1.3.Serbestlik derecesi (SD)

Bir mekanizmada bulunan tüm uzuvların konumunu belirlemek için gerekli olan parametre sayısı olarak tanımlayabileceğimiz Serbestlik Derecesi – SD (Degree of Freedom – DOF) bir robotun iş görebilme kabiliyetinin en önemli göstergesi olup genel bir tanımla robotun eksen sayısıdır. Rijid bir cisim, üç boyutlu uzayda üçü konum, üçü yönlenme olmak üzere toplam 6 serbestlik derecesine sahiptir. Bu yüzden geniş bir çalışma uzayına sahip olması istenen bir robot kolun en az 6 serbestlik dereceli olması beklenir. Serbestlik derecesi altıdan az olan kolların çalışma uzayı daralır ve çalışma alanı içinde her noktaya ulaşamazlar.

Eğer manipülâtörün kontrol edilen mafsâl sayıısı 6'dan fazla ise bu tür robotlara çok eksenli (redundant) robotlar denir. Bu tür robotlarda ana problem uç elemanın yapması istenen hareket için ihtiyaç duyulandan fazla mafsâlin olmasıdır. Bu durum ters kinematik çözüm yapılırken sonsuz yörünge sayısına neden olur. Fazla eksenli robotlar gelişme sürecinde olup sanayide en çok karşılaşılan robot türleri en fazla 6 serbestlik dereceli uçuş similatörleri, yürüyen robotlar, mekanik kollar vb.dir. (Potkonjak ve Krstulović, 1992)



Şekil 1.2 Altı Serbestlik Dereceli mafsallı robot

1.4.Tahrik Sistemleri

Robotlar elektrikli, hidrolik veya pnömatik motorlar veya eyleyiciler (actuator) tarafından sürülür. Aktuator veya hareketlendirici veya eyleyici mekanizmayı harekete geçiren bileşendir ve mekanizmanın türüne göre elektrik motoru, motor, selenoid valf, hidrolik veya pnömatik silindirler bu görevi üstlenebilir. Zemine monte edilen manipülâtörlerde en yaygın kullanılan eyleyiciler, elektrikli motorlardır. Genellikle DC veya AC servo motorlar ucuz, temiz ve sessiz olmaları nedeniyle tercih edilir. Hidrolik eyleyiciler cevap hızları ve tork üretme kabiliyetleri bakımından rakipsizdir. Bu yüzden ağır iş grubu kaldırıncılar için uygundur. Hidrolik akışkanın sızıntıya meyyal oluşu, sürekli bakım gerektirmesi ve gürültülü olması gibi sakıncaları vardır. Pnömatik (havalı) robotlar ucuzdur ve karmaşık değillerdir ancak hassas olarak kontrol edilmeleri

zordur. Bazı hidrolik ve elektrikli motorlu robotlar pnömatik ekipmanlar veya uç elemanlar içerebilir.

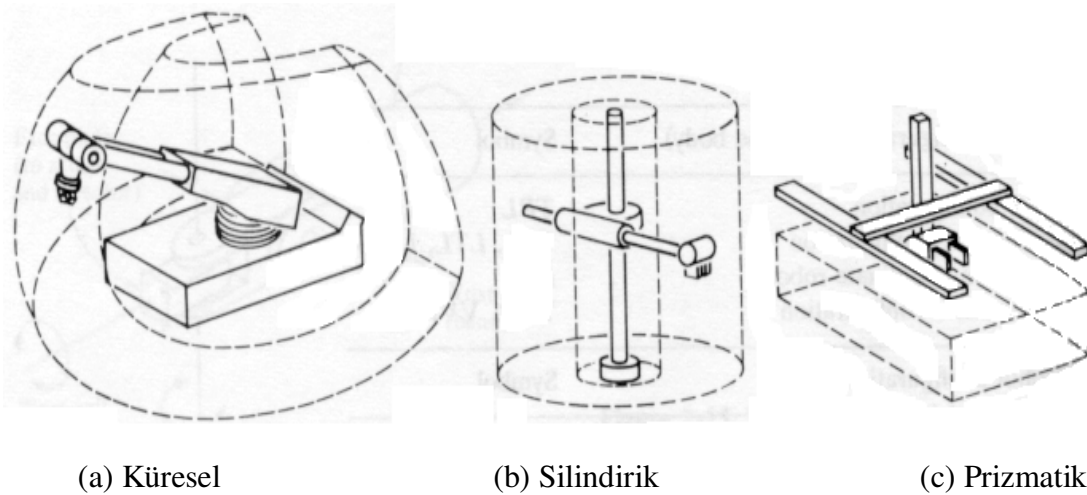
Ağır iş grubu endüstriyel robotların pek çoğu yere monte edilir ve bu tür robotlarda ana eksenler elektrikli motorlarla tahrik edilir, kontrol için bilgisayar kullanılır. Bir tezgah üzerine yerleştirilen hafif iş grubu montaj robotları veya topla-tak robotlar genellikle elektromekaniksel röleler, pnömatik motorlar üzerinde mekanik stoperlerle programlanırlar.

1.5.Robot Anatomisi

Bir robot gövde, kol ve bilekten oluşur. Robot kollarının gövdesi sağlam bir zemine sıkıca tespit edilmiştir. Kol, gövdeye; bilek mekanizması ise kolun ucuna bağlı olur. Bilek, robot kolun yerini ve yönlenmesini belirleyen bileşendir. Gövde, kol ve bilek arasındaki bağlantı kayar veya döner mafsallarla sağlanmıştır. Gövde, kol ve bileğin tamamına manipülatör denir. Robotun bileğine bağlı olan mekanizma robotun elidir. El, robot kolu anatomisine dahil edilmez. Manipülatörün gövde ve kol bağlantıları elin yerinin, bilek bağlantısı ise yönlenmesinin tespitinde kullanılır (Groover, 1992).

1.6.Robot Kolun Çalışma Alanı

Çalışma alanı manipülatörün bileğinin uzayda erişebileceği noktaların tamamından oluşan alana denir. Bileğe bağlanacak uç elemanı temel robota bir ilâvedir ve çalışma alanı belirlenirken dikkate alınmaz. Çalışma alanını robotun konfigürasyonu, kol ve



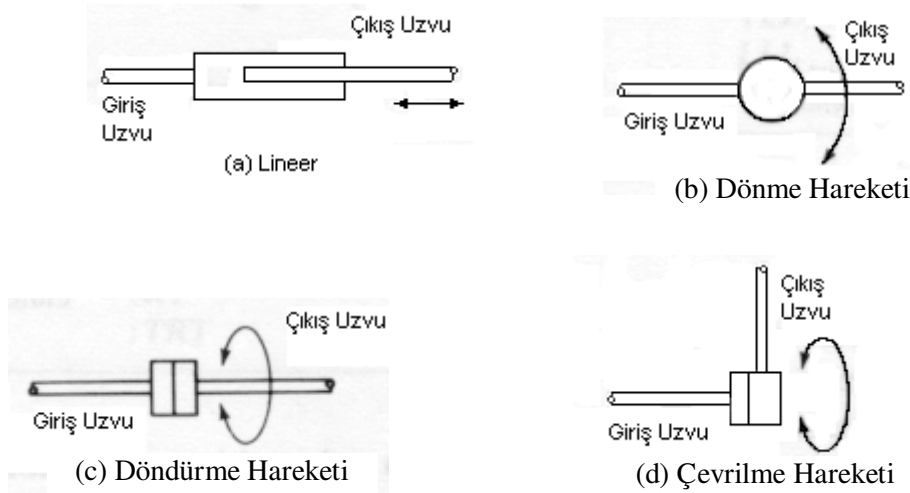
Şekil 1.3 Robot kollarının çalışma alanı [Groover,1992]

bileğin ölçüleri ve mafsalların hareket sınırları gibi parametreler belirler. Şekilde üç koordinat sistemine göre kolların çalışma alanı verilmiştir. (Koivo, 1989)

1.7.Robot Kolun Hareketleri

Robot kollar genellikle üretim işlerini yapmak üzere tasarlanırlar. Bu işleri gövde, kol ve bileğin hareketleri ile sağlarlar. Robotun hareketleri kolun hareketleri ve bileğin hareketleri olarak genel iki bölüme ayrılabilir.

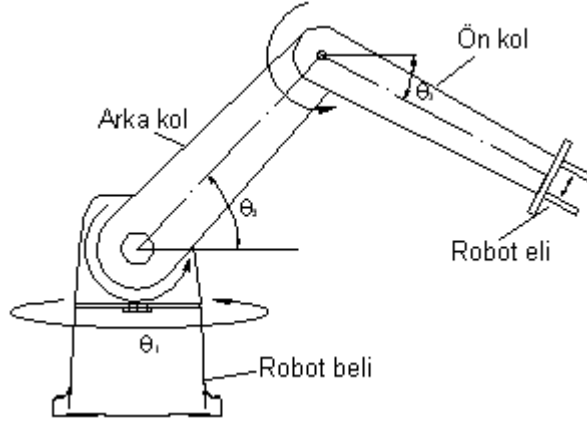
Mafsallar genel olarak iki hareket yaparlar. Bunlardan ilki öteleme hareketidir. Bu tür mafsallara prizmatik (P) mafsalları denir ve bu mafsallar kendilerine bağlı uzuvlara kaydırarak veya öteleyerek lineer hareket yaptırırlar. Lineer hareket değişik şekillerde elde edilir. Örneğin bir piston ile bir teleskopik mekanizma ile veya bir ray boyunca öteleme ile relatif hareket sağlanabilir. Bu mafsallara lineer mafsallar da denir.



Şekil 1.4 Robotlarda kullanılan mafsalları tipleri

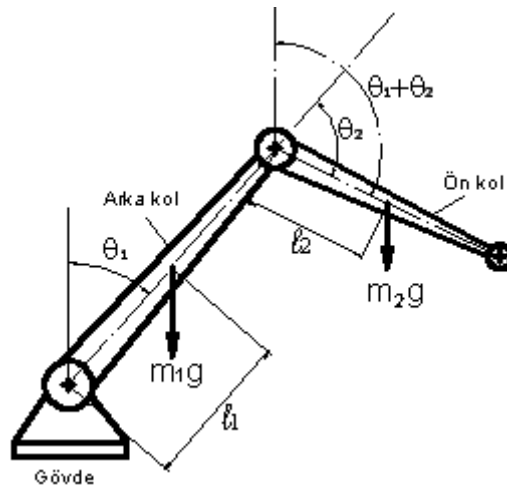
Mafsalların yapabildiği bir diğer hareket dönme (R-revolve) dir. Bir mafsalları en az üç değişik dönme hareketi yapabilir. Bunlardan biri iki bağlı uzvun eksenlerine dik dönme hareketidir. Buna dönme (rotational) (D) hareketi denir. Diğerinde dönme eksenini ile uzuvların eksenini paraleldir ve bu harekete kıvrılma(K) (twisting) denir. Sonuncu da ise dönmenin eksenini giriş uzvuna paralel, çıkış uzvunun eksenine diktir ve buna çevrilme (Ç) (revolving) denir.

1.8.Üç Serbestlik Dereceli RRR Robot Kolda Ağırlık Kuvvetleri



Şekil 1.5 Üç serbestlik dereceli robot kolu

Şekilde elin serbestlik derecesi ihmal edildiğinde 3 serbestlik dereceli iki uzuvlu bir robot kol görülmektedir. Burada θ_1 dik ekseninde robot belinin dönme açısı, θ_2 birinci eksene dik, robotun arka kolunun dönme açısı, θ_3 ise ikinci eksenle aynı doğrultuda robot ön kolunun dönme açısıdır. Bu her üç dönmeyi sağlamak üzere sistemde üç adet eyleyici vardır. Robot boşta iken bu eyleyicilerin dönme sırasında karşılaştıkları tek kuvvet kolların ağırlıklarından kaynaklanan yerçekimi kuvvetleridir. Robot kollarının taşınması planlanan yüklere göre belli bir dayanımda olmaları gerektiğinden bu yükler eyleyicilerin çok büyük torklarda seçilmesine neden olabilir. Birinci eksen dik olduğundan yerçekimi yükü oluşturmaz. Eyleyicinin torkuna sebep olan robotun arka ve ön kollarının ağırlıklarıdır. Şekil, robot belinin dönme açısını ihmal edecek ve yerçekimi kuvvetlerini gösterecek şekilde Şekil 1.6'da yeniden düzenlenmiştir.



Şekil 1.6 Robot kolda ağırlık kuvvetleri

Şekilde arka kolun kütlesi m_1 olup kütle merkezinin dönme eksenine uzaklığı l_1 dir. Kolun bütün kütesinin homojen dağıldığı ve kütle merkezinin kol boyunun yarısından etkidiği kabul edilmektedir. Benzer şekilde ön kolun kütlesi m_2 ve kütle merkezinin dönme eksenine uzaklığı l_2 dir. Arka kolu döndürmeye çalışan eyleyicinin aynı zamanda ön kolun kütesinden doğan torku yenmesi de gerektiğinden öncelikle ön kolun torku yazılırsa;

$$\tau_2 = l_2 \cdot m_2 \cdot g \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

olacaktır. Arka kolun torku; ön kolun ağırlığı $2 \cdot l_1$ uzaklığından etki edeceğinden bu kütlelen meydana gelen tork ve kendi ağırlığından oluşan torkun toplamı olup;

$$\tau_1 = l_1 \cdot m_1 \cdot g \cdot \sin \theta_1 + 2 \cdot l_1 \cdot m_2 \cdot g \cdot \sin \theta_1$$

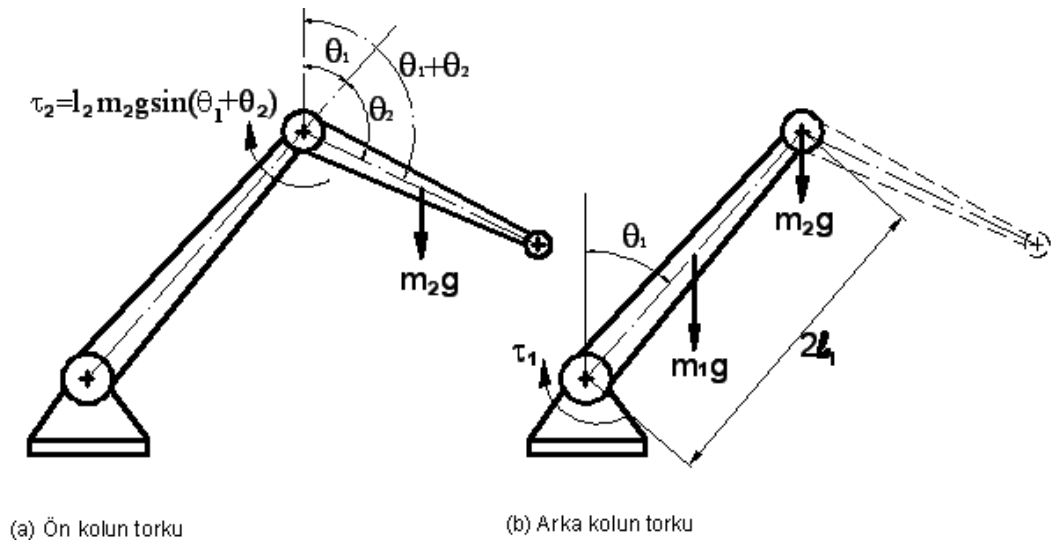
$$\tau_1 = l_1 \cdot g \cdot \sin \theta_1 (m_1 + 2m_2)$$

Ağırlık kuvvetlerinden oluşan toplam tork bu iki torkun toplamı olup

$$\tau = \tau_1 + \tau_2$$

$$\tau = l_1 \cdot g \cdot (m_1 + 2m_2) \cdot \sin \theta_1 + l_2 \cdot g \cdot m_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (1)$$

şeklinde dir. Şekil 1.7’de oluşan torklar ve bu torkların oluşmasına neden olan yerçekimi kuvvetleri gösterilmiştir. (1) formülü ile bulunan değer dengeleme mekanizmasının konusu olup önerilen mekanizma θ_1 ve θ_2 açısı değıştikçe değışen tork değerlerini karşılayabilmelidir.



Şekil 1.7 Ön ve arka kollara etkiyen yerçekimi kuvvetleri ve oluşan torklar

ROBOT KOLLARINDA YERÇEKİMİ KUVVETİNİN DENGELENMESİ

Endüstriyel robotlar ve manipülatörler dikey düzlemde hareket eden, göreceli olarak düşük hızlarla çalışan, büyük kütleli mekanik sistemlerdir. Bu tür sistemlerde tahrik sistemlerinin üstesinden gelmesi gereken dirençlerin başında ağırlık kuvvetleri gelir. Ağırlık kuvvetlerinin dengelenmesi sorunu, robot kollarının programlandığı işi isabetle yapabilmesi açısından büyük önem taşır. Ağırlık kuvvetlerinin dengelenmesi için genellikle fazladan tahrik gücü gerekir. Yataklanmalardan ileri gelen sürtünme kuvvetleri göreceli hareket olduğundan dengelemede ihmal edilebilir.

Seri manipülatörler yerçekimi nedeniyle oluşan yükleri dengelemek için fazladan eyleyici torkuna yani enerjiye ihtiyaç duyarlar. Seri bağlamanın geometrisi gereğince mafsallara gelen ağırlık kuvvetleri fazladır ve robot kolun gövdesine yerleştirilen eyleyicinin ürettiği torkun yarısından fazlası yerçekiminden kaynaklanan kuvvetleri yenmek için harcanır. Bu durum statik tasarımı etkilediği gibi dış kuvvetlere mukavemeti azaltır ve gücün önemli bir kısmının yerçekimi kuvvetlerini dengelemeye harcanmasına neden olur. (Ulrich ve Kumar,1991)

2.1.Yerçekimi Kuvvetlerini Dengelenme Yöntemleri

Robot kolların dengelenmesinde aktif dengeleme yöntemleri ve pasif dengeleme yöntemleri olarak iki temel yaklaşım mevcuttur.

2.1.1. Aktif dengeleme yöntemleri

Aktif dengeleme yöntemlerinde yerçekimi kuvvetlerini yenmek için karşı eylem yapmak esastır. Bunu temin etmek için ya manipülatörün ebatlarını, kütlelerini ve karmaşıklığını artırmayı göze alarak sisteme karşı eyleyiciler eklenir. Ya da robot kolun ilk mafsalında yer alan eyleyicinin torku kullanılarak yerçekimi yükleri karşılanmaya çalışılır. Her iki halde de enerji sarfiyatı artırılmış olur.

Aktif dengelemede son yıllarda üzerinde en çok araştırma yapılan yöntemlerden biri de PD veya PID kontrollü dengelemedir. PD (Proportional- Derivative / Oransal - Türevsel) veya PID (Proportional – Integral – Derivative / Oransal – İntegral –

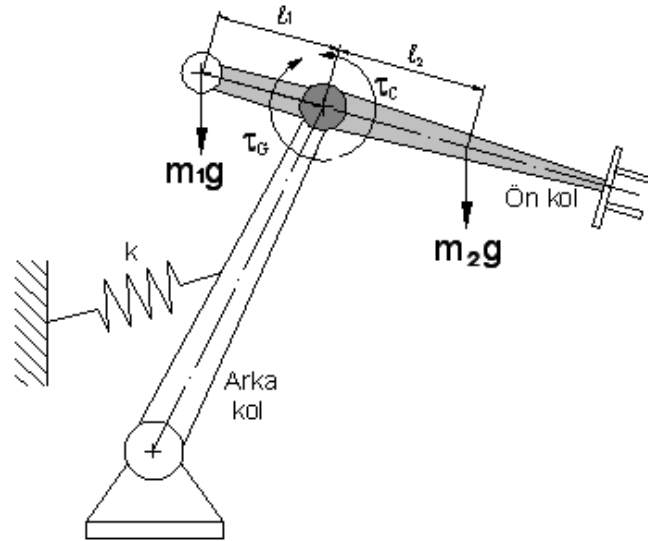
Türevsel) kontrolde kontrol elemanları, robot kolun statik haldeki yerçekimi yüklerini başlangıç değeri olarak alır ve robotun tüm çalışması boyunca oransal ve türevsel olarak bu değeri dengede tutmaya çalışır (Takegaki ve Arimoto,1981). Bu yöntem robotun değişik kütle ve ataletle sahip parçalarla çalışması gerektiğinde yetersiz kalabilir.

2.1.2. Pasif dengeleme yöntemleri

Pasif dengeleme yöntemlerinde en sık uygulanan yöntemlerin başında karşı ağırlık eklemek gelir. Bu yöntemde mafsalsal eksen ile çakışan uzvun kütle merkezine ilave ağırlık eklenir. Karşı ağırlık genellikle çelikten veya dökme demirden yapılır. Bu ağırlıklar artırılarak veya azaltılarak sistem dengelenmeye çalışılır. Bu yolla enerji daha etkin kullanıldığı gibi hareketin düzgünlüğü de sağlanır. Ancak diğer taraftan robot kolun kütlesi, sistemin ataleti ve hacmi büyür. Şekil 2.1’de örnek olarak verilen robot kolun ön kolunda karşı ağırlık kullanılmıştır. Ön kolun ve uç elemanın kütlelerinin robot ön kolun orta noktasından m_2 büyüklüğünde etki ettiği kabul edilirse mafsala etkiyen moment;

$$\tau_G = l_2 \cdot m_2 \cdot g$$

olur.

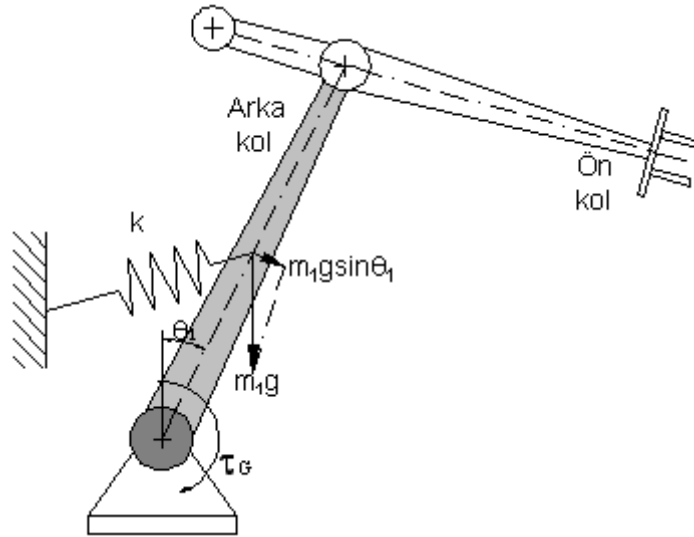


Şekil 2.1 Pasif dengelemede karşı ağırlık kullanımı

Bu momenti dengelemek için ön kolun ekseninde ve zıt yönlü moment uygulayacak şekilde karşı ağırlık konur. Robot kolun çalışma alanını etkilememesi için

kol boyu mümkün olduğunca kısa seçilir. Kol boyu kısaldığından karşı ağırlığın kütlesi ön kolun kütlesinden daha büyük olur. Karşı ağırlıktan doğan $\tau_C = l_1 \cdot m_1 \cdot g$ momenti τ_G ile aynı büyüklükte ve zıt yönlüdür.

Bir diğer pasif dengeleme yöntemi ise robot kolları ile robot gövdesi arasında dengeleme yaylarının kullanılmasıdır. Genellikle helisel olan yaylar kullanılarak yapılan pasif dengelemede, yerçekiminden doğan potansiyel enerji yayların gerilme enerjisi ile dengelenir. Bu yöntemde kütle, atalet ve karmaşıklık çok az artarken asıl sorun, mafsallar üzerindeki lineer olmayan yerçekimi kuvvetlerinin tam olarak nasıl karşılanacağıdır. Ancak uygun bir yay elemanının yerleştirilmesi sağlanırsa kontrol kolaylaşır, ısı artışı azalır, eyleyici torkunun fazladan artmasına gerek kalmaz, enerji sarfiyatında artış olmaz ve dinamik performans artar.

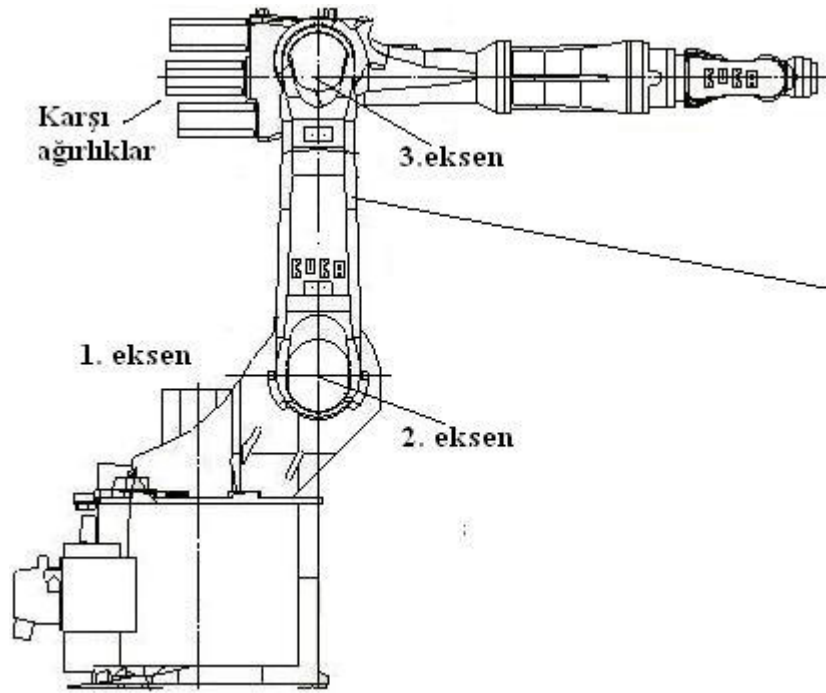


Şekil 2.2 Robot arka kolun yay ile dengelenmesi

Şekil 2.2’de görülen manipülatörde arka kol ağırlığının etkisi ile saat yönünde dönme eğilimindedir. Saat yönüne ters etki edecek şekilde arka kola bağlanan uygun k katsayılı bir yay, kolun ağırlığından doğan bu enerjiyi potansiyel enerji olarak üzerinde depolar ve robot kol ters yöne hareket ettiğinde üzerinde depolanmış potansiyel enerjiyi geri vererek eyleyicinin fazla bir enerji harcamadan görevini yerine getirmesine yardım eder. Buradaki temel sorun yerçekimi kuvvetlerinin lineer olmayışına karşılık yayın bu nonlineer duruma uygun olmayışdır.

Yaylar kullanılarak yapılan dengelemenin bazı avantajları vardır. Birincisi mekaniksel olarak basit ve pasif olması üretim ve bakımının kolay ve sürdürülebilir olmasını sağlar. İkincisi özellikle statik konumlarda fazladan güç istemediğinden enerjiden tasarruf sağlar ve sistemin güç talebini önemli ölçüde azaltır. Bir diğer avantajı bu metot ile uzuvların kütlesi ve ataleti önemli ölçüde azalır. Basit mekanik elemanlarla değişik kol tasarımlarını gerçekleştirmek mümkün olabilir.

Bu avantajlarının yanı sıra yayların yetersiz kaldığı veya hiç kullanılmadığı durumlarda vardır. Kollar ile robot gövdesi arasında yayların yerleştirilmesinin bir sonucu olarak çalışma uzayı daralır. Eğer kollardan birinin tam dönmesi isteniyorsa yaylar kararsızlık problemi doğururlar ve kullanılamazlar. Öte yandan dengeleme yayları ile değişken taşıma yüklerinin dengelenmesi ya hiç gerçekleşemez veya karmaşık ilave düzeneklere ihtiyaç duyarlar. (Koser, 2001)

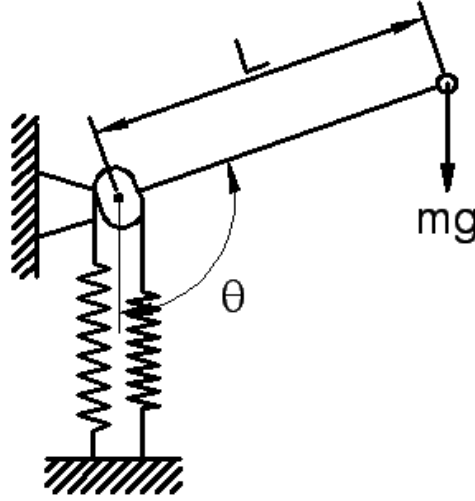


Şekil 2.3 KUKA KR 16 L6 robot kolu (3 DOF)

Şekil 2.3'de endüstride kullanılan bir KUKA robot ve dengeleme karşı ağırlıkları gösterilmiştir.

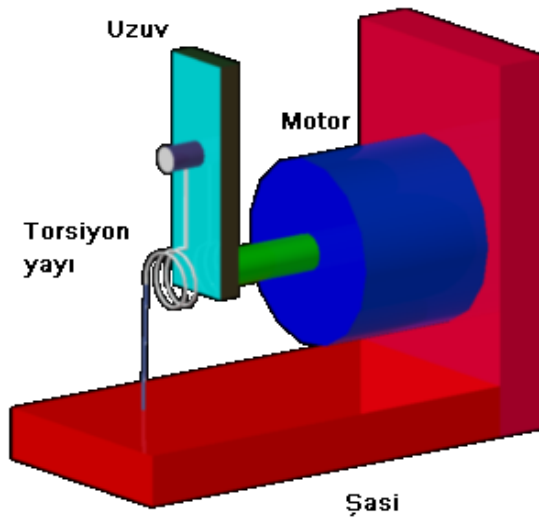
2.2.Literatürde Dengeleme Çalışmaları

Ulrich ve Kumar (1991) yay, kablo ve uygun profilli bir kasnak kullanarak sürekli bir dengeleme önermişlerdir.(Şekil 2.4) Önerdikleri bu yöntem için hem tek uzuvlu hem de çift uzuvlu bir robot kol test tezgâhı tasarlamışlar ve hesaplama sonuçları ile ölçüm sonuçlarını karşılaştırmışlardır.



Şekil 2.4 Kablo/makara/yaydan oluşan dengeleme metodu (Ulrich ve Kumar,1991)

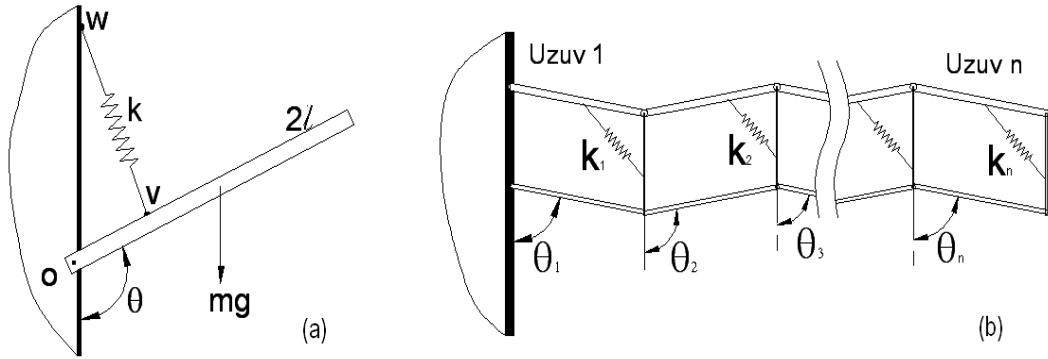
Gopalswamy ve arkadaşları (1992) hemen hemen tüm eklemlili tip robot kollarında ters yönlü etkiler oluşturan yerçekimi kuvvetlerini yenmek için torsiyon yayları kullanan bir model önermişlerdir.



Şekil 2.5 Tek uzuvlu torsiyon yayı uygulanmış model (Gopalswamy ve ark,1992)

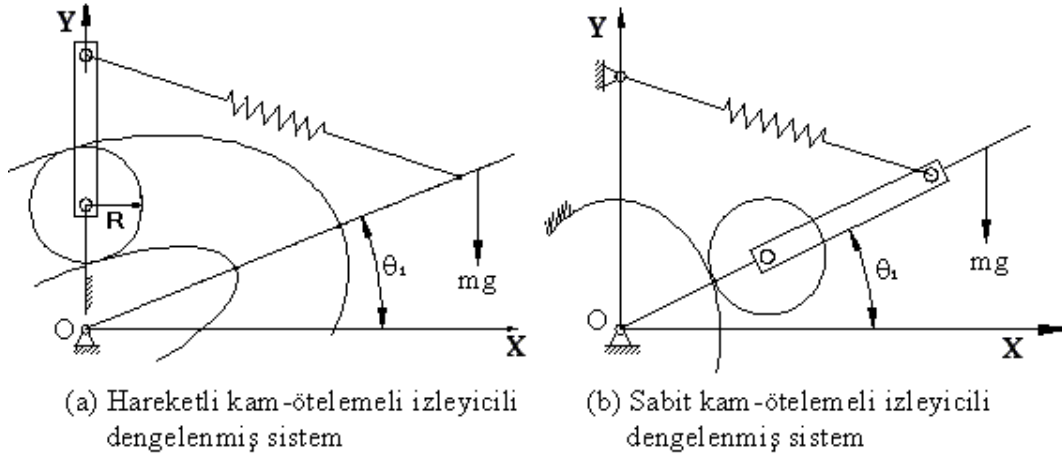
Çalışmalarında dikey düzlemde çalışan 2 serbestlik dereceli eklemli bir robot kol için torsiyon yayları ile dengelenmiş paralelogram bir manipülatörün düşük eyleyici torkları ile çalıştığını ve kolun her eklemde istenilen emniyetli çalışmanın sağlandığını göstermeyi amaçlamışlardır. Ayrıca bu çalışma ile emniyet freni ihtiyacının ortadan kalktığını, geleneksel paralelogram kollara oranla çalışma alanının arttığını ve kolların modüler olabileceğini göstermişlerdir. (Şekil 2.5)

Rahman ve arkadaşları (1995) yerçekimi kuvvetlerini yenmek için insan kaslarını örnekleyen yay, makara ve teller kullanan tasarımlar (Şekil 2.6) yapmış ve böylece kol mobilitesinde önemli bir etken olan eyleyici ebatlarını büyütmeden yeterli torku üretmesini hedeflemişlerdir. Geliştirdikleri bu tasarımla özellikle bir sebeple kas gücü körelmiş ama tamamen kaybolmamış hastaların faydalanmalarını amaçlamışlardır.

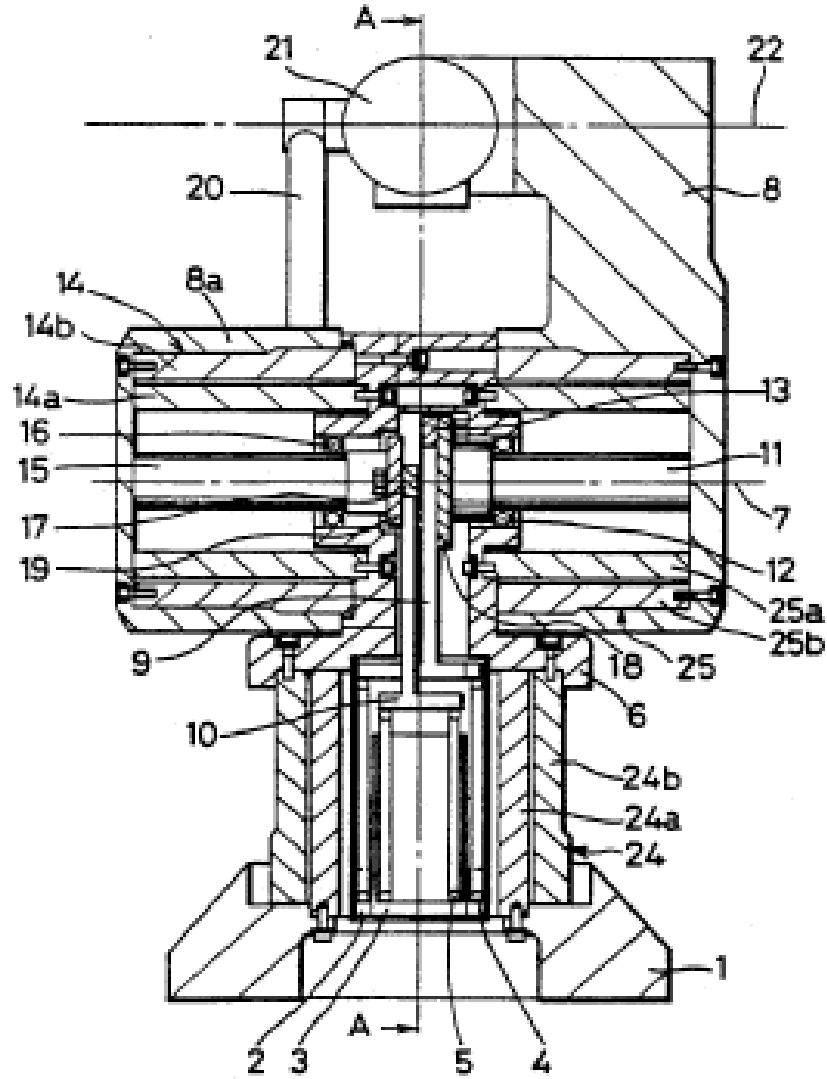


Şekil 2.6 (a) Tek uzuvlu (b) Çok uzuvlu helisel yaylarla dengeleme metodu (Rahman ve Ark,1995)

Simionescu ve Ciuputi (2000) helisel yayların elastik kuvvetlerini kullanarak robot kolların ağırlık kuvvetlerini dengelemek için birkaç mekanizma önermişlerdir. Yüksek kinematik çiftler içeren bu mekanizmaların, robot kolun tüm çalışma alanı içerisinde yerçekimi kuvvetlerini dengelediğini göstermişlerdir.



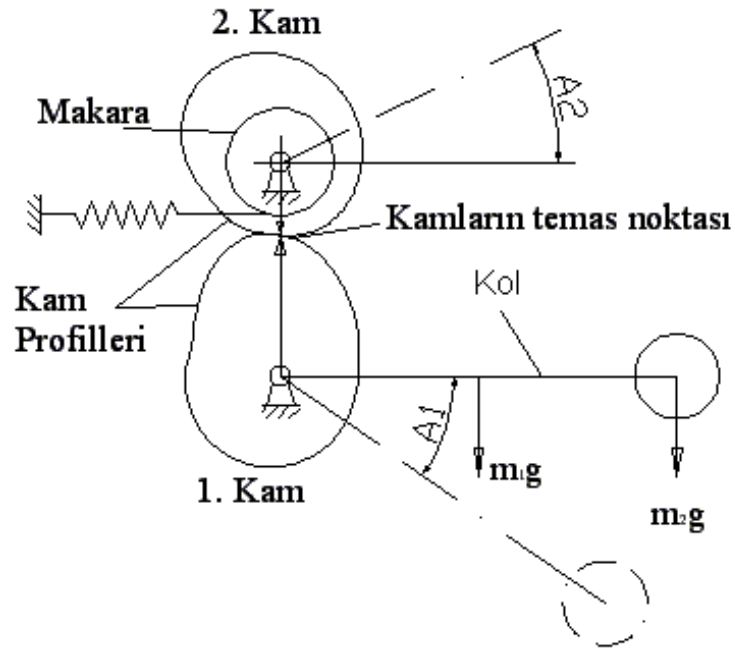
Şekil 2.7 Simionescu ve Ciuputi'nin çalışmalarından iki örnek



Şekil 2.8 İki uzuvlu kam mekanizması ile dengeleme (Umeda,1992)

Umeda (1992) yerçekimi yönünde dönen üst ve alt kolu eklemlili tip bir robot kolun yerçekimi kuvvetlerini dengeleyen kam mekanizması için patent almıştır. Şekil 2.8’de teknik resmi görülen bu çalışmada Umeda robot kolun alt kolunu dengelemek üzere bir kam, bir yay, bir takipçi ve yine üst kolu dengelemek için bir kam, bir yay, bir takipçi içeren mekanizmasını robot kolun gövdesinin içine yerleştirerek üst kolun hareketini bir paralelogram ile iletmiştir.

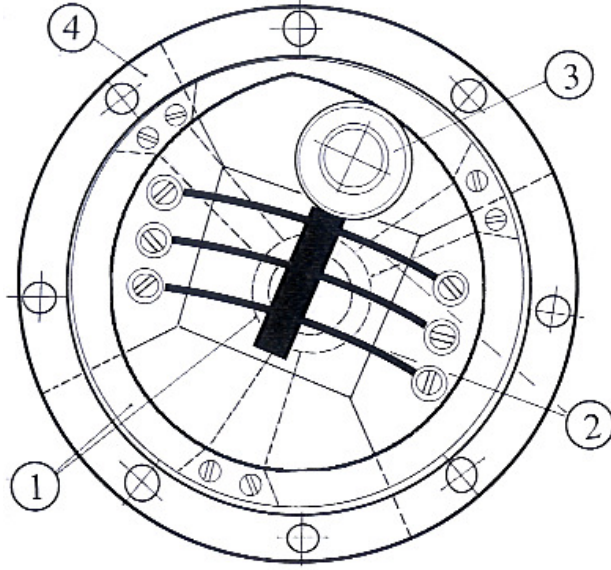
Chow ve Shi 2005 yılında patentini aldıkları çalışmalarında izleyici mekanizması kullanmaksızın kam profilleri yardımıyla yay elemanı sistemi dengelemekte kullanmayı amaçlamışlardır. Bu çalışmalarında önerdikleri mekanizmalardan biri Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Bu mekanizmada kolun A_1 açısı kadar döndürülmesi ile kolun bağlı olduğu kam dönmekte, kam profillerinin temas noktalarından 2. kam A_2 açısı kadar dönmekte, 2. kamın üzerine sabitlenmiş olan makara yardımıyla yay dengelemeyi sağlamaktadır.



Şekil 2.9 İki kam içeren dengeleme mekanizması (Chow ve Shi, 2005)

Koser (2001) robot kolları için yeni bir yaklaşım olan kam mekanizmaları ile yerçekimi kuvvetlerinin dengelemesini amaçlayan bir model tasarlamıştır (Şekil 2.10). Bu modelde iç yürek (1) sabit platforma (4) döner yataklanmıştır. Ana dengeleme yayı (2) sabit platform üzerine döner mafsallanmıştır. İzleyici ve toparlak (3) sabit platforma kayar yataklanmıştır. Mekanizmanın çalışma prensibi şöyledir: Ağırlık kuvvetleri dengelenecek olan robotun arka ve ön kolu şasiye döner yataklanmış iç yüreğin miline

ilave bir düzenele bağlanır ve böylece yürek dönen robot kollarının hareketini bire bir olarak alır. Robotun kolları, çalışma uzayı içerisinde hareket ederken iç yürek eşzamanlı olarak döner ve şasiye kayar yataklanmış izleyici, iç yüreğin özel olarak şekillendirilmiş profilini takip eder. Bunun sonucunda izleyici ile temas halindeki ana dengeleme yayı eğilme deformasyonuna uğrar. Bu deformasyon sonucunda oluşan aktif elastik kuvvetler dönen yüreğin mili üzerinde robotun kollarının ağırlık kuvvetine ters yönde ve tam olarak eşdeğer momentler oluştururlar. Bu düzenele mekanizmanın pasif ağırlık dengeleme ünitesidir.



Şekil 2.10 Ağırlık dengeleme mekanizması (Koser,2001)

KAM MEKANİZMALARI GENEL BİLGİLER

Yapısında en az bir kam çifti olan mekanizmaya kam mekanizması denir. Bir kam, bir takipçi ve bu elemanların ayrı ayrı bağlandığı şasiden oluşan bir kam çifti; elemanları arasında yüzeyel temas olan düşük kinematik çiftlerin tersine, kinematik elemanları arasında nokta veya çizgi teması olan, iki serbestlik derecesine sahip yüksek kinematik çifttir. Kam genellikle eğri bir profile sahiptir ve basit bir şekle sahip olan takipçi, kamın bu eğri yüzeyi ile temas halindedir. Pek çok kam mekanizmasında hareket kamdan takipçiye aktarılır ve bu yön pozitif yön kabul edilir. Bazen takipçi kama hareket iletecek şekilde tasarlanabilir ki bu yön de negatif yön kabul edilir.

Kam mekanizmaları yaygın olarak seri dönüşlü, sıralı hareket uygulamalarında kullanılır. Seri dönüş mekanizmaları geniş ölçüde metal kesme, metal şekillendirme, topla-tak, malzeme indir-bindir gibi üretim süreçlerinde kullanılır. Bu mekanizmalar yeni yeni hız düşürme amacıyla da kullanılmaktadır. Geleneksel kam-takipçi mekanizmaları robotikte ve genel makinecilikte hareket üretmek ve pozisyonlama sağlamak için kullanılmaktadır.

3.1. Avantajları ve Dezavantajları

- Her türlü hareketin elde edilebilmesi mümkün olduğundan tasarımı diğer mekanizmalarla karşılaştırıldığında nispeten kolaydır.
- Kamlar ayarlı olabilir veya kolayca değiştirebilir şekilde tasarlanabilir. Örn: Modern dikiş makineleri
- Diğer mekanizmalarla elde edilmesi kolay olmayan hareketler kam mekanizmaları ile kolayca elde edilebilir. Örn: beklemeli hareket
- Özellikle dişli mekanizmalarına göre düşük sürtünme, düşük boşluk mesafesi ve yüksek sağlamlık sunarlar.

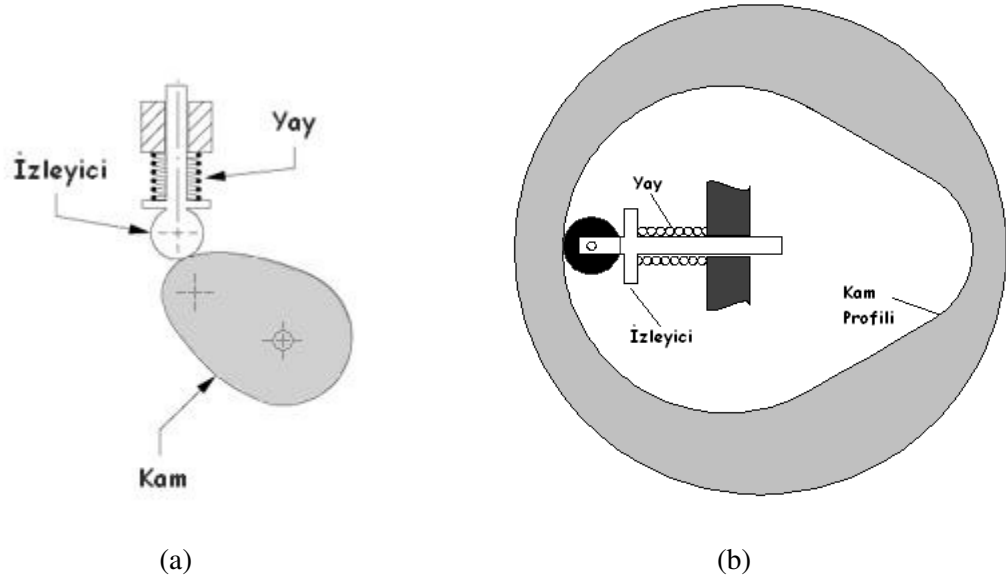
Ancak

- Hassas kamların maliyetleri oldukça yüksek olup, kamalarda sürtünme ve aşınma önemle dikkate alınmalıdır.

- Takipçiden gelebilecek ters yönlü bir hareket yüksek basınç açısına neden olabilir.
- Kuvvet kapalı kam mekanizmalarında kapalılığı sağlayan yay, titreşime neden olarak güç dengesini olumsuz yönde etkiler.
- Şekil kapalı kam mekanizmalarını işlenmesi zor olup kuvvetlerin yön değiştirmesi hem iç hem dış profilin aşınmasına neden olur.(Pasin ve ark.,1991)
- Yüksek hızlarda ve/veya yüksek yükler altında kam mekanizmalarının düzgün çalışabilmeleri çok dikkatli tasarımı ve çok hassas imalatı gerektirir. Bu nedenle bilhassa yüksek hızda çalışması istenilen makinelerin tasarımı sırasında mümkün olduğunca az kam kullanılmasına dikkat edilmesi önemlidir. (Söylemez E., 2001)

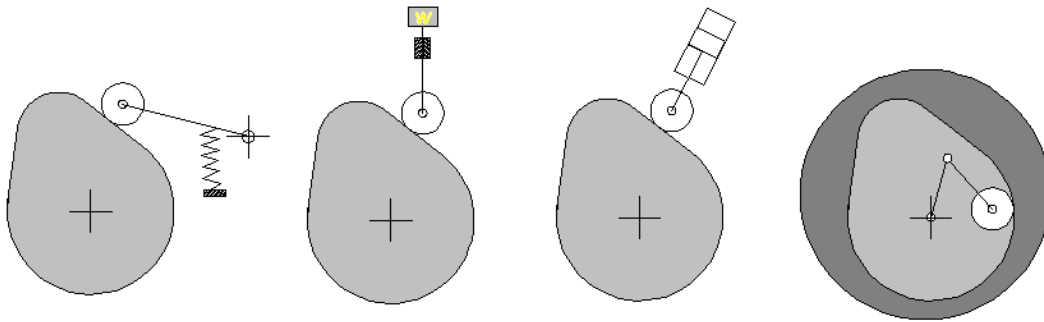
3.2.Kam Mekanizmalarının Sınıflandırılması

Kam mekanizmaları değişik şekillerde sınıflandırılabilir. Kamın şekline göre, radyal, yüzeysel, silindirik, kama, konik, küresel veya üç boyutlu; kam ile izleyicinin temas şekline göre kuvvet kapalı veya şekil kapalı; takipçinin geometrisine göre noktasal, düz yüzeyle, toparlaklı, silindirik veya küresel; hareketin şekline göre dönel kam-öteleyen izleyici, dönel izleyici, öteleyen kam-öteleyen izleyici, sabit kam-dönel izleyici; izleyicinin kuvvet doğrultusuna göre eksenal, eksenden kaçık gibi. Bir kam mekanizması tanımlanırken yukarıda verilmiş olan sınıflandırmalardan mümkün olduğunca fazlası verilmeye çalışılır: eksenal öteleme yapan, toparlaklı izleyicili, kuvvet kapalı radyal kam (Şekil 3.1-a) veya toparlaklı öteleme yapan izleyicili, kuvvet kapalı, iç kam (Şekil 3.1-b) gibi.



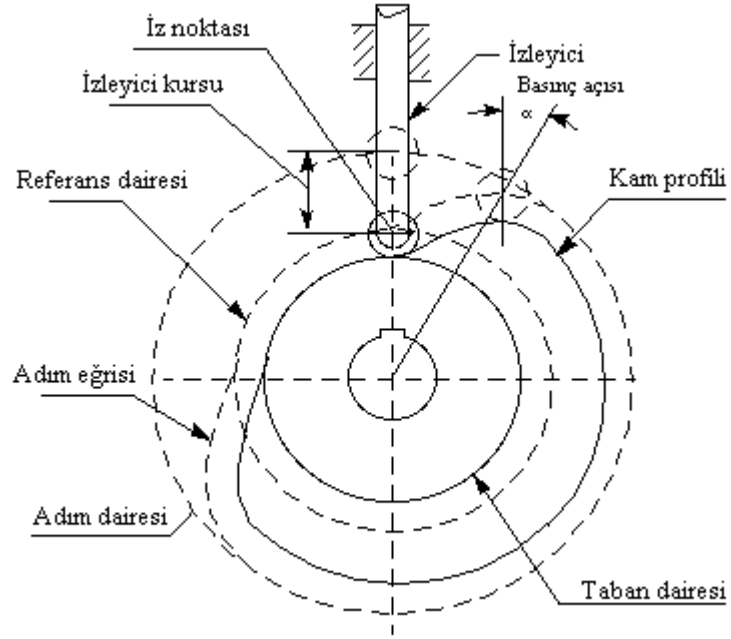
Şekil 3.1 Kam sınıflandırmasına iki örnek

Kuvvet kapalı kam mekanizmalarında takipçinin kam yüzeyine düzgün ve sürekli temasının temin edilmesi gerekir. Bunun için mekanizmanın tasarımı gereği takipçinin ağırlığı yeterli ise zorlayıcı bir sisteme ihtiyaç duyulmayabilir. Takipçi ağırlığının gerekli teması sağlayamadığı durumlarda ya yay sistemleri ile veya mekanik bazı kısıtlayıcılarla bu temas temin edilmelidir.



Şekil 3.2 İzleyici temas şekilleri (Söylemez,2000)

3.3.Yürek Terimleri



Şekil 3.3 Yürek terimleri

Yürek profilini tanımlamak için bazı terimleri açıklamak gerekir.

- Taban dairesi : Kam profilinin en küçük çapından çizilen daire.
- İz noktası : Nokta temaslı izleyicide izleyici üzerindeki teorik bir nokta, toparlaklı izleyici de toparlağın merkezi.
- Adım eğrisi : İz noktasının izlediği yol.
- Basınç açısı : Takipçinin hareketinin doğrultusu ile adım eğrisinin normali arasında kalan açı
- Adım noktası : Adım eğrisi üzerinde basınç açısının en büyük olduğu nokta
- Adım dairesi : Adım noktasından geçen daire. Bu dairenin çapı, verilen basınç açısı değerine uyan minimum kam ölçüsünü belirlemek için kullanılır.
- Referans dairesi : Adım eğrisinin en küçük çapından çizilen daire
- İzleyici kursu : İzleyicinin ötelemesi veya dönmesi sırasında en büyük yer değiştirmesi veya açısı

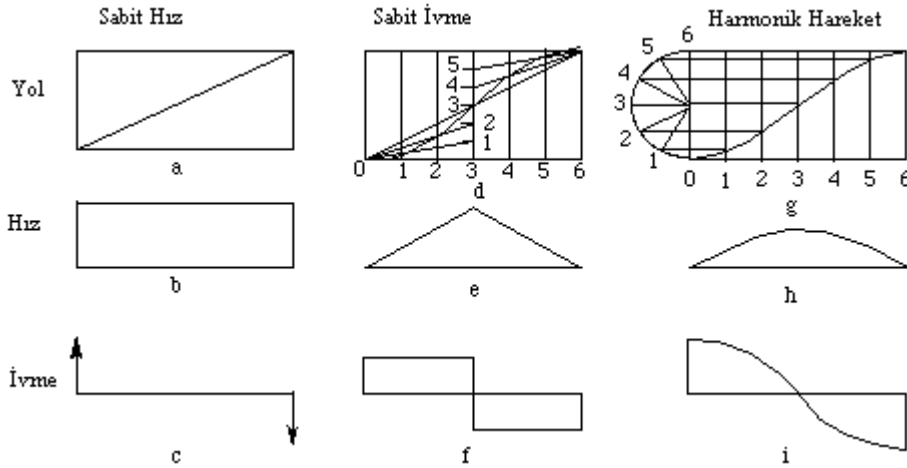
3.4.Yürek Tasarımı

Kam tasarımında temel konu, istenilen kam profilinin tasarlanması konusudur. Tasarımın temel dayanaklarına göre kamları iki başlık altında ayırabiliriz.

Yüksek hız kam mekanizmaları: Yüksek hız, düşük dayanım, büyük kütleler veya fazla titreşim söz konusu ise kinematik olarak tasarım yetersiz kalır. Söz konusu durumlarda kullanılan kam mekanizmalarının tamamına yüksek hız kam mekanizmaları denir ki bu tür tasarımda sistemin dinamiği dikkate alınmalıdır.

Düşük hız kam mekanizmaları: Bu tür tasarımda atalet yükleri ihmal edilebildiğinden kinematiksel çözümler yeterlidir. Yüzey kalitesi hayati öneme sahip olmadığından üretimleri ucuzdur. Kinematik ihtiyaçlar belli olduğunda sistemin dinamiğine girilmeksizin kam profili belirlenebilir. Bu arada en önemli konu, yüzey profilinin sürekli olması ve basınç açlarına dikkat edilmesidir

3.5.Yürek Hareket Eğrileri



Şekil 3.4 Kam hareketleri

Sabit hızlı harekette, takipçi birim zamanda birim yer değiştirir, yol-zaman grafiği eğimli bir çizgi olur (Şekil 3.4-a) ve kursunun başlangıcından sonuna kadar hızı sabit kalır (Şekil 3.4-b). Kursun sonlarında ivmede yön değişikliği olur (Şekil 3.4-c). Bu yön değişikliği kurs sonlarında ve başlarında büyük kuvvetlere neden olur. Özellikle yüksek hızlarda bu istenmeyen bir durumdur.

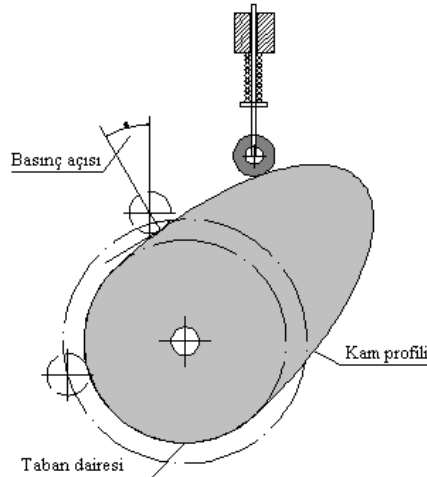
Parabolik veya sabit ivmeli harekette, takipçinin hızı hareketin ilk yarısında sabit olarak artarken ikinci yarısında sabit bir değerle azalır (Şekil 3.4-e). Takipçinin ivmesi hareketin ilk yarısı için pozitif, ikinci yarısı için ise negatiftir (Şekil 3.4-f). Bu tip hareket ivmelenmenin önemli olduğu yüksek hız gerektiren uygulamalarda tercih edilir.

Basit harmonik harekette, ivme de değişkendir. Hareketin başlangıç ve bitişlerinde takipçinin hareketi daha yavaş, orta noktalarında daha hızlıdır (Şekil 3.4-g-h-i). Düşük ve orta hızlı kamlarda tercih edilir. Tasarımı ve üretimi kolaydır.

3.6.Yürek Boyutunu Belirleme

Aynı hareket eğrisini veren farklı boyutlarda kam imal edilebilir. Temel daire çapı yürek boyutunu belirlemede ana etkindir. Zira temel dairesi çapı büyüdükçe yürek boyutu büyür, dengesiz kütle fazlaşır, izleyici hızı artar. Ancak eğer bu çap çok fazla küçülürse profilin eğimi dikleşir, basınç açısı değerleri yükselir, bazı durumlarda profilin şekli çalışmayı zorlaştırır, hatta çalışamaz hale gelir. Ayrıca kamın bağlanacağı milin çapı da temel dairesi çapını belirleyen diğer bir unsurdur.

Bir yürek mekanizmasında kuvvet iletimi özelliklerini belirleyen en basit ve en kolay kinematik parametre basınç açısıdır. Düz yüzeyli izleyiciler için basınç açısı tanımı kullanılmaz. Ayrıca kuvvet kapalı kamlarda yükselme sırasında izleyici kam tarafından itilecek, geri dönüş sırasında ise genellikle yay ile oluşturulan dış kuvvet izleyici ile kam arasında teması sağlayacak, kam tarafından izleyiciye bir kuvvet iletilmeyecektir. Bu nedenle kuvvet kapalı kamlarda yükselme sırasında basınç açısı önemlidir.

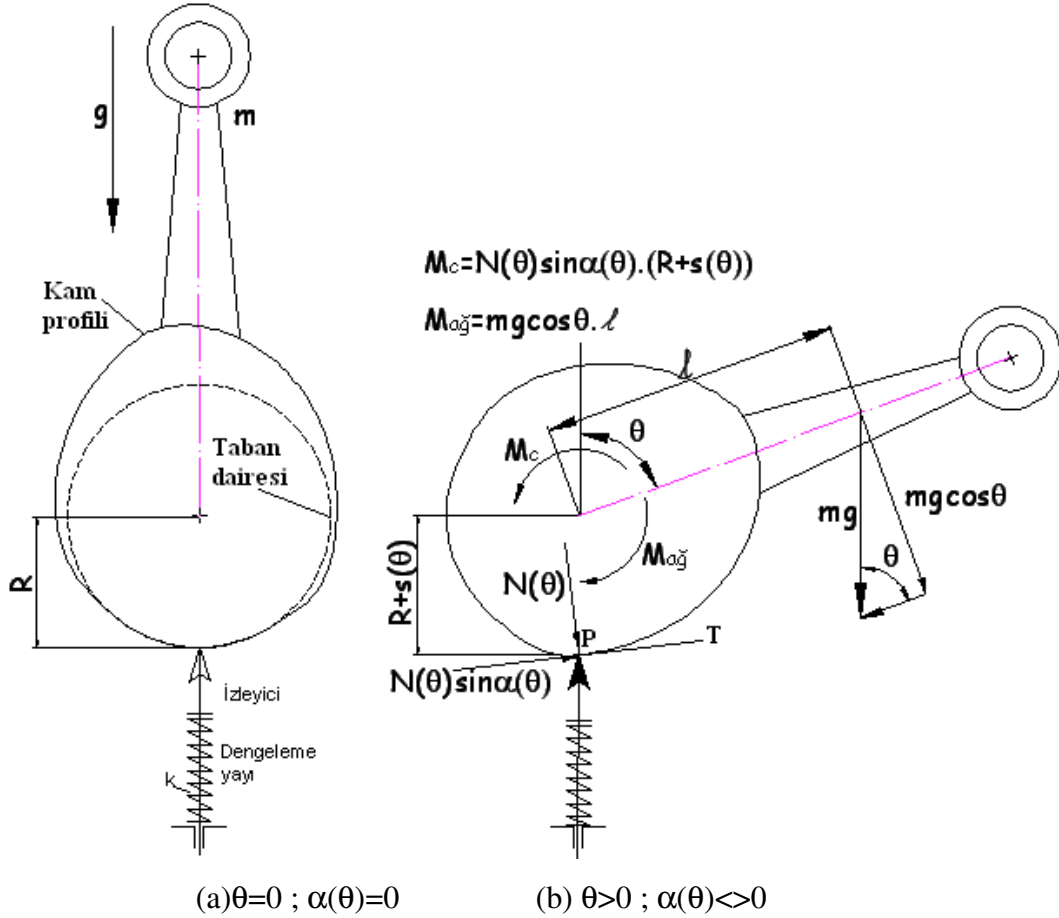


Şekil 3.5 Toparlıklı öteleyen bir kam mekanizmasında basınç açısı

AĞIRLIK DENGELENMESİ İÇİN YÜREK MEKANİZMASI TASARIMLARI

Robot kollarını ve kam mekanizmalarını genel olarak tanıdıktan sonra şimdi robot kollarının ağırlık kuvvetlerini dengelemeyi amaçlayan bir mekanizma geliştirilecektir. İlk olarak bir dış kam, nokta uçlu izleyici ve yaydan oluşan dengelenmemiş kolun üzerinde oluşan kuvvet ve momentler Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekillerde m kolun kütlelerini, l kol boyunu, g yerçekimi ivmesini, k yay sabitini, θ kol ekseninin dikey yaptığı açığı, $s(\theta)$ izleyicinin θ açısına bağlı yer değiştirme miktarını, R kamın taban dairesi yarıçapını göstermektedir.

Şekil 4.1-a'da kol dikey konumdadır, bu yüzden θ açısı ve basınç açısı (α) 0° 'dir. Kolun ağırlığı nedeniyle sisteme etki eden kuvvetler ve momentlerde θ açısına bağlı olarak sıfırdır.



Şekil 4.1 Dengelenmemiş robot kol - kam mekanizması ve oluşan kuvvetler

Kol θ açısı kadar döndüğünde kol üzerinde meydana gelen kuvvetler Şekil 4.1 (b)'de gösterilmiştir. Robotun kolu dikeyle θ açısı yapacak kadar döndüğünde; Kolun yerçekimi doğrultusunda oluşan mg kuvveti, dikey bileşeninin ağırlık merkezinin dönme merkezine uzaklığıyla çarpımı kadar saatin dönme yönünde kamin dönme merkezinde bir moment oluşturur.

$$M_{ağ} = m \cdot g \cdot l \cdot \cos \theta \text{ Nm}$$

İzleyicinin kamlar temas noktası olan P noktasından kama teğet çizilen T doğrusuna dik çıkan N normali doğrultusunda bir $N(\theta)$ normal kuvveti oluşur. Bu kuvvetin kamin dönme eksenini ile P noktası arasındaki doğruya dik olan x eksenini yönündeki bileşeni kolun ağırlığından doğan momente zıt yönde bir moment doğurur.

$$M_C = N(\theta) \cdot \sin \alpha(\theta) \cdot [R + s(\theta)]$$

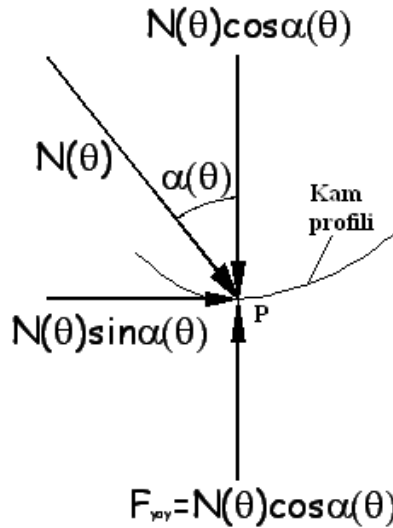
Normal kuvvetin takipçinin hareketi doğrultusunda yer alan y eksenini doğrultusundaki bileşeni; yaydan gelen kuvvetin büyüklüğü kadar ve zıt yönlüdür.

$$N(\theta) \cdot \cos \alpha(\theta) = F_{yay}$$

$$N(\theta) = F_{yay} / \cos \alpha(\theta)$$

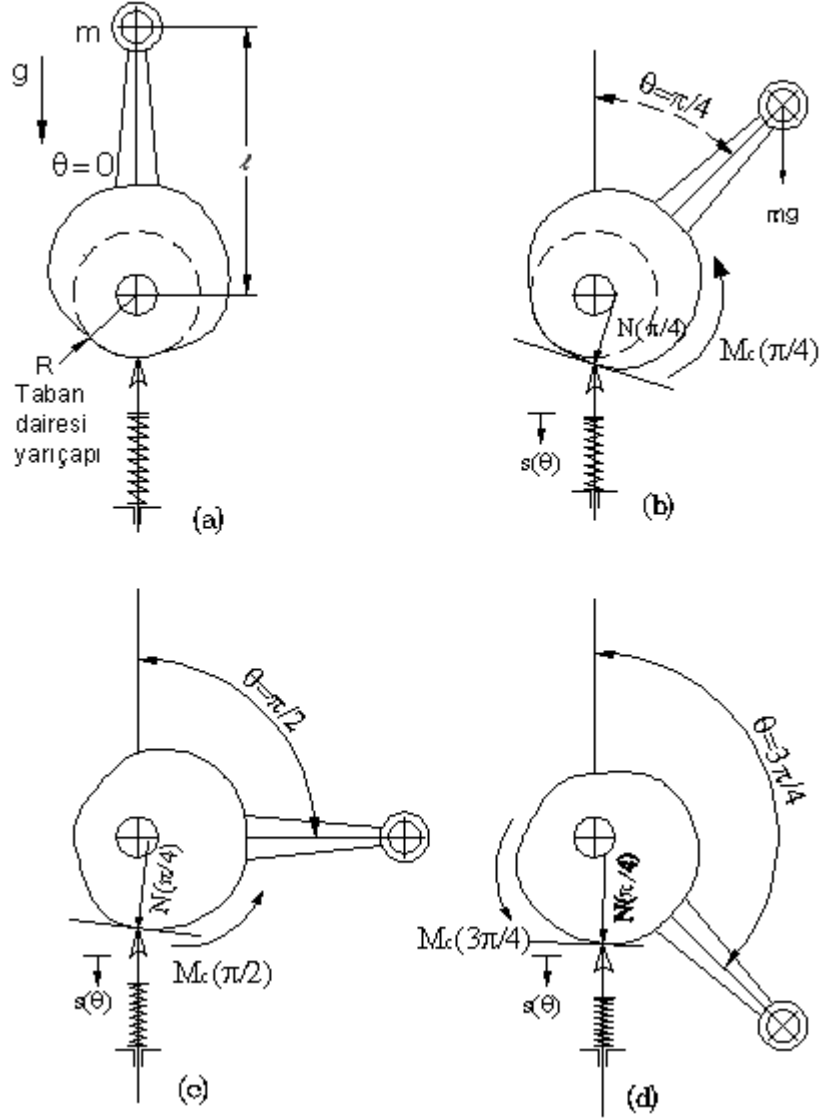
Yayın ürettiği kuvvet ise yay sabitinin izleyicinin yer değiştirmesi ile çarpımı kadardır. (Şekil 4.2)

$$F_{yay} = k \cdot s(\theta)$$



Şekil 4.2 Normal kuvvetin bileşenleri

Yukarıda anlatılan normal kuvvet $N(\theta)$ ve kamın dönme ekseninde etrafında oluşturduğu moment M_c , kolun θ dönme açısındaki değişimlere göre Şekil 4.3'de dört farklı konumda gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Farklı θ açılarında $N(\theta)$ kuvveti ve M_c momentini

Şekil 4.1'de verilen tek serbestlik dereceli robot kolun statik durumdaki potansiyel enerjisinin kolun her konumu için aynı kalması halinde sistemin dengesi temin edilmiş olacaktır başlangıç için sistemin potansiyel enerjisi $V(\theta)$ yazılırsa;

$$V(\theta) = \frac{1}{2}.k.s^2(\theta) + m.g.l.\cos(\theta) = C \quad (2)$$

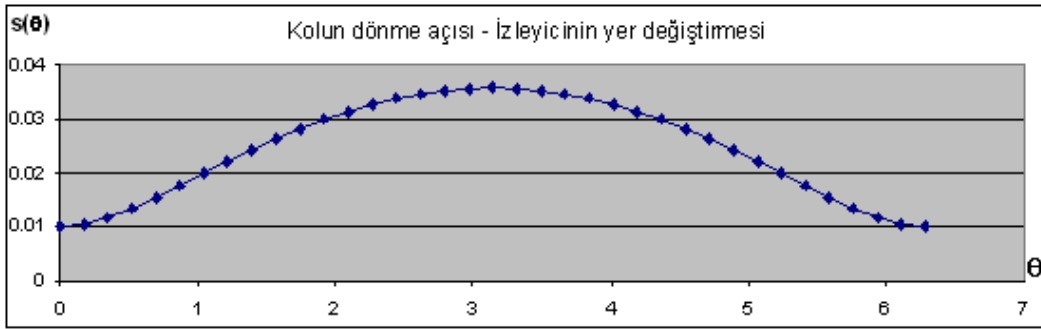
olmalıdır. Bu denklemde k helisel yayın yay katsayısı, s takipçinin yer değıştirmesi, m kolun kütlesi, g yerçekimi ivmesi, l kütle merkezinin yatay uzaklığı, θ kolun düşeyle yaptığı açıdır. (2) denklemde başlangıç koşulları olan $\theta=0$ anında $s=s_0$ değerlerini yerlerine yazarak başlangıç potansiyel enerjisi hesaplanabilir;

$$V(\theta) = \frac{1}{2}.k.s_0^2 + m.g.l \quad (3)$$

bu değer (2) denklemde yerine konup bu yeni eşitlikte $s(\theta)$ yalnız bırakılırsa izleyicinin yer değıştirmesinin kolun açısal konumuna bağlı denklemini elde edilir.

$$\frac{1}{2}.k.s_0^2 + m.g.l = \frac{1}{2}.k.s^2(\theta) + m.g.l.\cos(\theta)$$

$$s(\theta) = \sqrt{s_0^2 + \frac{2.m.g.l}{k}(1 - \cos(\theta))} \quad (4)$$



Şekil 4.4 Kolun açısal yer değıştirmesine bağlı olarak izleyicinin ötelenmesi

$m=3$ kg, $g=9,81$ Nm/sn², $l=0,3$ m ve $k=30.000$ N/m $R=0,1$ ve $s_0=0,01$ değerleri ile kol 2π dönüncüye kadar izleyicinin yer değıştirmesini veren grafik çizilerek Şekil 4.4'de gösterilmiştir.

(4) denklemini izleyicinin yer değıştirmesini, kolun dönmesine bağlı olarak vermekle birlikte potansiyel enerjii yay üzerine denge konumunu bozmadan aktaracak olan kam profilini belirlemede yeterli değildir. Bu yüzden bu yer değıştirme değerini kullanarak yürek profilinin parametrik denklemleri yazılır.

$$x(\theta) = s(\theta). \sin(\theta) \quad (5)$$

$$y(\theta) = s(\theta). \cos(\theta) \quad (6)$$

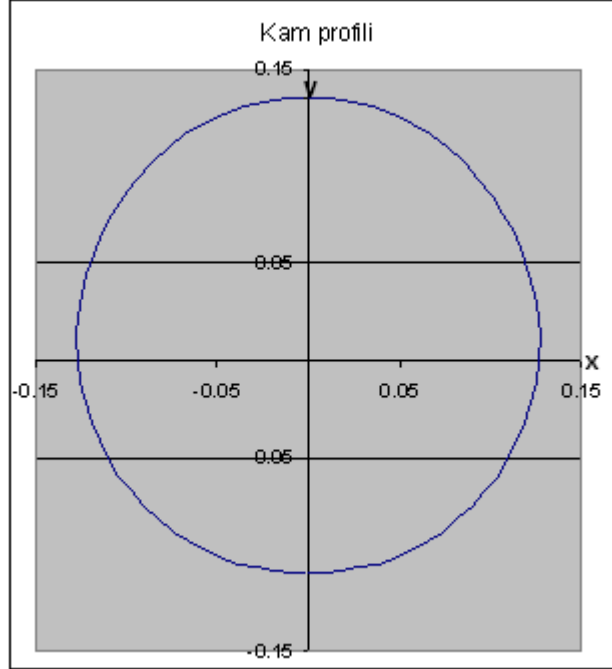
Şekil 4.4’de verilen grafikten kolun π kadar dönmesi ile izleyicinin maksimum ötelendiği görülmektedir. İzleyicinin maksimum ötelendiği noktada yay maksimum sıkışır. Ancak $\theta=\pi$ kadar döndüğünde kol yukarı konumdadır, yerçekimi kuvvetleri kolun eksenine paralel etkimekte olup basınç açısı sıfır değerindedir ve bu yüzden dengelenecek ağırlık yok demektir.

(5) ve (6) denklemlerinde (4) denklemi yerine konulduğunda nokta uçlu izleyici için yürek profilini veren koordinat değerleri elde edilir.

$$x(\theta) = \sin(\theta) \cdot \left[R + \sqrt{s_0^2 + \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot l}{k} (1 - \cos(\theta))} \right] \quad (7)$$

$$y(\theta) = \cos(\theta) \cdot \left[R + \sqrt{s_0^2 + \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot l}{k} (1 - \cos(\theta))} \right] \quad (8)$$

Bu iki denklem nokta uçlu izleyicili mekanizmalarda kam profili ile adım profili çakışık olduğundan hem kam profilini hem de izleyicinin yolunu vermektedir. $m=3$ kg, $g=9,81$ Nm/sn², $l=0,3$ m ve $k=30.000$ N/m $R=0,1$ ve $s_0=0,01$ değerleri için kolun 0’dan 2π ’ye kadar açısal yer değiştirme değerlerine karşılık gelen koordinatlar hesaplanarak bulunan sonuçlar Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Nokta uçlu izleyici için yürek profili

Hareket diyagramından tepe noktasında profilin bir miktar bozulduğu görülmektedir. Robot kolun tam olarak yukarıda olduğu konuma denk gelen tepe noktasındaki bu bozulma denklemin birinci türevinin bu noktalarda süreksiz olmasından kaynaklanır. Bu durum uygulamada bir soruna neden olmaz. Çünkü bu noktalarda basınç açısı 90° civarında olup ağırlık dengelenmesi gerekmez. Profilin bu aralıkta sürekli bir eğri ile değiştirilmesi istenirse, birinci ve ikinci derece türevleri sürekli yapan beşinci derece bir polinomla yapılabilir.

Bilindiği gibi nokta uçlu izleyici uygulamada pek uygun değildir. Eğer yürek mekanizmasında toparlaklı izleyici kullanılırsa toparlağın yarıçapı ve basınç açısı da hesaba katılmalıdır. Toparlak yarıçapı r_t ve basınç açısı α olmak üzere (5) ve (6) eşitlikleri;

$$x(\theta) = [R+s(\theta)]. \sin \theta - r_t \cdot \sin (\theta + \alpha(\theta)) \quad (9)$$

$$y(\theta) = [R+s(\theta)]. \cos \theta - r_t \cdot \cos (\theta + \alpha(\theta)) \quad (10)$$

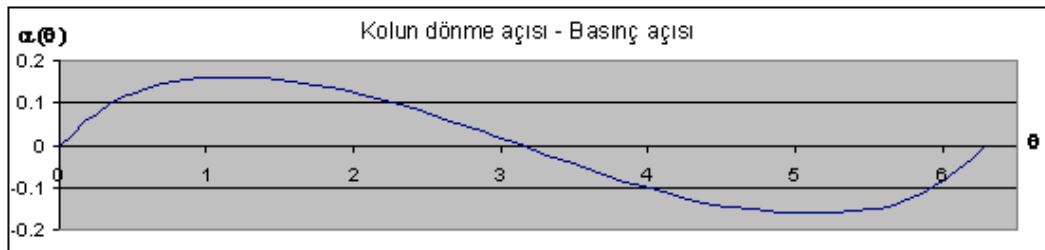
olarak yazılabilir.

Bu yürek profilinin kuvvet iletiminde yeterli olup olmadığını kontrol etmek için yürek ile izleyici arasında oluşan basınç açısının kontrol edilmesi gerekir. Basınç açısı;

$$\tan \alpha = \frac{s'(\theta)}{R + s(\theta)}$$

$$\tan \alpha = \frac{mgl \sin \theta / k}{\left[R + \sqrt{s_0^2 + \frac{2mgl}{k}(1 - \cos \theta)} \right] \sqrt{s_0^2 + \frac{2mgl}{k}(1 - \cos \theta)}} \quad (11)$$

formülü ile hesaplanıp kolun açısal yer değiştirmesine göre grafiği çizilirse;



Şekil 4.6 Kolun açısal yer değiştirmesine bağlı olarak basınç açısındaki değişim

$$m=3 \text{ kg}, g=9,81 \text{ Nm/sn}^2, l=0,3\text{m ve } k=30.000 \text{ N/m } R=0,1 \text{ ve } s_0=0,01$$

Grafiğe göre basınç açısının maksimum değeri $9,2^\circ$ olup bu değer kaynaklarda kabul edilen maksimum 35° nin çok altında ve uygun bir değerdir.

Bunlara ilave olarak yayın ürettiği moment ile kolun ağırlığının doğurduğu moment bir grafikte görülerek bunların birbirini dengeleyip dengelemediği kontrol edilebilir. Kol, kendi ağırlığından doğan m.g kuvvetinin kamın dönme eksenine uzaklığının çarpımı olan;

$$M_G = m.g.l.\sin\theta \quad (12)$$

kadar moment üretirken yay;

$$M_{yay} = N(\theta).\sin\alpha(\theta).[R + s(\theta)]$$

$$M_{yay} = \frac{k.s(\theta)}{\cos\alpha(\theta)}\sin\alpha(\theta).[R + s(\theta)]$$

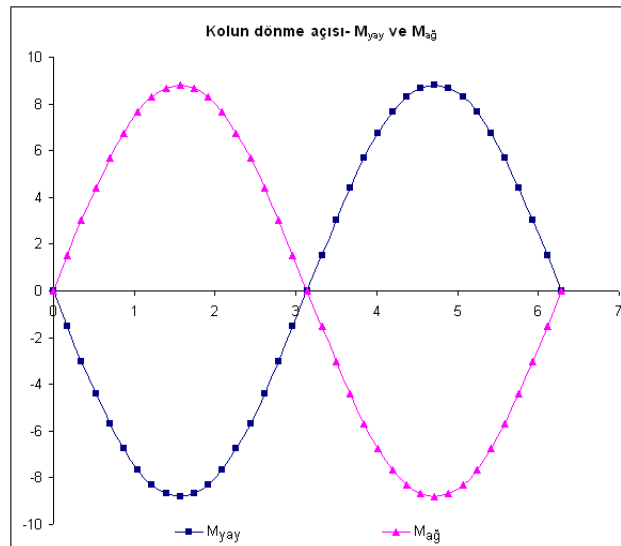
$$M_{yay} = k.s(\theta)\tan\alpha(\theta).[R + s(\theta)]$$

$$s'(\theta) = \tan\alpha(\theta).[R + s(\theta)] \text{ olduğundan}$$

$$M_{yay} = k.s(\theta)s'(\theta) \quad (13)$$

kadar moment üretmektedir.

Yine $m=3$ kg, $g=9,81$ Nm/sn², $l=0,3$ m ve $k=30.000$ N/m $R=0,1$ ve $s_0=0,01$ değerleri için hesaplanan $M_{ağ}$ ve M_{yay} momentleri aynı grafikte çizilerek Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi yayın ürettiği moment ile kolun ağırlığından oluşan yerçekimi momenti kolun her bir dönme açısı için aynı büyüklükte ama ters işaretlidir. Bu da göstermektedir ki robot kol döndükçe ağırlığından ileri gelen moment yay tarafından başarılı bir şekilde dengelenmektedir.

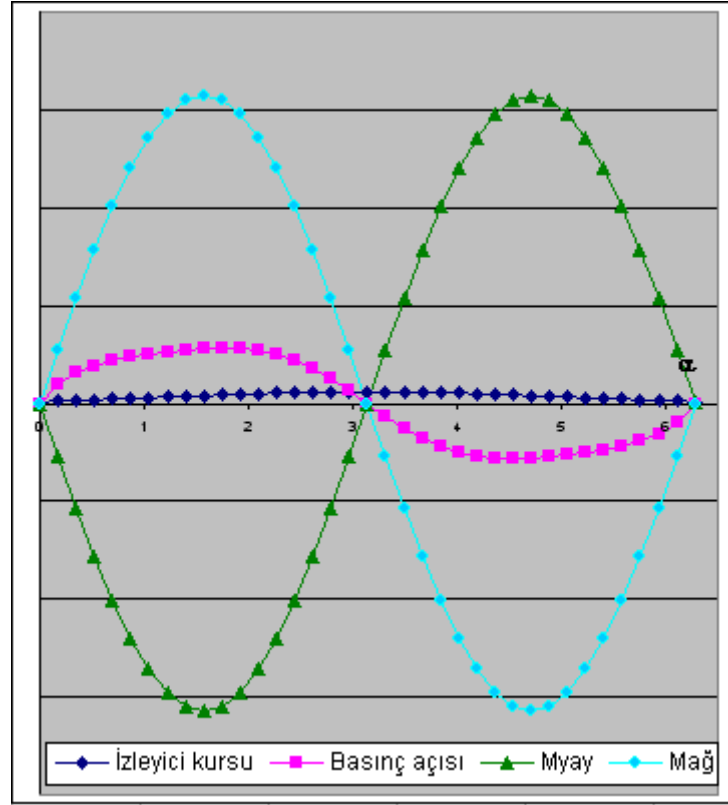


Şekil 4.7 Kolun yerçekimi momenti ile yayın momentinin karşılaştırılması

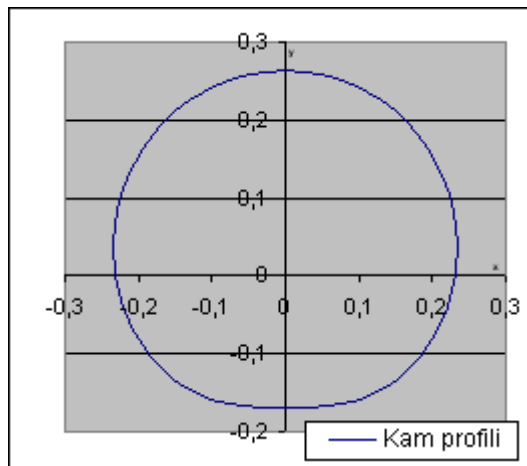
4.1. Formüllerin Farklı Değerlerle Denenmesi

Yukarıda belli değerler için yapılan hesaplamalar, değişik değerlerle kontrol edildiğinde çıkan grafikler aşağıda verilmiştir.

$$m=8 \text{ kg}; l=0,4 \text{ m}; k=10.000 \text{ N/m}; R=0,15 \text{ m}; s_0=0,02 \text{ m}$$



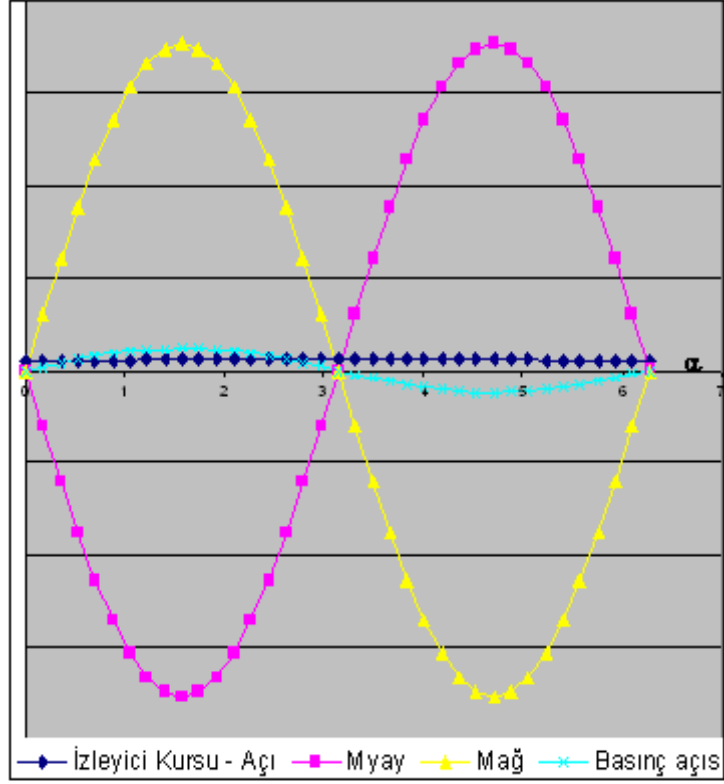
(a)



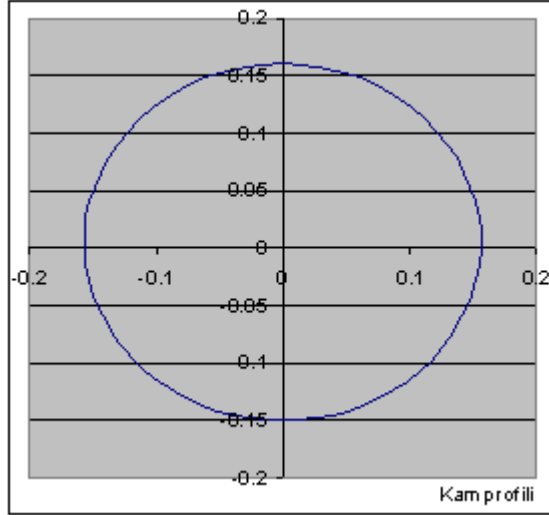
(b)

Şekil 4.8 (a) İzleyicinin yolu, basınç açısı ve momentler (b) Kam profili

$m=3$ kg; $l=0,6$ m; $k=60.000$ N/m; $R=0,1$ m; $s_0=0.05$ m



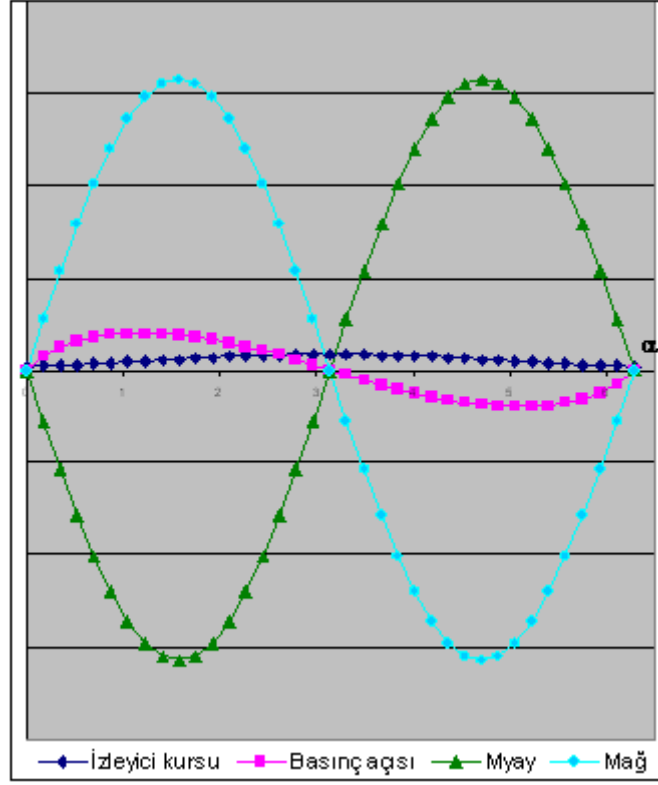
(a)



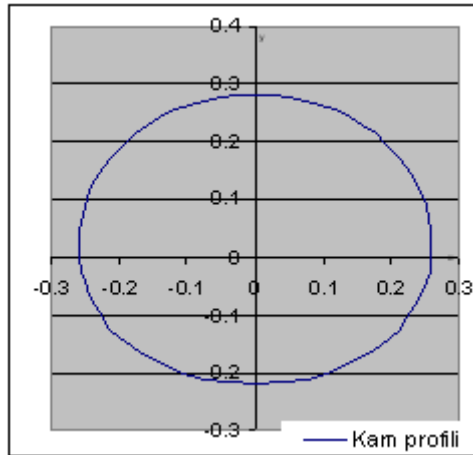
(b)

Şekil 4.9 (a) İzleyicinin yolu, basınç açısı ve momentler (b) Kam profili

$m=4$ kg; $l=0,4$ m; $k=10.000$ N/m; $R=0,2$ m; $s_0=0.02$ m



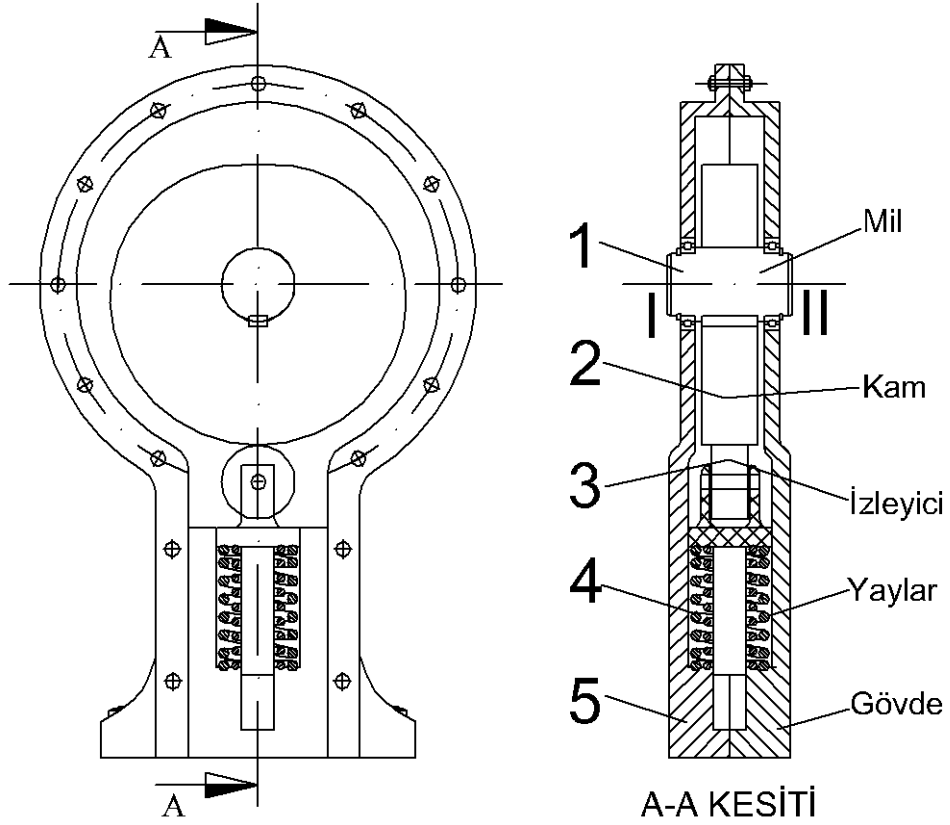
(a)



(b)

Şekil 4.10 (a)İzleyicinin yolu, basınç açısı ve momentler (b)Kam profili

4.2.Yerçekimi Dengeleme Mekanizması



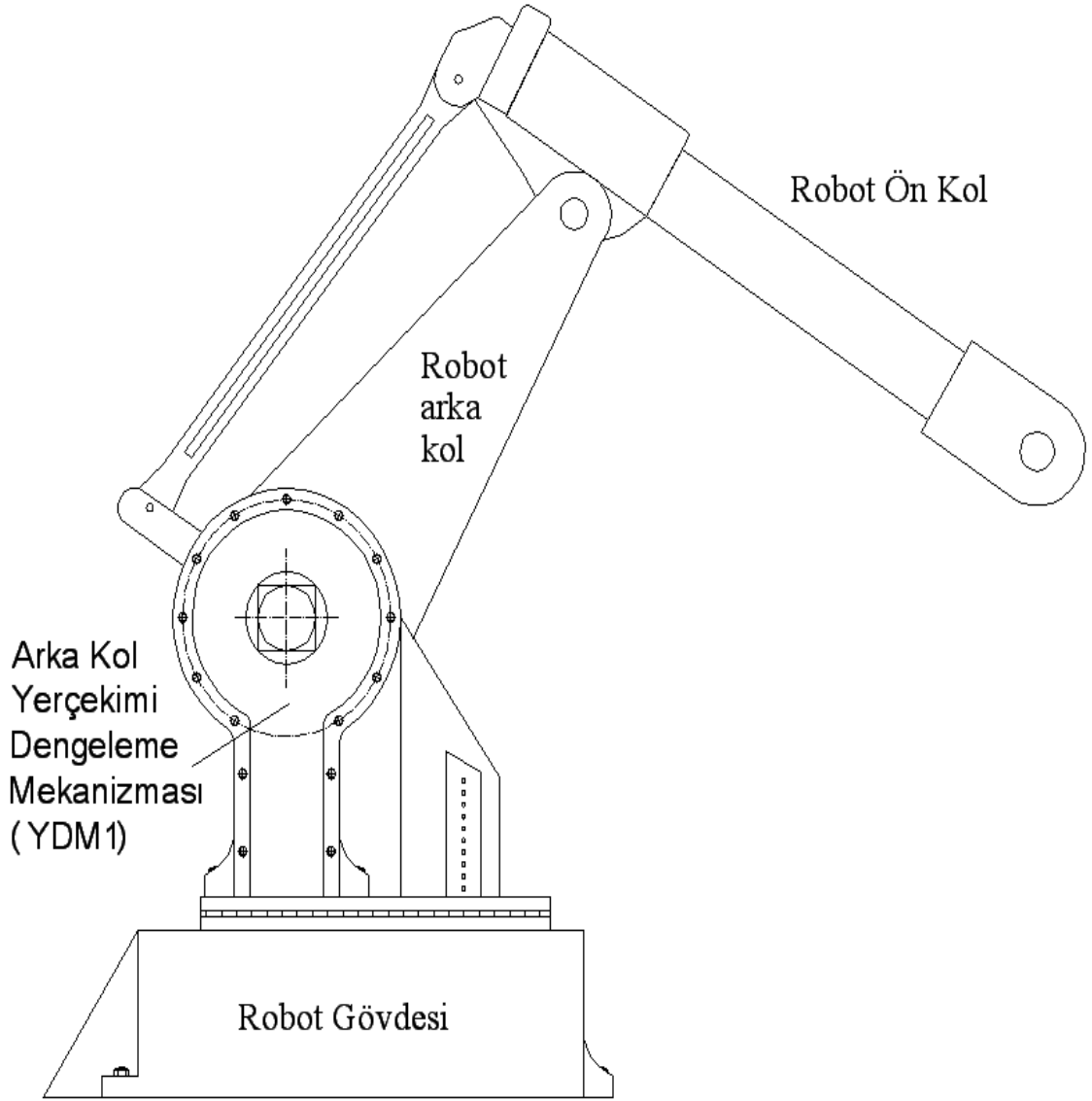
Şekil 4.11 Yerçekimi Dengeleme Mekanizması (YDM)

Yukarıda hesaplamaları yürek mekanizması için önerilen mekanizmalardan biri Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Bu mekanizma robot kol ile eyleyici arasına monte edilebilecek şekilde tasarlanmış olup eyleyici, gövdeye (5) her iki ucundan yataklanmış olan 1 milinin I ucundan bağlanacaktır. Eyleyiciden gelen hareket kama ve 1 milinin II ucuna bağlanacak olan robot arka koluna iletilmektedir. Kolun ağırlığı nedeniyle oluşan kuvvet, mili sürekli olarak yerçekimi doğrultusunda döndürmeye çalışacağından kam(2) ve gövde içindeki yuvasında düzlemsel hareket edebilen izleyicisi (3) üzerinden bu kuvvetin doğurduğu enerji dengeleme yayında (4) biriktirilecektir. Kolun değişen her açısı için uygun profilde imal edilmiş olan kama takip eden izleyici ve yay mekanizması, kolun ağırlığından doğan kuvvet ve momentleri dengeleyeceğinden eyleyicinin yenmesi gereken kuvvetler kolun uç elemanının taşıdığı yükten ibaret olacaktır.

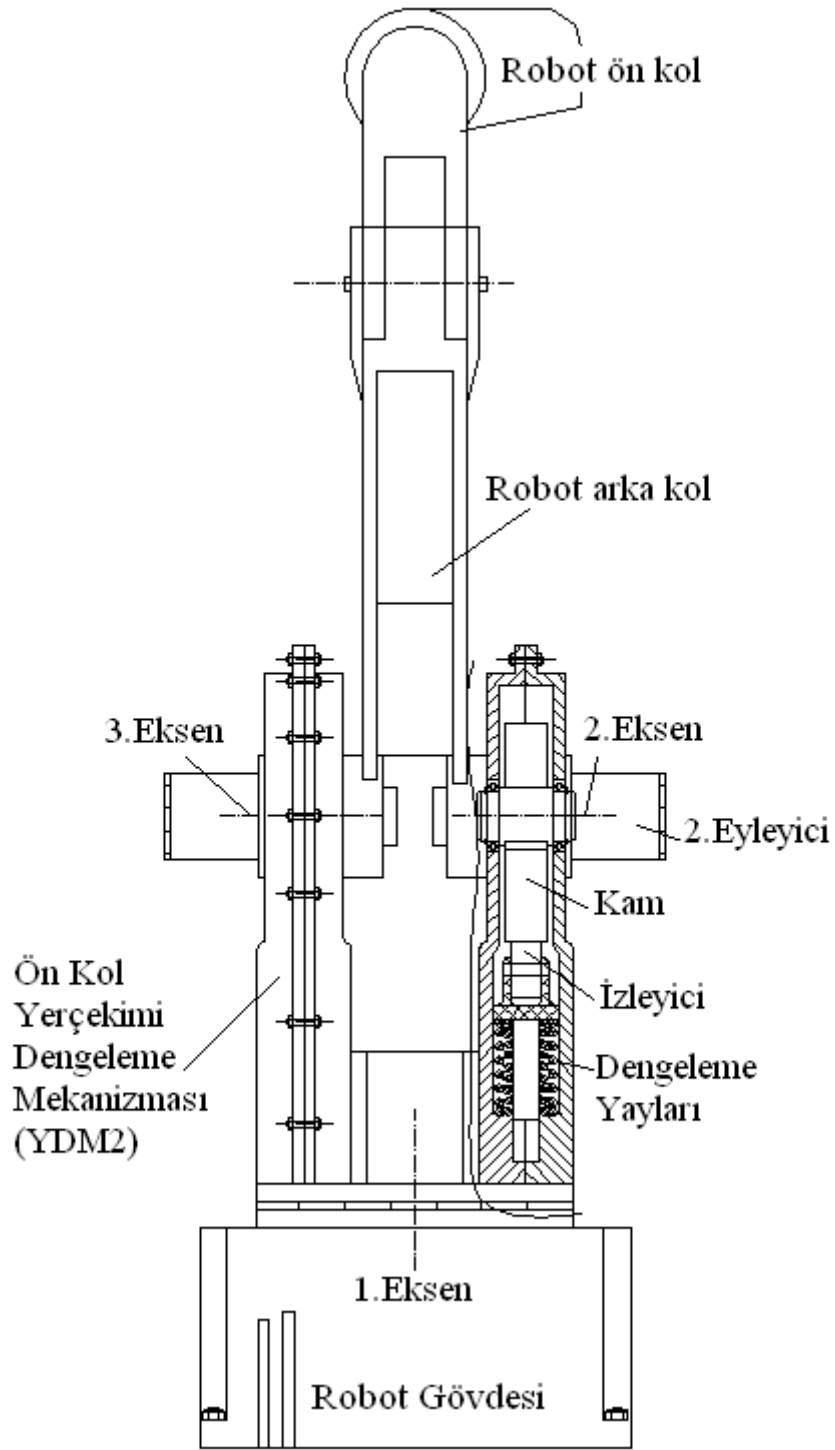
4.2.1. Üç Serbestlik Dereceli RRR Robot Kola Mekanizmanın Uygulanması

Bölüm 4.2’de eyleyici ile robot kolun arasına yerleştirilecek şekilde tasarlanan mekanizmanın manipülatörde çalışma konumu Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Şeklin önden görünüşünden de görüldüğü gibi mekanizma robot kolu anatomisi ile uyumlu bir şekilde sisteme dahil edilmiş olup kolun kendi çalışma alanına bir kısıtlama getirmemektedir. Sisteme yerleştirilen birinci yerçekimi dengeleme mekanizması robotun arka kolunun ağırlığını dengelemektedir. Arka kolu tahrik eden eyleyici, yerçekimi dengeleme mekanizmasının gövdesi görevini yerine getiren ön kapağın üzerine monte edilerek mile akuple edilmiş, robot arka kol ise arka kapak tarafından mile bir flanş yardımıyla bağlanmıştır.

Robot kolda ön ve arka kol olarak iki uzuv bulunduğundan böyle bir kolun dengelenmesi için sisteme ikinci bir yerçekimi dengeleme mekanizması eklenmiştir. Eyleyici yüklerinin arka kolun dengesini değiştirmesi istenmediğinden hareket ön kola paralel kollar yardımıyla iletilmiştir. Paralel kolların yerçekimi momentleri ihmal edilerek ön kolun dengeleme mekanizmasını robot kolun gövdesi üzerinde herhangi bir yere örneğin birinci mekanizmanın hemen arkasına yerleştirilmesi düşünülmüştür. Böylece ön ve arka kolların kolayca yataklanması hedeflenmiştir. İkinci mekanizmanın çıkış bağlantısı paralel kola yapılarak sistemin dengesi kolaylıkla sağlanmıştır. Ön kolun ağırlığından kaynaklanan moment, paralel kola, oradan da YDM_2 içinde bulunan kam – izleyici düzeneği yardımıyla yaya iletilmiş ve yayın robot arka kolun açısının değişmesiyle değişen moment değerlerini kamin profili yardımıyla uygun bir şekilde dengelemesi temin edilmiştir.



(a) Önden görünüş



(b) Soldan görünüş ve YDM kesiti

Şekil 4.12 YDM'nın robot kola uygulanması

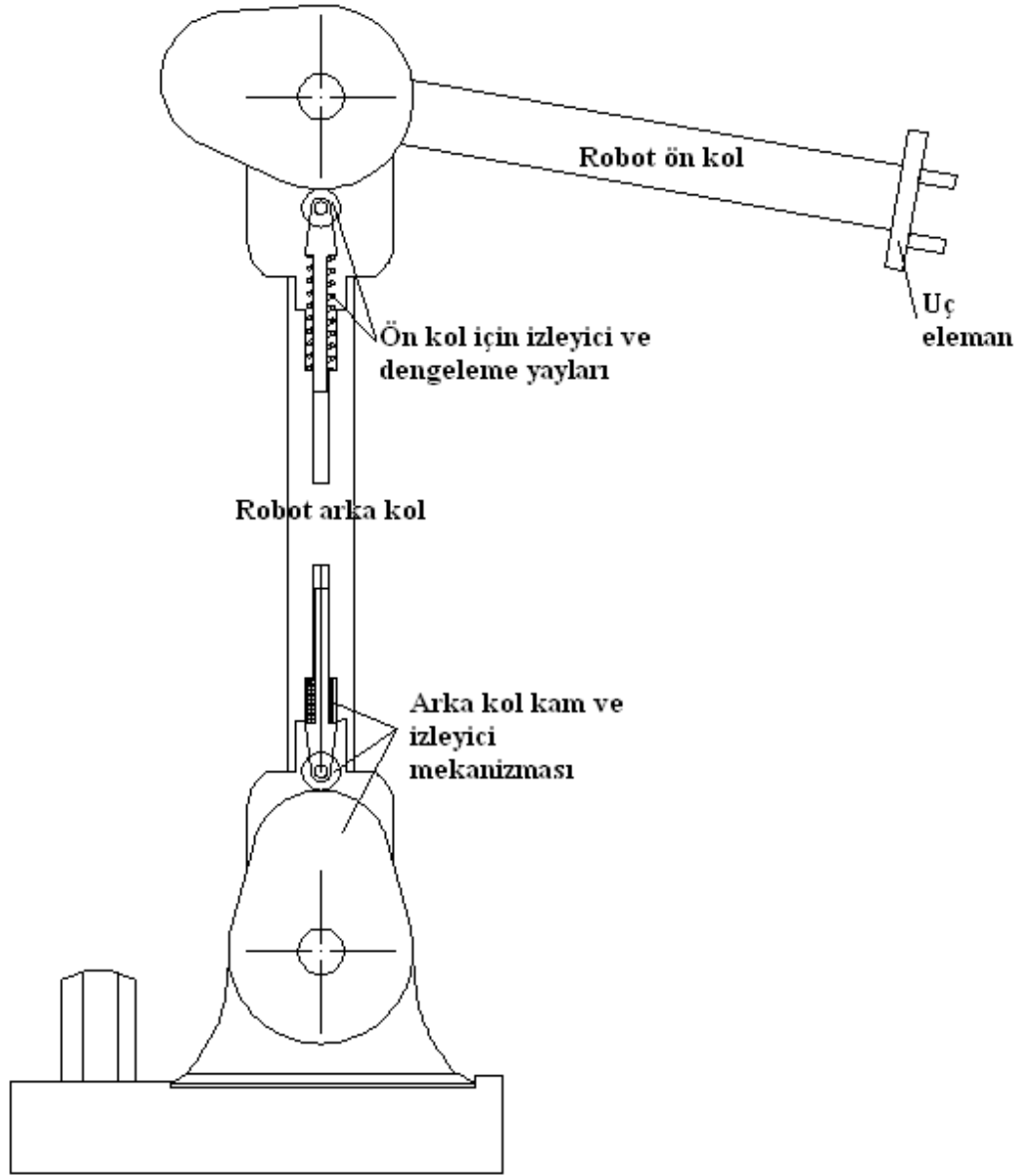
4.3.Robot Kolda Yerçekimi Dengelenmesi

Yerçekimi yüklerini dengelemede bir diğer alternatif

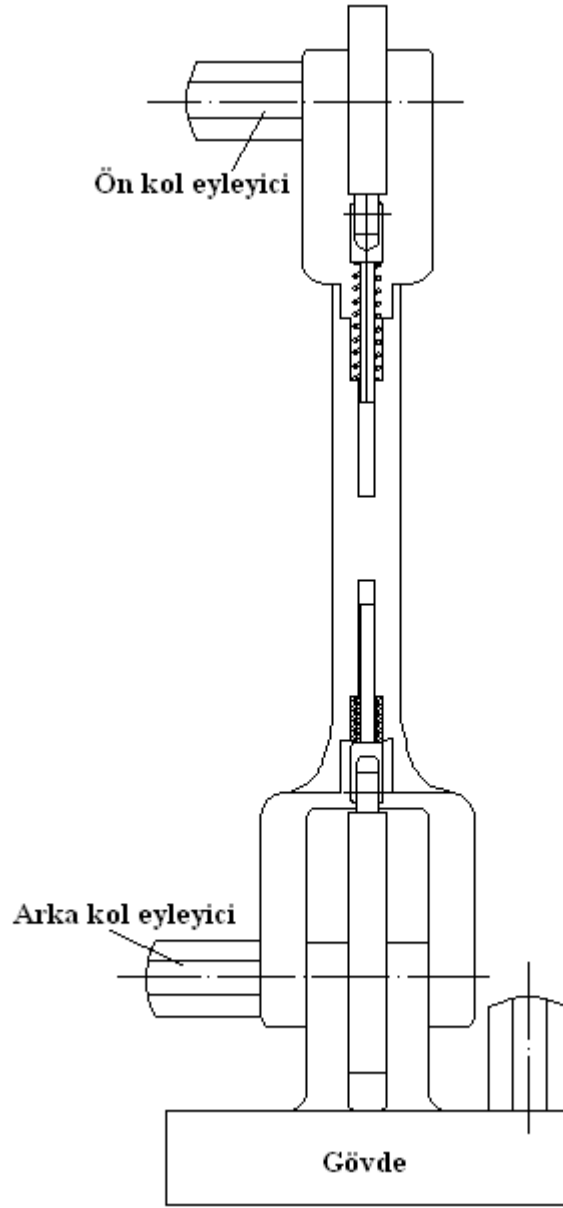
Şekil 4.13’de robot kolun iki farklı görünüşü ile gösterilmiştir. Bu yöntem paralel kollar kullanılmayacağı durumlar için uygun olup her kolun eyleyicisi kendi eksenini üzerindedir.

Robot arka kolun dengelenmesi için hesaplamalarla bulunan kam profiline göre imal edilen kam gövdeye sabitlenmiştir. Birinci dengeleme mekanizmasının izleyici ve dengeleme yayları robot arka kolun içerisine yerleştirilmiştir. Robotun arka kolunun iç kısmı izleyici ve yaylara yataklık edecek şekilde tasarlanmıştır. Robot arka kolun eyleyicisi kolun eklemine olup direk olarak kolu tahrik etmektedir. Arka kol döndükçe izleyici sabit kamın üzerinde yuvarlanarak kamın profiline uygun olarak yayı deforme etmektedir. Böylece arka kolun kendi ağırlığı, ön kolun ağırlığı, ön kolun eyleyicisinin ağırlığı gibi arka kola bağlı tüm ağırlıklar göz önünde tutularak profili belirlenmiş olan kam arka kolun dönmesi ile değişen yerçekimi kuvvetinden hasıl olan potansiyel enerji değişimlerini dengeleme yaylarına aktarmakta ve yaylar kolu dengelenmektedir.

Robot ön kolun dengelenmesi için ise yine sistemin yüklerine göre hesaplamalarla bulunan kam profiline uygun imal edilen kam, robot ön kolun eksene bağlanan ucuna sabitlenmiş olup izleyici ve dengeleme yayları robot arka kolun ikinci eksene bağlanan iç kısmına yerleştirilmiştir. Ön kolun eyleyicisi ön kol ile arka kolun birleştiği eksene monte edilmiş olup direk olarak ön kolu ve ön kola sabitlenmiş kamı döndürmektedir. Kam ve ön kol döndükçe değişen ön kolun ağırlığından kaynaklanan yerçekimi kuvvetleri kamın izleyicisi üzerinden dengeleme yaylarına aktarılmaktadır.



(a) Robot kolun ön görünüşü ve arka kol kesiti



(b) Robot kolun soldan görünüşü ve arka kol kesiti

Şekil 4.13 Yerçekimi dengelemede alternatif yöntem

SONUÇ

Özellikle eklemli tip endüstriyel robotlarda çok önemli konuların başında gelen yerçekimi yüklerinin dengelenmesi amacıyla yapılan bu çalışmada bir dış kam mekanizması tasarlanmıştır. Kam mekanizması tasarlanırken en önemli konu kam profilinin, robot kol eksenine etrafında döndükçe lineer olmayan bir şekilde değişen yerçekimi yüklerini dengeleyecek şekilde belirlenmesidir. Robot kolun dikeyle yaptığı açı doksan dereceye yaklaştıkça kolun ağırlığının dönme merkezine uyguladığı kuvvet ve moment artmakta, açının sıfır ve 180° olduğu durumlarda ise sıfırlanmaktadır. Bu problem dengelenmemiş robot kolun statik haldeki denge değerleri kullanılarak bu denge halini tüm açı değerlerinde temin edecek kam profilini bulmak aşılmasıdır. Bu değerler bir dengeleme mekanizması tasarımında kullanılmış ve elde edilen bu mekanizmanın işleyiş prensipleri bir robot kol üzerinde gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- Angeles J. (2003), Fundamentals of Robotic Mechanical Systems-Theory, Methods and Algorithms, Springer-Verlag Pres
- Anonim, (2009),<http://www.cs.cmu.edu/~rapidproto/mechanisms/chpt6.html#toc>
- Bai S., Angeles J. (2002), Kinematics of Spherical Multi-Lobe-Cams for The Design of A Pitch- Roll- Wrist, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 664-669
- Chow S.L. and Shi, C.F. (2005), Passive gravity-compensating mechanisms, USA patent no:0023424 A1
- Gopalswamy A., Gupta P., Vidyasagar M.(1992), A new parallelogram linkage configuration for gravity compensation using torsional springs, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 664-669
- Groover, M., Weiss, M., Nagel, R.N., Odrey, N.G.(1992), Industrial Robotics – Thecnology, Programming and Applications, Mc Graw Hill Inc.
- Hodges B.(1992), Industrial Robotics , Newnes Second Edition
- Koser K. (2001), Robot kollar için yrek-yay esaslı bir ağırlık dengeleme mekanizması, 10.Ulusal makine teorisi sempozyumu, 87-96 s
- Lewis, F.L.(1999), Robotics Mechanical Engineering Handbook Ed. Frank Kreith Boca Raton, CRC Press LLC
- Ma D., Hollerbach J. (1992), Identifying Mass Parameters for Gravity Compensation and Automatic Torque Sensor Calibration, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 664-669
- Pasin F., Koser K., Yanar .(1991), Yrek Mekanizmaları, İT Yayınları
- Potkonjak V., Krstulovi A. (1992), Contribution to the Kinematics and Dynamics of Redundant Robots Via Distrubuted Positioning,
- Rahman T., Ramanathan R., Seliktar R., Harwin W. (1995), A simple technique to passively gravity-balance articulated mechanisms, ASME Transactions on Mechanisms Design, Aralık, 117(4),655-8
- Sclater N. and Chirons N.P.(2001), Mechanisms and Mechanical Devices Source Book, McGraw Hill Inc.

- Siminionescu I. And Ciupitu L. (2000a), The static balancing of the industrial robot arms, Part I: Discrete balancing, Mechanism and machine theory, Pergamon
- Siminionescu I. And Ciupitu L. (2000b), The static balancing of the industrial robot arms, Part II: Continuous balancing, Mechanism and machine theory, Pergamon
- Söylemez E.(2000), Mekanizma Tekniği, ODTÜ Yayınları, Ankara
- Takegaki M., Arimoto S. (1981), A new feedback method for dynamic control of manipulators, ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control, 103, pp 119-125
- Ulrich N., Kumar V.(1991), Passive Mechanical Gravity Compensation For Robot Manipulators, IEEE International Conference on Robotics and Automation , pp 1536-1541
- Umeda T. (1992), Gravity compensating mechanism for articulated type industrial robots, USA patent no:5,115,778

ÖZGEÇMİŞ

1968 yılında Sivas'ta doğdu. İlk, orta ve lise tahsilini Sivas'ta tamamladı. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği Fakültesinden 1989 yılında mezun oldu. Aynı yıl Tarım, Orman ve Köyişleri Bakanlığının açmış olduğu personel alımı sınavını kazanarak 1990 yılda Orman Tamirhane Müdürlüğünde İkmal Şefi olarak göreve başladı. Halen Sivas Orman İşletme Müdürlüğünde görev yapmaktadır. Evli ve 3 çocuk annesidir. Yabancı dili İngilizce'dir.

EK: YAYLAR HAKKINDA GENEL BİLGİ

Belirli bir kuvvet altında bir dereceye kadar büyük elastik şekil değişikliği gösteren, kuvvet kaldırılınca kısmen veya tamamen eski vaziyetini alan mekanik enerji biriktirme elemanlarıdır. Yük altında şekil değişikliği esnasında yaylar bir deformasyon (şekil değişikliği) enerjisi biriktirirler, boşalma sırasında bu enerjinin büyük bir kısmını geri verirler. Teknolojide yaylar farklı amaçlarla kullanılabilir.

- Kuvvet ölçmek; dinamometre ve kantarlarda olduğu gibi.
- Kuvvet uygulamak veya bir hareketi kontrol etmek. Kavramalarda veya frenlerde kavrama ve fren kuvvetlerini oluşturmak. Patlamalı motorlarda subapların kapanmasını temin etmek, kam sisteminde kam ile çubuk arasındaki irtibatı sağlamak vs.
- Bazı sistemlerin frekanslarını değiştirmek. Darbe ile meydana gelen kuvvetlerin şiddetini azaltmak. Taşıt makinalarında olduğu gibi sönümleme görevi yapmak.
- Biriktirilen enerjiyi bir hareketi meydana getirmek için harcamak, yâni motor görevini yapmak. Mekanik saatlerde olduğu gibi.

Yayların sınıflandırılması:

- Ana zorlanmaya göre: Burulma, eğilme, çekme ve basma yayları.
- Yayın dış şekline göre: Silindirik, konik, helisel çubuk, spiral, disk, yaprak, bilezik yaylar.
- Yay telinin kesitine göre: Dairesel ve dikdörtgen kesitli.
- Yüklenme şekline göre: Çekme ve basma kuvveti ile zorlanan yaylar.

Teknolojide genellikle birçok yaylardan meydana gelen yay sistemleri kullanılır. Bunun sebebi, kullanma hacimlerinin sınırlı olması, tek yaydan daha güçlü olması ve istenen şartların elde edilmesidir. Prensip olarak sistemin rijitliği yayların bağlantı şekline göre tayin edilir. Bağlantı şekli paralel veya seri olabilir.

Paralel bağlantıda deplasmanlar birbirine eşittir:

$$D_{top} = D_1 = D_2 = \dots$$

Toplam kuvvet ise her bir yayın direnç kuvvetinin toplamına eşittir:

$$F_{top} = F_1 + F_2 + \dots$$

Sistemin yay sabiti her bir yayın yay sabitinin toplamına eşittir

$$k_{top} = k_1 + k_2 + \dots$$

Seri bağlamada toplam deplasman her bir yayın deplasmanlarının toplamına eşittir:

$$D_{top} = D_1 + D_2 + \dots$$

Toplam kuvvet her bir yaya etkiyen kuvvete eşittir:

$$F_{top} = F_1 = F_2 = \dots$$

Sistemin yay sabiti her bir yayın yay sabitinin terslerinin toplamının tersine eşittir:

$$1/k_{top} = 1/k_1 + 1/k_2 + \dots$$