YÜKSEK SERBESTLİK DERECELİ MEKATRONİK SİSTEMLERİN TASARIMI ve KONTROLÜ

Orçun EKİN



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK SERBESTLİK DERECELİ MEKATRONİK SİSTEMLERİN TASARIMI ve KONTROLÜ

Orçun EKİN

Prof. Dr. İbrahim YÜKSEL
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2011
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Orçun Ekin tarafından hazırlanan "Yüksek Serbestlik Dereceli Mekatronik Sistemlerin Tasarımı ve Kontrolü" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. İbrahim YÜKSEL

Başkan:	Prof. Dr. İbrahim YÜKSEL UÜ. Müh. Mim. Fakültesi, Makine Müh. Anabilim Dalı	İmza
Üye:	Prof. Dr. Osman KOPMAZ UÜ. Müh. Mim. Fakültesi, Makine Müh. Anabilim Dalı	İmza
Üye:	Yrd. Doç. Dr. A. Yurdun ORBAK UÜ. Müh. Mim. Fakültesi, Endüstri Müh. Anabilim Dalı	İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Kadri ARSLAN
Enstitü Müdürü
22/08/2011

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kılavuzuna uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı ve
- Bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,

Beyan ederim.

22/08/2011

İmza

Orçun EKİN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK SERBESTLİK DERECELİ MEKATRONİK SİSTEMLERİN TASARIMI ve KONTROLÜ

Orçun EKİN

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İbrahim Yüksel

Bu çalışmada insansı kol yapısına sahip bir robotik sistemde en uygun mafsal yörüngelerinin oluşturulması ve bu yörüngelerin yüksek hassasiyetli takibine yönelik yöntemler araştırılmış ve uygulanmıştır. Çalışmada ele alınan sistemin analiz ve denetimi mekatronik tasarım yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Robot ileri kinematiğinin tanımlanmasında bu tür çalışmalarda yaygın olduğu üzere Denavit-Hartenberg Yaklaşımı'ndan yararlanılmış, robot dinamiği Lagrange-Euler denklemi ile ifade edilmiştir. Robotun dinamik modellemesi, denetleyici tasarım ve analizleri MATLAB/Simulink ve Simmechanics ortamlarında yürütülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Endüstriyel robotlar, robot kinematiği, Simmechanics, robot dinamiği, Lagrange Euler yöntemi

2011, X+142 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

MODELLING AND CONTROL OF MECHATRONIC SYSTEMS
WITH HIGH DEGREE OF FREEDOM

Orçun EKİN

Uludağ Üniversitesi
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. İbrahim Yüksel

An optimum joint space trajectory approach and a highly sensitive control methodology for an anthropomorphic industrial robot are the aim of this study. Idea of Mechatronics is adopted for the stages of development. Robot forward kinematics is identified by Denavit Hartenberg Convention. Independent joint trajectories are calculated by the principles of inverse kinematics. Lagrange Euler Equation took place in order to achieving the dynamics formulation of the mechanism. Visual modeling, control design and simulations are carried out on the Matlab/Simulink and Simmechanics platforms.

Key words: Industrial robots, robot kinematics, Simmechanics, robot control, Lagrange-Euler formulation

2011, X+142 pages.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Mekatronik disiplininin popüler ürünlerinden olan insansı kol yapılı robot eyleyicilerin yükselişi hızlanarak sürmektedir. İnsan için tatmin sağlamayan, rahatsızlık uyandırıcı tekrarlı hareketlere dayanan, tehlikeli veya sürat ve kesinlik isteyen birçok işte robotik eyleyiciler insan gücünün yerini almaktadır.

Robot modellemesi modern paket programlar ile yakın geçmişte olduğundan daha hızlı ve emin bir şekilde sağlanabilmektedir. Sadece robot üreticilerinin kendi yazılımları ile değil MATLAB gibi 'sivil' programlar ile de gerek tekil robotların modellenmesi ve analizi gerekse robotik iş hücrelerinin tasarımı mümkün olmaktadır. Yapılan çalışmada buna imkan veren MATLAB/Simmechanics programından faydalanılmaktadır. Lagrange-Euler denklemi arka planda ileri ve/veya ters dinamik çözümlemelerde kullanılmakta olsa da Simmechanics ile sunulan olanaklar geliştiriciyi detaylı ve fazlasıyla karmaşık dinamik modeller oluşturma külfetinden kurtarmaktadır.

Eğitim hayatımın her aşamasında manevi ve maddi desteği ile yanımda olan, ilk öğretmenim ve ilham kaynağım, biricik annem Sergül EKİN'e şükranlarımı sunarım.

Lisans ve yüksek lisans eğitimlerimde danışmanlığımı yürüten, sabrı ve rehberliği ile mühendislik anlayışımı biçimlendiren Prof. Dr. Sayın İbrahim YÜKSEL'e teşekkürü borç bilirim.

Orçun Ekin

22/08/2011

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET I

ABSTRACT II

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR III

İÇİNDEKİLER IV

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ VI

ŞEKİLLER DİZİNİ VIII

1. GİRİŞ 1

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 4

3. MATERYAL VE YÖNTEM 13

3.1. Materyal 15

3.1.1. TX90 İnsansı Kol Yapılı Eyleyici ve CAD Dosyası 15

3.1.2. Elektromekanik servo sistemler 17

3.1.2.1. Kalıcı mıknatıs senkron motorlar 18

3.1.2.2. Gerilim kaynak evirgeci 21

3.1.2.3. Akım, açısal hız ve açısal konum algılayıcılar 24

3.1.2.4. Servo sistem denetim birimleri 26

3.1.2.5. PMSM Sürücü modelinin MATLAB/Simulink ortamında gerçeklenmesi 28

3.1.2.6. Modelde kullanılan motorlar 30

3.1.3. MATLAB/Simulink ve Simmechanics 31

3.1.4. Simmechanics modeli 32

3.2. Yöntem 34

3.2.1. Kinematik analiz 36

3.2.1.1. İleri kinematik analiz 36

3.2.1.2. Ters Kinematik Analiz Yardımıyla Mafsal Parametrelerinin Bulunması 41

3.2.1.3. Bilek Yönelimi 45

3.2.2. Mafsal Yörünge Algoritması 48

3.2.3. Robot Dinamiğinin Tanımlanması 55

3.2.3.1. Lagrange-Euler denklemi 55

3.2.3.2. Dinamik Modelin Elde Edilmesi 60

3.2.4. İnsansı kol yapılı robotta bağımsız mafsal denetimi 64

3.2.4.1. Kol mafsalına indirgenmiş robot dinamiğine ait matematiksel model 64

3.2.4.2. Kalıcı mıknatıs senkron motorun matematiksel modeli 68

3.2.4.3. Senkron motorun denetimi: Akım ve hız denetim döngüleri 71
3.2.4.4. Kol mafsalına indirgenmiş robot Simulink modeli 75
3.2.4.5. Kol mafsalına indirgenmiş robot Simulink/Simmechanics modeli 76
3.2.5. MATLAB/Simulink ortamında denetleyici optimizasyonu 78
3.2.5.1. Simulink modeli için denetleyici optimizasyonu 79
3.2.5.2. Simulink/Simmechanics modeli için denetleyici optimizasyonu 83
3.2.6. Uygulanan İş Planı 91
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 93
4.1. Yüklü Çalışma Halinde Ayrık Denetleyici Başarımları 93
4.2. Konumlama Hassasiyetleri 99
5. SONUÇ 103
KAYNAKLAR 105
EKLER 107
EK-1: Çalışmada Kullanılan Robota Ait Teknik Veriler 107
EK-2: Çalışmada Kullanılan Servo Motorlar 110
EK-3: Ters Kinematik Analiz ile Mafsal Yörüngelerini Oluşturan Program 114
EK–4: KOL Mafsalının Dinamiğini İfade Eden Denklemler 118
ÖZGEÇMİŞ 142

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklamalar
$m_1 \dots m_6$	Uzuv kütleleri
M	Tutucu uzvun taşıdığı yük
g	Yerçekimi ivmesi
V_{dqo}	Eşdeğer devre d- ve q eksen gerilimleri
V_{abc}	Trifaze gerilimleri
λ_d, λ_q	Eşdeğer devre d- ve q- eksen akım sabitleri
λ_f	PM Akım sabiti
i_{abc}	Trifaze akımlar
i_{dqo}	Eşdeğer devre akımları
I_m	PMSM akım sınırı
L_d, L_q	Eşdeğer devre d- ve q- eksen endüktansları
T_e, T_L	Elektromanyetik tork ve yük torku
ω_m, ω_r	Rotor açısal hızı, tasarım hız üst sınırı
$\omega_{ref}, \theta_{ref}$	Referans açısal hız ve konumlar
M_n	Nominal Motor Torku
N_n	Motor Hızı
J_{eff}	Motor miline indirgenmiş eşdeğer atalet momenti
K_m	Motor-tork sabiti
K_b	Zıt EMK katsayısı
$T_{01} \dots T_{56}$	Mafsal dönüşüm matrisleri
$R_{01} \dots R_{56}$	Mafsal açısal dönüşüm matrisleri
$a_1 \dots a_6$	DH Parametreleri: Eksenler arası mesafeler
$d_1 \dots d_6$	DH Parametreleri: Eksenel kaçıklıklar
$\alpha_1 \dots \alpha_6$	DH Parametreleri: Dönme eksenleri arası açılar
$\theta_1 \dots \theta_6$	DH Parametreleri: Mafsal açıları
$o_c x_c y_c z_c$	Bilek merkezi eksen takımı
$o_6 x_6 y_6 z_6$	Uç eyleyici eksen takımı
γ, β, α	Roll, Pitch, Yaw açı seti
$z_1 \dots z_6$	Mafsal dönme eksenleri
$\theta_{M1} \dots \theta_{M6}$	Mafsal açısal sığaları
$v_1 \dots v_6$	Uzuv ağırlık merkezi doğrusal hızları
$\omega_1 \dots \omega_6$	Uzuv ağırlık merkezi açısal hızları
$I_1 \dots I_6$	Uzuv atalet tensörleri
$J_1 \dots J_6$	Hız Jacobian matrisleri
$L(\theta, \dot{\theta})$	Lagrange – Euler Fonksiyonu
$C(\theta, \dot{\theta})$	Coriolis – Merkezkaç Kuvvet vektörü
$D(\theta)$	Bileşke kütle matrisi
$G(\theta)$	Yerçekimi vektörü
$\tau_1 \dots \tau_6$	Robot dinamiğinden gelen mafsal yükleri
$G_d(s)$	Denetleyici transfer fonksiyonu (SISO)
$G_s(s)$	Sistem kapalı döngü transfer fonksiyonu (SISO)
K_p	Oransal denetim etkisi kazancı

T_i	İntegral Denetim Etkisi Kazancı
ξ	Sönüm Oranı
ω_n	Doğal Frekans
C_1 , C_2	Denetleyici Transfer Fonksiyonları (MIMO)
$G_1(s)$, $G_2(s)$	Denetlenen Sistem Transfer Fonksiyonları (MIMO)

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
YSA	Yapay Sinir Ağı
IGA	Bağışık Genetik Algoritma
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CAM	Bilgisayar Destekli Üretim
DMU	Sayısal Canlandırma
AC	Alternatif Akım
DC	Doğru Akım
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
XML	Genişletilebilir İşaretleme Dili
VSI	Gerilim Kaynak Evirgeci
CSI	Akım Kaynak Evirgeci
PMSM	Kalıcı Mıknatıs Senkron Motor
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
SVM	Uzay Vektör Modülasyonu
DH	Denavit - Hartenberg
DoF	Serbestlik Derecesi
CS	Koordinat Takımı
EMK	Elektromotor Kuvveti
PI	Oransal + İntegral Denetim
SISO	Tek Giriş Tek Çıkış
MIMO	Çok Giriş Çok Çıkış
LTI	Doğrusal Zamandan Bağımsız
VR	Sanal Gerçeklik

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1: Mekatroniğin anahtar bileşenleri (National Instruments illüstrasyonu) 13
Şekil 3.2: Robotik sistem 14
Şekil 3.3: Robota ait CAD dosyası (CATIA DMU Kinematics ortamı)..... 16
Şekil 3.4: Mafsal denetiminde kullanılan servo devresi (Arroyo 2006) 17
Şekil 3.5: Açısal hız ve konumun denetlendiği servo sistem..... 18
Şekil 3.6: Kalıcı mıknatıs senkron motor..... 19
Şekil 3.7: Kalıcı mıknatıslı senkron motor şematik gösterimi ve akım yönü 20
Şekil 3.8: Üç fazlı gerilim kaynağı evirgeci prensip şeması (Espinoza 2007)..... 21
Şekil 3.9: Vektör modülasyonunda üç fazlı evirgeç için olası tüm anahtarlama vektörleri (Espinoza 2007) 22
Şekil 3.10: IGBT şematik gösterimi (a) ve IGBT kullanan üç fazlı evirgeç devresi 24
Şekil 3.11: Hall-etki algılayıcı 25
Şekil 3.12: Mutlak ve artımlı enkoderlere ait diskler..... 25
Şekil 3.13: PWM yoluyla akım denetimi (Arroyo 2006)..... 27
Şekil 3.14: Kalıcı mıknatıs senkron motor sürücü devre şematik gösterimi..... 28
Şekil 3.15: Vektör Denetleyici bloğuna ait şema..... 29
Şekil 3.16: AC6 Simulink üst modeli 29
Şekil 3.17: Simmechanics temel robot modeli..... 32
Şekil 3.18: Simulink/Simmechanics ortamı test modeli 33
Şekil 3.19: Dönme ekseni ve pozitif dönme yönünün belirtildiği bir döner mafsal (http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/mech/, 2011) 34
Şekil 3.20: Denavit-Hartenberg parametrelerinin gösterimi (Spong 2006)..... 37
Şekil 3.21: Kol mafsalı ve uzvunda tanımlanan parametreler 38
Şekil 3.22: Eksenel açıklık barındırmayan (solda) ve eksenel açıklıklı yapı..... 42
Şekil 3.23: Omuz mafsal açısı..... 43
Şekil 3.24: Kol ve dirsek açıları..... 44
Şekil 3.25: Roll-Pitch-Yaw açı takımı. 45
Şekil 3.26: Önkol uzvuna ait fiziksel özellikler (Catia DMU Kinematics Ortamı)..... 56
Şekil 3.27: Kol mafsalına indirgenmiş modelin yere paralel konumu..... 65
Şekil 3.28: Bileşke atalet momenti (a) ve yerçekimi etkisi (b)..... 67

Şekil 3.29: Park dönüşümüne göre PMSM eşdeğer devresi 71
Şekil 3.30: PMSM stator ve rotor eksenleri 72
Şekil 3.31: Kalıcı mıknatıs senkron motorda denetim döngüleri 74
Şekil 3.32: PMSM hız denetiminde akı zayıflatma prensibine ait blok şema (Arroyo 2006) 74
Şekil 3.33: Denetim yapısı (a) ile motor ve robota ait dinamik modeller (b) 75
Şekil 3.34: Üst model (a) ve Simmechanics robot modeli (b) 76
Şekil 3.35: Genel şemadaki BLOK-A'nın ayrıntılı görünümü 77
Şekil 3.36: Gövde eyleyicisi 78
Şekil 3.37: Hesaplanmış çalışma noktasına ait diyalog kutusu 79
Şekil 3.38: Denetim döngülerinin ayrıklaştırılması 80
Şekil 3.39: Denetleyici optimizasyonu ardından ulaşılan Bode diyagramları 81
Şekil 3.40: Tasarım parametrelerine göre doğrusal (a) ve doğrusal olmayan (b) sistem cevabı 82
Şekil 3.41: PD etki denetleyici (a) ve PI etki denetleyici (b) ayar parametreleri 83
Şekil 3.42: Enstantane yakalayıcı ile oluşturulan çalışma noktası 84
Şekil 3.43: Doğrusal sistemin ZPK gösterimi 84
Şekil 3.44: Optimizasyon basamakları 85
Şekil 3.45: Tasarım kıstasları seçim ekranı 86
Şekil 3.46: Aşırı kısıtlandırma sonucu elde edilen yetersiz sonuç 86
Şekil 3.47: Başarılı optimizasyon 87
Şekil 3.48: İterasyon adımları 87
Şekil 3.49: Doğrusal olmayan modelin basamak giriş cevabı 88
Şekil 3.50: Lookup Table'ın düzenlenmesi 89
Şekil 3.51: Lookup tablosuna göre cevap eğrisi (a) ve aşma miktarı (b) 90
Şekil 3.52: Robota ait iş planı 91
Şekil 3.53: Uç yöneliminde meydana gelen değişim. 92
Şekil 4.1: Kritik konumlar 94
Şekil 4.2: Omuz mafsalı; yüklü ve yüksüz çalışma hali 95
Şekil 4.3: Referans girişe göre omuz mafsal hatası. 95
Şekil 4.4: Kol mafsalı; yüklü ve yüksüz çalışma hali 96
Şekil 4.5: Kol mafsalında meydana gelen hata 96

Şekil 4.6: Dirsek mafsalı; yüklü ve yüksüz çalışma hali. 97
Şekil 4.7: Dirsek mafsalında meydana gelen hata 97
Şekil 4.8: Bilek mafsalı; yüklü ve yüksüz çalışma hali. 98
Şekil 4.9: Bilek mafsalında oluşan hata 98
Şekil 4.10: Yüklere göre uç eyleyicinin çizdiği yörünge 100
Şekil 4.11: Birinci (a) ve ikinci (b) kritik noktada konumlama hassasiyetleri ve yüke bağlı tekrarlayabilirlik 101

1. GİRİŞ

Robotik bir sistem aynı zamanda mekatronik bir sistemdir. Bu önermenin doğruluğunun anlaşılması için robot tasarım süreçlerinin incelenmesi yeterli olacaktır: Robot tasarımı ve denetimi konusu her aşamasıyla Mekatronik disiplininin sınırları içerisinde gerçekleştirilir. Bu çalışmanın ana fikri, temel mekatronik tasarım aşamalarının robotik bir sistem, tam olarak altı serbestlik dereceli insansı kol yapılı endüstriyel bir robot üzerinde uygulanmasıdır. Bu açıdan robot tasarımı ve denetimi ile ilgilenmeye başlamadan önce kaynak bilim dalı olan Mekatronik disiplininden kısaca ve yapılan çalışmanın kapsamı doğrultusunda bahsetmek yerinde olacaktır.

Mekatronik birden fazla mühendislik dalının biçimlendirdiği ortak bir disiplindir. Mekatronik sistemler, mekanik, elektrik ve elektronik bileşenlerden oluşan; ilk verileri karşılayan algılayıcıları, bu verileri yorumlayan ve işleyen mikroişlemcileri ve sonunda bu veriler doğrultusunda gerekli tepkileri veren eyleyicileri ihtiva eden sistemlerdir. Günümüzde tüketim ürünü olarak yaygın kullanım gören, günlük hayatın birer parçası haline gelmiş fotoğraf, video, fotokopi ve çamaşır makineleri gibi birçok ürün, algılayıcıları, yazılımları, denetleyici ve eyleyici yapıları ile en basit ve tipik mekatronik sistem örnekleridir.

İnterdisipliner olması dolayısıyla mekatroniğin uğraşı alanları son derece geniştir. Mekatronik çözümlerin uygulandığı alanlara şu örnekler verilebilir:

- İmalat Teknolojileri (bilgisayar denetimli tezgâhlar, robotlar vb.),
- Otomotiv Endüstrisi (ABS fren sistemleri, bilgisayar denetimli motor verimlilik ölçüm cihazları),
- Uzay teknolojisi (uzay araçlarının denetimi, insansız uzay araçları),
- Savunma sanayi (füze sistemleri, uçak denetim sistemleri),
- Malzeme işleme (fiziksel ve kimyasal süreç denetimi, metal, kompozit ve plastik malzemeler),
- Görüntüleme ve kayıt sistemleri (kamera, fotoğraf Makineleri),
- Tıp sanayi (tahlil üniteleri, görüntüleme cihazları vb.),
- Kopyalama makineleri (fotokopi, ofset makineleri),
- Tüketici ürünleri (elektrikli ev aletleri, ofis cihazları, spor aletleri vb.).

Doğayı taklit edici (*Biomimetic*) yapılanma gösteren endüstriyel robotlar konusu, mekatronik disiplininin en popüler uygulamalarından biridir. Endüstriyel robot akımı 1973 yılında Alman *KUKA Robotics* tarafından üretilen dünyanın ilk altı serbestlik dereceli antropomorfik eyleyicisi FAMULUS ile hız kazanmıştır (http://www.kuka-robotics.com/, 2011). Günümüzde başta çalışma uzayları, yükleme durumları ve hareket imkanları olmak üzere birçok özelliği ile farklılık gösteren antropomorfik eyleyicilerin üretimi gerçekleştirilmektedir. Endüstride gitgide artan kullanım olanaklarına kavuşan bu robotların ilerleyişi, donanım, yazılım ve denetim konularında araştırma ve geliştirme faaliyetlerini sürdüren bilim insanlarınca sağlanmaktadır. Antropomorfik[1] eyleyiciler bilim ve endüstrinin kesiştiği hat üzerinde bulunmakta ve bu sayede güçleri sürekli artmaktadır.

Antropomorfik eyleyicilerin belli başlı kullanım alanlarını maddeler halinde sunmak mümkündür (http://www.robots.com/applications.php, 2011):

- Kaynak operasyonları
  - Direnç kaynağı
  - Lazer kaynak
  - Nokta (punta) kaynak
- Nesne yönlendirme
  - Paketleme
  - İstifleme
  - Al ve Yerleştir (Pick&Place) operasyonlar
- Diğer işlemler
  - Tornalama
  - Boyama
  - Robotik montaj
  - Isıl sprey
  - Su Jetli kesme

[1] Antropomorfi (Anthropomorphism); Yunancadaki *ánthrōpos* (insan) ve *morphē* (biçim, form) kelimelerinden türetilmiş olup insan karakteristik özelliklerinin insan haricindeki hayvan, cansız nesneler, görüngü veya soyut kavramlara atfedilmesi halinde bunları tanımlamakta kullanılan terimdir. Benzer şekilde, serbestlik dereceleri ve hareket özellikleri bakımından insan kolunu taklit eden robotik eyleyiciler için de bu terim kullanılmaktadır.

Bu çalışma *STAUBLİ Robotics* firmasına ait *TX90* kodlu 6 serbestlik dereceli, 6 döner (revolute) mafsallı, Euler bilek yapısına sahip antropomorfik robot üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ters kinematik analiz yardımıyla mafsal uzayında yörünge tayini, Lagrange-Euler dinamik denklemi ile gerekli motor torklarının tespiti ve ayrık mafsal temelli geri beslemeli denetim faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Robot dinamiğinin modellenmesi sadece Simulink blokları ile değil aynı zamanda Simmechanics ortamının getirdiği yeni yapılar ile yapılmıştır. Araştırma bulguları bölümünde robotun sahip olduğu bu yapının tasarım şartları dahilinde yüklerle çalışması halinde verdiği tepkiler incelenmiş, sonuçlar boşta çalışma verileri ile karşılaştırılmıştır. Referans yörüngelerin takibinde oluşan hatalar tartışılmıştır. Robot uç eyleyicisinin yük değişimlerine göre tekrarlayabilirlik başarımı grafiksel olarak aktarılmıştır.

Robotun denetimi bağımsız mafsal denetimi yaklaşımı ile yürütülmektedir. Bu yaklaşımın temelinde referans mafsal yörüngelerinin takibi için gereken tork değerlerinin gövde eyleyicilerine (*body actuator*) beslenmesi yatar (Spong 2006). Mafsalların ölçülen açısal konum ve açısal hız değerleri çıkış sinyalleri olarak kullanılır. Robot denetimi konusunun en dikkat gerektiren bölümü konum ve yörünge denetiminin gerçekleştirilmesidir. Bu çalışma kapsamında robot mafsallarında açısal hız denetimi yanı sıra bağımsız bir geri besleme döngüsü ile konum denetim işlemi de yürütülmüştür. Robot mafsallarını hareketlendiren motorlarda akım ve dolayısıyla tork denetiminin sağlanması amacıyla hız denetim yaklaşımı kullanılır. Ölçülmesi ve değerlendirilmesi görece ekonomik ve pratik olan açısal hız parametresi motor iç denetiminde kullanılmaktadır. Bu çalışmada orantı artı integral tipinde (PI) hız denetim algoritmasından yararlanılmaktadır. Robot mafsallarındaki konum denetimi ise orantı artı türev etki (PD) ile sağlanmaktadır. Bu haliyle denetleyici çok giriş çok çıkışlı bir yapı göstermektedir (***M**ultiple **i**n **M**ultiple **o**ut - MIMO*).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Robot manipülatörler konusu, sahip olduğu tartışmasız endüstriyel potansiyel sebebiyle yıllar boyu araştırmacıların büyük ilgisini çekmiştir. Bu sebeple sadece antropomorfik yapılarda değil paralel, küresel, silindirik ve SCARA tip manipülatörler üzerine de sayısız çalışma yayınlanmıştır.

Konu, hemen her aşamasıyla tipik bir mekatronik problemi olarak yazılım bilimciler, mekanik ve elektronik bilimlerinde faaliyet gösteren araştırmacılar tarafından benimsenmiş ve yaklaşık otuz yıllık çerçevede 'enine boyuna' incelenmiştir. Robot manipülatörler üzerine yapılan araştırmalarda işlenen konular ana hatlarıyla şöyle sıralanabilmektedir:

- Robot yörüngelerinin tayini,
- Robot kinematiği,
- Robot dinamiğinin denetim yöntemleri,
- Esnek uzuvlu manipülatörler,
- Görme tabanlı iş takibi,
- Robot iş hücrelerinde görü tabanlı iş takibi,
- Robot iş hücrelerinde iş adaptasyonu.

Manipülatörler konusunda yapılan çalışmalar çok geniş bir yelpazede yer almakta dolayısıyla yukarıdaki maddelere zaman zaman yenileri eklenmektedir. Takip eden satırlarda yapılan çalışmanın konusu ile yakınlık gösteren ve mümkün olduğunca güncel durumdaki çalışmalardan örnekler sunulacaktır.

Hsia ve ark. (1991), bağımsız mafsal denetimi ilkesine dayanan dayanıklı (robust) denetleyici tasarımı ile ilgilenmişlerdir. Bu çalışmada da robot manipülatörler üzerine yapılan pek çok çalışmada olduğu gibi Puma 560 antropomorfik yapılı robot model olarak benimsenmiştir. Bağımsız mafsal denetiminin tercihinde robot dinamiğini temsil eden matematik modelin karmaşıklığının etken rol aldığı vurgulanmaktadır.

Çalışmada her bir mafsalın bağımsız bir atalet sistemine sahip olduğu varsayılır, basit bir algoritma ve PD denetleyici devresi ile bağımsız mafsal denetimi sağlanır. Bağımsız sistemlere etkiyen tüm bozucu girişler bu algoritmanın uygulanması sırasında ihmal edilmiştir.

Bağımsız denetim yapısına ait karşılaştırma bozucu etkilerin ihmal edildiği ideal mekanizma ile bu etkilerin kestirim yoluyla sisteme dahil edildiği durum arasında yapılır. Deneysel sonuçlar üç ana başlıkta sunulmaktadır:

- Basamak giriş cevabı: Mekanizma dik (dinlenme) konumdan ilk üç mafsalına 10'ar derecelik açısal basamak girişler verilerek sol ileri konuma getirilmiştir. Bu konum uzuvlar arası kuplajın ortaya çıkarılmasını sağlayacak mertebededir. Yukarıda anılan iki ayrı model için basamak cevap hataları döküm olarak sunulur.
- Yörünge takibi: Mekanizmanın her mafsalının 30°'lik bir 'ramp' girişi sağlaması üzerinden yörünge takibi yapılmıştır. İstenen hız değeri $40^{\circ}/s$ olarak tayin edilmiştir. Sistem başarımı yine her iki durum için sunulmuş ve hızın daha da artırılması halinde dahi hatanın çok fazla yükselmediği gözlenmiştir.
- Yük değişimi: Son test 1,35kg'lık yük etkisi altında sistem davranışını incelemektedir. Senaryo bir önceki maddede olduğu gibidir. Sunulan grafiklerde ihmal edilemez ölçüde hata gözlense de yörünge takibi sağlanmaya devam etmektedir.

Hu ve Müller (1994), yaptıkları çalışmada endüstriyel robotların bağımsız mafsal denetimi ile konumlama problemi üzerinde durmuşlardır. Bu yaklaşımın geliştirilmesi ve uyarlanması amacıyla kullanılan doğrusal olmayan kestirim teknikleri tanıtılmıştır.
Robot denetimi problemine getirilen çözümler iki ana grupta toplanır. Bunlar,

- Çoklu gövde yapıları ve lineerleştirme metotlarına dayanan çoklu değişken denetimi,
- Mekanizmanın nonlineerlik özelliğinin benimsenerek mafsal eyleyicilerinin hesaplanmış torklarla hareketlendirildiği bağımsız mafsal (parametre) denetimidir.

Çalışmanın sonucunda lineerleştirme metodu ile kıyaslama sağlanabilecek sonuçların eldesi mümkün olmuştur. Yükteki değişimler, sürtünme ve parametre doğruluğunun yeterli olmaması gibi bozucu etkiler karşısında bağımsız mafsal denetimi metodunun üstünlükleri savunulmuştur.

Kelly ve ark. (1996), engeller bulunduran bir çalışma uzayında etkinlik gösteren üç serbestlik dereceli robot kolun yörünge planlamasında bulanık mantık ile yapay sinir ağları yaklaşımını işbirliği halinde kullanmışlardır. Birden fazla sayıdaki bileşik (neuro-fuzzy) denetleyici için gereken örnek veriler robot kolun insan tarafından kumanda edilmesiyle toplanmıştır.

Çalışmada kullanılan ortaklıkta sinir ağları öğrenme kabiliyeti sağlamakla birlikte karmaşık sistemlerin eğitilmesinde ağır iterasyon yükleri getirmektedir. Bulanık mantık ise sistem modelinin üyelik fonksiyonları ve kural tabanı ile oluşturulmasını sağlarken çok iyi oturtulmuş şart döngülerini gerekli kılmaktadır.

Bulanık sistem içerisindeki kural tabanı yerine eğitilebilir bir yapay sinir ağı kullanılmasıyla karmaşık giriş çıkış ilişkilerinin tanımlanması mümkün olmaktadır. Bu yöntemin uygulanması şart döngülerinin kullanılması gereğini ortadan kaldırır. YSA'yı sıklaştıran bulanıklaştırma ve netleştirme aşamaları ile eğitim zamanında, genelleştirme yeteneğinde ve ağırlık fonksiyonlarının en küçük değerlerinin bulunmasında gelişim sağlanır. Bunların ötesinde bulanık üyelik fonksiyonları kullanıcıya sinir ağı giriş çıkış değerleri üzerinde daha iyi denetim sağlar.

Robotun insan denetiminde olduğu öğrenme aşamasındaki amaç hedef noktaların çalışma uzayı içerisinde kaldığı hareket planında engelin birinci uzuv yörüngesinin dışında kalmasının sağlanmasıdır. Eğitim örnekleri yedi farklı bulanık YSA denetleyicinin eğitimi için kullanılmaktadır.

Çalışma sonuçları kullanılan yedi denetleyicinin 2150 örnek ile eğitilmesinin ardından en başarılı denetleyicinin başarımının %17 civarında olduğunu göstermektedir. Bu haliyle uygulama mükemmel sonuçlar vermemekte ve geliştirilmeye açık olarak değerlendirilmektedir. Gerçekleşen hataların iki önemli sebebi olduğuna dikkat çekilmiştir. Bunlardan ilki denetleyicinin fiziksel mafsal kısıtlarının dışına çıkan değerler üretmesi, ikincisi ise kol uzvunun iki hedef nokta arasında titreşimli bir harekete başlamasıdır.

Abrams ve ark (1999), aktif bir robotik iş hücresinde görsel algılama üzerinde çalışmışlardır. İş hücrelerinde görsel planlama konusunun öncülerinden biri olarak değerlendirilebilecek olan çalışma *IBM T. J. Watson* geliştirme tesisinde yürütülmüştür.

Çalışmada standart PUMA 560 manipülatörüne el-göz koordinasyonunun kazandırılması amacıyla 5 serbestlik dereceli Kartezyen robot uç eyleyicisine CCD

kamera iliştirilmiş ve iki robotun bu doğrultuda gerçek zamanlı iletişim kurması sağlanmıştır. Kamera benzer çalışmalardan farklı olarak tanımlı iş uzayının bir noktasına sabitlenmemiş, aksine kartezyen robotun gereken anlarda kamerayı işleyişin en iyi takip edilebildiği noktaya taşımasını sağlayan bir algoritma geliştirilmiştir. Projede görsel algılama kalitesinin artırılması yolunda çözümlenmesine çalışılan kısıt şartları şu şekilde sıralanmıştır:

- Görünürlük: Gerçekleşen işlem ortamda bulunan cisimler tarafından kesilmemelidir.
- Görüş alanı: Gerçekleştirilen işlem daima algılayıcının 'gördüğü' alan içerisinde kalmalıdır.
- Çözünürlük: Gerçekleşen işlemin hareket sığası kamera çözünürlüğünden yüksek kalmalıdır.
- Odaklama: Hedef işlem iyi odaklanmış olmalıdır.
- Aydınlık: İşlemlerin sağlıklı takibinin sağlanması için kamera hassasiyeti doğrultusunda aydınlatmanın sürekliliği gereklidir.

Chen (2000), robotik iş hücrelerinde iş adaptasyonunun hızlandırılması yönünde yaptığı çalışmada tak ve çalıştır (*Plug&Play*) robot yapılanmaları ve denetim programcılığı üzerinde durmuştur.

CNC tezgahlar, manipülatörler, besleme ekipmanları, konveyörler gibi iş hücresi bileşenleri belirli bir işi gerçekleştirmek üzere programlanır, analiz ve benzetimler yürütülür. Bu işin devamı sırasında mevcut yapılanmalarda küçük bazı değişiklikler meydana getirilmesi zorunlu olduğunda sistem esnekliğinden istifade edilebilir. Ancak Chen'e göre ana işteki değişim sırasında geleneksel iş hücresi yaklaşımları adaptasyon ile ilgili büyük zamansal ve maddi külfetler getirmektedir. Bu durum üreticinin pazarda meydana gelen değişimlere hızlı tepki verilebilmesi önünde engel teşkil etmektedir.

Chen tanımladığı bu problem karşısında 'çabuk uyum gösteren iş hücresi' kavramını öne sürer. Bu sisteme göre çabuk modifikasyon 'tak ve çalıştır' esaslı teknolojiye dayanır: İş hücreleri değiştirilebilir modüler eyleyiciler, katı uzuvlar, uç eyleyici ve algılayıcılardan oluşmaktadır.

İş ve dolayısıyla yapılanma değişimleri sebebiyle her defasında yeniden oluşturulması gereken iş planları, ileri-ters kinematik ve ileri-ters dinamik problemler büyük bir engel teşkil etmektedir. Ancak çalışmada bu durumdan sakınmak için iş hücresinde var

olabilecek tüm olası yapılanmalara ait veri tabanları oluşturulmuştur. Böylece Tak&Çalıştır anlayışı sorunsuzca uygulanabilmektedir.

Cheng (2000), bu konuda popülerliğini halen korumakta olan bir yazılımın, Deneb IGRIP robotik benzetim paketinin incelemesini gerçekleştirmiştir.

IGRIP (***I***nteractive ***G***raphical ***R***obot ***I***nstruction ***P***rogram - Grafik temelli ve etkileşimli robot eğitim programı) kullanıcı dostu özellikli bir robotik iş hücresi benzetim paketidir. İş hücresi yerleşim planlaması, benzetim ve çevrimdışı programlama desteği sağlamaktadır.

Yazılım üç ana bölümden oluşmaktadır:

- IGRIP Menü Sistemi
- Grafik Benzetim Dili
- Komut Satır Çevirici

Grafik benzetim dili (***G***raphical ***S***imulation ***L***anguage) süreç esaslı bir dildir ve benzetim modellerinin denetiminin sağlanmasında görev alır. GSL yüksek seviyeli programlama dilleri ile benzetim ortamının özel nitelikleri ve modellerin hareket prensipleri arasındaki zorunlu bağlantıları kurar.

Komut satır çevirici (***C***ommand ***L***ine ***I***nterpreter) IGRIP sistemine doğrudan erişen ve sistemi işleten güçlü bir iletişim, denetim ve komut sistemidir.

Yapılan çalışmada IGRIP işleyişi hakkında tipik bir ikili robot iş hücresi üzerinden örnekler verilmiştir. Sistem CAD verilerinin tıpkı Simmechanics ortamında olduğu gibi ithal edilebilmesi yanında robot modellerinin oluşturulabildiği basit ve hızlı bir tasarım arabirimine de sahiptir. Tasarlanan veya ithal edilen modellerin kinematik atamaları ve kısıtları kaydedilir.

Programın ön plana çıkan özelliklerinden biri kendini hareket çözümlemesinde gösterir. İş planlarına göre robot yörüngelerinin oluşturulmasında araç merkez noktası (***T***ool ***C***enter ***P***oint) koordinatlarına göre robot ters kinematiği probleminin nokta esaslı çözülmesi yaklaşımı seçilmiştir. Robot kinematiğinin getirdiği olanaksız çözümler giderilir, olanaklı çözümler arasında çarpışma engellenmesi ve en kısa yol kıstasları uyarınca tercih yapılır.

Günümüzün en popüler bilim dallarından biri haline gelen robotik her yönüyle araştırılmaya ve geliştirilmeye devam etmektedir. Antropomorfik manipülatörler ile ilgili çalışmalar endüstriye dönük yüzleri sebebiyle görece daha büyük bir niceliğe

sahiptirler. Yapılmış olan çalışmada bu alanda en ön plana çıkmış olan makale ve projelere yer verilmesine gayret gösterilmiştir.

Patino ve ark. (2002), yüksek performanslı robotik eyleyiciler için yapay sinir ağları (YSA) temelli bir uyarlamalı denetim yöntemi önermiş ve geliştirmişlerdir. YSA tabanlı denetleyici çevrimdışı olarak eğitilmiş sabit sinir ağı kümesi ve doğrusal katsayıların kombinasyonlarını kullanarak robot dinamiği ve harici yüklerin etkilerini karşılamayı amaçlayan bir uyum yasası barındırmaktadır.

Çalışma esas olarak üç bölüm halinde düzenlenmiştir. Tercih edilen Puma 560 tipindeki robotun ters dinamiğinin modellenmesinde bir YSA kümesi ve öğrenme şartlarının seçimini sağlayan bir süreç kullanılmıştır. İkinci bölümde katı uzuvlu robot eyleyicilerde hareketin uyarlamalı denetimi anlatılmış ve matematiksel biçimde ifade edilmiştir. Bunun yanı sıra YSA tabanlı geribeslemeli-uyarlamalı ve geribeslemeli-dayanıklı uyarlamalı denetleyiciler hakkında bilgi verilmektedir, bu iki yöntem kıyaslanmaktadır. Üçüncü kısımda kullanılan YSA yapısı tanımlanırken bir eğitim yöntemi sunulmuştur.

Çalışmanın ürünleri incelendiğinde yazarın önerdiği sabit YSA denetim sisteminin etkinliği gözlenmektedir. Büyüklüğü YSA kümesinin yaklaşım hatasına bağlı olan denetim hatasının sıfırın bir komşuluğuna yakınsadığı kanıtlanmıştır. Çalışma verileri Puma 560 robotunun kullanıldığı benzetimlerde de yöntemin robotik çalışmaların genelinde kullanılmaya aday olduğunu gösterir niteliktedir.

Schaefer ve ark. (2002), tarafından Alman Havacılık ve Uzay Dairesi (DLR) bünyesinde yürütülen çalışmada, 7 serbestlik dereceli, 7 döner mafsallı (6R) redundant antropomorfik robota ait ters kinematik problemin çözümlenmesi hedeflenmiştir. Yörünge takibini sağlayan mafsal açılarının belirlenmesinde kapalı denklemlerin çözümü değil optimizasyon yolu seçilmiştir. Optimizasyon mafsal sürücü yönelimli ve yapılanma tabanlı olarak iki farklı biçimde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan robot hafif alaşımdan üretilmiş ve Alman Roentgen Satellite (ROSAT) üzerinde görev yapmak üzere simüle edilerek geliştirilmiştir.

Liu ve ark. (2005), 6 serbestlik dereceli 6 kayar (prizmatik) mafsallı Stewart platformunun (HEXAGLIDE) kinematik ve dinamik incelemesini gerçekleştirmişlerdir. İlgili modellemeler MATLAB-Simmechanics ortamında yapılmıştır. Platformun denetiminde ileri beslemeli mafsal torklarından yararlanılmıştır. Dinamik çözümlemede

Lagrange-Euler denklemi kullanılmış olup ileri beslenen torkların eldesi ters dinamik analiz yoluyla sağlanır. Sistem çıkışı platform yönelimidir. Mafsallarda PID denetim yönteminden faydalanılmıştır.

Rusu ve Eniko (2006), ABB IRB L6/2 model insansı kol yapılı robot mafsallarının vektör denetimli kalıcı mıknatıs senkron motor (***P**ermanent **M**agnet **S**ynchronous **M**otor* - *PMSM*) ile hareketlendirilmesi üzerinde çalışmışlardır.

PMSM düşük atalet momenti, yüksek verim, etkin ısı dağılımı ve nispeten küçük motor boyutları ile elektromekanik servo uygulamalarına uygunlukta benzerlerinin ilerisinde yer almaktadır. Fırçasız yapıdaki bu motorlarda gürültü azalır ve fırçaların getirdiği bakım külfeti ortadan kalkar.

Çalışmada PMSM servo denetimi DSK243 sayısal sinyal işlemcisi (***D**igital **S**ignal **P**rocessor* - *DSP*) yardımıyla sağlanmaktadır. DSK243 ile hareket denetim yaklaşımı denetleyicinin kompakt yapıda, güvenilir ve esnek olması dolayısıyla tercih edilmiştir.

PMSM servo sistemin dinamik davranışının araştırılması amacıyla IRB L6/2 endüstriyel robotunun dinamik modeli oluşturulmuştur. DSP sistemi devrede iken harici yüklerden kaynaklanan yük torkları ile çalışılması sırasında robot üzerinden elde edilen verilerde PMSM mafsal eyleyicileri ve hareket denetiminin başarımı kanıtlanmıştır.

Huang ve ark. (2008), restoran servisinde görev yapmak üzere kullanılan antropomorfik kol yapılı iki manipülatörle donatılan 'robot garsonların' yörünge tayinleri üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada ters kinematik analizin çözümlenmesinde kullanılan algoritma *bağışık genetik algoritma* olarak tanımlanmaktadır.

Çalışmanın konusu olan tekniğin uygulanmasından önce robot ters kinematiğinin çözümünde kullanılan iki esas yöntem olan kapalı denklemlerin çözümü ile iterasyon yöntemleri tartışılmıştır. Araştırmacılara göre kapalı denklemlerin çözümünde yüksek karmaşıklığa sahip denklem seti ile mücadele etmek gerekirken ayrık sistemlerde de fiziksel gerçekliği mümkün olmayan seçimlerin elenmesi probleminin doğduğu vurgulanmaktadır. İteratif yöntemler yakınsamayı garanti edemez. Ayrıca her iki yöntemde de gerçek-zamanlı işletim büyük zorluk taşır.

Çalışma yapay sinir ağlarının probleme uyarlanması yoluyla robot çalışma uzayından mafsal uzayına geçiş üzerinde durur. İfade ve programlama zorluklarının giderilmesi amaçlanır. Testlerde açısal değerler doğrudan robota sevke edildiği için çoklu çözüm

oluşumunun önüne geçilmektedir. Böylece manipülatörlerin olağandışı konumlar alarak çalışmaları engellenir.

Standart genetik algoritma (GA) yerine tercih edilen bağışık genetik algoritma (IGA), genetik algoritma ile biyolojik bağışıklık olgusunu en iyileme problemlerine adapte eden bağışıklık sistemi algoritmasının paralel olarak kullanılmasından ileri gelmektedir. Manipülatörün birçok durumda ihtiyaç duyduğu hızlı ters kinematik çözümlemenin sağlanmasında öncelikle sinir ağının eğitilmesi ve IGA'nın ürettiği sonuçların alınması yolu tercih edilmiştir. Gerçekleştirilen uygulamalar standart genetik algoritma sonuçları ile karşılaştırılmış ve IGA'nın uygunluğu yüksek çözümleri daha hızlı şekilde ürettiği tespit edilmiştir. Sadece robotik hücrelerin programlanması üzerine hazırlanmış yazılımlar da mevcuttur.

Williams (2009), geleneksel küresel bilek (Euler Bileği) donanımlı manipülatörlerde oluşan bilek tekil konumlarını incelediği çalışmasında ters kinematik çözümleme metodunu konumlama probleminde kullanmıştır. Bilekte yer alan ilave mafsal ofseti sebebiyle kinematik ayrıştırma yaklaşımı kullanılmaz hale gelmiş ve kapalı denklemler üzerinde sayısal yöntemlere başvurulmuştur. Çalışma Euler tipi manipülatör bileğinde yer alan mafsal ofsetinin bilek tekil konumlarını bertaraf etmekle beraber robotun genel çalışmasında ortaya çıkan tekillikleri çözümlenmesi daha zor hale getirdiğini ortaya çıkarmaktadır.

Dung ve ark. (2010), Ulsan Üniversitesi bünyesinde gerçekleştirdikleri çalışmada Simmechanics ortamını robot modelleme problemi çözümünde bir alternatif olarak kullanmışlardır. Uygulama aşamasında kullanılan örnek iki uzuvlu-iki serbestlik dereceli düzlemsel robot koldur. Denetleyici elemanı robot kol uygulamalarında sıkça tercih edilen nispeten basit yapılı PD algoritmasıdır.

Çalışmada kullanılan mekanik model hesaplanan torkları girdi olarak alarak mafsal açıları, açısal hızlarını ve mafsal torklarını çıktı olarak kabul eder. Tasarımı basitleştirmek amacıyla uzuv kütle merkezlerinin uzuv uç noktalarında yer aldığı kabulü yapılmaktadır. Robot dinamiğinin ifadesi için yine bu tür çalışmalarda çok yaygın olduğu üzere Lagrangian yaklaşımdan faydalanılmıştır. Çalışma sonuçlarında PD denetimin yerçekimi etkisinin telafisinde gösterdiği etkinlik grafiklerle sunulmaktadır.

Simmechanics üzerinde yürütülen modelleme sayesinde, araştırmacının gerçek bir modelin mevcut denetim altyapısına nasıl tepkiler üreteceğini pratik bir şekilde

saptaması mümkün olmaktadır. Ayrıca araştırmacı gerek mekanik ve dinamik gerekse denetim bileşenlerine rahatlıkla müdahale ederek sistem üzerindeki hâkimiyetini artırabilmektedir.

Mitrovic ve ark. (2010), 7 serbestlik derecesine sahip Euler bilekli ilave serbestlik dereceli (redundant) antropomorfik robotta en uygun geribeslemeli denetim (***O****ptimal* ***F****eedback* ***C****ontrol*) uyarlaması üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada hem maliyet (enerji) fonksiyonunun eniyilenmesi hem de ters kinematik analizin yalınlığı amaçlanmıştır. Araştırma *Barrett WAM* yüksek serbestlik dereceli robotu üzerinde pratik uygulamalar ile yürütülmüştür.

Çalışmada biyolojik temelli motor denetimi anlayışının geleneksel açık döngü denetim düsturuna göre üstünlükleri vurgulanmaktadır. Çözümlemelerin tümünde doğrusal dinamik programlama (*Differential Dynamic Programming – DDP*) ve iteratif lineer kuadratik Gauss (*Iterative Linear Quadratic Gaussian – ILQG*) yöntemleri sıra ile uygulanmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır.

Sayısal kararlılığa ulaşılması amacı ile konum hassasiyetinden feragat edilen çalışmada en uygun geri beslemeli denetimin alternatif çözüm yöntemlerine göre belirli şartlar altında getirdiği avantajlar savunulmaktadır.

Verdeş ve ark. (2010), yaptıkları çalışmada 4 serbestlik dereceli (3T1R) paralel manipülatörü robota ait CAD verilerinden yararlanarak Simmechanics ortamında modellemişlerdir. Dinamik modelleme için Lagrange-Euler Denklemi kullanılmıştır. Çalışmada ileri kinematik analiz verilerinden yararlanan bir yörünge takip sistemi geliştirilmiştir. Bir alternatif olarak yönelimi sabit kalan uç eyleyici konumunun oyun konsollarında görülen türde bir yönetme kolu (joystick) kullanılarak denetlenmesi üzerinde durulmuştur.

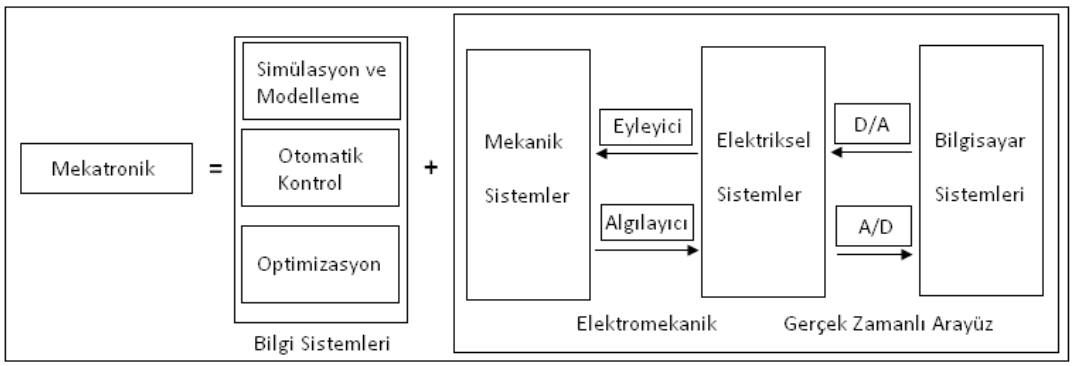
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada mekatronik disiplininin temel bileşenlerinden olan yazılım, denetim ve makine dinamiği konularına ait bazı teorem ve yaklaşımların örnek bir sistem üzerinde modellenmesi, gerçeğe uygun sonuçların sınanması ve iyileştirilmesi üzerinde durulmaktadır.

Mekatronik uğraşı modelleme ve benzetim aşamasıyla başlar. Üretim aşamasından önce sistemin tüm detaylarıyla modellenmesi ve ihtiyaçları karşılayan kıstasların benzetimler ile sınanması gereklidir. Üretim ancak sağlıklı modelleme ve benzetim aşamalarının ardından gerçekleştirildiğinde anlam ifade eder.

Mekatronik, yazılımsal ve elektronik unsurların mekanik yapı ve bağlantılar ile bütünleştirilmiş halidir (Şekil 3.1). Dolayısıyla sistem başarımının artırılması ve korunması, gerçek sistemin ürettiği cevabın istenen kıstaslar çerçevesinde oluşturulan tasarıma ait benzetim sonuçları ile uyumlu olmasına bağlıdır. Elde edilen sonuçlar sistemin temel bileşenleri üzerinde gerçekleştirilen eniyileme süreçleri ile geliştirilir ve arzulanan değerlere belirli toleranslar çerçevesinde ulaşma hedeflenir.

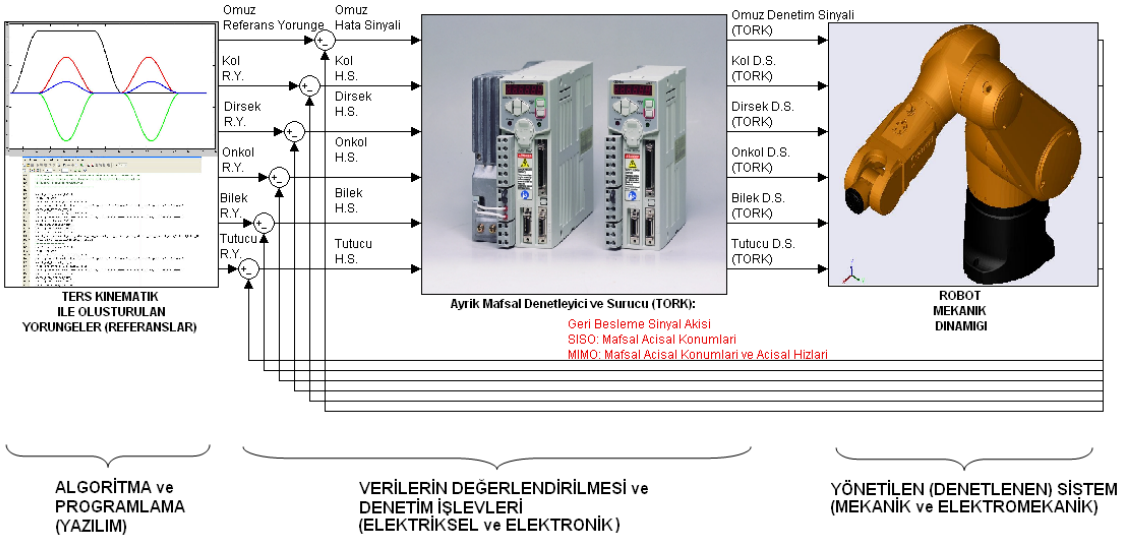
Mekatronik sistem her bileşeni ile bir bütün teşkil etmek durumundadır. Bu bütünlüğün sağlanması kullanıcı ve sistem arasındaki bağlantıyı kuran arayüz programları ve kumanda cihazları ile gerçekleştirilir. Ancak modelleme, benzetim ve eniyileme süreçleri kullanıcı aşamasına gelinmeden önce tamamlanmış ve hatalardan arındırılmış olmalıdır.



Şekil 3.1: Mekatroniğin anahtar bileşenleri (National Instruments illüstrasyonu)

Yukarıda anlatılan esaslar örnek bir robotik sistem üzerinde uygulanabilir (Şekil 3.2). Mekanik yapılanması ne türde olursa olsun robotun belirli bir işlevi yerine getirebilmesi bu doğrultuda hazırlanmış mafsal yörüngelerinin oluşturulmasına bağlıdır. Belirli bir iş planı için gerekli mafsal yörüngeleri esas olarak ters kinematik analiz yoluyla oluşturulur. Ancak her iş planı için robotun yeniden ve kullanıcı tarafından programlanması mümkün değildir. Bu sebeple robotun öğrenebilen bir yapıda olması ve değişen iş şartlarına pratik şekilde uyum göstermesi beklenir. Robot programı bu açıdan büyük önem taşır ve mekatronik sistemin yazılım kısmını teşkil eder.

Fiziksel sistem üzerinde robot yazılımı ile robot mekaniği arasındaki ilişki ve iletişimi elektronik yapılar sağlar. Sistem tarafından üretilen çıkışlar ilgili algılayıcılar ile elektriksel sinyallere dönüştürülür ve yine elektriksel biçimde bulunan referans giriş sinyalleri ile karşılaştırılır. Bu iki sinyal grubu arasında oluşan farklar hata sinyallerini teşkil eder. Denetleyici birimlere iletilen hata sinyallerine karşılık denetim sinyalleri üretilir ve bu veriler mekanik sistem hareketini sağlayan elektromekanik bileşenler olan motorları sürmekte kullanılır. Denetleyici grupları kendilerine has yapılanmalar içerirler ve denetim etkilerinin ayarlanması için etkin yöntemler ve paket programlar mevcuttur. Öte yandan günümüzde üretilen ve kullanılan denetleyici birimleri çoğunlukla otomatik ayar kabiliyetlerine sahiptirler.



Şekil 3.2: Robotik sistem

Robot mekaniği denetleyici çıkışlarını giriş olarak kabul eden ve elektriksel enerjiyi eyleme (çoğu zaman dönel harekete) çeviren elektromekanik cihazlar tarafından hareketlendirilir. Robotlar söz konusu olduğunda motorların etkinlik gösterdiği bağlantı elemanlarına 'mafsal' ismi verilmektedir. Mafsallar üzerinde bulunan hız veya konum algılayıcılar bu çıkış değerlerini denetleyici altyapılarına iletmekle yükümlüdürler ve bu yönleriyle denetim sisteminin bileşenleri olarak yorumlanırlar. Gerçeklenen mafsal çıkışlarının referans mafsal yörüngeleri ile kıyaslanması aşamasıyla sistemin veri akış çevrimi tamamlanmış olur.

Robotik sistemler özellikle yazılım, otomatik denetim ve makine dinamiği konularındaki verilerden faydalanır. Dolayısıyla çalışmanın kuramsal çerçevesi oluşturulurken bu konular da detaylarıyla incelenecektir.

3.1. Materyal

3.1.1. TX90 İnsansı Kol Yapılı Eyleyici ve CAD Dosyası

Bu çalışmada halen seri üretimi gerçekleştirilen *STAUBLİ Robotics* firmasına ait altı döner mafsallı (RRRRRR) antropomorfik endüstriyel robot kol örnek model olarak kullanılmıştır. Robot aynı yapıdaki benzerlerine kıyasla oldukça küçük boyutlu olup yaklaşık erişimi 1000mm civarındadır. En fazla 20kg'lık yükleri taşıyabilecek biçimde tasarlanmıştır. Robotun katalog özelliklerinden bazıları tablo ve çizimler halinde sunulmaktadır (***EK–1***). Bu çalışmada da robota ait detaylı materyal, boyut ve mafsal bilgilerine ilgili kaynaklardan ulaşılmış ve tamamen bu verilere sadık kalınmıştır.

Robot modeli asıl üreticiye ait internet sitesi üzerinden kolayca temin edilebilmektedir. Günümüzde belli başlı robot firmaları bu yaklaşımı sergilemektedir. Bu modeller üretici tarafından patentlenmiş olup kendi internet sitelerinde çeşitli amaçlarla yapılacak uygulamalarda faydalanılmak üzere araştırmacı ve programcıların kullanımına sunulmaktadır.

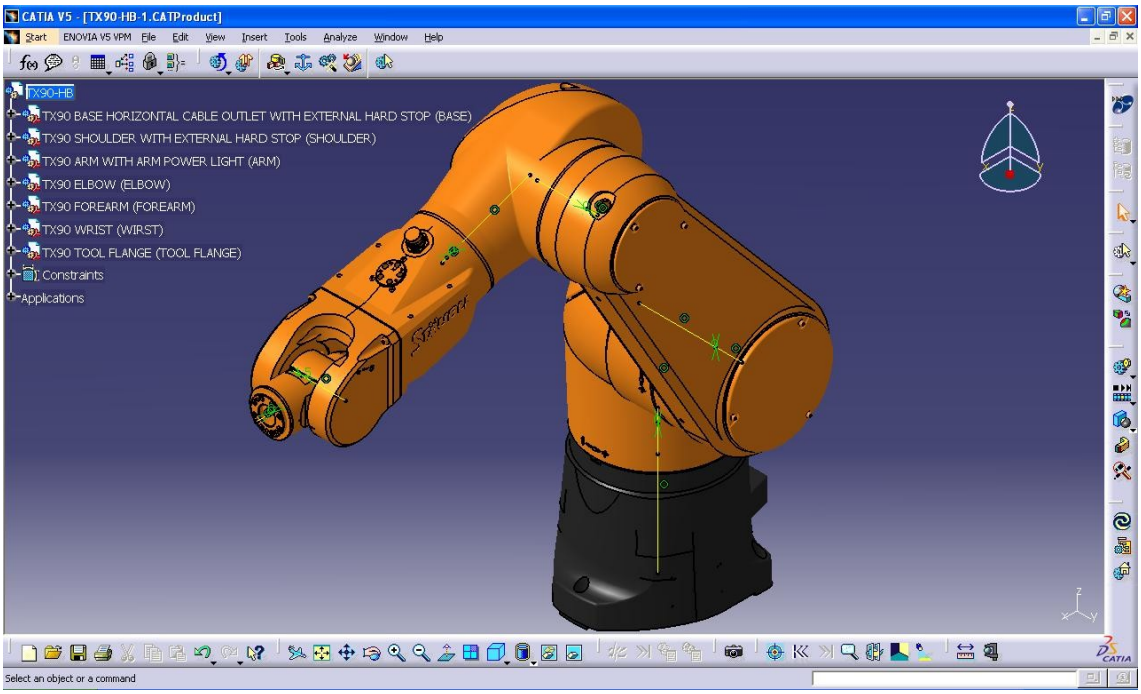
Üreticinin internet sitesinden edinilen '.stp' uzantılı dosya 'CAD' dosyası olarak tanımlanır. CAD (***C***omputer ***A***ssociated ***D***esign) bilgisayar destekli tasarım kavramının İngilizce kısaltmasıdır. Bu terim yıllar içerisinde mühendisliğin bilimsel ve endüstriyel uygulamalarında kendini kabul ettirmiştir. CAD dosyaları makine parçası veya montajının tüm görsel ve fiziksel detaylarını barındıracak şekilde oluşturulur. Bu haliyle

CAD bir terim olması yanı sıra bir süreçtir, denebilir. CAD süreci üretim aşamasından önce hatasız bir biçimde tamamlanmış olmalıdır (Şekil 3.3).

Montaj CAD dosyası her ne kadar eksiksiz bir model teşkil etse de yapısında kinematik veriler bulundurmaz. Simmechanics ortamına taşınacak olan modelin başlangıç mafsal yapılanması Catia programı içerisinde yer alan 'DMU Kinematics' eklentisi yardımıyla oluşturulur. Çalışmanın doğrudan konusu olmamakla birlikte DMU Kinematics eklentisinin özellikleri şu şekilde özetlenebilir (Turgut 2008):

- Kinematik zincirlerin tipik parametreleri olarak sayılabilecek sabit uzuv, mafsal, serbestlik derecesi, hareket serbestisi (dönme, strok) gibi özelliklerin modellere kazandırılmasını sağlar.
- Bu özellikler doğrultusunda mekanizmayı hareketlendirir, mafsal hareketlerinin tanımlanması yoluyla ileri veya kanunlar tanımlanması yoluyla ters kinematik çözümlemeleri gerçekleştirir.

Sürücüler yanı sıra algılayıcıların eklenmesine imkan tanır, benzetim sonuçlarını '*Microsoft Excel*' ortamına kaydedebilir.



Şekil 3.3: Robota ait CAD dosyası (CATIA DMU Kinematics ortamı)

3.1.2. Elektromekanik servo sistemler

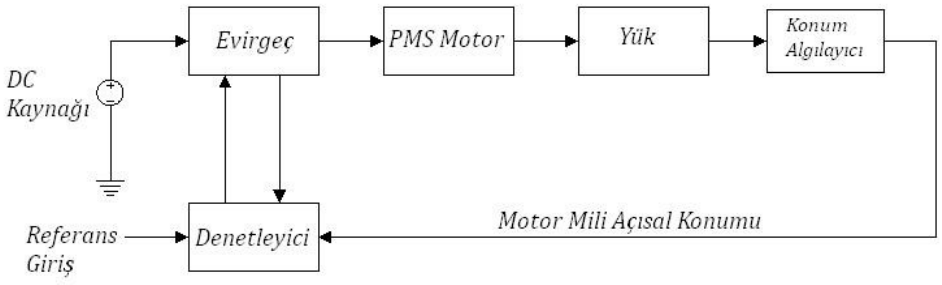
Günümüzde endüstriyel uygulamalarda çeşitli servo sistemler kullanılmaktadır (elektromekanik, elektrohidrolik, elektropnömatik vb.). Elektromekanik sistemler günümüzde üretilen robotlarda en sık kullanılan servo sistemlerdir. Ele alınan sistemde de bu türdeki servo sistemler kullanılmıştır.

Modern robotik uygulamalarda kullanılan servo sistemler dört temel unsurdan oluşmaktadır (Şekil 3.4):

- Genellikle kalıcı mıknatıslı senkron motor (***P***ermanent ***M***agnet ***S***ynchronous ***M***otor - *PMSM*) veya fırçasız DC motor (***B***rush***l***ess ***DC*** Motor - *BLDC*) tipinde olan mafsal eyleyicileri,
- Besleme üniteleri olarak akım veya gerilim kaynak evirgeçleri (***C***urrent ***S***ource ***I***nverter – *CSI*, ***V***oltage ***S***ource ***I***nverter - *VSI*)
- Akım, açısal hız ve/veya konum algılayıcılar ile
- Denetim birimleri

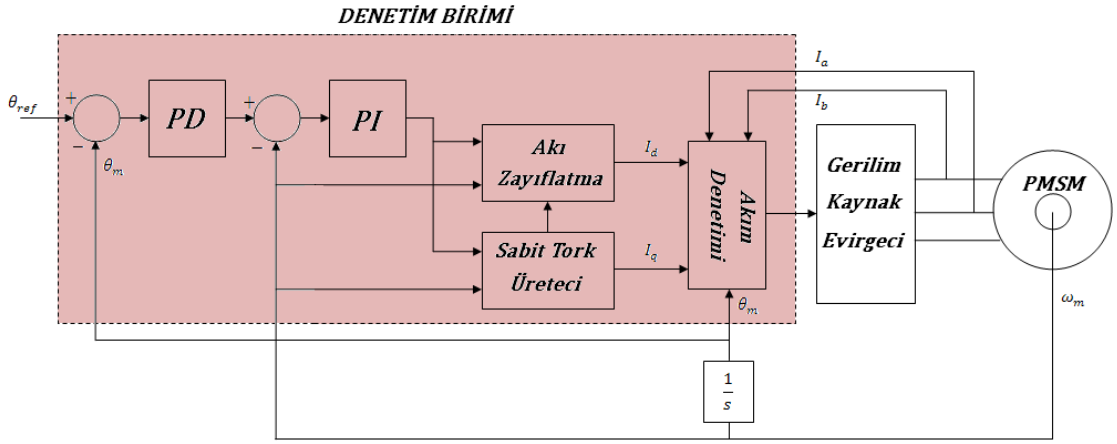
Denetim birimleri denetlenen parametreler (devre akımı, rotor açısal hızı veya mafsal torkları gibi) doğrultusunda belirlenir. Açısal hız ve açısal konum algılaması için çoğunlukla optik enkoderlerden yararlanılır. Servo sistemler standart hale gelmiş birtakım şartları sağlamak durumundadırlar (Halasz 2002).

- Dinamik cevap hızı: Özel kontrol şemaları ve anma momenti/eylemsizlik momenti oranı yüksek olan motorlar ile sağlanabilmektedir.
- Düzgün tork üretimi: Düzgün – pürüzsüz bir dönme hareketi ve konumda açısal titreşimin önüne geçilmesinde kritik öneme sahiptir.
- Kolay bakım ve onarım ile sağlanan güvenilirlik.
- Dayanıklı denetim: Sürücünün yük ataleti ve motor parametrelerindeki değişimlere olumlu tepkiler üretebilmesi için sağlanmalıdır.



Şekil 3.4: Mafsal denetiminde kullanılan servo devresi (Arroyo 2006)

Senkron motorlarda denetim şemaları çoğunlukla Şekil 3.5'de görüldüğü gibi iki bölümden oluşur. En içte yer alan döngü motor sürücü devresinin akım denetimini gerçekleştirir. İkinci döngüyü hız ve konum denetimleri oluşturur. Konum denetimi robotik uygulamalarda olduğu gibi hassas hareket denetiminin gerekli olduğu çalışmalarda motorun temel denetim birimlerine ek olarak gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.5'de görülen denetleyicilerin niteliklerini esas olarak denetlenen sistemden beklenen hız ve kesinlik gibi faktörler belirler. Ancak özel olarak hız denetim döngülerinin oransal artı integral tipte seçilmesi yaygındır.



Şekil 3.5: Açısal hız ve konumun denetlendiği servo sistem

Birden fazla eksenin denetlendiği uygulamalarda tüm servo sürücüler ortak bir güç kaynağı ile bağlantılıdır. Günümüzde elektrik motorlarının kullanıldığı uygulamalarda çoğunlukla kalıcı mıknatıslı senkron motorlar veya endüksiyon motorları tercih edilmektedir. Bu çalışmada kalıcı mıknatıs senkron motorların (PMSM) indirgenmiş modellerinden faydalanılmaktadır.

3.1.2.1. Kalıcı mıknatıs senkron motorlar

Kalıcı mıknatıs senkron motor, manyetik alanın üretilmesinde elektromıknatıslar yerine kalıcı mıknatıslar kullanan motordur (Şekil 3.6). 1970'li ve 80'li yıllarda samaryum kobalt ve neodimyum-demir-bor (NdFeB) manyetik malzemelerinin kullanılmaya başlamasından bu yana rotorlarında kalıcı mıknatıs bulunduran senkron motorlar yüksek performansa gereksinim duyulan uygulama alanlarında tercih edilmektedir. PM tahrikli

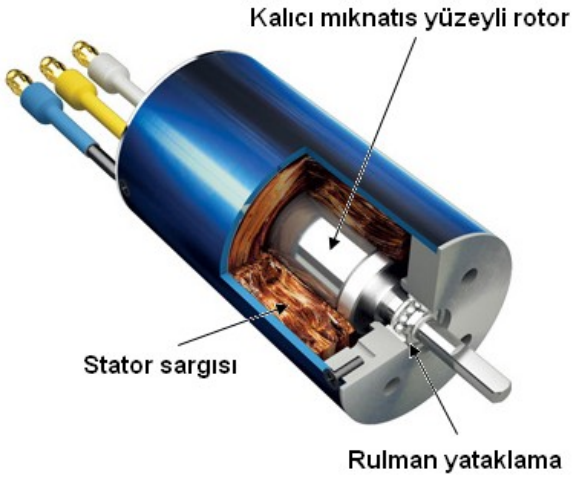
motorların diğer motor türlerine kıyasla üstün güç yoğunluğu, daha küçük ebatlar ve yüksek konumlama hassasiyetleri sundukları bilinmektedir.

Fırçalı ve fırçasız motorlarda elektromıknatıslar sabit iken Şekil 3.6'daki gibi PM senkron motorlarda mıknatıslar rotor üzerine sabitlenmiş durumdadır (yüzey mıknatıslı senkron motor). Bu durum akımın hareketli bir armatüre nasıl transfer edileceği problemini doğurur. Sorunun çözülmesi için sisteme elektronik bir düzenleyici dahil edilmektedir. Düzenleyici eş zamanlı (senkron) güç dağıtımı gerçekleştirirken fırça/komütatör sisteminin yerini alan elektronik bir devre kullanır.

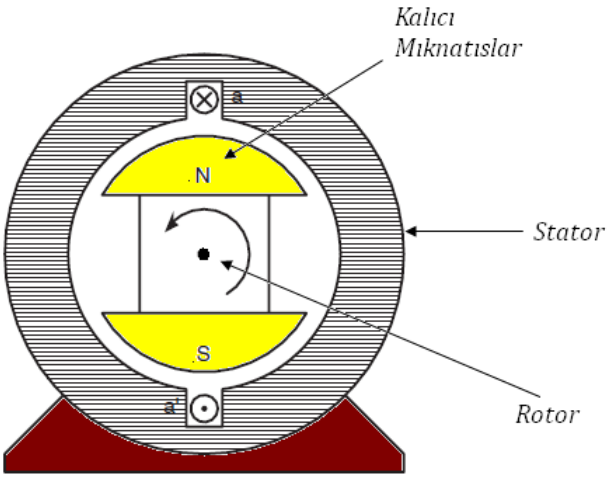
PM senkron motorların çalışma aralıkları oldukça geniş olup motorun fiziksel sınırlarını büyük oranda çalışma ısısı belirler. Isının yükselmesi kalıcı mıknatıs yapılarına zarar vermektedir. Söz gelimi neodimyum-demir-bor mıknatısları 310°C'ın üzerindeki sıcaklıklarda özelliklerini kaybeder (Rahman ve ark. 2007).

PMSM motorlar elektrik enerjisini mekanik güce çevirmede diğer birçok motor cinsine kıyasla çok verimlidirler. Bu avantajları esas olarak elektriksel ve mekanik kayıplara yol açan fırça yapılarını bulundurmamalarından kaynaklanır. Genel verimlilikleri PM senkron motorları yüksüz ve düşük yüklü motor performans grafiklerinde diğer motorların üzerine taşır.

Şekil 3.7'de görüldüğü gibi rotor kuzey ve güney kutuplu bir mıknatıstan oluşur. Stator çerçevesinde iletken sarımıyla oluşturulan bobin mevcuttur. Akım iletkene a ile gösterilen doğrultuda girer ve iletkeni a' ile gösterilen doğrultuda terk eder.



Şekil 3.6: Kalıcı mıknatıs senkron motor



Şekil 3.7: Kalıcı mıknatıslı senkron motor şematik gösterimi ve akım yönü

Kalıcı mıknatıs senkron motorların en önemli dezavantajı yüksek fiyatlarıdır. Bu özellik esas olarak PMSM motorların karmaşık elektronik hız denetleyicilerine gereksinim duymasından ileri gelir. Öte yandan fırçalı DC motorlar 'reosta (ayarlanabilir direnç)' gibi nispeten basit denetleyiciler ile kullanılabilir. Ancak gücün bir kısmı reosta üzerinde harcanmakta olduğu için bu etkinliği kısıtlar.

PMSM motorlar alternatif akıma göre yapılandırılabileceği gibi (vektör denetimi) doğru akım için de yapılandırılabilir. İkinci seçenek için eniyilenen motorlar tipik olarak trapezoidal EMK üretirler.

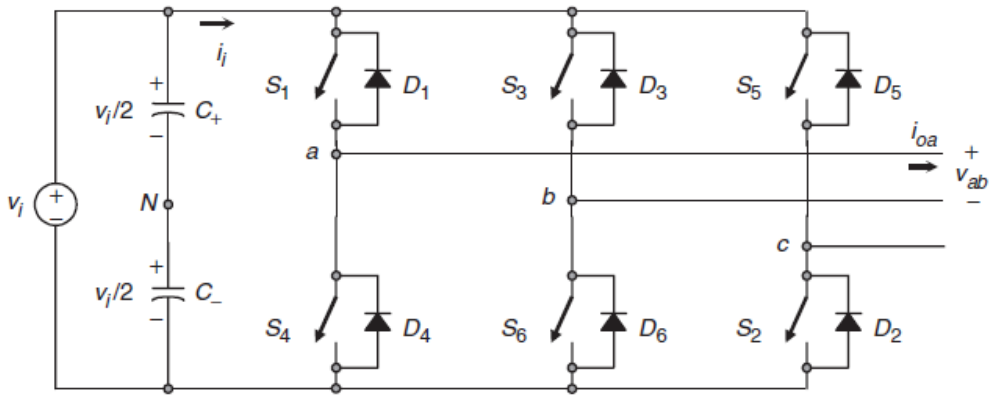
Vektör sürücüler motor için doğru akımı yeniden alternatif akıma dönüştüren ilave bir basamak kullanırlar. Bu sebeple yapıları daha karmaşıktır. DC – AC dönüşümü çoğunlukla pahalıdır ve etkinliği düşüktür. Bununla beraber vektör sürücüler (veya vektör eviriciler) motorun çok düşük hızlarda dahi pürüzsüz hareketini ve doğrudan doğruya bir kutup ile hizalı olmayan herhangi bir noktada tork üretilerek konumun korunmasını sağlamak gibi iki önemli avantaj sunar. Bu tür eviricilerin kullanıldığı sistem düşük hızlarda ve yük altında çalışırken kendisini etkin şekilde soğutamadığı için vektör sürücülerin tercih edildiği uygulamalarda ısıl toleranslar göz önünde bulundurulmalıdır.

3.1.2.2. Gerilim kaynak evirgeci

Statik güç değiştiricileri olarak da bilinen gerilim kaynak evirgeçlerinin (***V***oltage ***S***ource ***I***nverter – *VSI*) görevi girişlerine uygulanan DC gerilimi çıkışlarında istenen genlik, frekans ve faz değerlerine sahip eşzamanlı AC sinyallere dönüştürmektir. Gerilim kaynak evirgeci ismi denetlenen AC çıkışının bir gerilim dalga biçimi olması sebebiyle benimsenmiştir. Bu dalga formları ile çalıştırılan unsurlardan bazıları ayarlanabilir hız sürücüleri (***A***djustable ***S***peed ***D***rive – *ASD*), kesintisiz güç kaynakları, aktif filtreler ve gerilim denetleyicileri olarak sıralanabilir.

Tipik bir gerilim kaynak evirgecinin prensip şeması Şekil 3.8'de sunulmuştur. Evirgeçler (*inverter*) temelde güç anahtarlarından oluşurlar. Dolayısıyla AC çıkış dalga biçimleri (*waveform*) ayrık (*discrete*) değerler alır. Bu hızlı geçişlerin pürüzsüz geçişlere tercih edildiği durumlarda başvurulan bir yaklaşımdır. Örneğin üç fazlı ayarlanabilir hız sürücüsüne ait VSI tarafından üretilen AC çıkış gerilimi, darbe genişlik modülasyonu (***P***ulse ***W***idth ***M***odulation – *PWM*) tipinde bir dalga biçimidir.

İki fazlı gerilim kaynak evirgeçleri düşük güç gereksinimlerini karşılarken üç fazlı evirgeçler orta ve yüksek güçlü uygulamalarda kullanılırlar. Üç fazlı VSI yapılarının amacı genlik, faz ve frekans değerlerinin daima denetim altında tutulduğu üç fazlı (trifaze) bir gerilim kaynağı sunulmasıdır. Devrelerde bacakların herhangi birinde yer alan iki anahtar aynı anda kapalı durumda bulunmaz. Böylece kısa devre olayından kaçınılır. Anahtarların geçerli konumlarına göre oluşan sekiz ayrı duruma (varyasyona) ait faz değerleri ve vektörler Tablo 3.1'de sunulmaktadır.



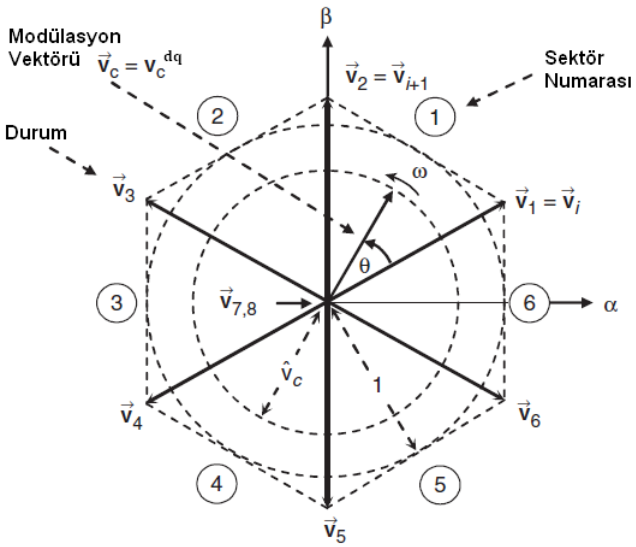
Şekil 3.8: Üç fazlı gerilim kaynağı evirgeci prensip şeması (Espinoza 2007)

Tablo 3.1: Üç fazlı VSI için geçerli anahtar varyasyonları ve vektör gösterimleri

Durum	*No #*	v_{ab}	v_{bc}	v_{ca}	*vektör formu*
S_1,S_2 *ve* S_6 *kapalı ;* S_4,S_5 *ve* S_3 *açık*	#1	v_i	0	$-v_i$	$\overrightarrow{v_1} = 1 + j0{,}577$
S_2 ,S_3 *ve* S_1 *kapalı ;* S_5,S_6 *ve* S_4 *açık*	#2	0	v_i	$-v_i$	$\overrightarrow{v_2} = j1{,}155$
S_3,S_4 *ve* S_2 *kapalı ;* S_6,S_1 *ve* S_5 *açık*	#3	$-v_i$	v_i	0	$\overrightarrow{v_3} = -1 + j0{,}577$
S_4,S_5 *ve* S_3 *kapalı ;* S_1,S_2 *ve* S_6 *açık*	#4	$-v_i$	0	v_i	$\overrightarrow{v_4} = -1 - j0{,}577$
S_5,S_6 *ve* S_4 *kapalı ;* S_2,S_3 *ve* S_1 *açık*	#5	0	$-v_i$	v_i	$\overrightarrow{v_5} = -j0{,}155$
S_6,S_1 *ve* S_5 *kapalı ;* S_3,S_4 *ve* S_2 *açık*	#6	v_i	$-v_i$	0	$\overrightarrow{v_6} = 1 - j0{,}577$
S_1,S_3 *ve* S_5 *kapalı ;* S_4,S_6 *ve* S_2 *açık*	#7	0	0	0	$\overrightarrow{v_7} = 0$
S_4,S_6 *ve* S_2 *kapalı ;* S_1,S_3 *ve* S_5 *açık*	#8	0	0	0	$\overrightarrow{v_8} = 0$

Üç fazlı senkron motorlar uzay vektör modülasyonu ile sürülürler. Uzay vektör modülasyonu (***S***pace ***V***ector ***M***odulation - SVM) amacı darbe genişlik modülasyon (***P***ulse ***W***idth ***M***odulation – *PWM*) gerilimleri üretmek olan sayısal bir yöntemdir.

Herhangi bir üç-fazlı değişken takımı karmaşık sayı düzleminde yer alan ve bir gerçel (d) bir de sanal (q) bileşen bulunduran bir vektör tarafından temsil edilebilir (Şekil 3.9). Üç fazlı doğrusal modülasyon sinyallerinden oluşan $v_c^{abc} = [v_{ca} v_{cb} v_{cc}]^T$ vektörü



Şekil 3.9: Vektör modülasyonunda üç fazlı evirgeç için olası tüm anahtarlama vektörleri (Espinoza 2007)

karmaşık düzlemde özel dönüşüm eşitlikleri kullanılarak $\vec{v}_c = v_c^{dq} = \left[v_{cd} v_{cq}\right]^T$ şeklinde ifade edilir. Eğer doğrusal modülasyon sinyalleri $\widehat{v_c}$ genliğinde ω frekansında üçlü sinüzoidal dalga formlarından (*wave form*) ibaret ise dönüşüm ile elde edilen dq sabit düzlemindeki modülasyon sinyalleri $\widehat{v_c}$ sabit modülünde ve ω frekansıyla dönen $\overrightarrow{v_c} = v_c^{dq}$ vektörü ile ifade edilebilmektedir.

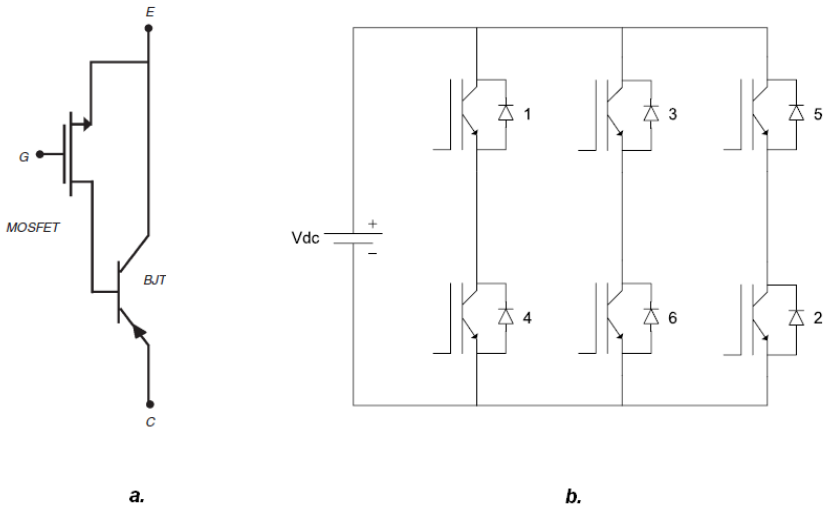
Üç fazlı bir VSI'da aynı bacak üzerinde yer alan anahtarlar aynı anda kapalı durumda bulunmamalıdır. Bu gereksinim Tablo 3.1'de verilen anahtar durumlarını oluşturur. Burada evirgeç için ikisi sıfır vektör altısı aktif anahtar vektörü olmak üzere toplam sekiz durumdan bahsedilir. Bu sekiz durum Şekil 3.9'da görülmektedir.

Yukarıda değinildiği üzere SV tekniğinin eğilimi doğrusal modülasyon sinyaline ait uzay vektörüne ($\overrightarrow{v_c}$) VSI yapısının bir parçası olan sekiz adet uzay vektörü ($\overrightarrow{v_i}, i = 1,2, \dots 8$) ile yaklaşım sağlanması yönündedir. $\overrightarrow{v_c}$ modülasyon sinyalinin $\vec{v}_i$ ve $\vec{v}_{i+1}$ vektörleri arasındaki bir doğrultuda bulunması halinde kestirim için en yakın ($\vec{v}_i \; ve \; \vec{v}_{i+1}$) vektörler ile sıfır vektörlerden biri ($\vec{v}_z = \vec{v}_7 \; veya \; \vec{v}_8$) kullanılmalıdır. Bu yolla hat gerilimi en yüksek, anahtarlama frekansı en düşük değerini alır (Espinoza 2007).

Gerilim ve akım kaynak evirgeçlerinde anahtarlama elemanı olarak kullanılan iki tür transistör ön plana çıkmaktadır. Bunlar metal oksit yarıiletken alan etkili transistör (***M***etal ***O***xide ***S***emiconductor ***F***ield ***E***ffect ***T***ransistor - *MOSFET*) ve yalıtılmış kapılı çift kutup transistördür (***I***nsulated ***G***ate ***B***ipolar ***T***ransistor - *IGBT*).

MOSFET cihazları metal oksit yarıiletkenlerin mikroelekronik devrelerde kullanılmaya başlamasından kısa bir süre sonra 1975 senesinde geliştirilmiştir. Çift kutuplu kavşak transistörün (***B***ipolar ***J***unction ***T***ransistor - *BJT*) aksine tek kutuplu bir yapıya sahiptir. MOSFET 1MHz'in üzerindeki anahtarlama frekansı ile en hızlı anahtarlama cihazı olarak ön plana çıkmaktadır. $1000V$'luk gerilim altında ve $300A$ akım ile çalıştırılabilir. MOSFET gerilim denetimli bir cihaz olduğu için anahtarlama periyodunda çok düşük akım değerlerine sahiptir. Bu yüzden kapı sürücü devreleri son derece basittir. Ancak tek kutuplu yapısı çalışma geriliminin $200V$'un üzerine çıktığı durumlarda iç iletim karakteristikleri gözlenir. Bu durum gerilimin artışı ile iç direncin yükselmesine sebep olur.

Anahtarlama cihazlarındaki önemli bir gelişme Darlington konfigürasyonu ismi verilen bir düzende BJT ve MOSFET yarıiletkenlerin olumlu yanlarının birleştirilmesi ile kendini göstermiştir (Şekil 3.10a). Konfigürasyon ile oluşturulan devre iki bileşenin yüksek anahtarlama hızı ve güvenli çalışma bölgesi avantajlarını bir arada sunar (Abedinpour ve Shenai 2007). Bu özellikleri ile ön plana çıkan IGBT cihazları 1980'li yılların başlarından itibaren yaygın kullanım alanları bulmaktadırlar. IGBT çalışma gerilimi ve akımı yönünden MOSFET ve BJT'ye yakın imkanlar sunmakla birlikte $20kHz$'lik anahtarlama frekansı MOSFET'in gerisinde kalır. Şekil 3.10b'de IGBT cihazlar ile oluşturulmuş bir gerilim kaynak evirgeci (VSI) görülmektedir.



Şekil 3.10: IGBT şematik gösterimi (a) ve IGBT kullanan üç fazlı evirgeç devresi

3.1.2.3. Akım, açısal hız ve açısal konum algılayıcılar

Servo sistemler içteki denetim döngüleri için büyük bant genişlikli akım algılayıcıları ve dış denetim döngülerinde gürültüden arındırılmış yüksek hassasiyetli ve hızlı açısal hız ve konum algılayıcıları kullanırlar.

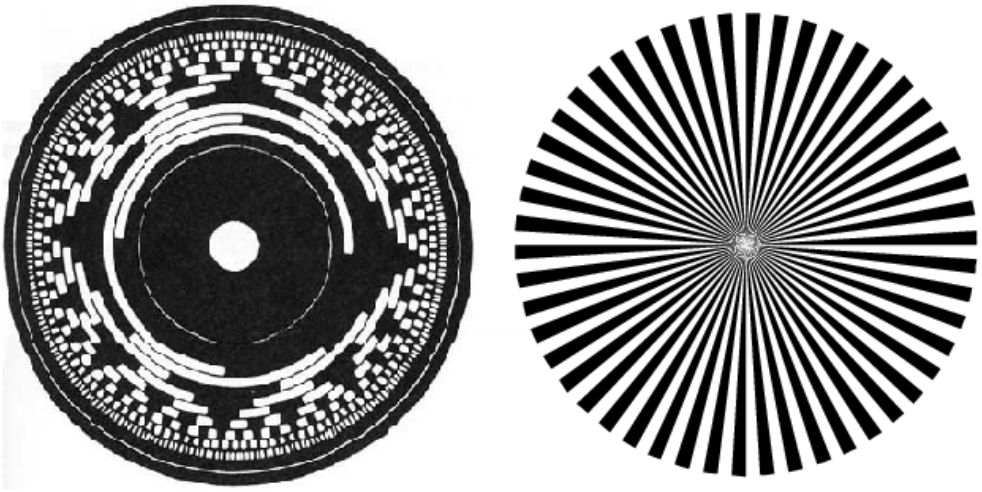
Akım denetleyicileri çoğunlukla yükselteçli Hall etki tipindedir (Şekil 3.11). Hall etki algılayıcılar 100kHz'e kadar çıkan bant genişlikleri sunar. İçte yer alan akım döngüsü hızlanma ve yavaşlamayı da içine alacak şekilde sürme işleminin her aşamasında motor akımını hem kısıtlayan hem de düzenleyen bir etkiye sahiptir. Bir Hall etki algılayıcı çıkış gerilimi üzerine etkiyen manyetik alan şiddeti oranında değişen bir analog dönüştürücü gibi davranır.



Şekil 3.11: Hall-etki algılayıcı

Akım algılayıcı çıkışları anahtarlama frekans gürültüsünü yeterli şekilde yalıtacak biçimde filtrelenmelidir. Aksi takdirde evirgeç üzerindeki belirli anahtar elemanları aşırı yüklenir. Akım algılayıcı üzerinde gerçekleştirilen bu filtreleme işlemi akım denetim sisteminin bant genişliğini kısıtlar.

Servo sistemlerin performansları hız ve konum algılayıcıların doğruluğuna kritik biçimde bağlıdır. Yakın zamana kadar 12bit veya daha yüksek sayısal doğruluk sağlayan senkron çözümleyiciler (Synchro-Resolvers) bir çok servo sistem uygulamasında kullanılmaktaydı. Artımlı (*incremental*) ve mutlak optik enkoderlerin ortaya çıkışı bu durumu değiştirmiştir (Şekil 3.12). Bu sayısal algılayıcılar gerçek anlamda konum ölçüm cihazlarıdır. Hız bilgisi algılayıcının elde ettiği konum bilgisinin ayrık biçimde türetilmesiyle elde edilir. Bu türev alma işlemi analog konum algılayıcılarda gürültü oluşumu sebebiyle kullanılamaz (Falcon 2005).



Şekil 3.12: Mutlak ve artımlı enkoderlere ait diskler

Şekil 3.12'de mutlak ve artımlı enkoderler kıyaslanmıştır. Mutlak ve artımlı enkoderler arasındaki esas fark mutlak enkoderin bulunulan konuma ait özel bir sinyal üretmesidir. Artımlı enkoder ise bunun aksine mil döndüğü sürece sinyal üretir. Dolayısıyla artımlı enkoder ile konumu denetlenen bir milin her çalışmada referans alınan bir konuma geri çevrilerek enkoder bilgisinin sıfırlanması gerekir. Artımlı enkoderler sıfır noktasından yoksun olmalarının önemsenmediği alanlarda hem konum hem de hız geri beslemesi sağlarlar. Ancak denetlenen makine aksamının her seferinde bir referans konuma getirilmesinin külfet halini aldığı uygulamalarda bu iki niceliğin ölçülmesinde mutlak enkoderler ön plana çıkar. Mutlak enkoderlerde kullanılan diskler çıkış bitlerinin sayısı kadar iz bulundurur.

Modern ayrık konum algılayıcıları gürültüsüz hız ve konum algılama yeteneklerine sahiptir. Bu nitelikleri ile servo sistemlerin anahtarlama frekanslarının müsaade ettiği ölçüde yüksek hızlı dinamik cevap üretmelerine imkan verirler.

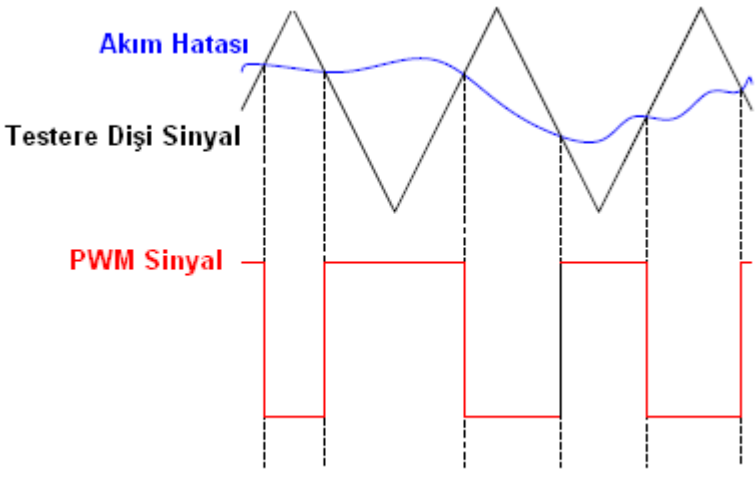
3.1.2.4. Servo sistem denetim birimleri

PMSM motor VSI ile beslenirken VSI bileşeni akımın denetlenmesi ile yönetilir. Denetim süreci akımın motor statorundaki akışının düzenlenmesiyle gerçekleştirilir. Burada akım denetleyiciler evirgeç için kapı (gate) sinyalleri üretmek amacıyla kullanılır. Dolayısıyla evirgeç cihazların ve denetim yönteminin dikkatli seçimi sistem başarımını belirleyen faktörlerdir.

AC sürücülerin akım düzenleyicileri karmaşık yapıdadırlar. Bir AC akım düzenleyicisi aynı anda stator akımının hem genliğini hem de fazını kontrol altında tutmalıdır. AC akım düzenleyicisi hareket denetiminin iç döngüsünü biçimlendirir. Bu sebeple sistemdeki en büyük bant genişliğine ve sıfır kalıcı durum hatasına sahip olmalıdır. Gerek akım kaynak evirgeçleri (***C***urrent ***S***ource ***I***nverter - *CSI*) gerekse gerilim kaynak evirgeçleri denetlenen akım yöntemleri ile kullanılabilirler. Ancak CSI doğal bir akım kaynağı olduğu için akım denetimine hazırdır. VSI akım düzenlenmesinde biraz daha karmaşık bir yapı sergilerken CSI bileşenlerine kıyasla daha büyük bant genişliği ve akım dalgalanmalarının etkin şekilde engellenmesi gibi avantajlara sahiptir (Shakweh 2007).

Akım denetiminde temel olarak PWM akım denetleyiciler kullanılır. PWM denetimin esasını arzu edilen anahtarlama frekansını temsil eden testere dişi (sawtooth) biçimli taşıyıcı sinyal ile denetlenen sinyale ait hatanın kıyaslanması oluşturur. Burada hata, denetleyicide üretilmiş referans sinyal ile anlık motor akımının ters işaretlisinin toplanması ile elde edilen sinyaldir. Bu kıyaslama istenen çıkışın üretilmesi için VSI'nın kapılarına iletilen bir gerilim denetim sinyali meydana getirir. Eğer hata sinyali testere dişi dalga formundan büyük ise evirgeç bacağı pozitif polarmada anahtarlanmış olarak kalır (üst anahtar kapalıdır). Benzer şekilde hata sinyali testere dişi sinyalden küçükse evirgeç bacağı negatif polarmaya geçer (alt anahtar kapalıdır). Bu durum Şekil 3.13'dekine benzer bir sinyal akışı oluşturur. Evirgeç bacağı testere dişi sinyalin frekansına uygun olarak anahtarlamaya zorlanır ve akım hata sinyaline *oransal* olacak şekilde çıkış gerilimi üretilir.

Gerek konum gerekse hız denetleyicileri referans girişler ile gerçeklenen çıkışlar arasındaki farkları kullanarak hata sinyalleri üretir ve yapılarındaki denetim etkisi doğrultusunda bir düzeltme sinyali sentezler. Denetim etkileri denetim gereksinimi ve performansı doğrultusunda belirlenir. Hız denetimli motorlarda iki temel denetim döngüsü gözlenir. Bunlardan içte yer alan daha temel (*essential*) durumda bulunan akım döngüsü, dışta yer alan ise hız ve konum döngüleridir. PMSM motorlar ağırlıklı olarak akım yönelimli denetlendikleri için modellenmeleri DC motorlarda olduğu gibi gerçekleştirilebilir.



Şekil 3.13: PWM yoluyla akım denetimi (Arroyo 2006)

3.1.2.5. PMSM Sürücü modelinin MATLAB/Simulink ortamında gerçeklenmesi

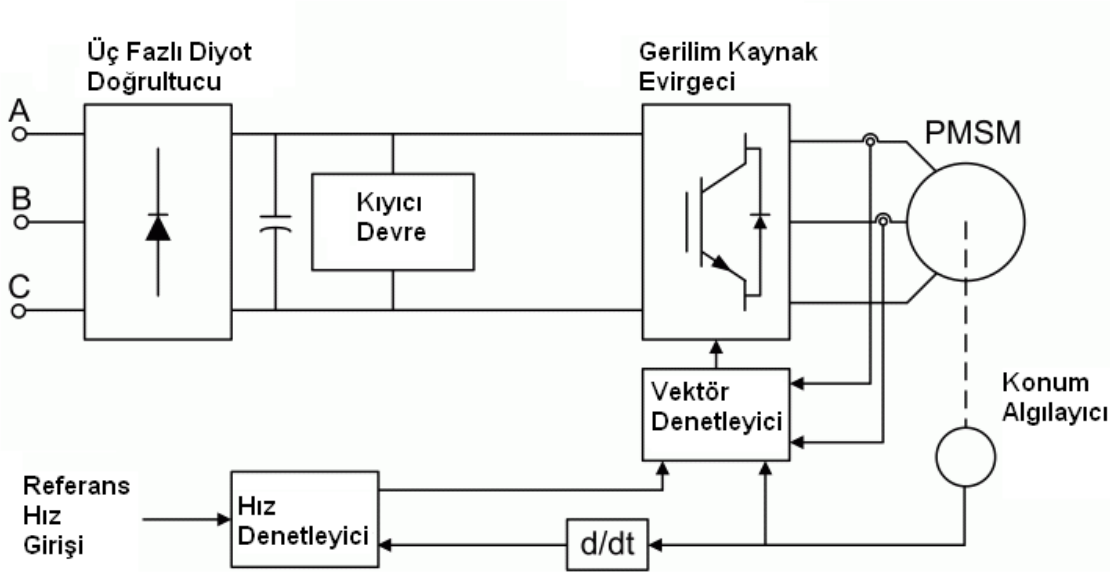
Bu çalışmada bir PMSM motorun akım ve hız denetimlerinin incelenmesi ve detaylı eşdeğer modelin sentezlenmesi konularında MATLAB programlama ortamına ait SimPowerSystems kütüphanesinde yer alan "AC6 – PM Synchronous Machine Drive" modelinden faydalanılmıştır. Model kalıcı mıknatıslı senkron motoru ve denetim döngülerini barındırmakta ve etkileşimli uygulamalara müsaade etmektedir. Model senkron motor haricinde dört temel unsurdan oluşmaktadır. Bunlar,

- Hız Denetleyici
- Vektör Denetleyici
- Üç-fazlı Diyot Doğrultucu
- Gerilim Kaynak Evirgeci

olarak sıralanır. Üst modele ait şematik Şekil 3.14'de görülmektedir.

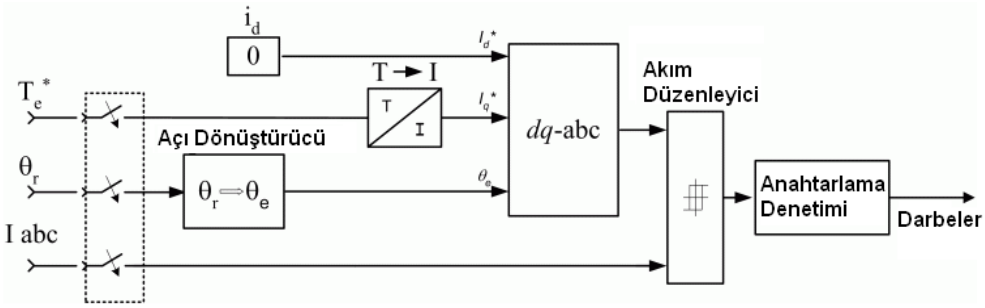
Hız denetleyici PI denetim etkisini baz almaktadır. Denetleyicinin çıkışı vektör denetleyici bloğuna beslenen elektromanyetik tork değeridir.

Vektör denetleyici dört bloktan oluşmaktadır. $dq - abc$ bloğu rotor akım değişkenlerini faz değişkenlerine çeviren matematiksel ifadeleri (ters-Park denklemleri) içerir. Akım düzenleyici bloğu ayarlanabilir hysteresis bant genişlikli akım denetimi görevini üstlenir.



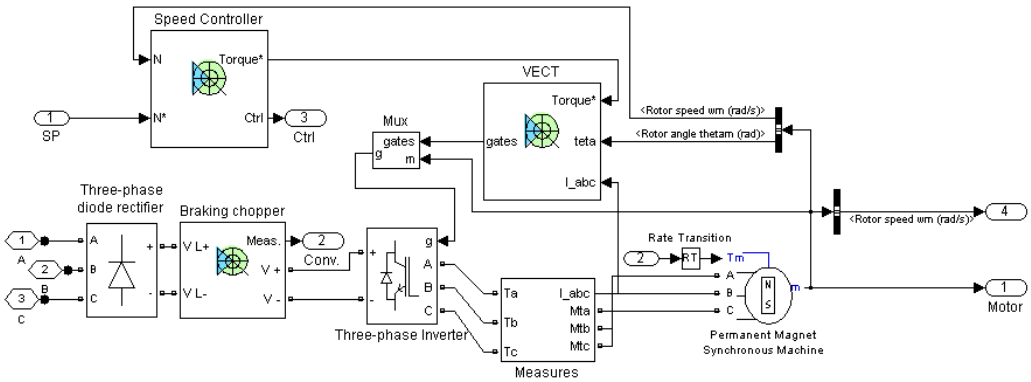
Şekil 3.14: Kalıcı mıknatıs senkron motor sürücü devre şematik gösterimi

Açısal dönüştürme bloğunda mekanik rotor açısından elektromanyetik rotor açısı değerinin hesaplanmasında kullanılır. Son olarak anahtarlama denetim bloğu evirgeç frekansının kullanıcı tarafından belirlenen en yüksek değeri aşmaması için kullanılmaktadır. Vektör denetleyici bloğunun şematik gösterimi Şekil 3.15'de olduğu gibidir. Kıyıcı devre frekans dönüştürücülere ait DC gerilim devrelerinde motora etkiyen yükün enerjiyi bu ara devrelere geri besleyecek denli büyük olduğu şartlarda gerilimin denetlenmesi amacıyla devrede yer alır. Yükün motor kapasitesinin üzerine çıkması durumunda motor bir jeneratör davranışı gösterir.



Şekil 3.15: Vektör Denetleyici bloğuna ait şema

SimPowerSystems kütüphanesinde yer alan AC6 senkron motor modelinin Simulink şeması Şekil 3.16'de aktarılmıştır.



Şekil 3.16: AC6 Simulink üst modeli

(http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/powersys/, 2011)

3.1.2.6. Modelde kullanılan motorlar

Bu çalışmada gerçekleştirilen modelleme ve benzetim işlemlerinde İtalyan *Bonfiglioli Riduttori* firmasına ait $VECTRON$ model isimli BCR serisi kalıcı mıknatıs senkron servo motorlardan faydalanılmıştır.

Bu markanın tercihinde Bonfiglioli firmasının Türkiye mümessillikleri olan aktüel bir firma olması yanı sıra rahatlıkla erişilebilir ve geniş kapsamlı ürün katalogları sunması etkili olmuştur. Bununla birlikte firma bilinen bazı otomasyon firmalarına kıyasla çok ekonomik çözümler sunan bir firma olmakla tanınmamaktadır.

BCR serisi senkron motorlar sundukları yüksek torklar ve iyi dinamik karakteristikleri ile ön plana çıkmakta ve özellikle robot mafsallarına adapte edilmek üzere tasarlanmış oldukları üretici tarafından belirtilmektedir.

$VECTRON$ model grubunun diğer serisini BTD kodlu motorlar oluşturmaktadır. BTD motorlar tasarımcıya nispeten düşük torklar ($27{,}4Nm$'ye kadar) ancak çok yüksek çalışma hassasiyetleri sunarlar.

Robot mafsalları için seçilen motorlarda hız veya tork düzenlemesi için dişli kutularının kullanılmasına gerek duyulmamıştır. Dişli kutuları veya redüktörler motor şaftının hızını azaltırken dişli güç iletim yasası gereği motor torkunu büyütme görevini üstlenirler. Ancak bu çalışmada kullanılan motorların tork kapasiteleri mafsalların ihtiyaç duyduğu torkları karşılar niteliktedir. Senkron motorlarda hız denetimi motor akımının denetlenmesi yoluyla başarılı bir biçimde gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla üreticinin de opsiyonel olarak tanımladığı redüktörlerin kullanılması söz konusu değildir.

Seri (*articulated*) veya insansı (*anthropomorphic*) yapılanma gösteren bir robotik sistemde özellikle omuz ve kol mafsallarında güç ve çalışma hızı yönünden yüksek performans sunan motorların kullanılması uygundur. Ancak robota ait tüm mafsallarda benzer karakterli motorların kullanılması en doğru çözüm olmaktan uzak görünmektedir. Özellikle Euler bilek yapılı robotlarda uç eyleyici (kıskaç, tutucu, kaynak aparatı vs. robotun serbestlik derecesini *artırmayan* ek donanım) yönelimini belirleyen son üç mafsalın yüksek torklardan ziyade yüksek hassasiyet sunan motorlarla sürülmesi sistem genel başarımı ve performansına büyük iyileştirmeler getirecektir.

Yukarıda bahsedilen sebeplerden ötürü bu çalışmada yararlanılan *STAUBLİ Robotics TX90* model robotun omuz, kol ve dirsek mafsalları yüksek torklu BCR senkron motorlar ile son üç mafsal ise yüksek dinamik karakterli BTD serisi motorlar ile sürülmektedir. Kullanılan BTD ve BCR motorlara ait katalog verileri ***EK-2*** içerisinde okuyucuya sunulmaktadır.

3.1.3. MATLAB/Simulink ve Simmechanics

MATLAB (Matris Laboratuarı – ***Mat***rix ***Lab***oratory) yüksek seviyeli bir teknik programlama dili ve etkileşimli bir algoritma geliştirme, veri görüntüleme, veri analizi ve sayısal hesaplama ortamıdır. MATLAB paket programı teknik hesaplamalar gerektiren problemlerin çözümünde C, C++ veya Fortran gibi geleneksel programlama dilleri ile olduğundan daha hızlı ve etkin sonuçlar sağlar (http://www.mathworks.com, 2011).

MATLAB sinyal ve görüntü işleme, denetim tasarımı, ölçme ve test etme, finansal modelleme ve analiz hatta hesapsal biyolojiye dek uzanan uygulamalarda kullanılmaktadır. Eklenebilir (*add-on*) yazılımlar MATLAB ortamının daha spesifik uygulamalara adapte olmasını sağlar.

Simulink yazılımı dinamik sistemlerin modellenmesi, benzetimi ve analizi için geliştirilmiş bir model bazlı tasarım ortamıdır. Simulink yazılımı ile doğrusal modellemenin ötesinde fiziksel sistemlerde gözlenen tüm etkilerin (kuru sürtünme, hava direnci, kayarak yuvarlanma olgusu vs.) rahatlıkla modellenmesi mümkündür.

Simulink yazılımının sunduğu model esaslı tasarım yaklaşımı aralarında denetim sistemleri, sinyal işleme ve iletişim sistemlerinin yer aldığı birçok dinamik sistemin hızlı ve etkin biçimde tasarlanmasına olanak verir. Model esaslı tasarımın her aşamasında sistemi temsil eden modelin gelişim sürecinin merkezinde yer alması sağlanır. Gelişim sürecinin ardından modelin istenen kıstaslar çerçevesinde ve doğru olarak çalıştığının belirlenmesi benzetimler ile sağlanır.

Simmechanics yazılımı rijit veya esnek gövde yapılı makineler ve bunların hareketlerinin tasarımı ve benzetimlerinde standart Newton dinamiklerinin kullanıldığı blok diyagram esaslı bir modelleme ortamıdır. Simmechanics yazılımının sunduğu araçlar ile makine uzuvlarına ait kütle özelliklerinin, hareketler ve kinematik kısıtlarının, sahip oldukları koordinat takımlarının tanımlanması mümkün olmaktadır.

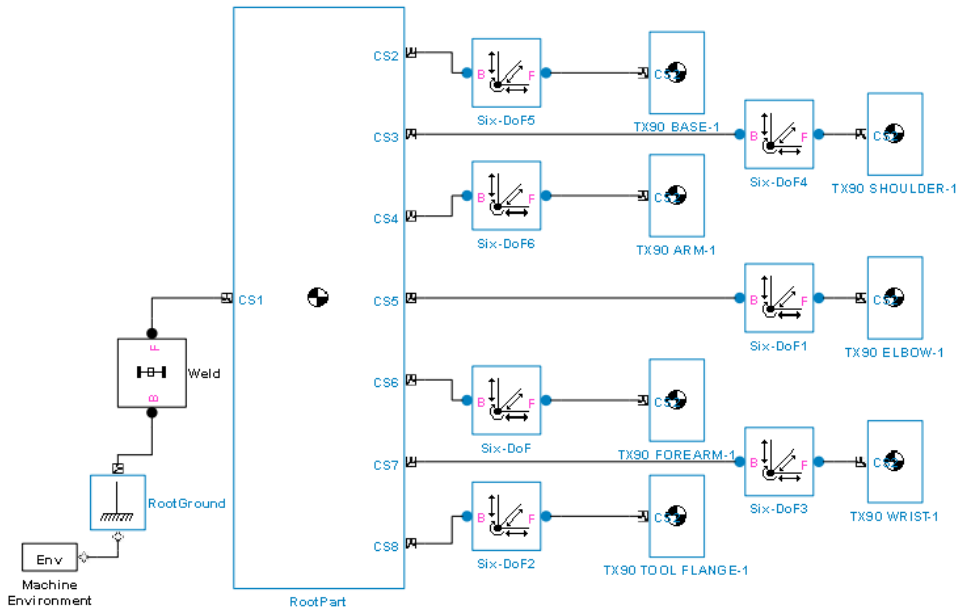
Mekanik sistemler Simulink ortamındakine benzer şekilde bağlantılı blok şemaları ile temsil edilir. Hiyerarşik alt sistemler yapılandırılabilir.

Simulink ortamı için geliştirilen diğer fiziksel modelleme programları gibi Simmechanics yazılımı da Simscape üst grubuna bağlıdır. Simscape yazılımı MATLAB ve Simulink ile bütünlük halinde çalışır. Simscape ortamının temel farklılığı matematiksel işlemleri sinyal akışları halinde düzenleyen blokların yerini fiziksel bileşenler ve ilintileri doğrudan temsil eden Simscape bloklarının almış olmasıdır.

3.1.4. Simmechanics modeli

Program ve benzetime taban oluşturan CAD dosyaları robot üreticisinin internet sitesinden sağlandıktan sonra *Mathworks*'un sitesinden indirilebilen ek program yardımıyla '.xml' uzantılı olarak Simmechanics ortamına aktarılır. Şekilde XML uzantılı dosyanın taban alındığı bir model Matlab üzerinde çalışan 'mech_import' komutu ile oluşturulmuştur (Şekil 3.17).

Başlangıç modelinin en kritik özelliği, konstrüksiyonu oluşturan bileşenlerin kütle, hacim, dizeysel atalet momenti, ağırlık merkezi ve koordinat ekseni verilerini barındıran modüler 'gövde' bloklarını içermesidir. Bu veriler CAD modelinde gerçekleştirilen değişiklikler doğrultusunda güncellenebilir, daha ileri uygulamalarda gerçek zamanlı veri akışlarına müsaade edebilir.

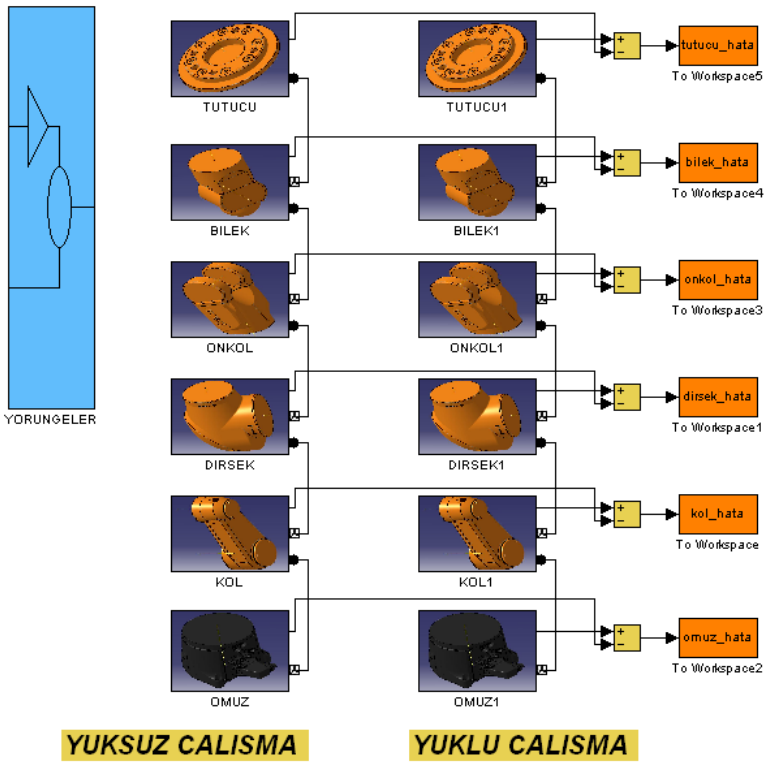


Şekil 3.17: Simmechanics temel robot modeli

Başlangıç modeli, denetim optimizasyonu gibi ileri uygulamaların doğrudan doğruya gerçekleştirilebileceği bir taban teşkil etmez. Simulink/Simmechanics ortamındaki başlangıç modelleri yalnızca CAD ortamından MATLAB ortamına taşınan dinamik parametrelerin kaydedildiği gövde bloklarını kullanıcıya sunar. Zira Simulink ortamındaki benzetimin bu aşamada çalıştırılması halinde hiçbir kısıt ve komut atanmamış olduğu için bir dizi hata ile karşılaşılmaktadır. Model bu sebeple temel model olarak değerlendirilebilir.

Temel model kullanılacak olan denetim altyapısına, modelden alınacak sonuçların türüne, modelin nasıl izleneceğine ve geliştirileceğine göre biçimlendirilir. Şekil 3.18 uygulamada kullanılan modeli göstermektedir.

Simulink-Simmechanics ortak düzleminde oluşturulan model referans açısal giriş sinyallerinin tork sinyallerine dönüştürülerek gövde mafsallarının sürülmesi esasına göre yapılandırılmıştır. Şekil 3.18'de görüleceği üzere açısal yörünge girişleri, mafsal açısal çıkışları ve uç eyleyici koordinat takımına (**C**oordinate **S**ystem **2** – ***CS2***) ait çıkış yörünge değişimi çalışma uzayına ihraç edilmektedir. Model ve ayrık mafsal denetim altyapısının başarımına ilişkin tartışma takip eden bölümde bu verilere dayanarak gerçekleştirilecektir.



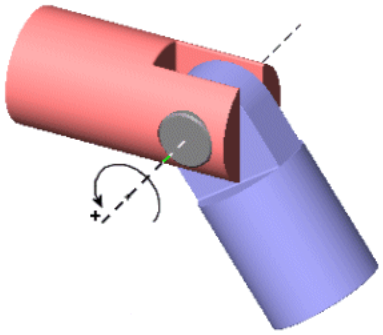
Şekil 3.18: Simulink/Simmechanics ortamı test modeli

3.2. Yöntem

Mekatronik sistemlerin mekanik kısımları itibariyle açık kinematik zincir yapısında olmaları yüksek serbestlik dereceleri taşımaları anlamına gelmektedir. Bu tanımlamaya uyan manipülatörlerin kuramsal yönleri sahip oldukları serbestlik derecesi (**D**egree **o**f **F**reedom - ***DoF***) ölçüsünde karmaşıklaşır. İncelenmekte olan model her biri ayrık mafsallar vasıtasıyla denetlenen altı serbestlik derecesine sahiptir. Robotun tüm hareket eksenlerinde döner mafsallar kullanılmıştır. Döner mafsallar, kendilerine atanan eksen etrafında dönme hareketi gerçekleştirir, böylece tek serbestlik derecesi sağlarlar (Şekil 3.19). Altı adet döner mafsal ile hareketlendirilen açık kinematik zincirin serbestlik derecesi '6' olmaktadır (Söylemez 2000). Bu yapılanma gerek makine kinematiği gerekse dinamiğinin tanımlanmasında tutarlılık ve kesinlik sağlayan bir yaklaşıma ihtiyaç duyar.

Robot kinematik karakteristiğinin tanımlanmasında bu tür çalışmalarda yaygın olduğu üzere 'Denavit Hartenberg Yaklaşımı'na başvurulmuştur. Robot bağları ve mafsalları arasındaki matematiksel bağlantıları sağlayan yöntemin esas yönelimi ileri kinematik tanımlamaların gerçekleştirilmesi yanı sıra ters kinematik analizlere gereken verileri ortaya çıkarmaktır.

Robot ters kinematiğinin başarılı bir biçimde tanımlanması robot yörünge analizi için şarttır. Bu çalışmada robot hareket yörüngeleri mafsal uzayı için hesaplanmıştır. Mafsal uzayında gerçekleştirilen bu işlem günümüz robotik uygulamalarında sıkça kullanılan bağımsız mafsal denetim yaklaşımı için gereken referans yörüngeleri oluşturur. Çalışmada faydalanılan robotun sahip olduğu mekanik yapılanma sebebiyle en uygun



Şekil 3.19: Dönme ekseni ve pozitif dönme yönünün belirtildiği bir döner mafsal (http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/mech/, 2011)

mafsal açılarının bulunmasında geometrik yaklaşım kullanılmıştır.

Dinamik çerçeve Lagrange-Euler denklemi ile oluşturulmaktadır. Yaklaşım mekanik sistemin hareketinde rol oynayan tüm dinamik etkileri başarılı ve pratik bir biçimde temsil eden fonksiyonlar ile işletilir. Mekatronik sistemlerin yüksek serbestlik derecelerine sahip mekanik bağlarına ait dinamik yapıların tanımlanması doğrusal olmayan sonuçlar doğurur. Çoğunlukla trigonometrik fonksiyonların kuvvetleri ve birbirleri ile çarpımlarını içeren ifadelerin doğrusal sistemler olarak modellenmesinde birtakım varsayımlar yapılması gereği duyulmuştur.

İş planları doğrultusunda gerçekleştirilen ters kinematik analizin sonuçları olan mafsal yörüngelerinin başarılı biçimde takibi motor ve sürücü devre sistemlerin iyi seçimi ve tasarımı ile mümkündür. Bu çalışmada kullanılan motorlar kalıcı mıknatıs senkron motorlar arasından seçilmiştir. Üç fazlı bu motorların akım esaslı sürülmesinde gerilim kaynak evirgeçleri kullanılmaktadır. Motor grupları da eşdeğer eksen indirgemeleri doğrultusunda modellenmiş, hassas hız ve konum denetimi faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada tüm benzetimler MATLAB/Simulink ve Simmechanics ortamlarında yürütülmekte, sonuçları hem sayısal hem görsel biçimde sunulmaktadır.

Denetleyici tasarımları her ikisi de non-lineer olarak modellenen Simulink ve Simmechanics modelleri için ayrı olarak gerçekleştirilmiştir. Denetleyici tasarım ve optimizasyonlarında Simulink Denetim Tasarımı (*Simulink Control Design*) araç kutusundan yararlanılmaktadır. Araç kutusu ile ile doğrusal olmayan sistemlerin belirli çalışma noktaları etrafında doğrusallaştırılması ve belirli kısıtlar doğrultusunda el ile veya otomatik olarak denetim optimizasyonunun gerçekleştirilmesi mümkün olmaktadır.

Ters kinematik analiz ile mafsal yörüngelerini oluşturan program MATLAB ortamında M-File formatlı olarak hazırlanmıştır. Program ***EK-3*** içerisinde sunulmaktadır.

3.2.1. Kinematik analiz

Kinematik, hareketi oluşturan kuvvetler veya cisimlerde oluşan gerilimler düşünülmeden mekanizmalarda sadece hareketin incelenmesi uğraşına verilen isimdir (Söylemez 2000). Kinematik analizde, mekanizmayı oluşturan katı (rijit) cisimlerin gerekli tüm boyutsal özellikleri biliniyor olmalıdır. Bu tanımlar doğrultusunda kinematik analiz geometrik bir yaklaşımdır, denilebilir. Takip eden başlıklar altında kinematiğin iki esas problemi olan ileri ve ters kinematik analiz üzerinde durulacak, bu çalışmaya uyarlanmaları konusu detaylı biçimde işlenmiştir.

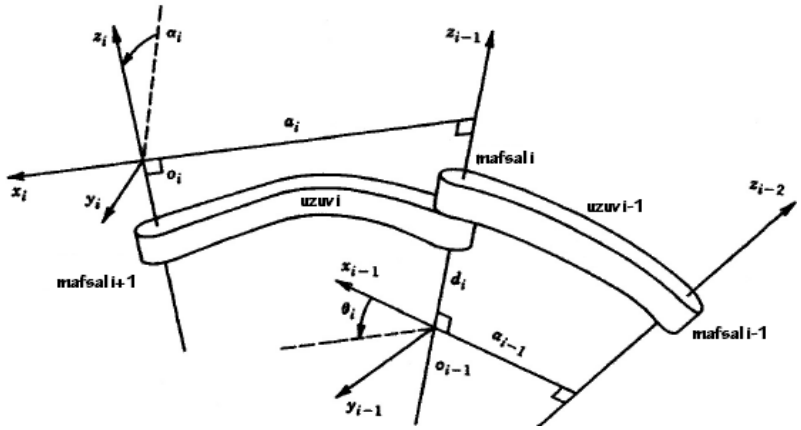
3.2.1.1. İleri kinematik analiz

İleri kinematik analiz robotik uygulamalarda uzuvlar arasındaki geometrik ilişkilerin ve mafsal açısal değerlerinin bilinmesi halinde robot uç eyleyicisinin uzayda bulunacağı konumu ve uç eyleyici yönelimini belirlemekte kullanılmaktadır. Ancak ileri kinematik analizin asıl önemi robot hareket yörüngelerinin tayininde rol oynayan ters kinematik analizin ihtiyaç duyduğu verileri hesaplamasıdır.

Robot ileri kinematik analizi üzerine yapılmakta olan güncel çalışmaların önemli bir kısmında, bağlantıları teşkil eden tüm mafsalları ilişkilendirmek üzere bir notasyon sistematiği oluşturan *Denavit-Hartenberg* yaklaşımından yola çıkılır.

Denavit-Hartenberg yaklaşımının uygulanmasına, giriş mafsalından başlayıp çıkış mafsalına kadar devam eden zinciri takip etmek suretiyle, mafsalları numaralandırarak başlanır. Ardından her bir mafsalın hareket ekseni tayin edilir, bunlar için pozitif bir dönme yönü belirlenir ve her biri bir dönme ekseni teşkil eder (z_i). Dönme eksenleri uzayda dağınık bir biçimde bulunuyor olsalar dahi, birbirini takip eden iki eksen arasında (burada z_i ve z_{i-1}) daima ortak diklik teşkil eden bir doğru bulunabilir ve bu doğru x_i olarak isimlendirilir. x_i doğrultuları için de keyfi pozitif yön belirlemesi yapılır.

Şekil 3.20 incelenir ve mafsalın sağladığı hareket göz önünde bulundurulursa $x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$ eksen takımının $i-1$ ve $i-2$ mafsallarını taşıyan uzva, $x_iy_iz_i$ eksen takımının ise i ve $i-1$ mafsallarını taşıyan uzva bağlı kaldığı anlaşılabilir. Böylece koordinat sistemlerini barındıran uzuvlara numaralar atamak üzere bir taban oluşturulmuş olur (Uicker 2003).



Şekil 3.20: Denavit-Hartenberg parametrelerinin gösterimi (Spong 2006)

Denavit-Hartenberg yaklaşımının işleyişi, uzuv ve mafsal biçimlerinin ve aralarındaki ilişkilerin sınıflandırılmasında kendini gösterir. Birbirini takip eden herhangi iki koordinat sisteminin göreli konum ve yönelimleri sadece dört parametre kullanılarak belirlenmektedir. Şekil 3.20'da görülebilen a, α, θ ve d parametreleri aşağıdaki gibi tanımlanır:

- a_i= x_i boyunca z_{i-1} ve z_i arasındaki mesafe olup işareti tanımlanan yöndeki x_{i+1}'in işaretine bağlıdır.
- α_i= Pozitif z_{i-1} ile pozitif z_i arasındaki açı olup verilen sıralamaya göre saatin tersi yönünde pozitif ölçülür.
- θ_i= Pozitif x_{i-1} ile pozitif x_i arasındaki açı olup verilen sıralamaya göre saatin tersi yönünde pozitif ölçülür. Kullanılan mafsalın döner mafsal olması (R) halinde bu katsayı parametre olarak kullanılır.
- d_i= z_i ekseni boyunca x_{i-1} ile x_i arasındaki mesafe olup işareti uyarınca pozitif alınır. Kullanılan mafsalın kayar mafsal olması (P) halinde bu katsayı değişken halini alır. 'Eksenel Ofset' terimi bu parametre için sıkça kullanılır.

Sisteme özgü Denavit Hartenberg parametreleri

Robot modelinde Denavit Hartenberg parametrelerinin belirlenmesi özel bir çabayı gerektirmektedir. Eksenel farkların ve dönme eksenleri arasındaki mesafelerin birbirinden hatasız biçimde ayırt edilmesi kritik önem taşır. Doğru biçimde belirlenmeyen parametreler ileri ve ters kinematik analizlerde tutarsız sonuçların

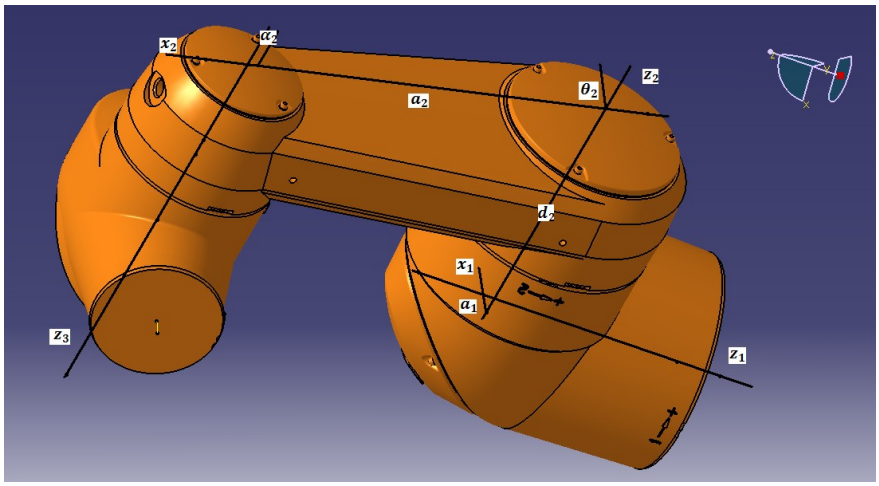
hesaplanmasına sebep olmaktadır. İlk ve ikinci ekleme ait parametrelerden bazıları Şekil 3.21'de görülmektedir.

Dikkat edileceği üzere α_2 açısal değeri sıfıra eşittir. Açıların tespit edilmesi ancak ilgili x- ve z- eksenlerinin taşınması ile sağlanır. a ve d parametreleri mekanizmanın dizilişine bağlı olarak birbirlerinin yerine geçebilmektedir: d parametresi genellikle eksenel açıklığı teşkil ettiği halde, tanımlar gereği a parametresi de eksenel açıklık olarak kendini gösterebilmektedir. Parametrelerin belirlenmesini kritik bir işlem haline getiren bir etken de budur.

Üretici firmanın bildirmiş olduğu katalog bilgileri ve daha önce verilmiş olan tanımlar doğrultusunda sisteme ait Denavit-Hartenberg parametreleri şu şekilde tespit edilmiştir:

$a_1 = 0.050m$	$\alpha_1 = 90°$	$\theta_1 = \theta_1$	$d_1 = 0.478m$
$a_2 = 0.425m$	$\alpha_2 = 0$	$\theta_2 = \theta_2$	$d_2 = 0.050m$
$a_3 = 0$	$\alpha_3 = -90°$	$\theta_3 = \theta_3$	$d_3 = 0$
$a_4 = 0$	$\alpha_4 = -90°$	$\theta_4 = \theta_4$	$d_4 = 0.425m$
$a_5 = 0$	$\alpha_5 = 90°$	$\theta_5 = \theta_5$	$d_5 = 0.0895m$
$a_6 = 0$	$\alpha_6 = 0$	$\theta_6 = \theta_6$	$d_6 = 0.0105m$

Denavit-Hartenberg parametreleri sadece mekanik bağlantıların önemli geometrik özelliklerinin ölçülmesinde standart bir metot sunmakla kalmaz. Denavit ve Hartenberg ardışık koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm denklemlerinin parametreleri kullanan standart matrisler formunda yazılabileceğini göstermişlerdir (Denavit ve Hartenberg 1955). Eğer koordinat sistemlerinden birine göre (R_{i+1}) ölçülmüş herhangi bir noktanın



Şekil 3.21: Kol mafsalı ve uzvunda tanımlanan parametreler

konum koordinatları biliniyorsa, bu noktanın koordinatlarının bir önceki koordinat sistemine (R_i) göre bulunması mümkündür. Bu işlemin gerçekleştirilmesini sağlayan operatöre 'dönüşüm (*transformasyon*) matrisi' adı verilir ve '$T_{i,i+1}$' ile sembolize edilir. Tanımlanan işlemin matematiksel ifadesi şu şekildedir:

$$R_i = T_{i-1,i} R_i \tag{3.1}$$

Dönüşüm matrisi standart formdadır (Uicker 2003):

$$T_{i-1,i} = \begin{bmatrix} cos\theta_i & -cos\alpha_i sin\theta_i & sin\alpha_i sin\theta_i & a_i cos\theta_i \\ sin\theta_i & cos\alpha_i cos\theta_i & -sin\alpha_i cos\theta_i & a_i sin\theta_i \\ 0 & sin\alpha_i & cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

Konum vektörleri ise aşağıdaki gibi verilir:

$$R = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

İncelenecek olan sistem her biri bağımsız olarak denetlenen altı adet döner mafsala, dolayısıyla altı serbestlik derecesine sahip bir açık kinematik zincirdir. Yukarıda açıklanan tüm ifade ve yöntemler kapalı çevrim sistemlerde olduğu gibi, açık kinematik zincirler için de geçerliliğini korur.

Altı serbestlik derecesi altı adet dönüşüm matrisi getirmektedir. Denavit-Hartenberg parametreleri kullanılarak oluşturulmalarından sonra kinematik analizin her aşamasında bu matrislerden yararlanılmaktadır. Zemin uzvu ve omuz uzvu arasındaki dönüşüm matrisi Denklem (3.2) kullanılarak,

$$T_{01} = \begin{bmatrix} cos\theta_1 & 0 & sin\theta_1 & 0{,}050 cos\theta_1 \\ sin\theta_1 & 0 & -cos\theta_1 & 0{,}050 sin\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0{,}478 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

olarak elde edilir. Buradan hareketle diğer matrisler de hesaplanır.

$$T_{12} = \begin{bmatrix} cos\theta_2 & -sin\theta_2 & 0 & 0{,}425cos\theta_2 \\ sin\theta_2 & cos\theta_2 & 0 & 0{,}425sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & -0{,}050 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$T_{23} = \begin{bmatrix} cos\theta_3 & 0 & -sin\theta_3 & 0 \\ sin\theta_3 & 0 & cos\theta_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$T_{34} = \begin{bmatrix} cos\theta_4 & 0 & -sin\theta_4 & 0 \\ sin\theta_4 & 0 & cos\theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0{,}425 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$T_{45} = \begin{bmatrix} cos\theta_5 & 0 & sin\theta_5 & 0 \\ sin\theta_5 & 0 & -cos\theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0{,}0895 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$T_{56} = \begin{bmatrix} cos\theta_6 & -sin\theta_6 & 0 & 0 \\ sin\theta_6 & cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0{,}0105 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$T_{01} \ldots T_{56}$ matrisleri alt indislerle belirtilen uzuvları geometrik olarak birbirine bağlayan dönüşüm operatörleridir. Hareketsiz, dolayısıyla zeminin bir uzantısı olarak düşünülebilecek sabit uzvun '0' ile belirtildiğine dikkat edilmelidir. Bu matrisler ardışık biçimde çarpılacak olursa elde edilen çarpımın yine bir dönüşüm matrisinden ibaret olacaktır.

Bir dönüşüm matrisinin işlevi, koordinat sistemlerinden birine göre ölçülen bir noktanın bilinen koordinatlarının yardımıyla, bir önceki koordinat sistemine göre bu noktanın tarif edilmesidir. Dönüşüm matrislerinin çarpımı ile elde edilen bileşke matrisin de uç eyleyici koordinat sistemini zemin koordinat sistemine 'dönüştürdüğü' kanıtlanabilir:

$$R_0 = T_{06}R_6 \quad (3.10)$$

Bu aşamada R_6 ile belirtilen konum vektörü, sözgelimi son uzvun $z-$ ekseni üzerindeki uç noktasının koordinatları verildiği takdirde bu noktanın birinci uzva göre konumunu bulmak mümkün olacaktır. İleri konum analizinin temel fikri böylece uygulanabilmektedir. Zira bir kez eyleyici açıları verildiğinde bu değerler basitçe T_{06} matrisinde yerlerinde yazılarak bu açı değerlerinin uç uzvun en dış noktasını robot çalışma uzayında nereye konumlandıracağı rahatlıkla bulunabilir.

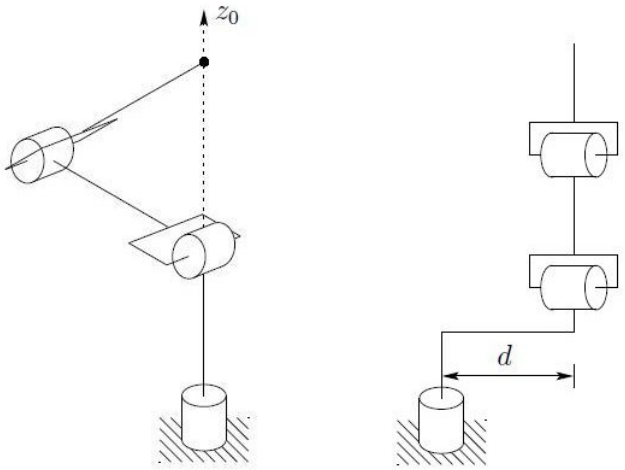
3.2.1.2. Ters Kinematik Analiz Yardımıyla Mafsal Parametrelerinin Bulunması

Bu çalışmada robota ait hareket çözümlemesi ters konum analizi ile gerçekleştirilir. Robotikte kullanılan ters kinematik analizin (***I***nverse ***K***inematic ***A***nalysis - *IKA*) temelinde, konumu ve 3x3 rotasyon matrisi verilen uç eyleyiciye göre kinematik zincirde yer alan diğer eyleyicilerin almış olduğu açısal değerlerin (konumlar, gerekli olduğunda hız ve ivmeler) belirlenmesi amacı yatar.

TX90 model insansı kol yapılı robot, kendisini IKA yönünden özgün kılan birtakım özelliklere sahiptir:

- Kol ve dirsek mafsallarında eksenel ofset bulundurur. Eksenel ofsetler kol yapılı robotlarda tekil dönüşüm matrislerinin oluşumuna dolayısıyla IKA'nın belirli konumlar için sonsuz sayıda çözüm üretmesine engel olmak amacıyla kullanılır (Şekil 3.22).
- Birçok modern endüstriyel robotta görüldüğü gibi TX90'ın da son üç mafsalının dönme eksenleri bir noktada kesişir. Küresel bilek veya '*Euler Bileği*' olarak isimlendirilen bu yapı, uç eyleyici yönelimini belirleyici rol üstlenir. Euler bileği oluşan matematiksel çözüm çiftlerinin bir kısmını engelleyerek ters kinematik analizin daha hızlı ve sağlıklı biçimde işlemesini sağlar.

Robotun sahip olduğu bu ikinci özellik ilk üç mafsala ait çözümlemede ayrıklaştırma (decoupling) yöntemini kullanılır hale getirmektedir. Yönteme göre robotun ilk üç mafsalı, problemde tanımlanması zorunlu olan 3x3 rotasyon matrisindeki veriler doğrultusunda *geometrik* olarak çözümlenebilmektedir (Spong 2006). Son üç mafsal değişkeni ise yine rotasyon matrisi yardımıyla ve ilk üç mafsal değişkeni kullanılarak belirlenir.



Şekil 3.22: Eksenel açıklık barındırmayan (solda) ve eksenel açıklıklı yapı (Spong 2006)

Eksenel ofsetler sonsuz çözüm döngüsüne engel olmakla birlikte bu döngünün oluşmadığı hallere ait varyasyonların sayısını da azaltır. Sözgelimi tek eksenel ofset taşıyan ancak Euler bileği ile donatılmamış altı serbestlik dereceli robotun çalışma uzayı içerisinde kalan bir noktaya erişimini sağlayan mafsal açılarına ait $2^6 = 64$ farklı olasılık mevcuttur (Bingül 2009).

z_4, z_5 ve z_6 eksenlerinin kesiştiği varsayımsal noktaya bilek merkezi (o_c) ismi verilir. o_c noktası, uç eyleyici koordinat merkezinden z_6 ekseni boyunca $(d_5 + d_6)$ mesafesinde bulunur. z_5 ve z_6 eksenleri örnek modelde aynı doğrultuda bulunduğu için uç eyleyici rotasyon matrisinin üçüncü sütunu taban uzvuna göre z_6 ekseninin doğrultusunu belirler. Böylece,

$$o_c^0 = o_6 - d_6 R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

ifadesine ulaşılır. Bu denklem açık olarak ifade edilecek olursa bilek koordinat ekseninin,

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} o_x - d_6 r_{13} \\ o_y - d_6 r_{23} \\ o_z - d_6 r_{33} \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

koordinatlarına sahip olacağı görülür. Bilek ekseninin çalışma uzayındaki konumunu belirleyen ilk üç mafsal açısının bulunmasında bu koordinatlar kullanılabilir. Bu fikir geometrik yaklaşımın temelini oluşturur.

Omuz mafsal açısı θ_1'in belirlenmesinde XY izdüşüm düzleminden faydalanılır. Şekil 3.23'de omuz uzvunu takip eden dizilimin XY düzlemine paralel olduğu farz edilmiştir (ileri uç uzanım).

$$a_1 \perp d_2 \; ve \; a_1 = d_2 = d$$
$$\sin\beta_1 = d/r = d/\sqrt{x_c^2 + y_c^2} = t \; ise$$
$$\beta = \text{atan2}\left(t, \sqrt{1-t^2}\right) \tag{3.13}$$

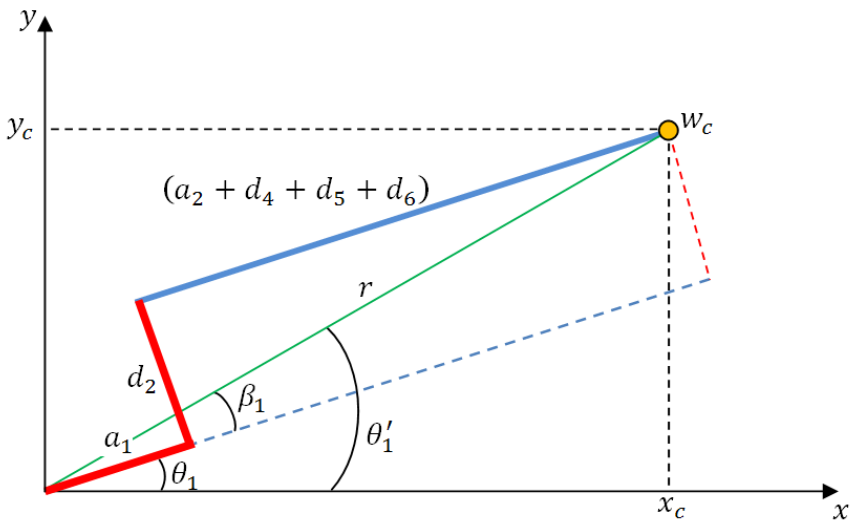
biçimindedir. Burada zahiri θ_1' açısı için,

$$\theta_1' = \text{atan2}(y_c, x_c) \tag{3.14}$$

ifadesi mevcuttur.

Herhangi bir anda omuz mafsal açısı θ_1, hesaplanan bu iki açı arasındaki farka eşit olmaktadır:

$$\theta_1 = \theta_1' - \beta \tag{3.15}$$



Şekil 3.23: Omuz mafsal açısı

Omuz mafsalını takip eden kol ve dirsek mafsallarının sahip olacakları açılar için yine geometrik yaklaşımdan istifade edilir (Şekil 3.24).

θ_3 değerini belirlemek için kosinüs teoremini uygulamak mümkündür:

$$\cos\theta_3 = \frac{(r')^2 - a_2^2 - d_4^2}{2a_2a_3} := D \tag{3.16}$$

'$atan2$' tanımı kullanılarak;

$$\theta_3 = \text{atan2}\left(\mp\sqrt{1-D^2}, D\right) \tag{3.17}$$

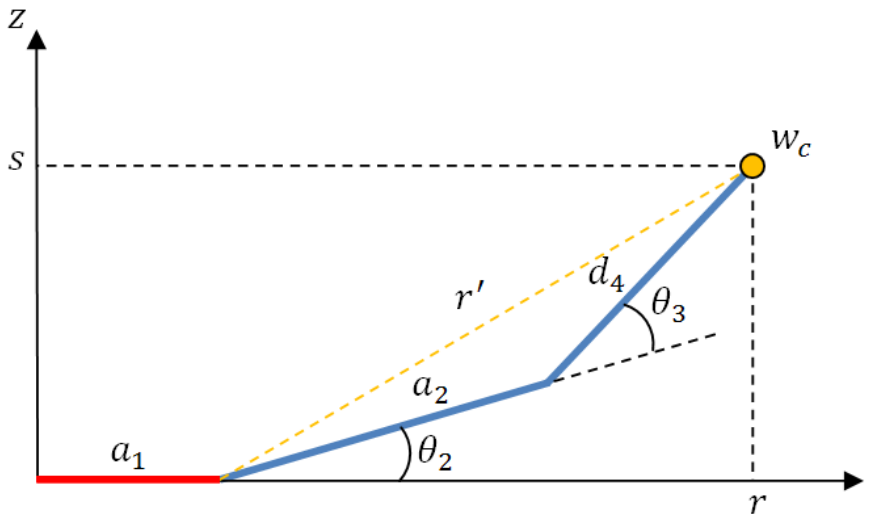
olduğu ifade edilebilir. Burada

$$(r')^2 = (r-a_1)^2 + s^2 = (x_c^2 + y_c^2 - a_1)^2 + s^2 \tag{3.18}$$

şeklindedir. Ayrıca 's' terimi, bilek yüksekliği z_c'den baz uzvu yüksekliği d_1'in farkını temsil etmektedir:

$$s = z_c - d_1 \tag{3.19}$$

Görüleceği üzere ters kinematik analiz θ_3 için iki ayrı değer üretmiştir. Robot kinematiğinde bu konumlar *dirsek yukarıda* ve *dirsek aşağıda* olarak adlandırılır. Eşdeğer sonuçlar robotların hareket imkanlarını artırmakla birlikte matematiksel sonuçlar her zaman fiziksel olarak gerçeklenemez. θ_2 değerini önceki adımda bulunan θ_3 doğrultusunda belirlenir:



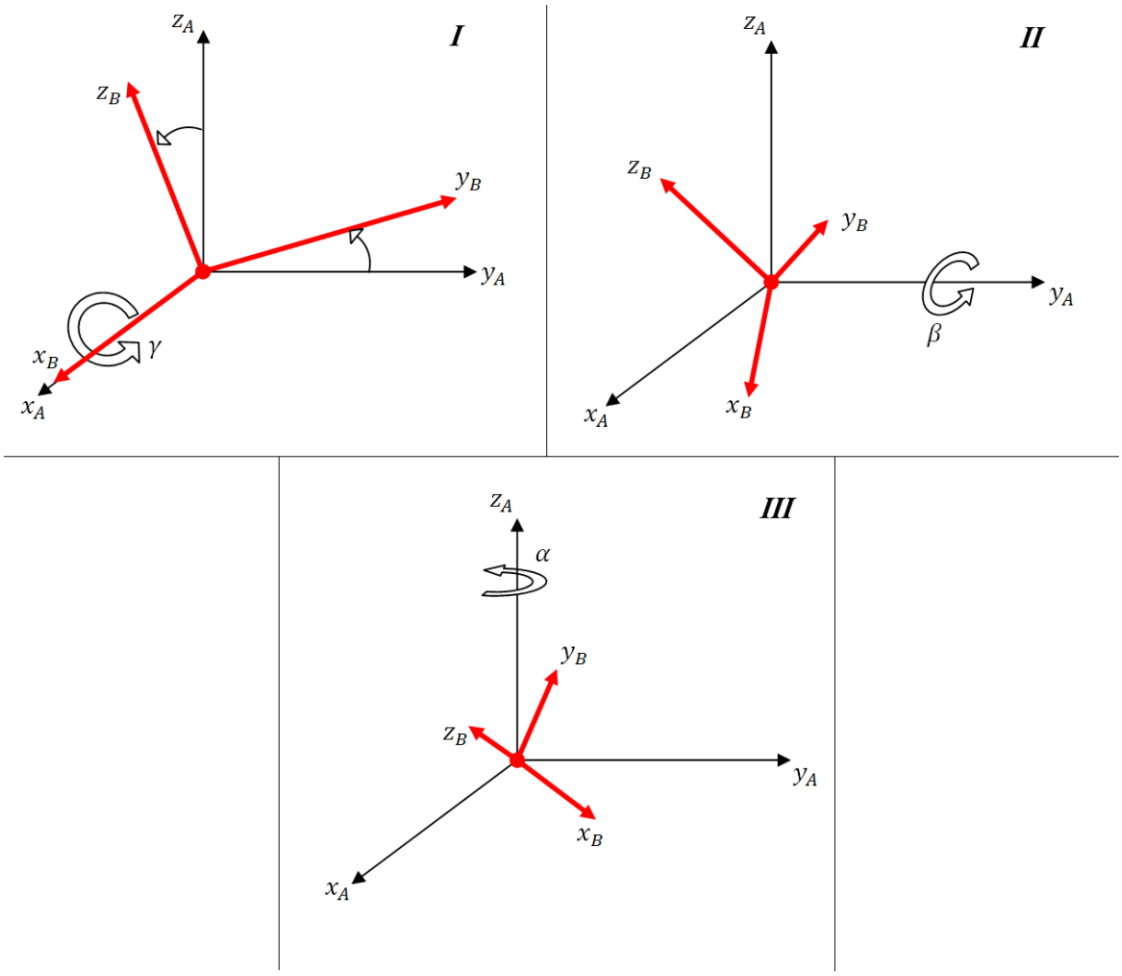
Şekil 3.24: Kol ve dirsek açıları

$$\theta_2 = \pm \operatorname{atan2}(s, (r - a_1)^2) - \operatorname{atan2}(\mathrm{d}_4 \sin\theta_3 , \mathrm{a}_2 + \mathrm{d}_4 \cos\theta_3) \qquad (3.20)$$

Kol mafsalında da bilek mafsalında olduğu gibi iki farklı sonuç üretilmektedir. Bu farklılığın yol açtığı iki farklı konum *kol yukarıda* ve *kol aşağıda* olarak adlandırılabilir.

3.2.1.3. Bilek Yönelimi

Bilek yönelimindeki değişimin karakterize edilmesinde *Roll-Pitch-Yaw* (*Yuvarlanma-Baş Vurma-Yalpalama*) açı seti kullanılmıştır. Bu tür çözümlemelerde farklı yöntemlerden de istifade edilebilmektedir. Ancak eşdeğer açı seti veya Euler açı seti gibi alternatif yaklaşımların tercih edilmemiş olmasının sebebi Roll-Pitch-Yaw açı setinde hareket etmeyen sabit bir koordinat çerçevesine göre değerlendirme yapılıyor olmasıdır. (Şekil 3.25).



Şekil 3.25: Roll-Pitch-Yaw açı takımı.

Eşmerkezli $\{A\}\,(o_A x_A y_A z_A)$ ve $\{B\}\,(o_B x_B y_B z_B)$ koordinat takımlarını ele alalım. $\{B\}$ koordinat sistemi sırasıyla x_A etrafında γ (Yaw), y_A ekseni etrafında β (Pitch) ve z_A ekseni etrafında α (Roll) açısıyla döndürülmüş olsun. Bu eksenler boyunca gerçekleştirilen dönme hareketleri $\{A\}$ koordinat sistemine göre ifade edilir. İşlem matematiksel olarak şu şekilde gösterilir:

$$\begin{aligned} R_{xyz}(\gamma,\beta,\alpha) &= R_z(\alpha)R_y(\beta)R_x(\gamma) \\ &= \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\gamma & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3.21}$$

Roll-Pitch-Yaw açı setinin ters çözümlemelerinde ${}^{A}_{B}R_{xyz}(\gamma,\beta,\alpha)$ rotasyon matrisi verildiğinde sabit açı sisteminde α,β,γ açıları için,

$$\begin{aligned} {}^{A}_{B}R_{xyz}(\gamma,\beta,\alpha) &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\gamma & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3.22}$$

denklem sisteminin çözümü yapılır.

Problem tanımında verilen uç eyleyici rotasyon matrisinin yapısı şu şekildedir:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \tag{3.23}$$

TX90 eyleyicisinde bulunan Euler bilek yapısı uç eyleyici yönelimini uç eyleyici konumundan ayrı kılan dönüşüm formülünü mümkün kılar:

$$R_3^0 R_6^3 = R \;\rightarrow\; R_6^3 = (R_3^0)^T R \tag{3.24}$$

İlk üç mafsal açısının hesaplanabiliyor olması sebebiyle eşitliğin sağ tarafı tamamen bilinmektedir. Eşitliğin sol tarafını oluşturan R_6^3 matrisi ve sağ taraf birbirine eleman elemana eşit olmak durumundadır. R_6^3 son üç rotasyon matrisinin ileri yönlü çarpımı yoluyla hesaplanır ki bu matrisler D-H parametreleri ile elde edilmiştir:

$$R_6^3 = \begin{bmatrix} c_4c_5c_6 - s_4s_6 & -c_4c_5s_6 - s_4c_6 & c_4s_5 \\ s_4c_5c_6 + c_4s_6 & -s_4c_5s_6 + c_4c_6 & s_4s_5 \\ -s_5c_6 & s_5s_6 & c_5 \end{bmatrix} \tag{3.25}$$

Euler çözümü olarak adlandırılan yöntem artık sisteme uygulanabilir. Örneğin üçüncü sütunlar birbirine eşitlenecek olursa,

$$c_4s_5 = c_1c_{23}r_{13} + s_1c_{23}r_{23} + s_{23}r_{33} \tag{3.26}$$

$$s_4s_5 = -c_1s_{23}r_{13} - s_1s_{23}r_{23} + c_{23}r_{33} \tag{3.27}$$

$$c_5 = s_1r_{13} - c_1r_{23} \tag{3.28}$$

eşitlikleri yazılır. Son iki ifadenin ikisinin de sıfır olmaması halinde θ_5 açısı için:

$$\theta_5 = \text{atan2}\left(\mp\sqrt{1-(s_1r_{13} - c_1r_{23})^2}, s_1r_{13} - c_1r_{23}\right) \tag{3.29}$$

yazılabilir. Burada yine ikili bir çözüm oluşmuştur (bilek yukarı ve bilek aşağı konumu). Pozitif kökün kabul edilmesi halinde θ_4 ve θ_6 için,

$$\theta_4 = \text{atan2}(-c_1s_{23}r_{13} - s_1s_{23}r_{23} + c_{23}r_{33}, c_1c_{23}r_{13} + s_1c_{23}r_{23} + s_{23}r_{33}) \tag{3.30}$$

$$\theta_6 = \text{atan2}(s_1r_{12} - c_1r_{22}, -s_1r_{11} + c_1r_{21}) \tag{3.31}$$

eşitlikleri elde edilir. Analog sonuçlar için diğer terimlerin eşitliğinden de faydalanılabilir. Bu denklemlerde kullanılan iki kısaltmanın açıklanmasında fayda vardır:

$$s_{23} = \sin\theta_2\cos\theta_3 + \cos\theta_2\sin\theta_3 \tag{3.32}$$

$$c_{23} = \cos\theta_2\cos\theta_3 + \sin\theta_2\sin\theta_3 \tag{3.33}$$

3.2.2. Mafsal Yörünge Algoritması

Ters kinematik analiz her ne kadar popüler bir yöntem halini aldıysa da programlama ve işletme yönünden önemli bir zorluğu da beraberinde getirmektedir: Ters kinematik analiz özdeş (*identik*) matematiksel sonuçlar üretir. Bu durum uç eyleyicinin belirli bir hareketi için birden fazla alternatifin hesaplanmasına sebep olur.

Bir antropomorfik eyleyicinin ters kinematik analizinde oluşacak alternatif çözüm sayısının hesaplanması oldukça pratiktir. Hiçbir eksenel açıklık barındırmayan altı serbestlik dereceli altı döner mafsallı kuramsal bir manipülatörün ters kinematik analizinde ortaya çıkan aday çözümlerin sayısı $2^6 = 64$ adettir. Euler bilek yapısına sahip olan manipülatörlerin son üç eksenleri tek bir noktada (bilek merkezi) kesişmekte olup bu durum aday çözümlerin sayısını önemli ölçüde kısıtlar ($2^4 = 16$).

Bu çalışmada olduğu gibi robot mafsalları arasındaki olası eksenel açıklıkların her biri bir alternatif çözüm çiftini ortadan kaldırır. Ele alınan modelde omuz ve kol mafsalları arasında eksenel açıklık bulunur. Bu durum belirli bir konum ve yönelimi sağlayan aday çözümlerin sayısının $2^3 = 8$ adet olacağı anlamına gelmektedir. Bu çözümler kol (üst ve alt), dirsek (üst ve alt) ve bilek (üst ve alt) mafsallarında ortaya çıkar.

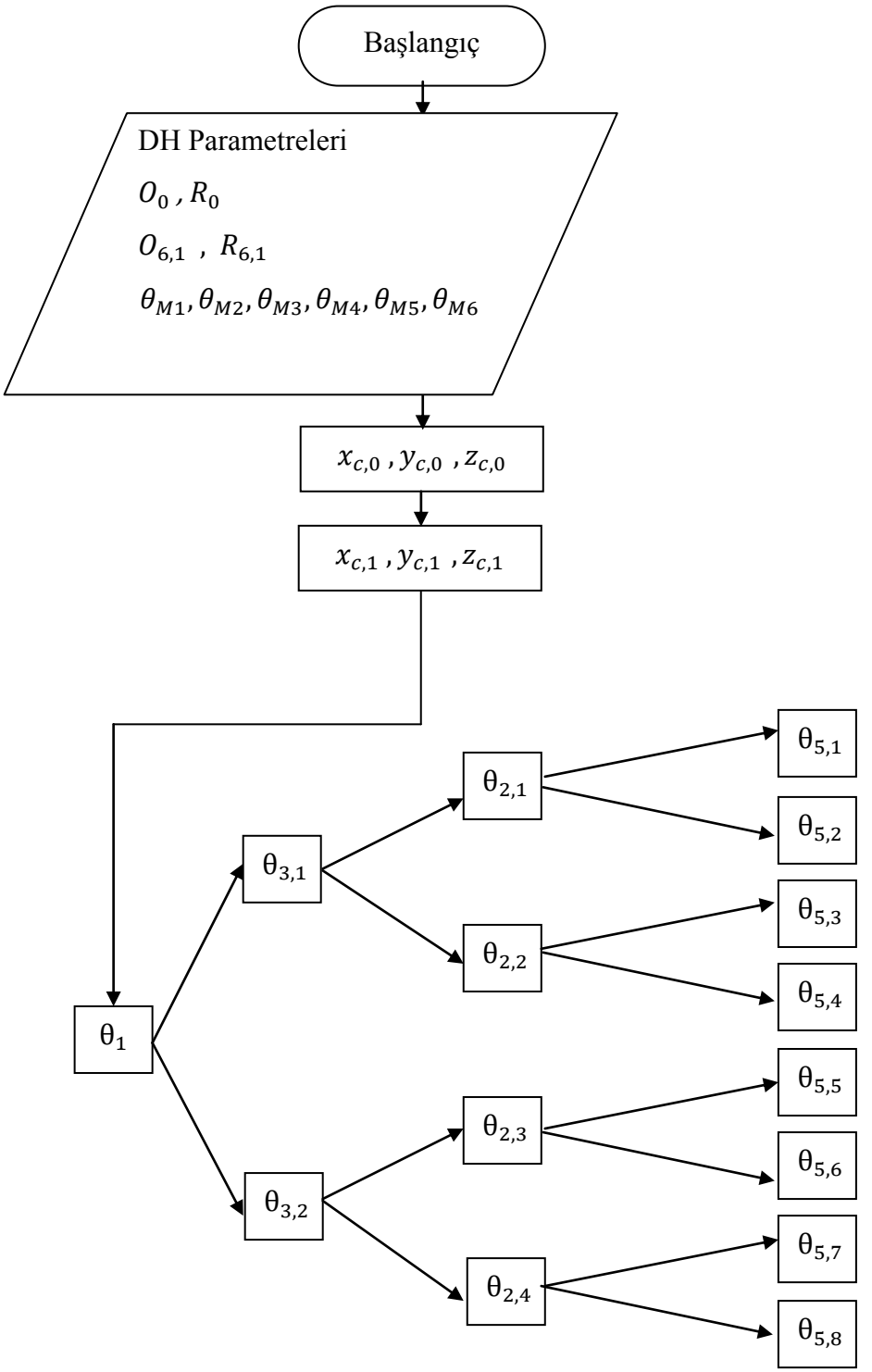
Yapılan çalışma kapsamında geliştirilmiş olan algoritma söz konusu aday çözüm gruplarının elenmesinde üç aşamayı takip eder. Bunlar şu şekilde sıralanır:

- Hem Matematiksel hem fiziksel olarak imkansız (bariz) sonuçların elenmesi,
- Yalnızca fiziksel olarak imkansız sonuçların (gizli) elenmesi,
- En ekonomik güzergahı üreten adayın seçilmesi (en uygun çözüm).

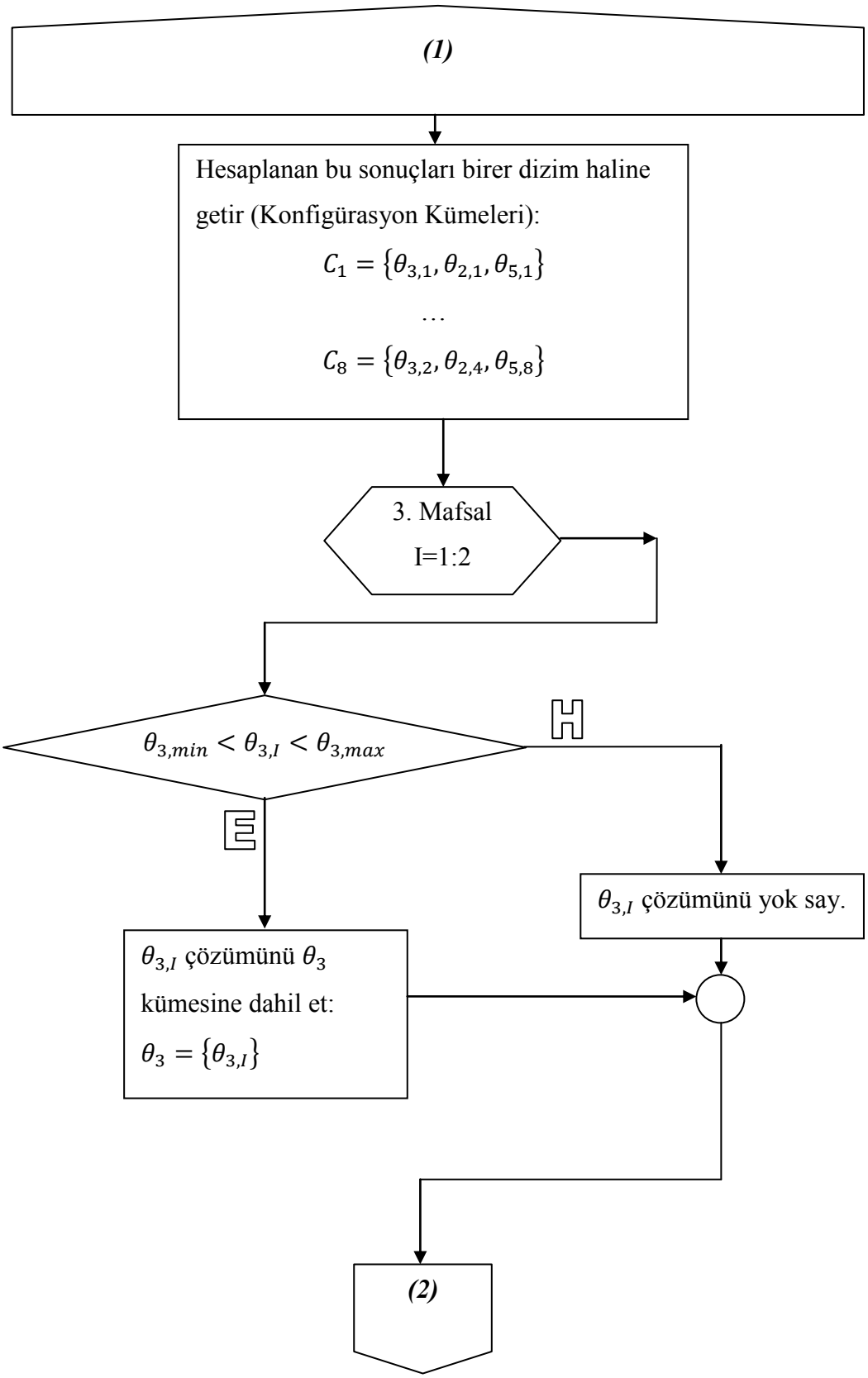
Üçüncü adım çözüm sayısının birden fazla olması halinde bu sayıyı bire indirme görevini üstlenmekle kalmaz aynı zamanda mafsalların en az hareketini garantileyen seçkin adayı belirler. Ancak sıralama önem arz etmektedir. Sözgelimi üçüncü adımın ilk sıraya alınması algoritmayı kararsızlığa götürecektir (Vatansever 2007).

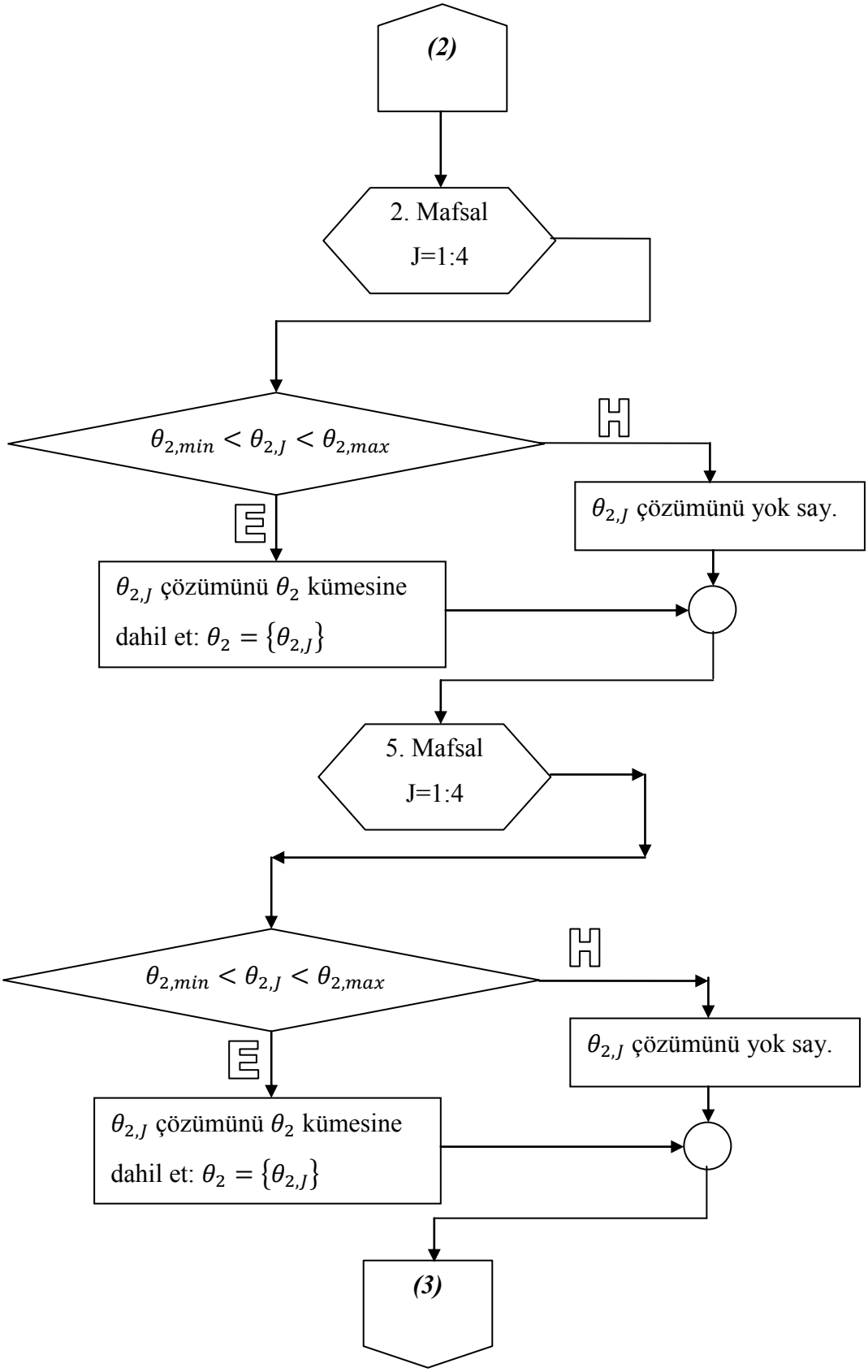
Bu çalışmada mafsal yörünge algoritması MATLAB ortamında "M-File" biçiminde yazılmış bir program ile gerçekleştirilmiştir. Program, eyleyici hareket sığalarını, Denavit Hartenberg yaklaşımının biçimlendirdiği dönüşüm matrislerini ve en önemlisi iş planı doğrultusunda belirlenen uç eyleyici konum ve yönelim verilerini girdiler olarak kabul eder. Elde edilen matematiksel çözüm dizileri en iyi sonucu verecek şekilde seçim aşamalarından geçirilir.

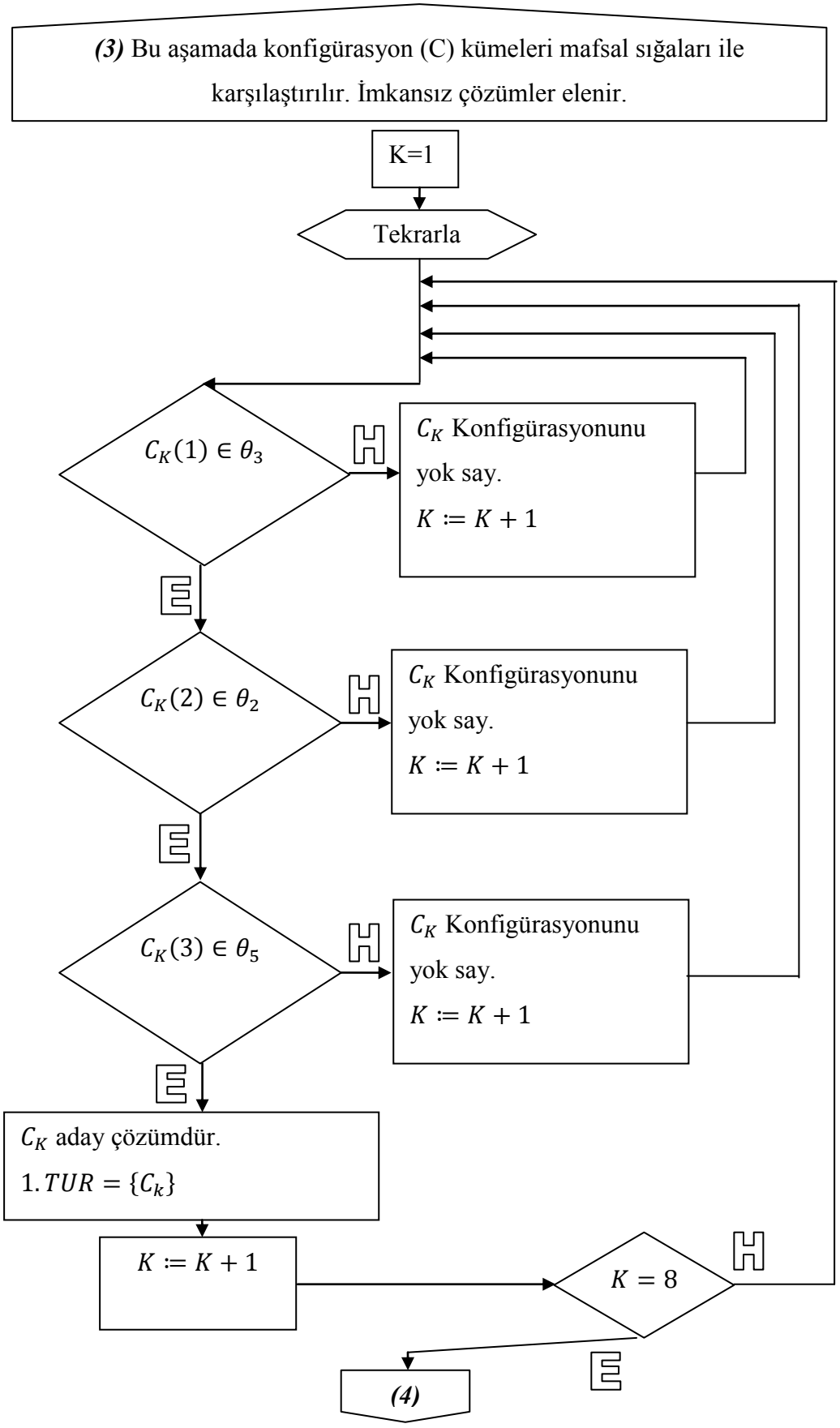
Mafsal Yörünge Algoritması



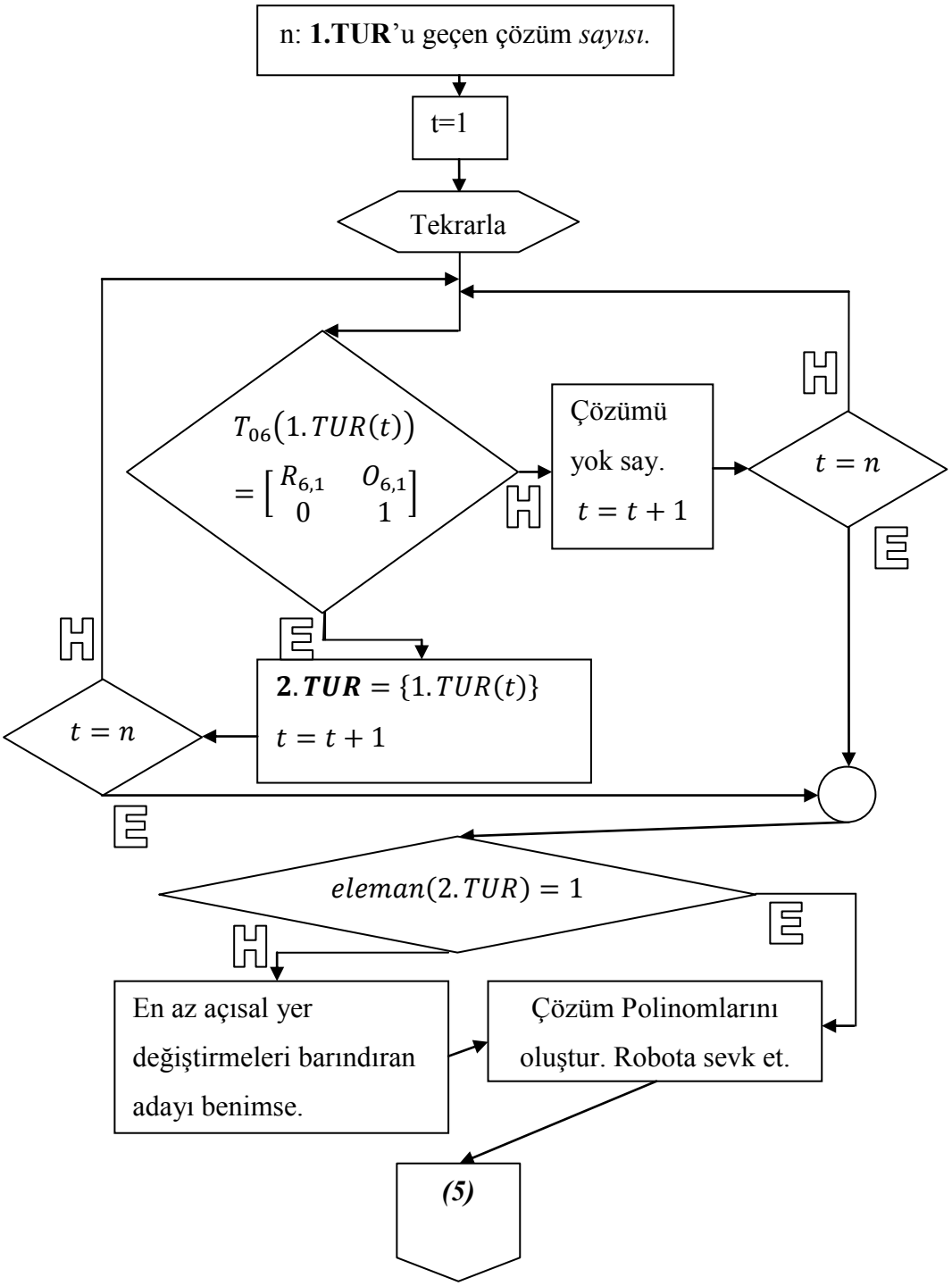
(1) Bulunan her bir çözüm 'hattı' bir konfigürasyon teşkil eder.

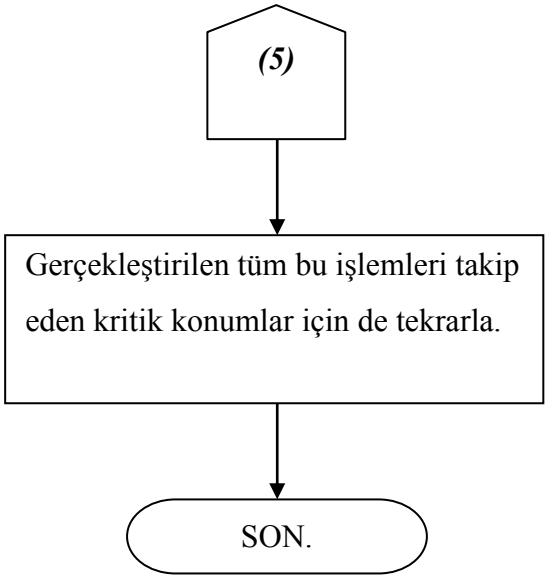

(1)
Hesaplanan bu sonuçları birer dizim haline getir (Konfigürasyon Kümeleri):
$C_1 = \{\theta_{3,1}, \theta_{2,1}, \theta_{5,1}\}$
…
$C_8 = \{\theta_{3,2}, \theta_{2,4}, \theta_{5,8}\}$
3. Mafsal
I=1:2
$\theta_{3,min} < \theta_{3,I} < \theta_{3,max}$
H
E
$\theta_{3,I}$ çözümünü yok say.
$\theta_{3,I}$ çözümünü θ_3 kümesine dahil et:
$\theta_3 = \{\theta_{3,I}\}$
(2)


(2)
2. Mafsal
J=1:4
$\theta_{2,min} < \theta_{2,J} < \theta_{2,max}$
H
E
$\theta_{2,J}$ çözümünü yok say.
$\theta_{2,J}$ çözümünü θ_2 kümesine dahil et: $\theta_2 = \{\theta_{2,J}\}$
5. Mafsal
J=1:4
$\theta_{2,min} < \theta_{2,J} < \theta_{2,max}$
H
E
$\theta_{2,J}$ çözümünü yok say.
$\theta_{2,J}$ çözümünü θ_2 kümesine dahil et: $\theta_2 = \{\theta_{2,J}\}$
(3)


(3) Bu aşamada konfigürasyon (C) kümeleri mafsal sığaları ile karşılaştırılır. İmkansız çözümler elenir.
K=1
Tekrarla
$C_K(1) \in \theta_3$
H
C_K Konfigürasyonunu yok say.
$K := K + 1$
E
$C_K(2) \in \theta_2$
H
C_K Konfigürasyonunu yok say.
$K := K + 1$
E
$C_K(3) \in \theta_5$
H
C_K Konfigürasyonunu yok say.
$K := K + 1$
E
C_K aday çözümdür.
$1.TUR = \{C_k\}$
$K := K + 1$
$K = 8$
H
E
(4)

(4) Bu aşamada ilk elemeyi geçen çözümler ileri kinematikte yazılarak istenen konum ve yönelimi sağlayıp sağlamadıkları kontrol edilir. Burada matematiksel olarak mümkün ancak fiziksel olarak imkânsız sonuçlar elenmiş olur.




(5)
Gerçekleştirilen tüm bu işlemleri takip eden kritik konumlar için de tekrarla.
SON.

3.2.3. Robot Dinamiğinin Tanımlanması

3.2.3.1. Lagrange-Euler denklemi

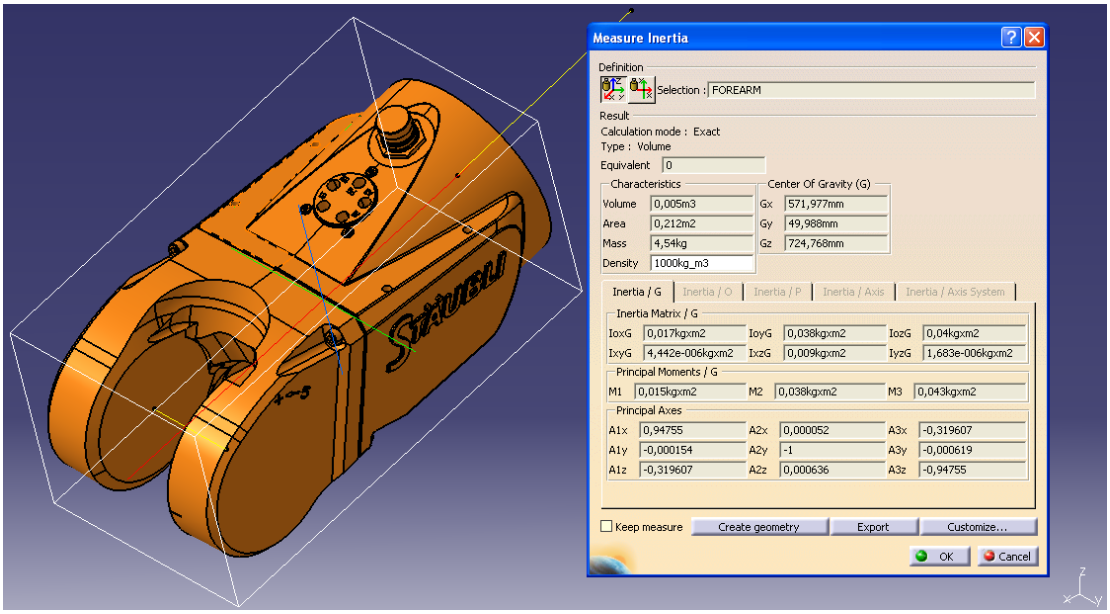
Dinamik denklemlerin çıkarılmasında robotik uygulamalarda yaygın şekilde kullanılan Lagrange-Euler denklemi tercih edilmiştir. Yöntemin pratik uygulamasında Lagrange-Euler denklemi mafsallar üzerinde makine dinamiğinden kaynaklanan yüklerin hesaplanması işlevini yerine getirmektedir. Hareket halindeki mekanizmada mafsallar üzerine etkimekte olan yükleri,

- Uzuv ataletleri,
- Coriolis etki ve merkezkaç kuvvetleri,
- Yerçekimi etkisiyle oluşan ağırlık kuvvetleri ve
- Sürtünme kuvvetleri

oluşturmaktadır. Doğru kurulmuş bir Lagrange-Euler denklem seti ile tüm bu yüklerin etkileri değerlendirilir. Lagrange-Euler denklemi robot dinamiğinin etkisini tork denklemleri halinde ifade edebilmektedir. Bu aşamada belirtilmesi gereken önemli bir husus çalışma kapsamında Lagrange-Euler denkleminin sadece pratik amaçlar ile kullanılıyor olmasıdır. Dolayısıyla teori bilgilendirme amacını taşımakta ve yöntemin üzerinde çalışılan mekatronik sisteme nasıl adapte edildiği detaylı olarak işlenmektedir.

Yaklaşımın dikkat gerektiren kısmını makineyi oluşturan uzuvların sahip olduğu fiziksel niteliklerin (boyutlar, ağırlık, ağırlık merkezi koordinatları ve uzamsal cisimlerde atalet tensörü) hassas biçimde tespit edilmesi oluşturmaktadır. Uzuv fiziksel özellikleri belirlendikten sonra tork denklemlerinin çıkarılışı rutin bir matematiksel uğraş olarak değerlendirilebilir (Bingül 2008).

Uzuvların sahip olduğu fiziksel özelliklerin belirlenmesinde bilgisayar destekli tasarımın gerekliliği bir kez daha anlaşılır. İstenen tüm kabiliyet ve kısıtların sağlanacağı şekilde oluşturularak üretime sunulma aşamasına getirilmiş CAD verileri robota ait tüm fiziksel özellikleri barındırmaktadır. Bu çalışmada kullanılan TX90 eyleyicisine ait Lagrange Euler denkleminde ihtiyaç duyulan tüm özellikler üreticinin sağladığı CAD dosyasından edinilebilmektedir. Şekil 3.26, *Catia* ortamında robotun bir uzvuna ait fiziksel özelliklerin yer aldığı ekranı göstermektedir.



Şekil 3.26: Önkol uzvuna ait fiziksel özellikler (Catia DMU Kinematics Ortamı)

Robot fiziksel özelliklerinin elde edilmesinde bir başka önemli kaynak da MATLAB/Simmechanics ortamıdır. Tipik bir CAD programından farklı olarak Simmechanics ortamı CAD verilerinin kendi üzerine transfer edilmesinin ardından özel matematiksel modellerin kurulmasına gerek kalmadan makine dinamiğinin temsilini gerçekleştirebilir, benzetimler ile modelin geliştirilmesine imkan verir. Simmechanics ortamında robot modellemesi konusu ilerleyen başlıklar altında detaylı biçimde işlenecektir.

Lagrange-Euler denklemi robot kolun kinetik ve potansiyel enerjileri arasındaki farkı temsil eder:

$$L(\theta,\dot{\theta}) = K(\theta,\dot{\theta}) - P(\theta) \tag{3.34}$$

Altı döner mafsallı (RRRRRR) antropomorfik robot kol için Lagrange-Euler denklem değişkeni açısal konum θ'dır.

Kinetik enerji ifadesi fonksiyonun en karmaşık terimidir:

$$K(\theta,\dot{\theta}) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}[(v_i)^T m_i v_i + (\omega_i)^T I_i \omega_i] \tag{3.35}$$

Burada,

m_i : i. bağın kütlesi

v_i : i. uzvun ana kütle merkezinin ana koordinat sistemine göre doğrusal hızı

ω_i : i. uzvun ana kütle merkezinin ana koordinat sistemine göre açısal hızı

I_i : i. uzvun ana kütle merkezinin ana koordinat sistemine göre atalet tensörü.

Uzuv atalet tensörlerinin hesaplanmasını açıklayarak başlayalım. Atalet tensör matrisi en genel haliyle aşağıdaki gibi verilir:

$$I_m = \begin{bmatrix} \int_v (y^2+z^2)\rho dv & -\int_v xy\rho dv & -\int_v xz\rho dv \\ -\int_v xy\rho dv & \int_v (x^2+z^2)\rho dv & -\int_v yz\rho dv \\ -\int_v xz\rho dv & -\int_v yz\rho dv & \int_v (x^2+y^2)\rho dv \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Bir kolaylık olarak, referans koordinat sistemi kütle merkezi ile çakışacak şekilde seçilirse tensör matrisi şu formu alır:

$$I_m = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Düzgün biçimli cisimlerin atalet tensörleri rahatlıkla hesaplanabiliyor olsa da girift şekillere sahip robotik uzuvlarda el ile hesaplama pratik değildir. Ancak CAD/CAM programları ve özellikle Simmechanics gövde blokları bu hesapları otomatik olarak yaparak kullanıcıyı hesaplama külfetinden kurtarır.

Robotun i. uzvunun atalet tensörü I_i, bu uzvun kütle merkezinin robot ana koordinat takımına göre tanımlanması ile bulunur. Burada ileri kinematik analizin araçları olan dönüşüm matrislerine başvurulur:

$${}^0_iT = \begin{bmatrix} {}^0_iR & P_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

4x4 elemanlı olan bu matriste ${}_{i}^{0}R$ yönelim ve P_i konum bilgilerini içerir. Bu iki matrisin kullanılmasıyla i. uzvun ana koordinat takımına göre atalet tensörü I_i kolaylıkla hesaplanır:

$$I_i = {}_{i}^{0}R \; I_m \; ({}_{i}^{0}R)^T \tag{3.39}$$

Bir uzuvda kinetik enerji ifadesinin işletilebilmesi için hesaplanması gereken ikinci öğe Uzuv Jacobiyen matrisidir. Jakobiyen matris uzuvlara ait doğrusal ve açısal hızlarla ilgili bilgileri barındırır ve bu bilgileri işler. i'nci uzva ait Jakobiyen matrisin eldesi için i'nci uzuv *sanki* uç uzuvmuş gibi kabul edilir. Daha sonra bu uzvun kütle merkezinin ana koordinat sistemine göre konumu, h_i vektörünün tanımlanmasıyla elde edilir:

$$h_i = {}_{i}^{0}T \Delta h_i \tag{3.40}$$

Denklemde Δh_i terimi i. mafsala yerleştirilen koordinat sistemine göre i. uzvun kütle merkezi koordinatlarını göstermektedir. Bu bilinenlerle Jakobiyen matris şu şekilde tanımlanır:

$$J_i = \begin{bmatrix} \delta h_1/\delta\theta_1 & \cdots & \delta h_i/\delta\theta_i \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \xi_1 z^1 & \cdots & \xi_i z^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix} \tag{3.41}$$

Burada A_i ve B_i uzvun doğrusal ve açısal hızlardan kaynaklanan Jakobiyen matrisleri sembolize ederken ξ_i mafsal tip değişkenini gösterir. Bu parametre prizmatik mafsallarda 0, döner mafsallarda 1 değerini alır. Son parametre olan z^i i. uzuv koordinat sisteminin üçüncü sütun birim matrisidir ve

$$z^i = {}_{i}^{0}R i^3 \; ; \;\; i^3 = [0 \; 0 \; 1]^T \tag{3.42}$$

şeklinde gösterilir.

Sonraki terimlere geçmeden Jakobiyen matrise ait probleme özel şartlardan bahsedelim. Jakobiyen matrisin ebatları incelenen kinematik zincirin niteliklerine göre değişkenlik gösterir. Öyle ki matrisin sütun sayısı, sistemin serbestlik derecesi kadardır. Satır sayısı

ise sabit olup ilk üç satır doğrusal hızlara, son üç satır ise açısal hızlara ait alt matrisleri oluşturmakta kullanılır.

Böylece bu çalışma için söz konusu olan Bağ Jakobiyen matrislerinin boyutları 6x6 olacaktır. Ancak belirtilmelidir ki Jakobiyen daima bir kare matris olmak zorunda değildir. Robot kolunun kinetik enerjisinin θ ve $\dot{\theta}$ cinsinden ifadesi için şu eşitlikler de tanımlanmalıdır:

$$v_i = A_i\dot{\theta} \tag{3.43}$$

$$\omega_i = B_i\dot{\theta} \tag{3.44}$$

Bu iki ifade i. uzvun kütle merkezinin doğrusal ve açısal hızlarını vermektedir. Bunlar kinetik enerji ifadesinde yerinde yazılacak olursa,

$$K(\theta,\dot{\theta}) = \frac{1}{2}(\dot{\theta})^T \sum_{i=1}^{n} [(A_i)^T m_i A_i + (B_i)^T I_i B_i]\,\dot{\theta} \tag{3.45}$$

elde edilir. Bir kısaltma olarak pozitif tanımlı bir matris olan eyleyici atalet tensörü D(θ) kullanılabilir:

$$K(\theta,\dot{\theta}) = \frac{1}{2}(\dot{\theta})^T D(\theta)\dot{\theta} \tag{3.46}$$

Lagrange-Euler denkleminin tamamlanması için toplam potansiyel enerji teriminin de hesaplanması gerekir. Robot kolunun depoladığı potansiyel enerji yerçekimi ivmesinin etken olduğu ortamda bağ kütle merkezlerinin yer değiştirmesini sağlayan iş miktarı kadardır ve

$$P(\theta) = \sum_{i=1}^{n} m_i\, g^T h_i \tag{3.47}$$

biçimindedir. Burada $g \in R^3$ terimi yer çekimi ivmesini temsil etmektedir. Artık Lagrange-Euler denklemi bütün robot kolu için aşağıdaki biçimde yazılabilir:

$$L(\theta,\dot{\theta}) = \frac{1}{2}(\dot{\theta})^T D(\theta)\dot{\theta} + mg^T h \tag{3.48}$$

3.2.3.2. Dinamik Modelin Elde Edilmesi

Robot kolun hareket denklemi, yukarıdaki ifadeler yardımıyla hesaplanan Lagrange-Euler denkleminin türetilmesiyle elde edilir:

$$\frac{d}{dt}\frac{\delta K}{\delta \dot{\theta}} - \frac{\delta L}{\delta \theta} = \tau \tag{3.49}$$

İfade açık biçimde,

$$\frac{d}{dt}\frac{\delta K}{\delta \dot{\theta}} - \frac{\delta K}{\delta \theta} + \frac{\delta P}{\delta \theta} = \tau \tag{3.50}$$

şeklinde yazılır. Burada τ eyleyicilerde oluşan $nx1$ boyutlu tork vektörüdür. Kinetik ve potansiyel enerjileri ifade eden denklemler yerlerinde yazılır ve sürtünme kayıpları göz önünde bulundurulursa,

$$\sum_{j=1}^{n} D_{ij}(\theta)\ddot{\theta}_j + \sum_{k=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} c_{kj}^{i}(\theta)\dot{\theta}_k\dot{\theta}_j + y_i(\theta) + b_i\left(\dot{\theta}\right) = \tau \tag{3.51}$$

eşitliğine ulaşılır (Asada ve Slotine 1986). Denklemin ilk terimi ivme terimi olarak anılır, robot iç kuvvetleri ve torklardan ileri gelen parametreleri ihtiva eder. İvme terimi veya bileşke kütle matrisinin hesaplanmasında hız Jakobiyen matrislerinden yararlanılmaktadır. Bir i uzvuna ait kütle matrisi veya atalet tensörü şu şekilde hesaplanır:

$$D(\theta_i) = (A_i)^T\, m_i\, A_i + (B_i)^T\, I_i\, B_i \tag{3.52}$$

Burada A_i ile i. uzuv hız matrisinin doğrusal hızlardan kaynaklanan $3xn$ boyutlu üst yarısı; B_i ile de i. uzuv hız matrisinin açısal hızlardan kaynaklanan yine $3xn$ boyutlu alt yarısı sembolize edilir. Bileşke kütle matrisi mafsal kütle matrislerinin toplamından ibaret olmaktadır.

İkinci terim Coriolis ve merkezkaç kuvvet vektörüdür. Coriolis etkisi sabit bir koordinat ekseni etrafında dönme hareketi yapmakta olan cisme etkiyen saptırma kuvveti olarak

tanımlanır. Buna göre saat ibreleri yönündeki bir dönüşte cisim üzerine sola doğru ve Coriolis faktörü dolayında bir saptırma kuvveti etkir.

Oldukça karmaşık bir yapı sergileyen Coriolis-Merkezkaç Kuvvet vektörünün hazırlanması için öncelikle mafsal hız bağlaşım matrisleri hesaplanmalıdır. Bu matrislerin elde edilmesinde Denklem (3.58)'deki formül kullanılır.

$$c_{kj}^{i}(\theta) = \frac{\delta}{\delta\theta_k} D_{ij}(\theta) - \frac{1}{2}\frac{\delta}{\delta\theta_i} D_{kj}(\theta) \quad 1 \leq i,j,k \leq n \tag{3.53}$$

Matrislerin hesaplanmasında kullanılan sayaçların işletilmesi dikkat gerektiren bir hususdur. Burada en iç döngü k sayacı, bir üst seviyedeki döngü j sayacı ve en üst döngü i sayacı ile temsil edilir. Tüm sayaçların üst sınırları mekanizma serbestlik deresine eşittir. Hız bağlaşım matrislerinin boyutu bileşke kütle matrisi ile belirlenir. Çalışmada kullanılan altı serbestlik derecesine sahip robot için hız bağlaşım matris boyutunun 6x6 olacağı $D(\theta)$ matrisleri incelendiğinde görülebilir. Üçüncü terim yerçekimi ivmesinin etkisini denkleme taşır.

$$y_i(\theta) = -\sum_{k=1}^{3}\sum_{j=1}^{n} g_k m_j A_{ki}^{j}(\theta) \tag{3.54}$$

Lagrange-Euler denkleminde yerçekimi ivmesi dolayısıyla ağırlık kuvveti ilk mafsalda hangi yönde etkili ise takip eden mafsallarda da aynı yönde etkili olmak durumundadır. Bu durum yerçekimi vektörünün hesaplanmasında dikkat gerektiren bir kuraldır. Sözgelimi yerçekimi ivmesi ilk koordinat çerçevesinde z- eksenine zıt yönde etkiyorsa takip eden tüm mafsallarda aynı yöndeki bileşenler hesaplanır. İfadelerde yer alan $A_{ki}^{j}(\theta)$ terimlerinin hız Jakobiyen matrislerinin doğrusal hızları temsil eden kısımları olduğunun belirtilmesinde fayda vardır.

TX 90 robotunun mevcut yapılanmasında ilk mafsaldaki yerçekimi vektörünün yönü yukarıda anlatıldığı gibidir. Bu durumda mafsallarda oluşan yerçekimi vektör bileşenlerini hesaplayalım ($i,j = 1..6$).

$$z_1 = -g(m_1 A_{31}^{1} + m_2 A_{31}^{2} + m_3 A_{31}^{3} + m_4 A_{31}^{4} + m_5 A_{31}^{5} + m_6 A_{31}^{6}) \tag{3.55}$$

$$z_2 = -g(m_2 A_{31}^2 + m_3 A_{31}^3 + m_4 A_{31}^4 + m_5 A_{31}^5 + m_6 A_{31}^6) \quad (3.56)$$

$$z_3 = -g(m_3 A_{31}^3 + m_4 A_{31}^4 + m_5 A_{31}^5 + m_6 A_{31}^6) \quad (3.57)$$

$$z_4 = -g(m_4 A_{31}^4 + m_5 A_{31}^5 + m_6 A_{31}^6) \quad (3.58)$$

$$z_5 = -g(m_5 A_{31}^5 + m_6 A_{31}^6) \quad (3.59)$$

$$z_6 = -g m_6 A_{31}^6 \quad (3.60)$$

Beklenildiği üzere omuz eyleyicisinden uç eyleyiciye doğru gidildikçe her mafsala etkiyen toplam ağırlık kuvveti azalmaktadır. Her mafsal kendisini takip eden yüklerden sorumludur. Her mafsal üzerine etkiyen yerçekimi yüklerinin hesaplanmasının ardından bu ifadeler ile $G(\theta)$ vektörü oluşturulur.

Hareket denkleminin son terimi robotun belirli bir andaki hareketine ters yönde etki eden sürtünme kuvvetlerinden ileri gelir. Basitleştirme amacıyla bu faktörün ihmal edilmesi halinde hareket denklemini şöyle özetlenebilir:

$$D(\theta)\ddot{\theta} + C\left(\theta, \dot{\theta}\right)\dot{\theta}^2 + G(\theta) = \tau_i \quad (3.61)$$

İfadeden görüldüğü üzere Lagrange-Euler denklemi robot dinamiğini çözümlerken bu dinamik karakteristiklere sahip uzuvların sürülmesinde kullanılacak tork değerlerini çıktı olarak programcıya sunmaktadır.

Dinamik bir sistemde Lagrange-Euler denkleminin uygulama aşaması karışık olsa da doğru adımların belirlenmesi ve bunlara bağlı kalınması ile hata yapma olasılığı ortadan kaldırılabilir. Burada yöntemin pratik uygulama adımları ile ilgili bir fikir vermek faydalı olacaktır.

1. Uzuv dönüşüm matrisleri hesaplanır: $T_1 .. T_6$
2. Uzuv açısal dönüşüm matrisleri hesaplanır: $R_1 .. R_6$
3. Uzuv atalet tensörleri hesaplanır: $I_{m,1} .. I_{m,6}$
4. Uzuv atalet tensörleri mafsal koordinat takımlarına göre ifade edilir:

$$I_i = {}_i^0 R \; I_{m,i} \; ({}_i^0 R)^T$$

5. Uzuv ağırlık merkez koordinatları mafsal koordinat takımlarına göre ifade edilir: $\Delta h_1 .. \Delta h_6$
6. Hız Jakobiyen matrislerinin oluşturulmasında kullanılan vektörler hesaplanır:

$$h_i = {}^0_i T \, \Delta h_i$$

$$z_i = {}^0_i R \, [0 \; 0 \; 1]^T$$

7. Hız Jakobiyen matrisleri oluşturulur. Bir Jakobiyen matrisin ilk üç satırı uzvun doğrusal hız bileşenlerini, ikinci üç satırı ise açısal hız bileşenlerini temsil eden alt matrislerdir $(3xn)$: $A_1 .. A_6 \; ve \; B_1 .. B_6$
8. Uzuv atalet tensörleri ve kütlelerini barındıran kütle matrisleri oluşturulur:

$$D(\theta_i) = (A_i)^T \, m_i \, A_i + (B_i)^T \, I_i \, B_i$$

9. Hız bağlaşım matrisleri bileşke kütle matrisi kullanılarak hesaplanır: $C_1 .. C_6$
10. Coriolis-Merkezkaç kuvvet vektörü denklik matrisinin yardımıyla hesaplanır:
11. Yerçekimi ivmesi etkisiyle oluşan yükler hesaplanır: $z_1 .. z_6$
12. Bilinen değerler ile tork denklemleri hesaplanır.

Altı serbestlik dereceli TX90 antropomorfik robotunun dinamiğini tanımlayan denklemler gerek sembolik gerekse sayısal değerleriyle çok uzun ve karmaşık yapıdadırlar. Bu durum ve model üzerinde çoğunlukla Simmechanics bloklarının kullanılmış olması sebebiyle tez içerisinde tork denklemlerinin tamamı verilmemektedir. Ancak bir fikir vermesi amacıyla robotun kol mafsalına ait tork denklemini oluşturan bileşenler ***EK-4***'de okuyucuya sunulmuştur.

Robotun kol mafsalına indirgenmiş haline ait Simulink ve Simmechanics modelleri ile Simulink ortamında gerçekleştirilen doğrusallaştırma esaslı denetleyici optimizasyonları takip eden başlık altında detaylı biçimde aktarılmıştır.

3.2.4. İnsansı kol yapılı robotta bağımsız mafsal denetimi

Bağımsız mafsal denetim yöntemi insansı kol yapılı robotların denetimi üzerine yapılan çalışmalarda önemli bir yere sahiptir. Yaklaşımda sadece modellenmekte olan mafsalın hareketli, diğer tüm mafsalların sabit durumda oldukları kabulü yapılır (Spong 2006). Genellikle mafsalı istenen konuma yönlendirmek amacıyla elektrik motorları, hidrolik veya pnömatik motorlar tek başlarına veya ortaklaşa kullanılabilmektedir. Motorlar doğrudan mafsallar ile bağlantılı olabileceği gibi dişli kutusu veya zincir gibi ilave unsurlara başvurulabilmektedir. İstenen mafsal konumları yörünge planlama algoritması ile elde edilir. Mafsalın belirli bir andaki konumu potansiyometre veya optik enkoder gibi bir algılayıcı tarafından belirlenmektedir.

Bu bölümde her mafsalın ve bunlara ait yörünge denetim yaklaşımlarının modellenmesi ve aktarılması yerine sadece kol mafsalının detaylı analizine yer verilmektedir. Önemli bir varsayım robotun kol mafsalını takip eden tüm uzuvların birbirine rijit bir biçimde bağlanmış olduğudur. Böylece bir antropomorfik kol yapılı robotun taşıdığı yük ve hareket özellikleri yönünden tasarımı en dikkat gerektiren mafsalı olan kol mafsalı aşamalı bir şekilde modellenmiştir. Robot mekaniğinin her aşamasında etkili olduğu tasarımın aşamaları şu şekildedir:

- Kol mafsalına indirgenmiş Simulink robot modeli için denetim tasarımı ve optimizasyonu,
- Simulink/Simmechanics ortamında modellenmiş robot için denetim tasarımı ve optimizasyonu,
- Robot konum denetim sisteminde mafsal yörünge takibinin değerlendirilmesi.

3.2.4.1. Kol mafsalına indirgenmiş robot dinamiğine ait matematiksel model

Endüstriyel robotların dinamik davranışını ifade eden denklemler trigonometrik fonksiyonlar, bunların kuvvetleri ve birbirleriyle çarpımlarını içerir. Dinamik yapılar bu sebeple doğrusal olmayan denklemlerden oluşmaktadır. Simmechanics ortamında makine dinamiğinin ifade edilmesi işlemi gövde bloklarının düzenlenmesinin ardından kullanıcı tarafından tanımlanan özellik ve toleranslar çerçevesinde zahmetsizce gerçekleştiriliyor olsa da aynı işlemin Simulink ortamında yapılmasında geliştiriciye

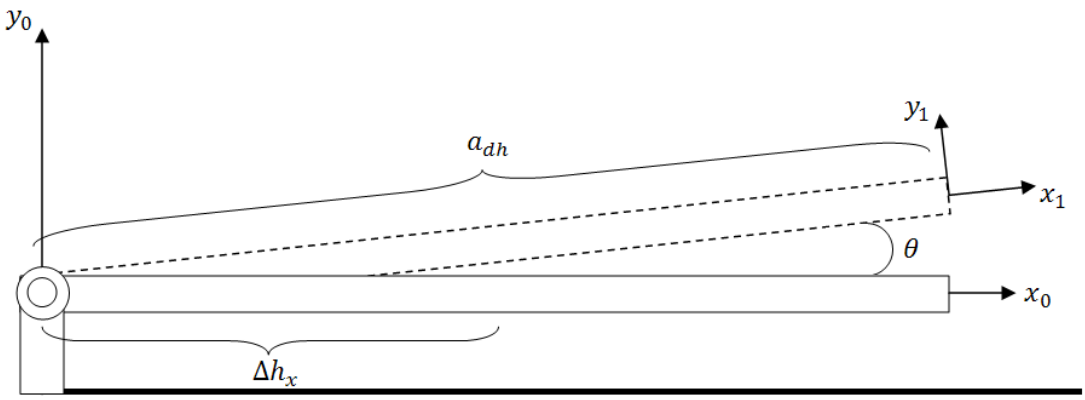
düşen görev daha büyüktür: Simulink ortamındaki çalışmada dinamik modelin tamamen kullanıcı tarafından oluşturulması gerekir.

Bu aşamada robotun tek serbestlik dereceli olduğu kabulü yapılmaktadır. Bu kabul çerçevesinde kol mafsalını takip eden uzuvların bir bütün halinde ve robot erişimine eşit uzunluklu bir çubuk biçiminde olduğu düşünülür. Robotun tam olarak modellenmesi durumunda kol mafsalına indirgenmiş robot dinamik denklemleri ***EK-4*** içerisinde sunulmaktadır.

Robot, kol mafsalından itibaren tüm uzuvların yere paralel oldukları dinlenme konumundan başlamak üzere kol mafsalının hareketiyle $1°$ $(0{,}0175\,rad)$ açısal yer değiştirme gerçekleştirir.

Kol mafsalına indirgenmiş robot dinamiğinin tanımlanması için bu duruma özel bazı parametrelerin belirlenmesi gerekir. Bunlar uzva ait dönüşüm matrisi, kütle merkezinde tanımlı atalet tensörü ve mafsal koordinat takımına göre kütle merkezi koordinat vektörüdür. Bu ifadelerin hesaplanma yöntemleri önceki bölümlerde detaylı biçimde işlenmiştir. İfadeler Şekil 3.27 yardımıyla hesaplanabilir:

$$T_{01} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & a_{dh}cos(\theta) \\ sin(\theta) & cos(\theta) & 0 & a_{dh}sin(\theta) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.62}$$



Şekil 3.27: Kol mafsalına indirgenmiş modelin yere paralel konumu

$$I_m = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \tag{3.63}$$

$$\Delta h_1 = \begin{bmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.64}$$

Bu bilinenler doğrultusunda kol mafsalına indirgenmiş robot dinamiğini tanımlayan ifade Denklem 3.65'de olduğu gibidir.

$$\begin{aligned} \tau = {} & (m\boldsymbol{P_2}(\boldsymbol{\theta})^2 + m\boldsymbol{P_1}(\boldsymbol{\theta})^2 + \boldsymbol{I_{zz}})\ddot{\theta} \\ & + \left(m\boldsymbol{P_2}(\boldsymbol{\theta})\left(-\cos(\theta)\Delta h_x + \sin(\theta)\,\Delta h_y - \operatorname{acos}(\theta)\right) + m\boldsymbol{P_1}(\boldsymbol{\theta})\boldsymbol{P_2}(\boldsymbol{\theta})\right)\dot{\theta}^2 \\ & - gm\boldsymbol{P_1}(\boldsymbol{\theta}) \end{aligned} \tag{3.65}$$

Burada kullanılan,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{P_1}(\boldsymbol{\theta}) &= \cos(\theta)\,\Delta h_x - \sin(\theta)\,\Delta h_y + \operatorname{acos}(\theta) \\ \boldsymbol{P_2}(\boldsymbol{\theta}) &= -\sin(\theta)\,\Delta h_x - \cos(\theta)\,\Delta h_y - \operatorname{asin}(\theta) \end{aligned} \tag{3.66}$$

kısaltmaları denklemlerin çıkartıldığı MATLAB paket programı içerisinde kullanıcıya sunulan *Symbolic Math Toolbox* tarafından otomatik olarak atanmıştır (http://www.mathworks.com/help/toolbox/symbolic/ 2011).

Dikkat edilecek olursa yerçekimi kuvvetlerinin sistem üzerinde etkili olduğu anlaşılabilir. Bunun sebebi kol uzvuna ait doğrusal hızlardan kaynaklanan y- ekseni yönündeki $Jacobien$ matris bileşeni A_{21}^1 teriminin sıfırdan farklı olmasıdır.

Açısal ivme $(\ddot{\theta})$ ile çarpılan terim robotun kol mafsalına indirgenmiş atalet momentini temsil etmektedir:

$$J_{kol} = (m\boldsymbol{P_2}(\boldsymbol{\theta})^2 + m\boldsymbol{P_1}(\boldsymbol{\theta})^2 + I_{zz}) \tag{3.67}$$

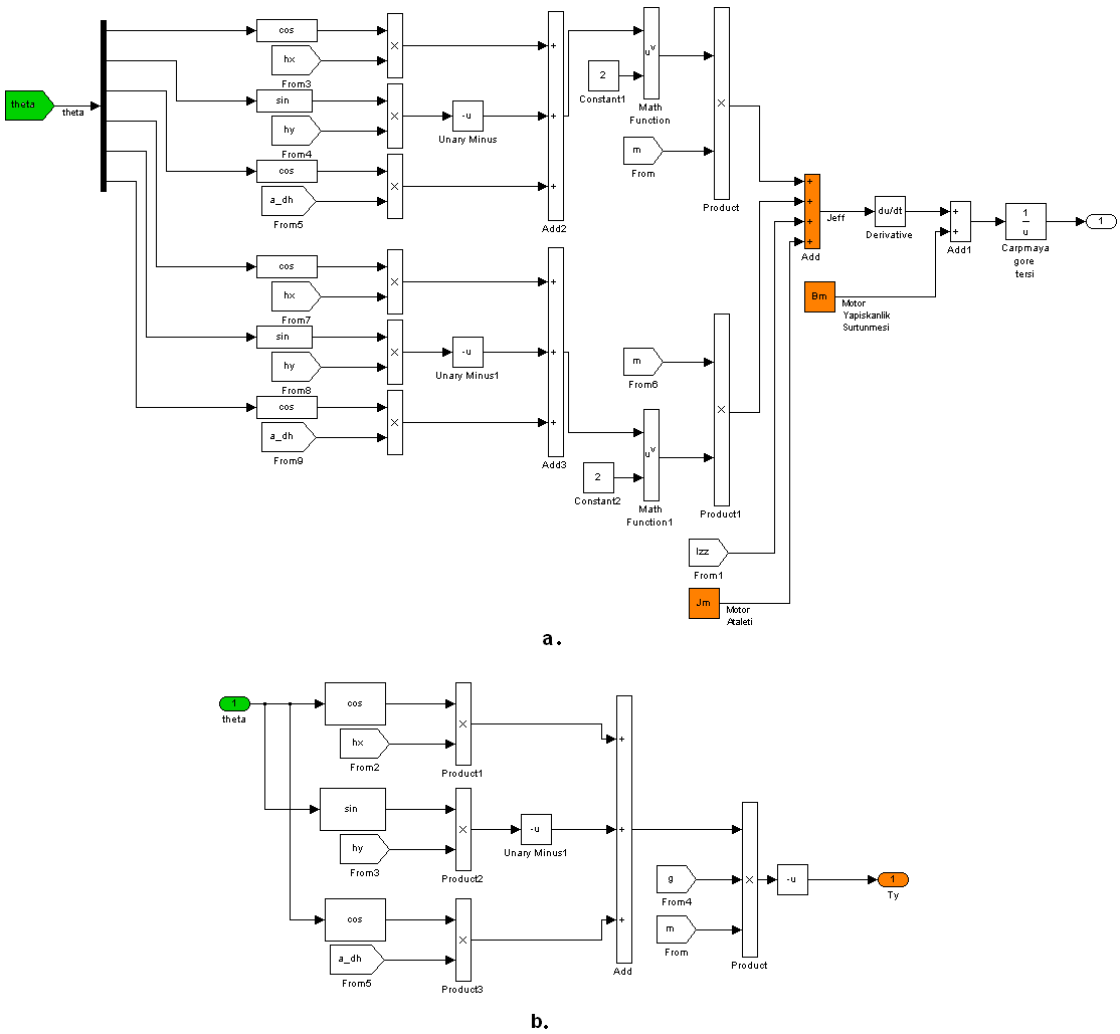
Böylece kol mafsalına hareket kazandıran motorun miline indirgenmiş bileşke atalet momenti için,

$$J_{eff} = J_{motor} + J_{kol} \tag{3.68}$$

denklemi yazılabilir. Öte yandan robot mafsalında harekete ters yönde etkiyen yapışkanlık sürtünmesi mevcuttur. Robot mafsalına etkiyen tek sürtünme etkisinin bundan ibaret olduğu farz edilmektedir. Böylece etken yapışkanlık sürtünmesi,

$$B_{eff} = B_{motor} \tag{3.69}$$

olarak tanımlanır. Kol mafsalına indirgenmiş robot dinamiği MATLAB/Simulink ortamında tanımlanabildiği gibi Simmechanics ortamının sunduğu bloklar yardımıyla bir CAD dosyası üzerinden de tanımlanabilir. Bu aşamada kol mafsalına indirgenmiş robot matematiksel modeli Simulink ortamında oluşturulmuştur (Şekil 3.28).



Şekil 3.28: Bileşke atalet momenti (a) ve yerçekimi etkisi (b)

Denklem 3.65 mafsal üzerine etkiyen tork bileşenlerinin mafsal bağımsız değişkeni θ'nın fonksiyonları olduğunu göstermektedir. Bu sebeple robot dinamiğine ait Simulink modeli cebrik (algebraic) bir döngü içerir.

Cebrik döngülerde değişkenin belirli bir andaki değerinin hesaplanması için değişkenin kendisi gereklidir. Bu sebeple iteratif çözüm yöntemleri kullanılır. İterasyon döngüleri Simulink çözüm algoritmasının (*Simulink Solver Algorithm*) çok yavaş ilerlemesine, bazı durumlarda ıraksama olgusu sebebiyle hata vermesine sebep olur.

Mevcut problemde cebrik döngü olgusuna rağmen çözüm sürdürülmektedir. Bu sebeple birtakım kabuller yapılmıştır. θ parametresinin radyan cinsinden işletilmesi halinde 10°'den küçük açısal yer değiştirmeler için iki temel trigonometrik fonksiyonda $\sin\theta \cong \theta \; ve \; \cos\theta \cong 1$ kabullerinin yapılması yaygındır (Toprak 1998, Söylemez 2000). Bu kabulün uygulanmasıyla model içerisinde yer alan bu iki fonksiyonun hesaplatılması zorunluluğu ortadan kaldırılır. Böylece algoritma hızlandırılır ve yakınsama ihtimali artırılır.

3.2.4.2. Kalıcı mıknatıs senkron motorun matematiksel modeli

Bu çalışmada robot mafsalları kalıcı mıknatıs senkron motorlar (PMSM) ile hareketlendirilmiştir. Senkron motorlar günümüzde yüksek dinamik gereksinimleri bulunan sistemlerde sıkça karşılaşılan motor türleridir. Senkron motorlar özellikle plastik ve metal işleme, paketleme-istifleme, gıda ve atık değerlendirme üzerine gerçekleştirilen robotik uygulamalarda tercih edilmektedirler. PM senkron motorlar uygun elektronik bileşenler ile denetlenebilmektedir. Bu sebeple servo sürücüler eyleyicilerle tümleşik halde bulunmak ve mükemmele yakın eşzamanlılık sunmak durumundadırlar.

PMSM kuramı belirli kabuller doğrultusunda aktarılmaktadır. Yapılan kabuller şu şekilde sıralanabilir (Arroyo 2006):

- Stator sarımı düzgün dağılımlı bir sinüzoidal elektromotor kuvvet üretir. Hava boşluğunda oluşan salınım ihmal edilmektedir.
- Hava boşluk direnci sinüzoidal bileşen yanı sıra sabit bir bileşene de sahiptir.
- Motor zıt EMK'sı sinüzoidal yapıdadır.
- Eddy akımı ve hysteresis kayıpları ihmal edilecek düzeydedir.

Üç fazlı modelin dq eşdeğerine ait gerilim değerleri şu şekildedir:

$$V_q = R_s i_q + \omega_r \lambda_d + \rho \lambda_q \tag{3.70}$$

$$V_d = R_s i_d - \omega_r \lambda_q + \rho \lambda_d \tag{3.71}$$

Manyetik akı bağıntıları için,

$$\lambda_q = L_q i_q \tag{3.72}$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_f \tag{3.73}$$

yazılabilir. Denklem 3.77 ve 3.78 yukarıdaki 3.75 ve 3.76 ifadelerinde yerlerinde yazılırsa,

$$V_q = R_s i_q + \omega_r \left(L_d i_d + \lambda_f\right) + \rho\left(L_q i_q\right) \tag{3.74}$$

$$V_d = R_s i_d - \omega_r L_q i_q + \rho\left(L_d i_d + \lambda_f\right) \tag{3.75}$$

denklemlerine ulaşılır. Bu iki ifade matris formunda düzenlenebilir:

$$\begin{pmatrix} V_q \\ V_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + \rho L_q & \omega_r L_d \\ -\omega_r L_q & R_s + \rho L_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_q \\ i_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_r \lambda_f \\ \rho \lambda_f \end{pmatrix} \tag{3.76}$$

Elektriksel motor torku T_e şu eşitlikle ifade edilmektedir:

$$T_e = \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)\left(\lambda_d i_q - \lambda_q i_d\right) \tag{3.77}$$

T_e torku dişli takımının bulunmadığı ve mil esnekliğinin ihmal edildiği bir motorda motorun kendi ataleti ve yapışkanlık sürtünmesi ile üzerine etkiyen yükün hareketlendirilmesine harcanır. Bu durumu ifade eden dinamik denklem,

$$T_e = T_L + B\omega_m + J\frac{d\omega_m}{dt} \tag{3.78}$$

biçimindedir. Burada ω_m rotor mekanik hızını temsil eder. Rotor elektriksel hızı ω_r ile rotor mekanik hızı ve motor kutup sayısı arasında,

$$\omega_m = \omega_r\left(\frac{2}{P}\right) \tag{3.79}$$

bağıntısı mevcuttur.

Dinamik dq modellemesi motorun geçici ve kalıcı durum halinde incelenmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum üç fazlı gerilim ve akımların dqo değişkenlerine dönüştürülmesi ile sağlanabilmektedir. Faz gerilim değişkenleri V_a, V_b, V_c'nin V_d, V_q, V_o rotor referans değişkenlerine çevrilmesi işlemi Park dönüşümü olarak adlandırılır. Park dönüşüm fonksiyonları,

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \\ V_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - 120) & \cos(\theta_r + 120) \\ \sin(\theta_r) & \sin(\theta_r - 120) & \sin(\theta_r + 120) \\ 0{,}5 & 0{,}5 & 0{,}5 \end{bmatrix} \tag{3.80}$$

olarak biçimlenirken $V_{dqo} \rightarrow V_{abc}$ ters dönüşümünde,

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \sin(\theta_r) & 1 \\ \cos(\theta_r - 120) & \sin(\theta_r - 120) & 1 \\ \cos(\theta_r + 120) & \sin(\theta_r + 120) & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \\ V_o \end{bmatrix} \tag{3.81}$$

ifadelerinden yararlanılır.

Park dönüşümü ile oluşturulan motor eşdeğerleri modelleme ve benzetim çalışmalarında kullanılır. dqo matematiksel modeline ait stator gerilim denklemleri ile motor eşdeğer modeli sentezlenebilir. Rotor d-ekseni üzerinde kalıcı mıknatıstan kaynaklanan manyetik akı ile akım kaynağı arasındaki bağıntının zamanla değişmediği kabul edilecek olursa bu iki nicelik arasında,

$$\lambda_f = L_{dm} i_f \tag{3.82}$$

bağıntısının varlığından bahsedilebilir. Böylece üç fazlı PMSM motor elektriksel kısmına ait devre Şekil 3.29'deki gibi olmaktadır.

3.2.4.3. Senkron motorun denetimi: Akım ve hız denetim döngüleri

Senkron motorların denetimi alan yönelimli denetim veya vektör denetim olarak bilinen yöntem ile gerçekleştirilir. Vektör denetim motor statorunun tahrik edilmesiyle doğan akım ve manyetik akı kanallarının birbirinden ayrı olarak incelenmesi fırsatı tanır. PMSM motora ait vektör denetim altyapısı motorun dinamik modelinden yararlanılarak oluşturulur. Motoru besleyen akımların girişler olarak kabul edilmesiyle bu akımlar,

$$i_a = I_m \cos(\omega_r t + \alpha) \tag{3.83}$$

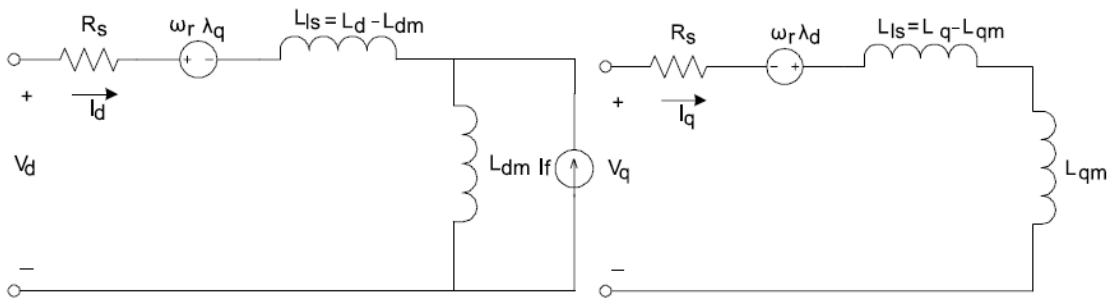
$$i_b = I_m \cos\left(\omega_r t + \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \tag{3.84}$$

$$i_c = I_m \cos\left(\omega_r t + \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \tag{3.85}$$

olarak veya matris biçiminde,

$$\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_r t + \alpha) \\ \cos\left(\omega_r t + \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\omega_r t + \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} (I_m) \tag{3.86}$$

şeklinde elde edilir. Burada α rotor d-ekseni ile stator akım fazı arasındaki açıyı θ_r ise rotor konumunu sembolize etmektedir (Şekil 3.30).



Şekil 3.29: Park dönüşümüne göre PMSM eşdeğer devresi

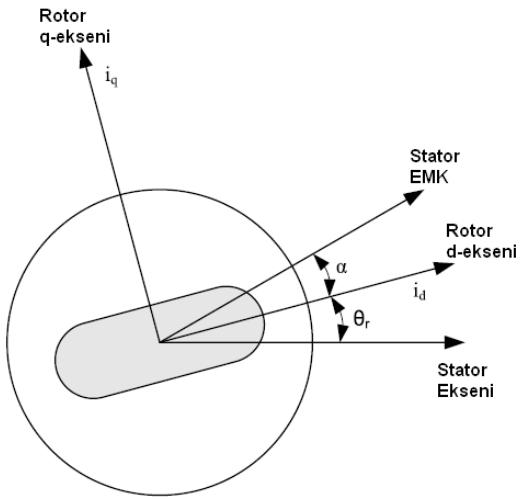
Denklem 3.88 – 3.90'da elde edilmiş olan akım ifadeleri stator akımları olup eşdeğer modelleme için Park dönüşümünün kullanılmasıyla referans çerçeveye adapte edilmeleri gereklidir. Burada açısal hız yine ω_r olmaktadır. α belirli bir yükün etkisi altında iken sabit kalan bir değer olduğu için q- ve d-eksen akımları rotor referans çerçevesine göre sabit kalır. Bu sebeple Park dönüşümüne uğratılan PMSM alan ve armatür sargıları ayrı tahrik edilen DC motorlar ile benzeşim gösterir. q- eksen akımı DC makinenin armatür akımına tam anlamıyla benzerlik gösterirken d-eksen akımı da alan sargısı akımını kısmen karşılamaktadır. Bir parçası alan sargısı akımını ifade ederken bir kısmı da rotor üzerindeki kalıcı mıknatıs alanını temsil eden eşdeğer akım kaynağı olarak değerlendirilir. Bu sebeple q-eksen akımı stator akımının 'tork üreten bileşeni' ve d-eksen akımı stator akımının 'akı üreten bileşeni' olarak anılır.

i_d, i_q akımları I_m cinsinden ifade edilecek olursa,

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_d \end{pmatrix} = I_m \begin{pmatrix} sin\alpha \\ cos\alpha \end{pmatrix} \tag{3.87}$$

eşitliği yazılır. Elektromanyetik tork T_e , Denklem 3.75, 3.76, 3.82 ve 3.87 kullanılarak bulunur:

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2}\left[\frac{1}{2}\left(L_d - L_q\right)I_m^2 sin2\alpha + \lambda_f I_m sin\alpha\right] \tag{3.88}$$



Şekil 3.30: PMSM stator ve rotor eksenleri

DC motor denetimi uygulamalarında olduğu gibi motorun çalışması sırasında sürekli olası en yüksek torkun etkin olması istendiğinde elektromanyetik tork ifadesi bu yönde düzenlenebilir. Bu işlem tork üreten akım i_q'nun bir kazanç katsayısı kullanılarak kaynak akımı I_m'ye eşitlenmesiyle sağlanır. Burada k_t $[Nm/A]$ motor tork sabiti ismini alır:

$$T_e = k_t i_q \tag{3.89}$$

DC motorlarda olduğu gibi motor torku, motor akımına bağlıdır.

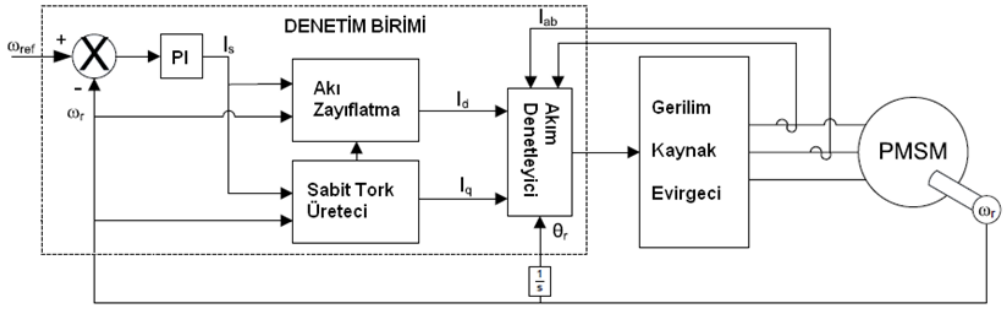
Akı zayıflatma tekniği d-eksenindeki akıyı azaltarak motorun hız sınırlarını artırma amacını taşıyan bir yöntemdir. Motor sürücüsü indüklenen EMK ile stator frekansı arasındaki oranın (V/f) sabit kaldığı hızlarda çalıştırılır. Baz frekansın geçilmesinin ardından V/f oranı evirgeç DC gerilim kaynağının sınırlı bir değere sahip olması sebebiyle azalma gösterir. Akının zayıflatılması baz frekansının düşürülmesinde kritik önem taşımaktadır. Bu işlem akı ile orantılı olan torkun azalmasına dolayısıyla motorun yeniden sabit güç bölgesine geri dönmesini sağlar.

Rotor üzerinde indüklenen akı kalıcı mıknatıs tarafından üretilir ve indüksiyon motorları gibi bazı motor tiplerinde olduğu gibi bu akı doğrudan azaltılamaz. PMSM motorlarda akı zayıflatma işlemindeki prensip negatif işaretli eksen doğru akımının yükseltilerek armatür manyetik akısında azalma sağlamaktır.

Yöntemin uygulama aşamasında stator EMK ile rotor d-ekseni arasındaki açı değiştirilir. α açısı akı zayıflatma bölgesinde $(\omega_r < \omega_m)$ stator akımının belirli bir değeri için i_d ve i_q akımlarının etkili şekilde denetlenmesi ile değiştirilir. i_q azaldığı için çıkış torku da azalır. Burada α için şu ifade geçerlidir,

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{i_q}{i_d}\right) \tag{3.90}$$

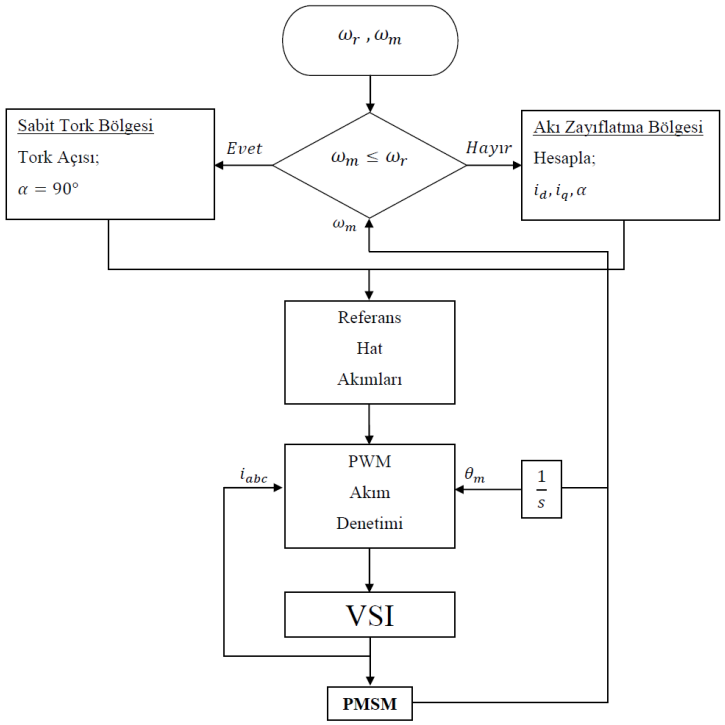
PM senkron motorda akım denetimi iç denetim döngüsünü oluştururken ikinci denetim döngüsünü hız denetimi oluşturur. Robotik uygulamalarda hız ve konumun hassas denetimi önemli bir tasarım kıstasıdır. Hız denetimi arzu edilen motor hızının rahatlıkla atanması ve denetlenmesine olanak verir. Hız denetim döngüsü hız geri beslemesi, bir evirgeç (VSI) ve denetleyici algoritması içerir. Denetimde işleyen mekanizma talep edilen hıza ait sinyal doğrultusunda motoru sürmektir.



Şekil 3.31: Kalıcı mıknatıs senkron motorda denetim döngüleri

Kapalı döngü hız denetim sistemleri yüksek dinamik davranış özellikleri sunmakla birlikte hızın geri beslenmesi ilave ve özel donanımları gerektirdiği için yüksek fiyatlara sahiptirler. Hız ve akım denetim birimlerinin yer aldığı PMSM denetim şeması Şekil 3.31'de sunulmuştur.

Denetleyici motor fiziksel kısıtlarına uyacak denetim etkileri üretmelidir. Motor ayarlı hıza (ω_r) kadar olan hızlarda sürekli tork bölgesinde çalıştırılırken bu hızın aşıldığı anlarda akı zayıflatma işlemi devreye girer. Motor akı kısıtlama bölgesinde çalıştığı sırada d-eksen akısı dolayısıyla üretilen tork değerleri azalır. Denetim döngüleri Şekil 3.32'de olduğu gibi akış şeması halinde verilebilir.

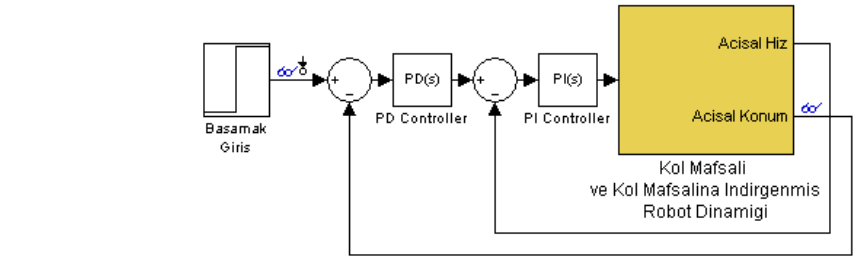


Şekil 3.32: PMSM hız denetiminde akı zayıflatma prensibine ait blok şema (Arroyo 2006)

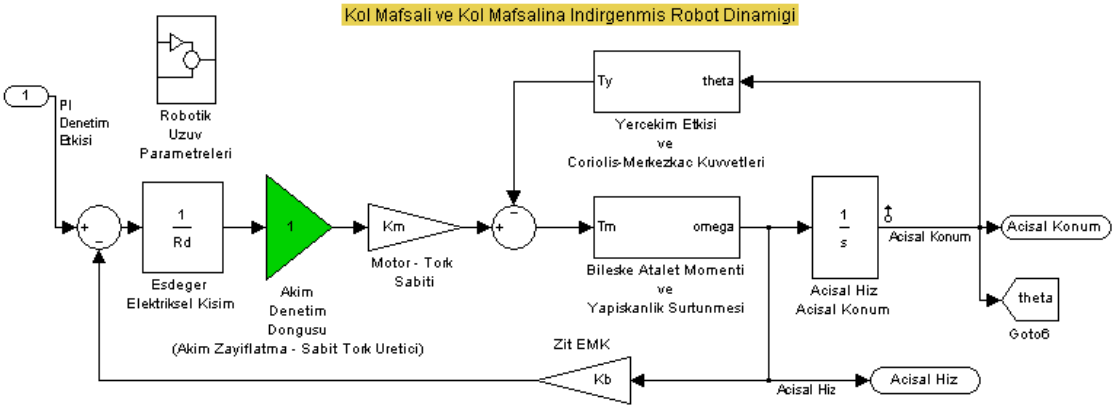
3.2.4.4. Kol mafsalına indirgenmiş robot Simulink modeli

Robot mafsallarında hız denetimi için çoğunlukla PI tipi denetim etkisi kullanılmaktadır. Verimli bir denetim sisteminde akım döngüsünün hız döngüsünden en az on misli çabuk olması arzu edilir. Eğer PMSM akım ve hız denetim döngülerinin cevap hızları arasında bu oran sağlanacak olursa, motor elektriksel kısmının basit bir LR devresine indirgenerek modellenmesi mümkün hale gelir.

Sistemde akım denetimi referans akım değerleri ile üretilen akım değerleri arasında gerçekleştirilir. Akım denetiminin rotor hız denetimine kıyasla çok çabuk olması sebebiyle akım denetim döngüsü üst denetim sürecini temsil eden hız denetim döngüsünde birim kazanç katsayısı olarak düşünülebilmektedir. Bu varsayımın ardından açısal konum ve hızın denetlendiği sistem Şekil 3.33'deki hali alır.



(a)



(b)

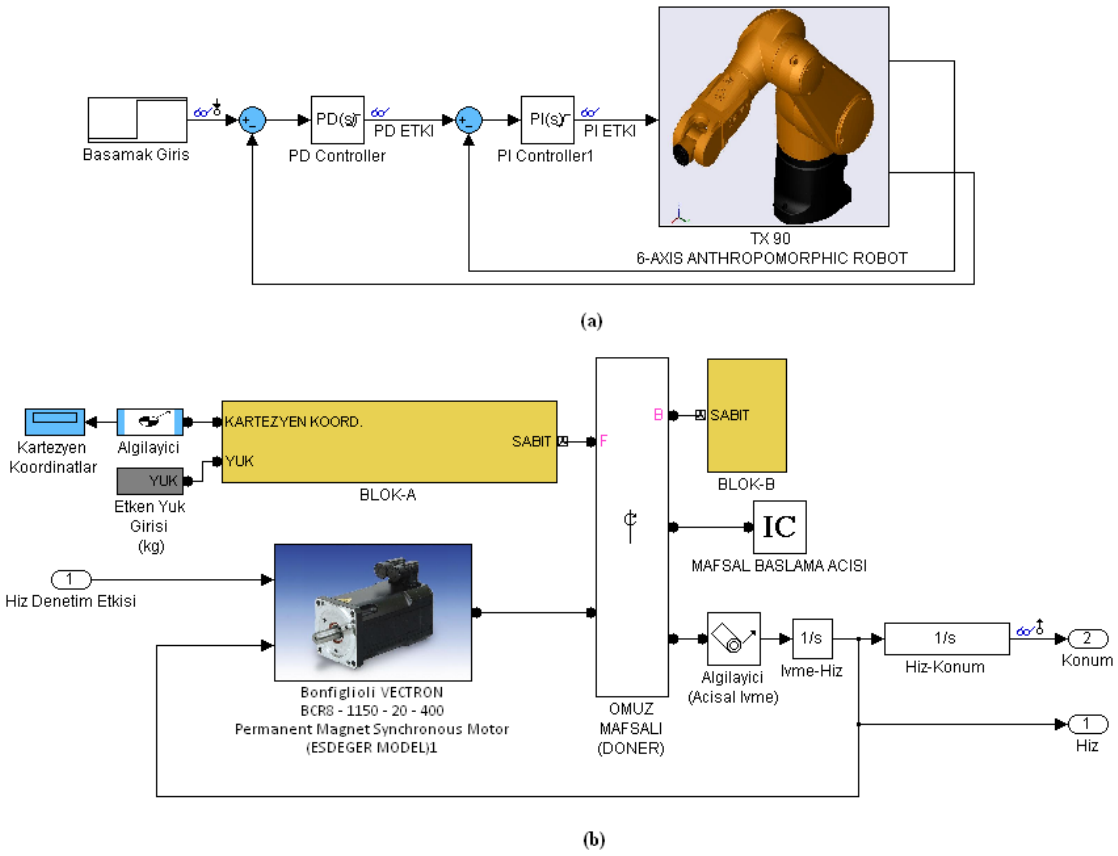
Şekil 3.33: Denetim yapısı (a) ile motor ve robota ait dinamik modeller (b)

Şekil 3.33'de yer alan Simulink modelinde motor şaftına etkiyen yükler (yerçekimi, Coriolis ve merkezkaç kuvvetleri ile atalet momentleri) mafsal parametresinin değerine göre değişmektedir. Sistem bu haliyle sergilediği doğrusal olmayan (*non-linear*) yapı sebebiyle transfer fonksiyon yaklaşımına göre ifade edilemez. Dolayısıyla *SISO Design*

Tools programı ile denetleyici tasarımının gerçekleştirilebilmesi için sistemin belirli kısıtlar uyarınca, belirli bir çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılması gerekmektedir. MATLAB/Simulink ortamında model doğrusallaştırma ve denetleyici optimizasyonu işlemleri Simulink ortamına tam olarak uyarlanmış güçlü bir yazılım olan Simulink Denetim Tasarımı (*Simulink Control Design*) arayüzü ile gerçekleştirilmektedir.

3.2.4.5. Kol mafsalına indirgenmiş robot Simulink/Simmechanics modeli

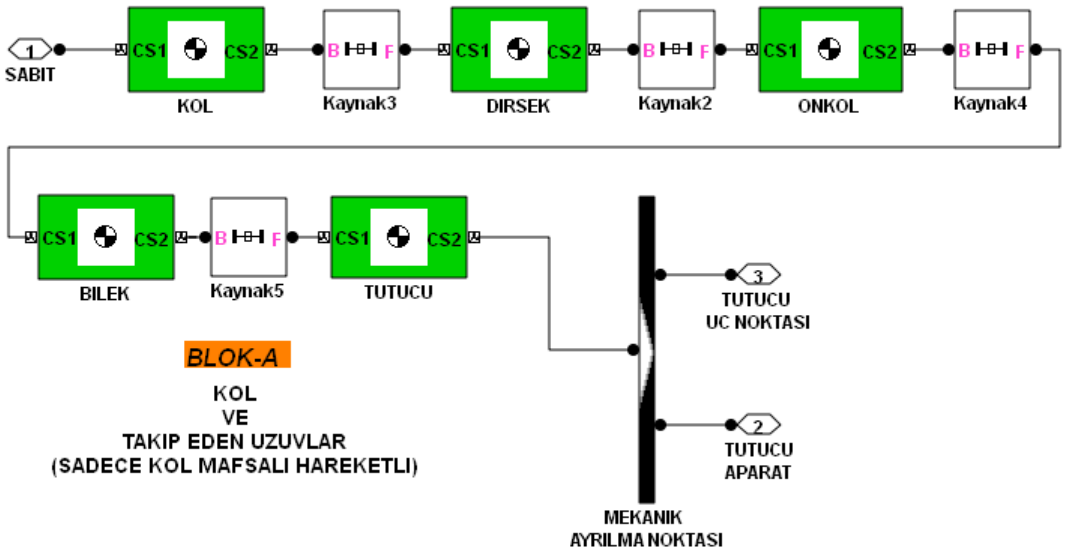
Bu aşamaya kadar kol mafsalına indirgenmiş robotun Simulink ortamında modellenmesi üzerinde durulmuştur. Simulink ortamında her türden sistemin (fiziksel, matematiksel, biyolojik vs.) modellenmesi mümkün olsa da sisteme ait dinamik yapıların detay seviyesi arttıkça ve doğrusallaştırma kıstasları terk edildikçe modelleme işlemi son derece karmaşık bir hal almaktadır. Simulink ortamında çalışan Simmechanics alt programı dinamik modellerin rahatlıkla oluşturulması ve geliştirilmesi yolunda kullanıcı dostu çözümler sunmaktadır. Bu bloklar yardımıyla oluşturulan model Şekil 3.34a ve b'de görülmektedir.



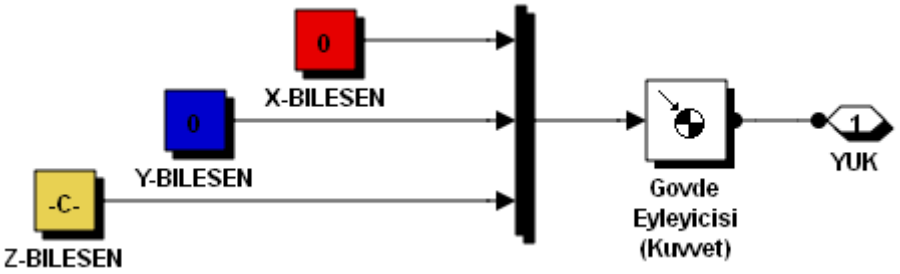
Şekil 3.34: Üst model (a) ve Simmechanics robot modeli (b)

Robotik sistemin Simulink/Simmechanics ortamında modellenmesi esnasında özellikle gövde ve mafsalların tanımlanması için geliştirilmiş olan hazır bloklar sistem dinamik yapısının temsilinde büyük kolaylık ve hız sağlamaktadır. Şekil 3.34b'de görülen BLOK-A ve BLOK-B alt sistemleri uzuv dinamik özelliklerini tanımlayan gövde bloklarını içermektedir. B bloğu kol mafsalından önce yer alan ve burada hareketsiz kabul edilen omuz uzvu ve mafsalı ile zemin uzvunu barındırır. Blok A ise kol mafsalını takip eden tüm uzuvları temsil etmektedir (Şekil 3.35). Modellemenin bu aşamasında kol mafsalını takip eden tüm uzuvlar birbirine kaynaklı dolayısıyla hareketsiz olarak tutulur.

Son uzuv olan tutucuya hem yükün bağlanması hem de uç noktadan konum sinyallerinin alınması için mekanik ayırma bloğu kullanılmıştır (Şekil 3.35). Bu sayede CS2 koordinat takımı aynı işleve sahip iki uçlu yapıya kavuşur. Simmechanics ortamında bir mafsala yönü ve şiddeti belirtilmek üzere harici moment veya bir koordinat takımına yine yön, doğrultu ve şiddet belirtilmek üzere kuvvet uygulanabilmektedir. Ancak bu işlem için ilave bir yapı kullanılır (Şekil 3.36). Gövde eyleyicisi bir gövde koordinat eksenine bağlanır. Kuvvetin tatbik noktasına göre bileşenlerine ayrılması ve bu verilerin 'mux' bloğu ile vektör haline getirilmesi gereklidir.



Şekil 3.35: Genel şemadaki BLOK-A'nın ayrıntılı görünümü



Şekil 3.36: Gövde eyleyicisi

3.2.5. MATLAB/Simulink ortamında denetleyici optimizasyonu

MATLAB paket programı gerek Simulink gerekse özel Simscape kütüphaneleri ile oluşturulmuş doğrusal olmayan fiziksel modellerin belirli çalışma noktaları civarında en doğru şekilde doğrusallaştırılarak denetleyici tasarımlarının gerçekleştirilmesine olanak verir. Bu işlemler Simulink ortamı içerisinden çalıştırılan *Simulink Control Design* araç kutusu (*toolbox*) ile yapılmaktadır (http://www.mathworks.com/help/toolbox/control/, 2010).

Bu çalışmada Simulink ve Simmechanics modellerinin her ikisi de non-lineer yapıda olduğu için denetim tasarımı Simulink Control Design ile gerçekleştirilmiştir. Metin içerisinde çıkış sırasına sadık kalınarak öncelikle Simulink tabanlı modelde denetleyici optimizasyonu konusu anlatılmıştır. Ancak çalışmanın esasını Simmechanics dolayısıyla Simscape ortamının sunduğu olanaklar yardımıyla bir mekatronik sistemin mekanik kısmı itibariyle modellenmesi ve denetimi oluşturduğu için ikinci model üzerinde yapılan denetleyici optimizasyonunun sonuçları detaylı olarak işlenmiş ve tartışılmıştır. Simulink üzerinde gerçekleştirilen denetleyici tasarımının adımları şu şekilde sıralanabilir:

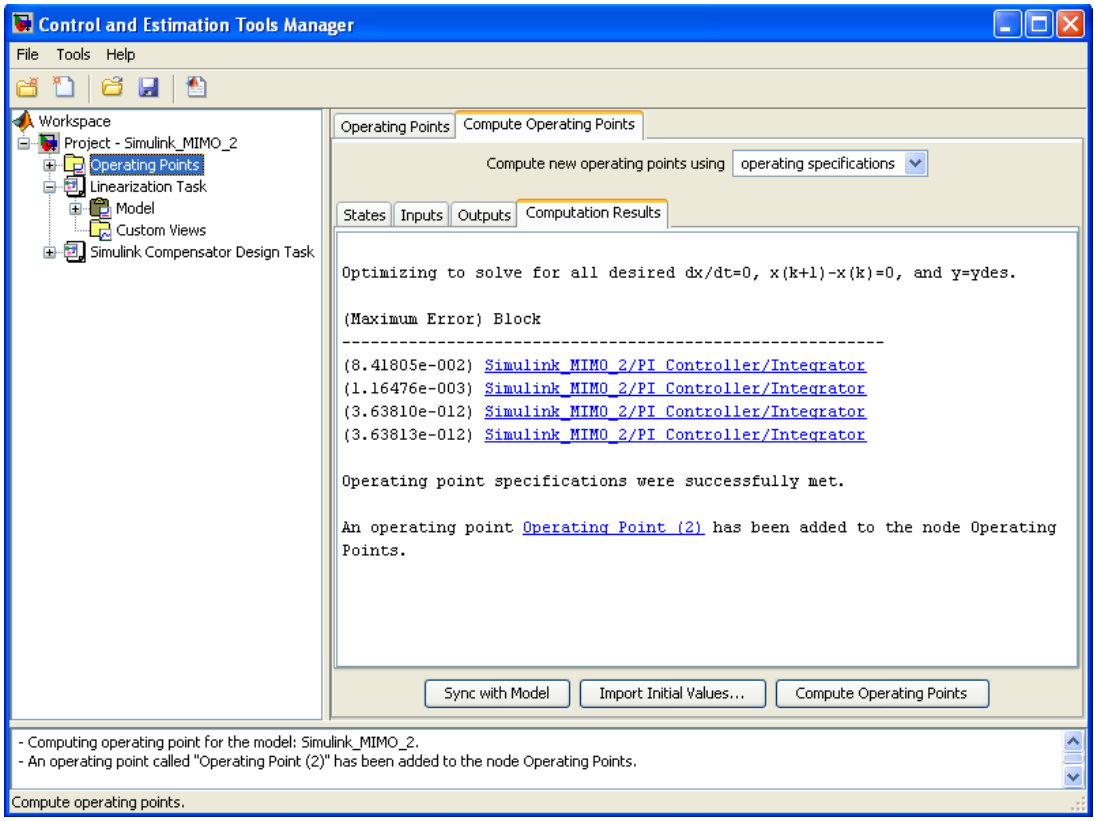
- Denetime esas olan geribesleme (*feedback*) döngüleri tanımlanır.
- Çalışma noktası tespit edilir.
- Çalışma noktası civarında model doğrusallaştırılır.
- Denetleyici tasarım işlemi bu düzlemde gerçekleştirilir.
- Denetleyici doğrusal olmayan model üzerinde test edilir.
- Denetim kıstaslarının sağlanması halinde tasarım sonlandırılır.

Her iki modelleme yaklaşımında robotik mafsalların iki kademeli denetimi söz konusudur. İçte yer alan denetim döngüsü açısal hız, dış denetim döngüsü ise açısal konum denetimini gerçekleştirir.

3.2.5.1. Simulink modeli için denetleyici optimizasyonu

Simulink modeli robotun sadece kol mafsalının hareketli olduğu kabulü doğrultusunda robot dinamiğinin bu mafsala göre tanımlanması ile oluşturulmuş bir modeldir. Modelin Simulink/Simmechanics ortamında hazırlanan model ile arasındaki esas farklılık belirli birtakım kabuller ile basitleştirilmiş bir model olmasıdır. Ancak bu işleme rağmen model görece karmaşık ve doğrusal olmayan yapısını korur.

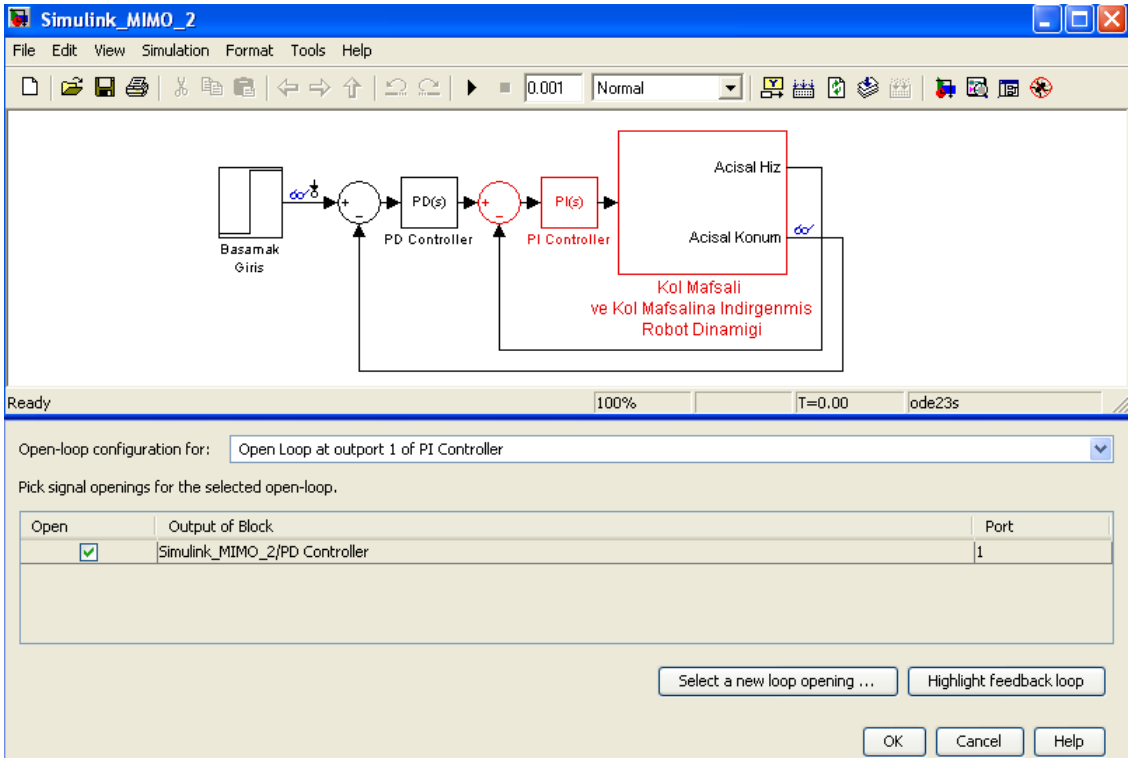
Modelin kapsadığı denetim döngülerinin Denetim ve Kestirim Araçları Yöneticisi'ne (***C**ontrol **a**nd **E**stimation **T**ools **M**anager* - *CETM*) yazılımına tanıtılmasının ardından çalışma noktası tanımlanmaktadır. Burada program tarafından doğrusallaştırılmış modele göre belirlenen çalışma noktası doğrudan benimsenebileceği gibi sistemin çalışması sırasında geçtiği bir nokta enstantane (snapshot) yöntemi ile basitçe tanımlanabilir. Üçüncü bir yol en büyük ve en küçük değerleri bilinen sistem parametrelerinin belirlenerek kısıt (*constraint*) olarak kullanılmasıdır. Bu çalışmada çalışma noktası tespitinde üçüncü yol tercih edilmiştir. Çalışma noktasının başarıyla tanımlanması kullanıcıya iletilir (Şekil 3.37).



Şekil 3.37: Hesaplanmış çalışma noktasına ait diyalog kutusu

Çalışma noktalarının belirlenmesinin ardından sistem bu noktalar civarında doğrusallaştırılır. Doğrusallaştırılan modeldeki denetleyicilerin de CETM yazılımına tanıtılması gereklidir. Burada söz konusu denetleyiciler Simulink kütüphanesinde kullanıcıya sunulan PID bloklarıdır. Bu bloklar CETM programı tarafından otomatik olarak tanınır ve ayarlanır.

Çok katmanlı denetim faaliyetinde gerek MATLAB gerekse Simulink ortamında denetleyicilerin etkileşimli ve eş zamanlı (*simultaneous*) olarak tasarımı mümkün olsa da yetkin bir denetim tasarımı için öncelikle daha iç döngüde yer alan denetleyicinin tasarlanması gereklidir. İç denetim döngüsünün dış döngüde meydana gelen değişikliklere karşı duyarsız hale getirilmesi ayrıklaştırma (*decoupling*) olarak tanımlanır (http://www.mathworks.com/help/toolbox/control/, 2011). Ayrıklaştırılan sistemde içte yer alan denetleyici dış döngüye ait denetleyiciden bağımsız olarak ayarlanabilirken, dış döngüye ait denetleyici iç döngüde oluşan değişiklikleri 'görmeye' devam eder. Bu sayede parametrik denetleyici ayarı yapılır. Ayrıklaştırma işlemi ve ayrık döngüler Şekil 3.38'de görülmektedir.

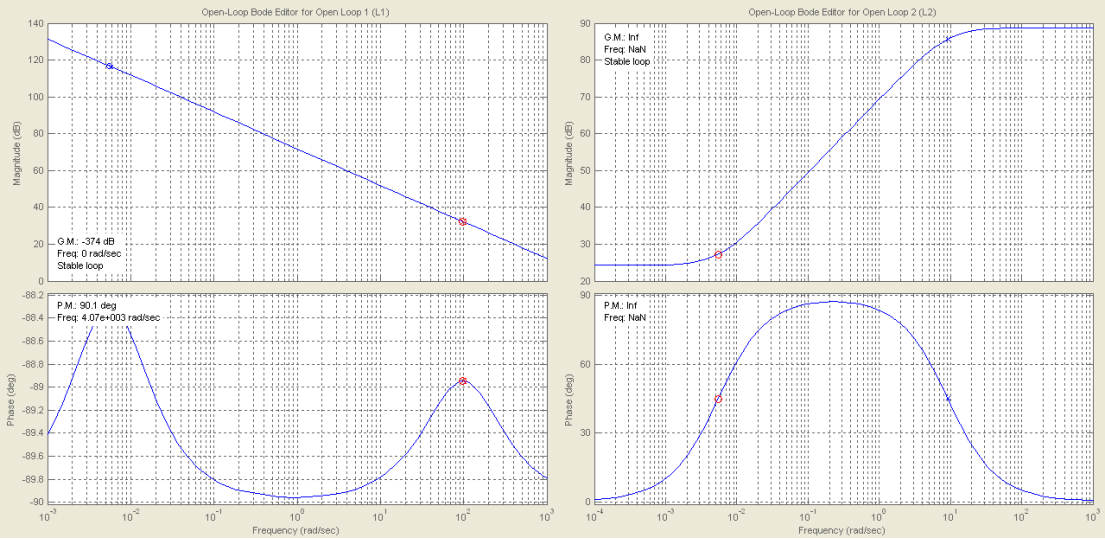


Şekil 3.38: Denetim döngülerinin ayrıklaştırılması

Bu çalışmada hız döngüsü orantı artı integral (PI) tipindeki denetim algoritması ile denetlenirken konum denetimi orantı artı türev (PD) etki denetleyici ile sağlanmaktadır. PI denetleyici sistemin ileribesleme yolu üzerine bir integral alıcı yerleştirir. Böylece sistem ileri yol transfer fonksiyonu TİP1 halini alır. Transfer fonksiyonuna eklenen bu integral alıcı veya integratör kalıcı durum hatalarının ortadan kaldırılmasını sağlar. Konum denetiminde kullanılan türev etki sistem açık döngü transfer fonksiyonunun payına bir ‘s’ çarpanı getirerek karmaşık düzlem orijininde olmak üzere sisteme bir sıfır ilave eder. Payda yer alan bu çarpan sisteme 90° ‘lik faz avansı kazandırır. Türev etki sahip olduğu bu özellik ile sistem kararlılığı üzerinde olumlu etki yapmaktadır (Yüksel 2009).

Çalışma noktasının tanımlanması, modelin doğrusallaştırılması ve denetim döngülerinin ayrık hale getirilmesinin ardından denetleyici tasarımları MATLAB ortamında olduğu gibi gerçekleştirilir. CETM içerisinde kullanıcıya diyagramlar yoluyla, diyalog penceresi ile veya otomatik olarak denetleyici ayarlarının gerçekleştirilmesi imkanı tanınmaktadır. Bu çalışmada üç yöntem arasından diyagramlar yoluyla tasarım yöntemi tercih edilmiştir.

Etkileşimli diyagramların kullanılması halinde denetleyicilerin Bode ve kök yer eğrileri yöntemleri ile tasarlanmasına imkan verilmektedir. Bu çalışmada her iki denetim döngüsünde Bode diyagramları kullanılmıştır (Şekil 3.39).

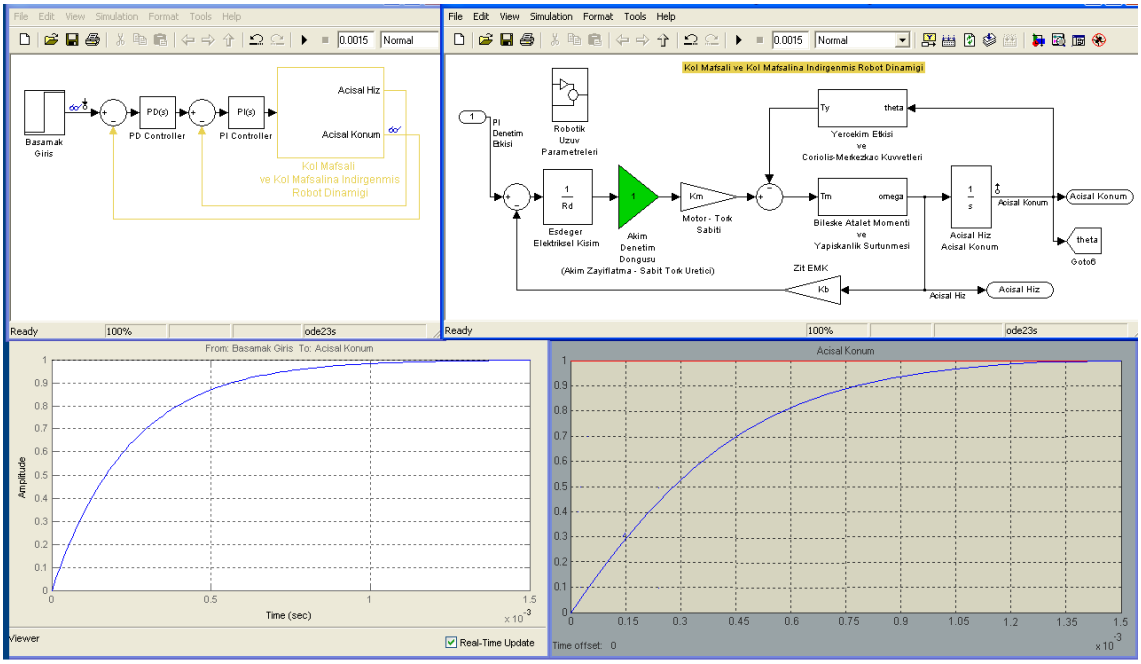


Şekil 3.39: Denetleyici optimizasyonu ardından ulaşılan Bode diyagramları

Doğrusallaştırılmış model üzerinden gerçekleştirilen tasarımın sonuçları basamak giriş cevabı olarak takip edilir. Tasarımın esas hedefi robot mafsalının belirlenen yörüngeyi kalıcı durum hatası vermeksizin ve aşma gözlenmeden hızlı bir şekilde takip etmesidir. Doğrusallaştırılmış sisteme ait denetleyici ayarlarının gerçekleştirilmesinin ardından bulgular doğrusal olmayan Simulink/Simmechanics karma sistemine aktarılır. Bu işlem CETM tarafından otomatik olarak gerçekleştirilmektedir.

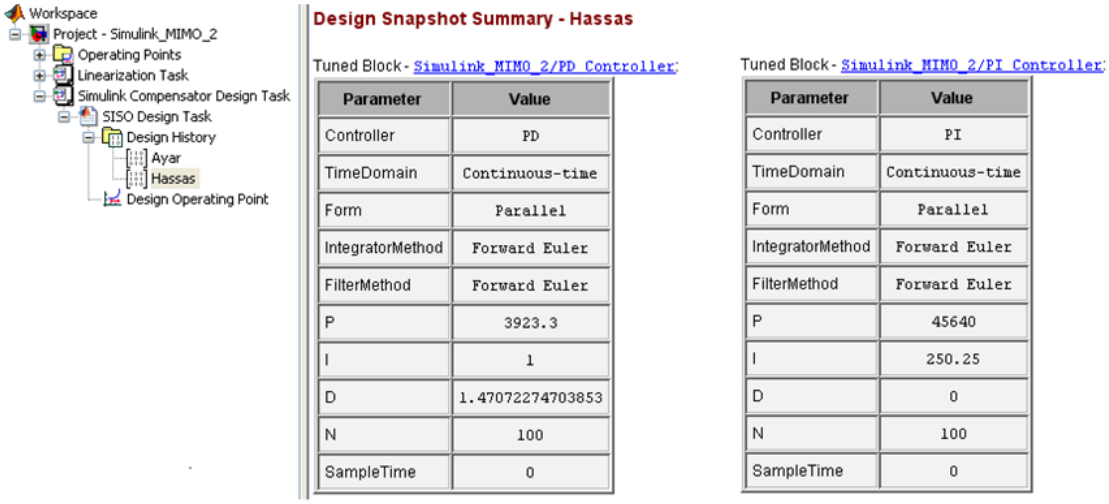
Başarılı bir tasarım sürecinin ardından doğrusal olmayan modelin doğrusal modele aynı şartlar altında yakın bir davranış göstermesi beklenir. Burada her iki sistem de birim basamak giriş ile uyarılmaktadır. Şekil 3.40 doğrusal modelin doğrusal olmayan Simulink modelini başarılı biçimde temsil ettiğini göstermektedir.

Denetleyici tasarımının ardından ayar parametreleri Şekil 3.41'de olduğu gibidir. Simulink denetim tasarımı ortamında elde edilen ayar parametreleri aynı proje içerisinde düğüm noktaları (node) olarak isimlendirilerek kaydedilebilir. Ulaşılan farklı optimizasyon sonuçlarının etkin biçimde kıyaslanması için düğüm noktaları geri çağrılarak model içerisindeki denetleyici bloklara atanır.



(a) (b)

Şekil 3.40: Tasarım parametrelerine göre doğrusal (a) ve doğrusal olmayan (b) sistem cevabı

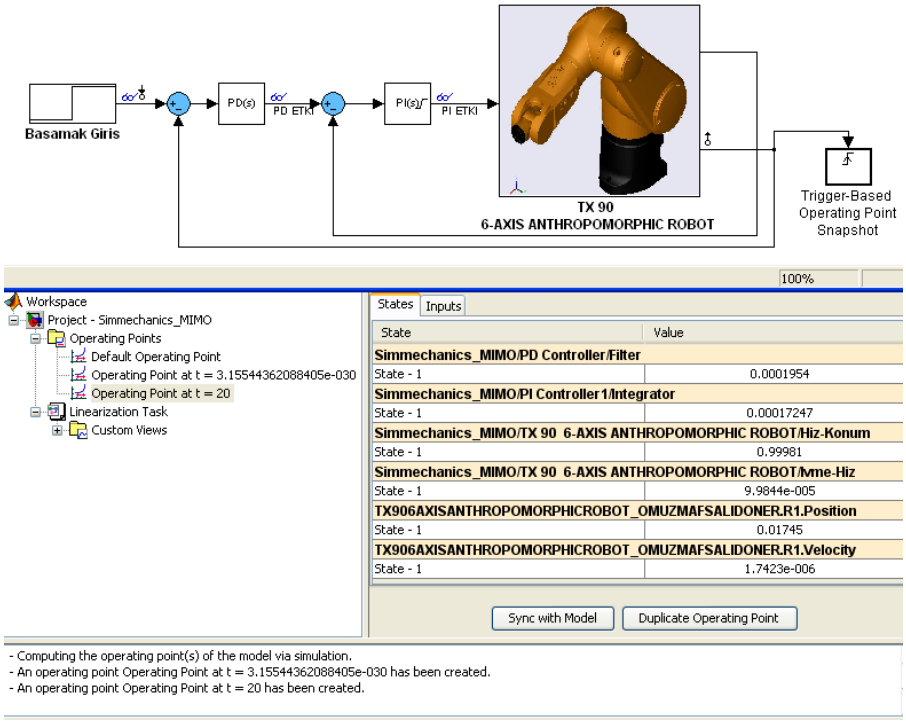


Şekil 3.41: PD etki denetleyici (a) ve PI etki denetleyici (b) ayar parametreleri

3.2.5.2. Simulink/Simmechanics modeli için denetleyici optimizasyonu

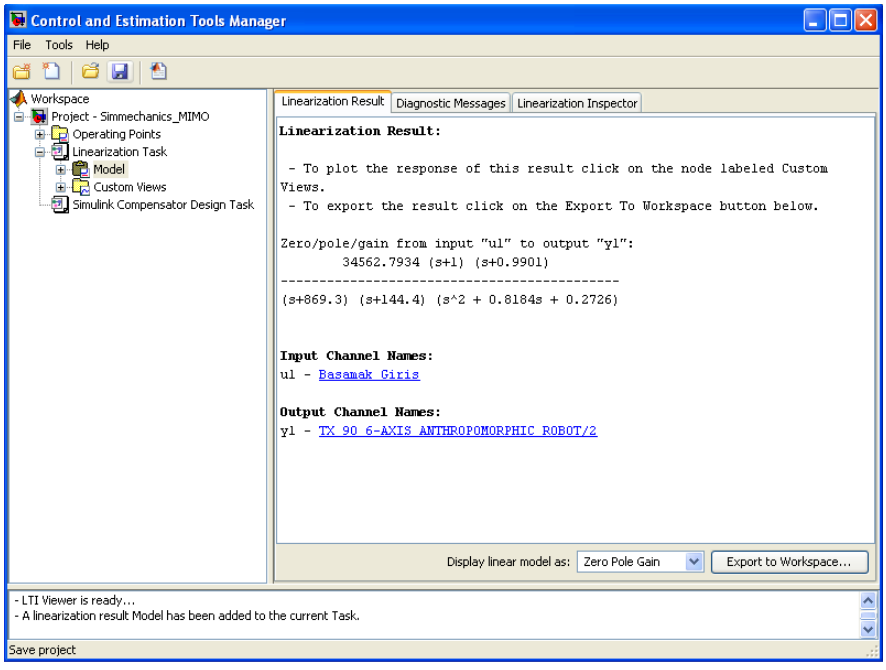
Görüldüğü üzere Simulink denetim tasarımı projeleri sistemden beklenen dinamik davranış nitelikleri doğrultusunda yürütülebilmekte ve doğrusal sistemlerin karakteristikleri işlemlerin her adımında doğrusal olmayan sistemler üzerine uygulanarak sonuçlar takip edilebilmektedir. Bu çalışmada robot mafsallarının referans girişlerin takibinde aşma olgusu olmaksızın mümkün olan en çabuk cevabı üretmeleri kıstası ile hareket edildiği için denetleyici optimizasyonunun alternatif sonuçları arasından bu özellikte olanlar benimsenmektedir.

Simulink/Simmechanics modelinde önceki başlık altında izlenen yöntemler benzer şekilde takip edilir. Burada çalışma noktasının tanımlanması için bir önceki modelden farklı olarak enstantane yakalama yöntemi kullanılmıştır. Bunun için *Simulink Control Design* kütüphanesinden tetikleyicili çalışma noktası yakalayıcı (*Trigger Based Operating Point Snapshot*) bloğunun model ekranına kopyalanarak izlenecek olan sinyale bağlanması yeterli olmaktadır (Şekil 3.42).



Şekil 3.42: Enstantane yakalayıcı ile oluşturulan çalışma noktası

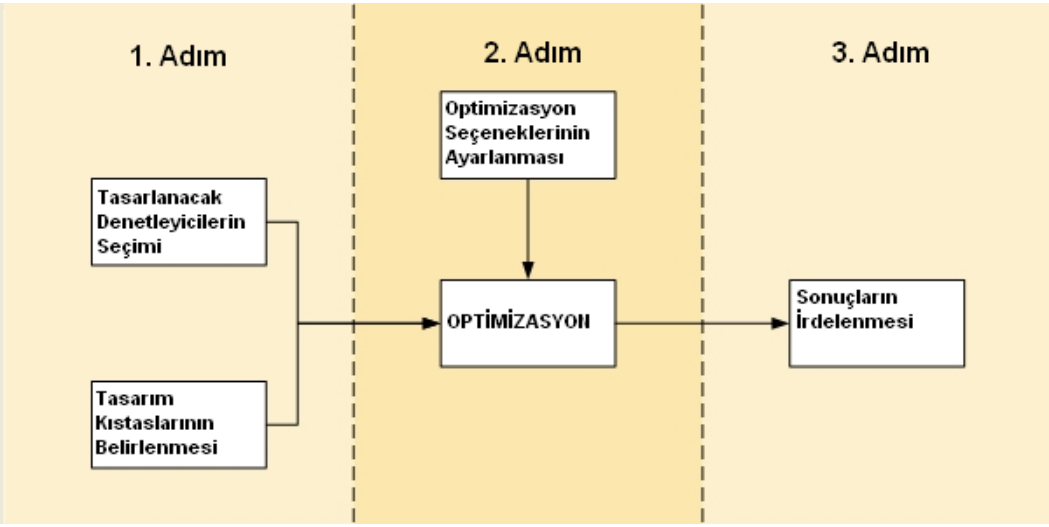
Tanımlanan çalışma noktası civarında doğrusallaştırılan model transfer fonksiyonu, sıfır-kutup-kazanç (*zpk*) veya durum değişkenleri biçiminde sunulur. Bu model çalışma uzayına (*Workspace*) aktarılabilir (Şekil 3.43).



Şekil 3.43: Doğrusal sistemin ZPK gösterimi

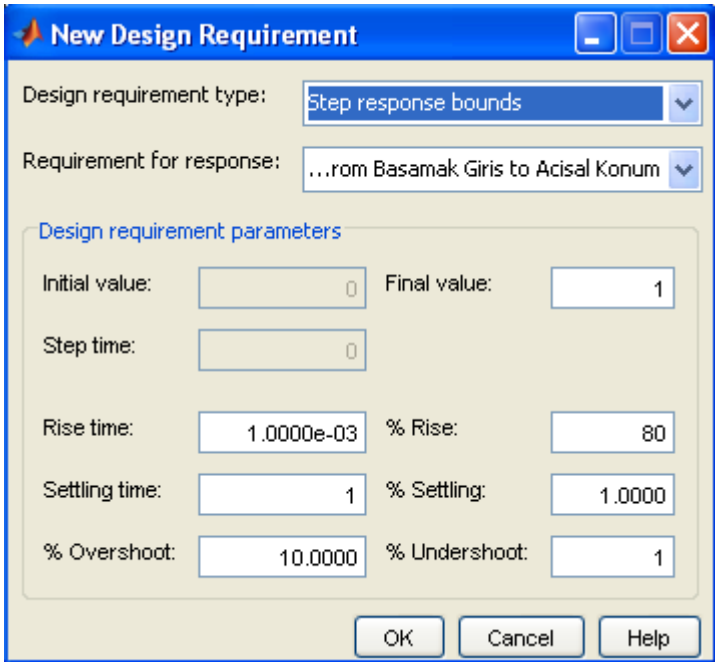
Simulink/Simmechanics modeline ait denetleyici ayarlarının yapılmasında CETM programının kullanıcıya sunduğu optimizasyon tabanlı ayar (*Optimization Based Tuning*) seçeneği kullanılmıştır. Optimizasyon tabanlı ayar seçeneğinde etkileşimli diyagramlar ile ayar yönteminde kullanıcının gerçekleştirdiği aşamalar program tarafından yürütülmektedir. CETM başlangıçta tanımlanan tasarım kriterleri doğrultusunda en uygun ayar parametrelerini bulur. Bu işlem iterasyonlar yoluyla gerçekleştirilir (http://www.mathworks.com/help/toolbox/control/ 2011).

Optimizasyon tabanlı denetleyici ayarında doğrusal olmayan modelin belirli bir çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılmış olması gereklidir. Optimizasyon akış şeması Şekil 3.44'de görüldüğü gibidir:



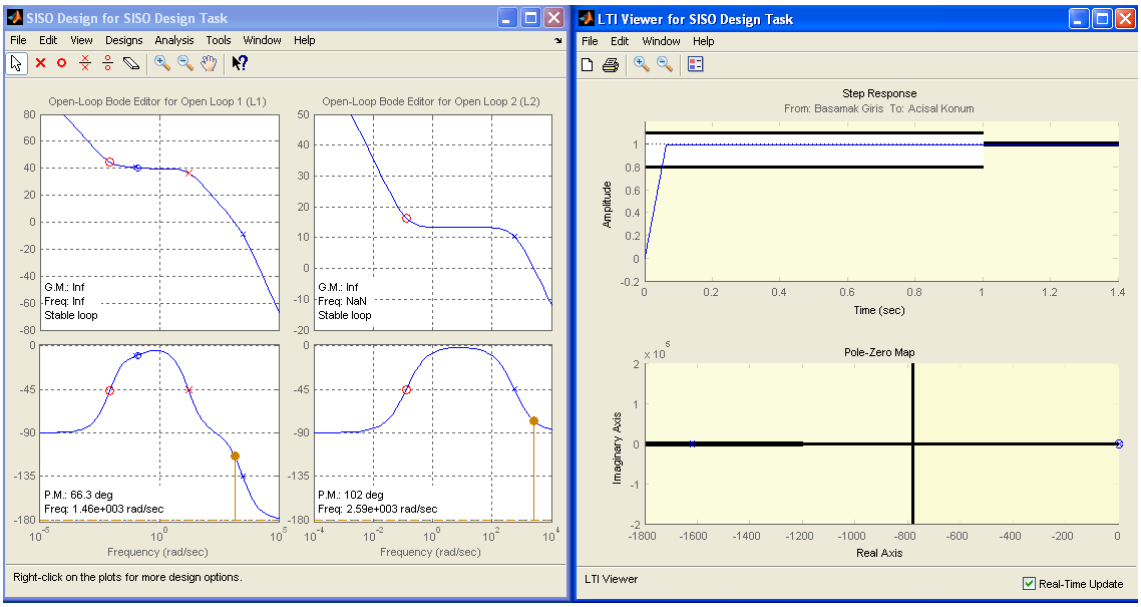
Şekil 3.44: Optimizasyon basamakları

Tasarım kriterleri Şekil 3.45'de görülen diyalog kutusu ile belirlenmektedir. Tasarım kriter tipi menüsünde çeşitli seçeneklere ulaşılabilir ve optimizasyon üzerinde gerekli olduğu kadar kısıt belirlenebilir. Ancak tasarım kriterlerinin artması optimizasyon algoritmasının kararlı çözümler üretemeyecek kadar kısıtlanmasına yol açabilmektedir. Bu çalışmada cevap hızının 0,001 saniyeden daha kısa ve aşma miktarının %10'dan düşük olması şartları gözetilmiştir.

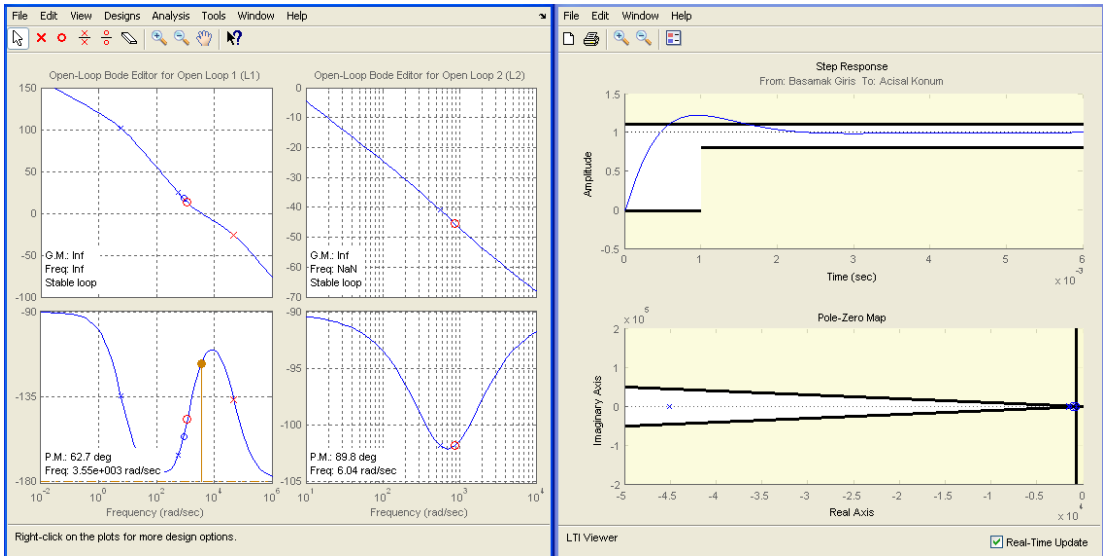


Şekil 3.45: Tasarım kıstasları seçim ekranı

Tasarım kıstaslarının belirlenmesinin ardından başlatılan optimizasyon istenen sonucu üretememiştir (Şekil 3.46). Böyle bir durumda program en uygun sonucun bulunamamış olduğunu bildirir. Sonucun geliştirilmesi için birtakım tasarım kıstaslarının terk edilmesi veya bunların yumuşatılarak algoritmanın hareket imkanının artırılması yoluna gidilir.



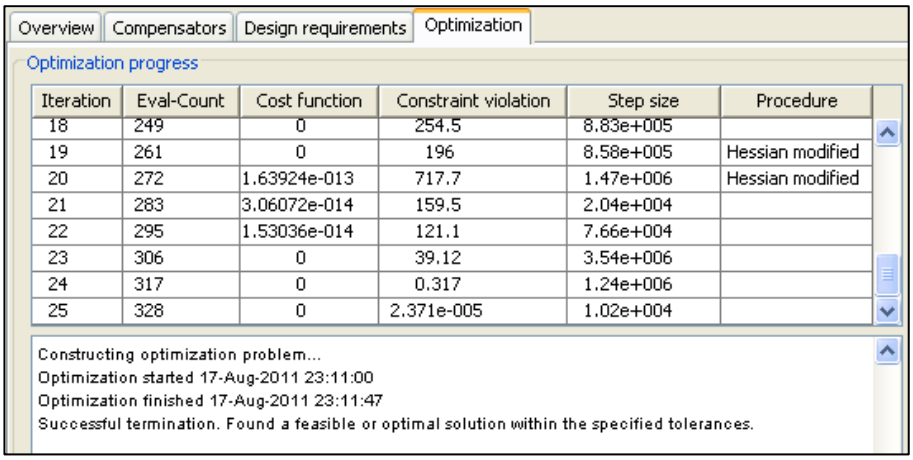
Şekil 3.46: Aşırı kısıtlandırma sonucu elde edilen yetersiz sonuç



Şekil 3.47: Başarılı optimizasyon

Optimizasyon başarımının artırılması amacıyla farklı kıstaslar kullanılmıştır. Önceki adımdan farklı olarak ikinci denemede oturma zamanı $(0{,}005sn)$ ve sönüm oranı $(0{,}707)$ belirlenmiştir. Bu kıstaslar doğrultusunda elde edilen sonuç Şekil 3.47'de olduğu gibidir.

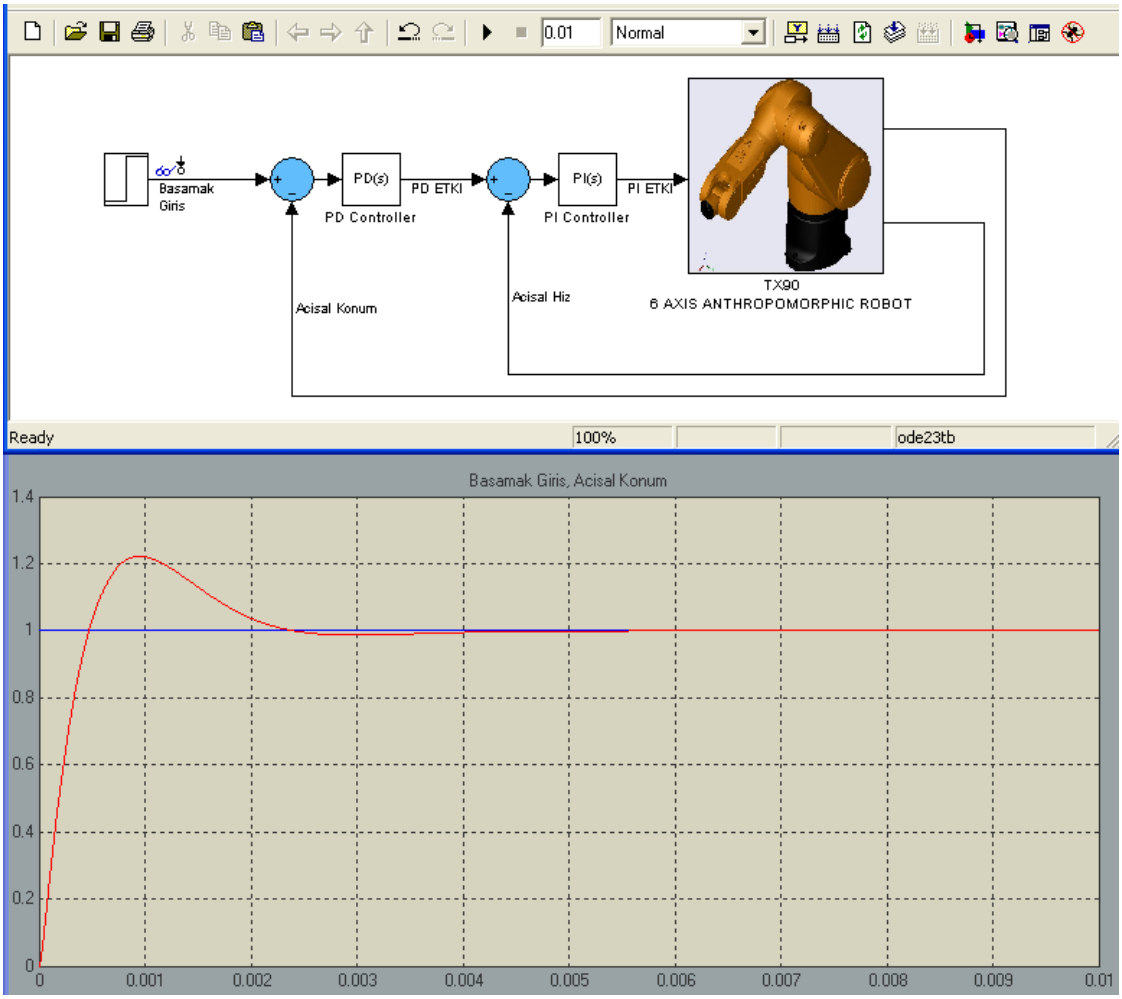
Şekil 3.47 oturma zamanına yönelik tasarım şartının sağlandığını öte yandan sönüm oranı ile ilgili şartın kısmen ihlal edildiğini göstermektedir. Bu kusura rağmen doğrusal sisteme yönelik ayar parametreleri başarılı görünmektedir. Algoritma bu çözüme 24 iterasyon adımının ardından ulaşmıştır. İşlem basamakları Şekil 3.48'deki diyalog penceresi ile kullanıcıya sunulur.



Şekil 3.48: İterasyon adımları

CETM üzerinde ve doğrusallaştırılmış sistem göz önünde bulundurularak belirlenmiş olan denetleyici parametrelerinin doğrusal olmayan model üzerinde izlenmesi gereklidir. Bu iki modelin aynı uyarana karşı verdikleri tepkilerin yakınlığı gerçekleştirilen doğrusallaştırma ve denetleyici tasarımı işlemlerinin başarımı hakkında fikir vermektedir. Mevcut ayar parametrelerine göre doğrusal olmayan sistemin basamak giriş cevabı Şekil 3.49'da görülmektedir.

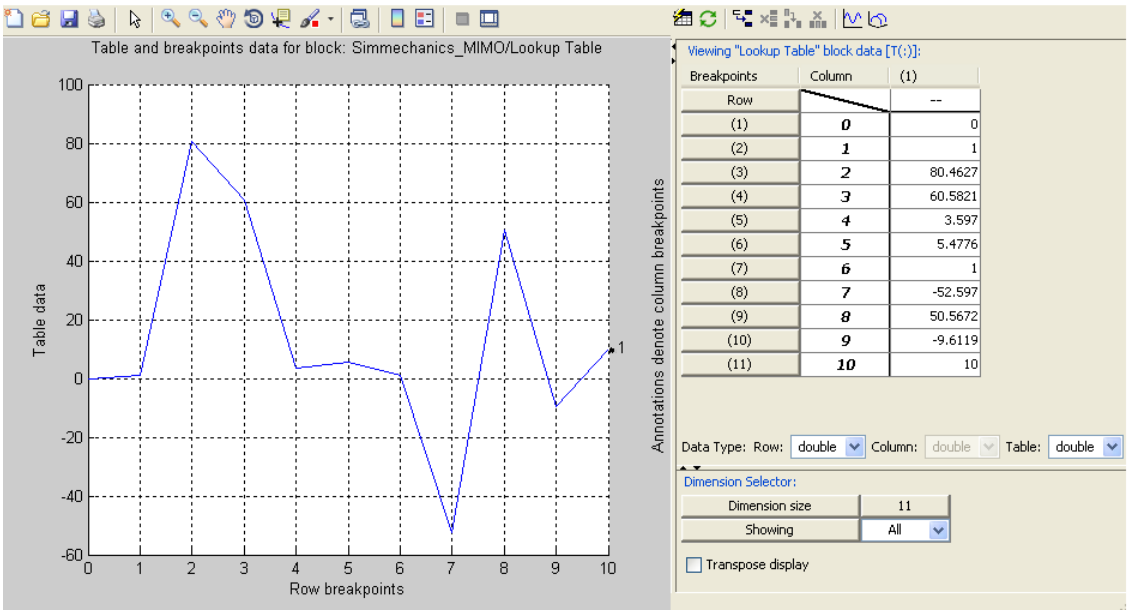
Şekil 3.49'da mafsalın birim basamak girişte %20 civarında aşma yaptığı görülmektedir. Buna karşılık mafsal açısal konumu $0{,}006sn$'de $0{,}9995°$ değerine ulaşır. Bu anda $0{,}0005°$ civarındaki gözlenen hata $0{,}008sn$'de azalarak ihmal edilecek mertebeye geriler.



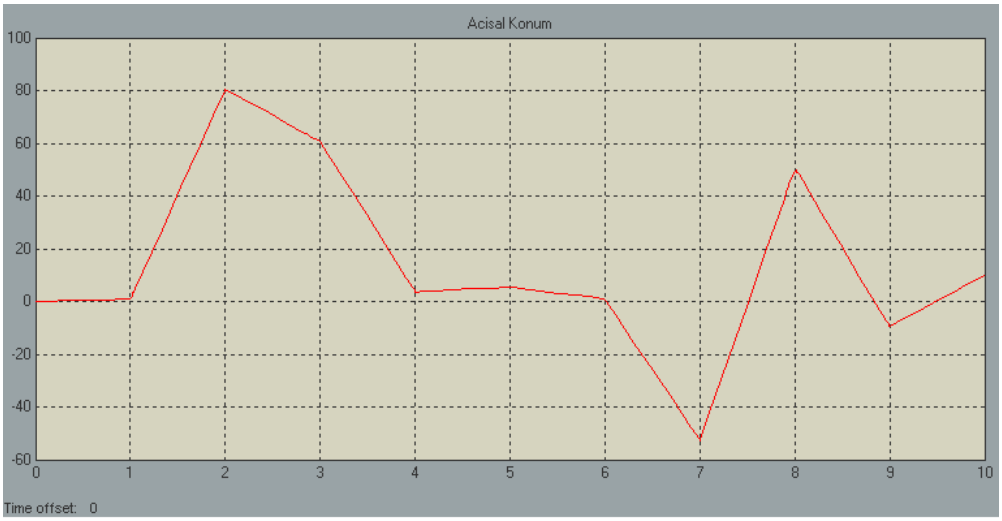
Şekil 3.49: Doğrusal olmayan modelin basamak giriş cevabı

Basamak giriş haline oldukça iyi sonuç veren denetleyici ayarlarının robotik uygulamalarda karşılaşılacak ve daha büyük hareket sığası gerektiren farklı bir girişe (referansa) karşı üreteceği cevabın gözlenmesi mafsal yörünge takibinde oluşabilecek olası hataların tespiti ve giderilmesinde yararlı olacaktır. Bu işlem için Simulink temel kütüphanelerinde kullanıcıya sunulan amaca yönelik bloklardan *Lookup Table* kullanılmıştır. Blok içerisinde sinyal etkileşimli grafik ekranı ile istenen forma kavuşturulur (Şekil 3.50).

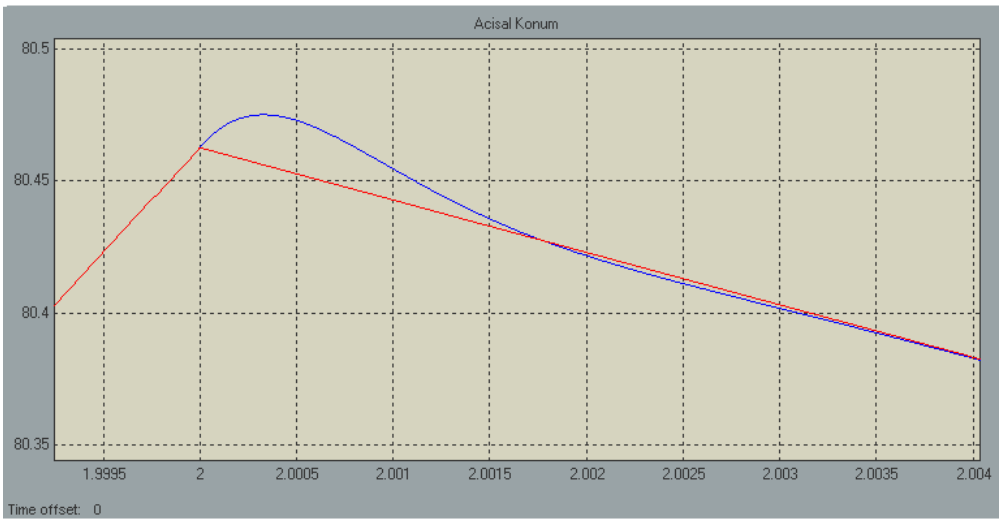
Robot mafsalının bu uyarıma karşı ürettiği cevap Şekil 3.51a'da gözlenebilir. Mafsal denetleyici parametreleri giriş sinyalinin niteliği değiştiğinde dahi kalıcı durum hatasız ve oldukça hızlı bir cevap üretmektedir. Denetleyici optimizasyonu sırasında kabul edilen aşma olgusu sistem cevabında kayda değer bir bozulma meydana getirmemektedir. Aşma olgusuna ait izler açısal konum-zaman eğrisinin gerekli yerlerde yakınlaştırılması ile gözlenebilir (Şekil 3.51b). Şekil 3.51 robotun kol mafsalına indirgenmiş dinamik modeli için belirlenmiş olan denetleyici parametrelerinin sadece basamak girişin takibinde değil bir robotik mafsaldan beklenebilecek örnek bir referans yörüngenin takibinde de etkin sonuçlar üretebildiğini göstermektedir.



Şekil 3.50: Lookup Table'ın düzenlenmesi



a.



b.

Şekil 3.51: Lookup tablosuna göre cevap eğrisi (a) ve aşma miktarı (b)

Robota serbestlik derecesini kazandıran mafsalların modelleme ve denetleyici tasarımları bu bölümde aktarılan esaslar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ancak burada robotun sadece kol mafsalı için gerçekleştirilen işlemler detaylı biçimde sunulmaktadır. Takip eden bölümde ters kinematik analiz tabanlı mafsal yörünge algoritması ile oluşturulan yörüngeler doğrultusunda ve yük etkisi altında çalışan altı serbestlik dereceli robotun konumlama ve yörünge takibindeki başarımı tartışılmaktadır.

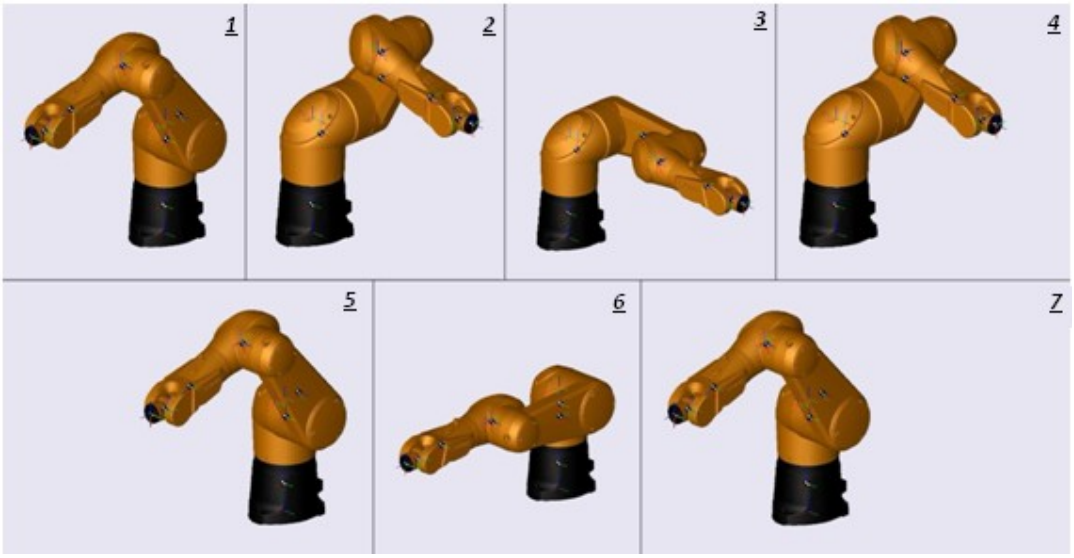
3.2.6. Uygulanan İş Planı

Tasarımı ve denetleyici ayarları gerçekleştirilen robot çalışma uzayında gerçekleştirilecek bir iş planı için ayarlanabilir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen modelleme ve denetleyici tasarımlarının görsel olarak sunulması amacıyla Simulink/Simscape sanal gerçeklik (***V****irtual* ***R****eality* - *VR*) ortamı yardımıyla oluşturulan bir benzetim örneği kullanılmıştır. VR ortamı Simulink/Simmechanics yazılımı tarafından otomatik olarak çağrılarak benzetimin başlatılması ile birlikte devreye girer. VR sahnesi kullanıcı isteği doğrultusunda düzenlenebilir ve benzetimler sıkıştırılmış video biçimleri ile saklanabilir (http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/mech/, 2011). Örnek bir iş planı Şekil 3.52'da yer almaktadır.

Kullanılan algoritma gereği robot çalışma uzayı içerisinde yer alan herhangi iki nokta arasında hareket ederken bu hareketi ikiye böler:

- Dönme,
- Uzanma.

İdeal durumda dönme hareketinin miktarı omuz ve bilek mafsallarının koordineli çalışmasına göre kararlaştırılır. Ancak yapılan uygulamada önkol mafsalının statik olmasına imkan veren görece daha sade bir iş planı benimsenmiş ve geliştirilmiştir. Böylelikle dönme hareketi sadece birinci mafsal (omuz) vasıtasıyla gerçekleştirilir.



Şekil 3.52: Robota ait iş planı

Uç eyleyici yönelimi dönme hareketi sırasında değişim gösterir. 3x3 rotasyon matrisi üzerinde de bu değişim izlenebilmektedir (Şekil 3.53). Dönme hareketi öncesinde rotasyon matrisi, sabit yer koordinat takımına göre hesaplanır. Buradaki dönme açıları,

$$\begin{aligned} \gamma &= 0° \\ \beta &= 90° \\ \alpha &= 0° \end{aligned} \tag{3.91}$$

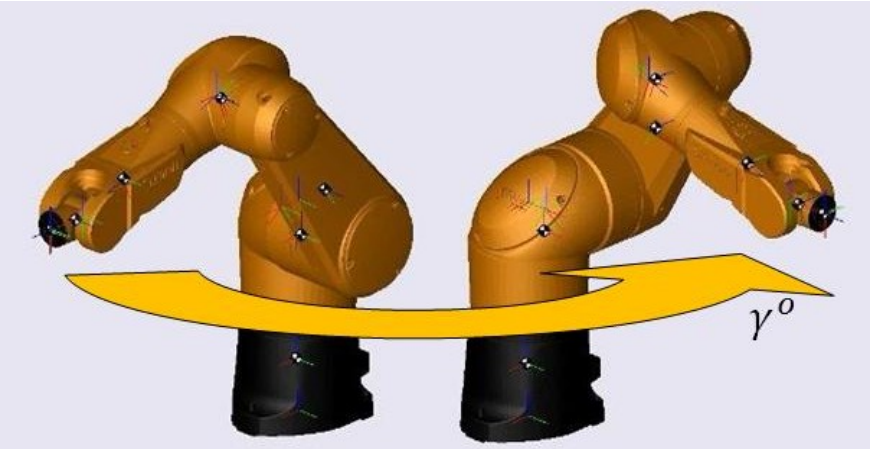
şeklindedir. İş planına göre gerçekleşen 90°'lik dönmenin ardından yeni açı kümesi,

$$\begin{aligned} \gamma &= -90° \\ \beta &= 90° \\ \alpha &= 0° \end{aligned} \tag{3.92}$$

olarak tespit edilir. Rotasyon matrisindeki değişimin γ (Yaw) açısı üzerinde gerçekleştiği görülmektedir. Bu hal rotasyon denklemlerine şu şekilde yansır:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow R_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.110}$$

İlk hareketin ardından kol, dirsek ve bilek eklemleri kullanılarak ileri uzanım gerçekleştirilir. İleri uzanım hareketi sırasında uç eyleyici yönelim matrisi *sabit* kalmaya zorlanır. Nesnenin alınmasından sonra robot esas başlangıç noktasına, yine omuz mafsalını kullanarak dönmektedir. İleri uzanım hareketini gerçekleştirerek nesneyi uç eyleyicisinden ayırır.



Şekil 3.53: Uç yöneliminde meydana gelen değişim.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada mekatronik sistem tasarım süreçleri takip edilerek robotik bir sistemin kuramsal çerçevesi oluşturulmuş ve sistem MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir.

Bir mekanizma olarak robotik sistemin kuramsal çerçevesini uzuv ve mafsallar arasındaki geometrik bağıntıları ortaya çıkaran kinematik analizin gerçekleştirilmesi ve hareket halindeki sistemin dinamik davranışının tanımlanması oluşturur.

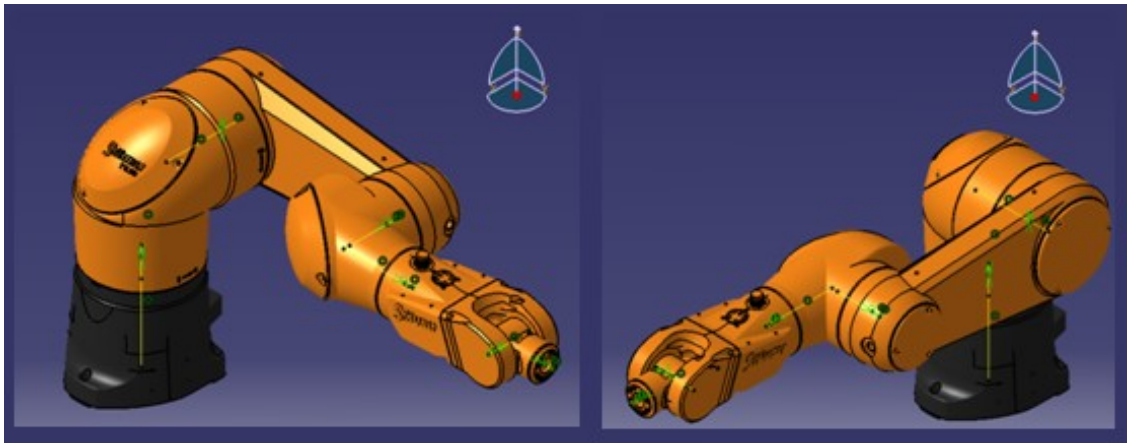
Öte yandan otonom bir makine olarak robotik sistemin kuramsal çerçevesini mafsalları hareketlendiren servo sistemlerin tanımlanması ve hassas konum denetiminin gerçekleştirilmesi amacıyla yapılandırılan hareket denetim tasarımı çizmektedir. Robot ve eyleyici dinamiğinin elde edilmesi MATLAB/Simulink ortamındaki modelleme aşamasının verilerini oluşturur.

Robot kinematiği bir kez tanımlandıktan sonra ters kinematik analizin verilerinden yararlanılarak ayrık mafsal yörüngeleri oluşturulur. Bu uygulamanın bir algoritma ile desteklenmesi robot yörüngelerini hesaplayan bir programın dolayısıyla bu çalışmadaki mekatronik sisteme ait yazılımın hazırlanması anlamına gelmektedir.

4.1. Yüklü Çalışma Halinde Ayrık Denetleyici Başarımları

Bu bölümde MATLAB/Simulink ortamında her mafsal için ayrı olarak tasarlanan denetleyicilerin mafsal yörünge takibindeki etkinlikleri diyagramlar ile sunulmaktadır. Mafsal yörünge denetiminde konum denetimi özel bir yere sahiptir. Hız denetimi motor yapısında yer alan ve sadece hızın değil hız ile doğrudan bağlantılı olan motor akımı ve dolayısıyla tork denetiminde kullanılan bir denetim döngüsüdür. Ancak rotor konumunun sağlıklı biçimde denetimi için hız döngüsü yetersiz kalabilmektedir. Bu şartlar altında hassas ve dayanıklı bir konum denetim algoritmasına başvurulur.

Robotun önceki bölümde aktarılan iş planı uyarınca çalışması esnasında ulaştığı iki özel nokta ‘kritik noktalar’ olarak tanımlanmaktadır. Bu noktalar pratik olarak robotun yükü iş hücresi veya hattında bulunan ikinci bir robota veya platforma ilettiği (1) ve yükü konveyör, operatör veya iş hücresinin bir diğer robotundan devraldığı (2) noktalar olarak düşünülebilir (Şekil 4.1).

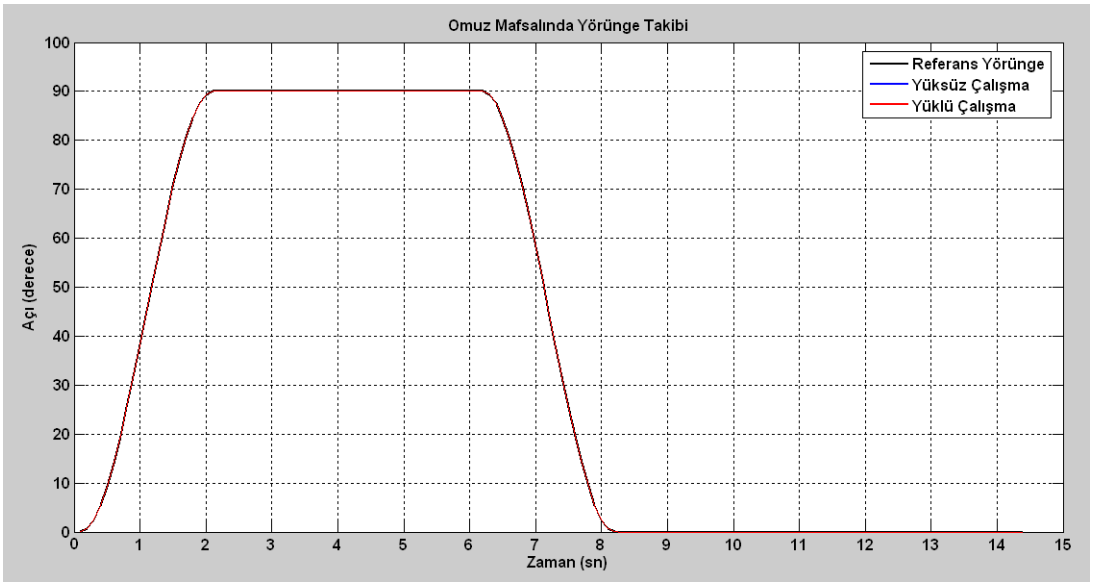


Şekil 4.1: Kritik konumlar.

Daha önce belirtildiği üzere robot yörüngeleri mafsal uzayında oluşturulmaktadır. Ters kinematik analizin ihtiyaç duyduğu uç eyleyici konum ve yönelim bilgilerinin kritik konumlarda tanımlanması yeterli olmaktadır. Mafsal yörünge algoritması mümkün olan en az sayıda mafsalın kullanılarak ve olası en ekonomik güzergahın tespit edilerek en uygun mafsal yörüngelerinin oluşturulmasını sağlar.

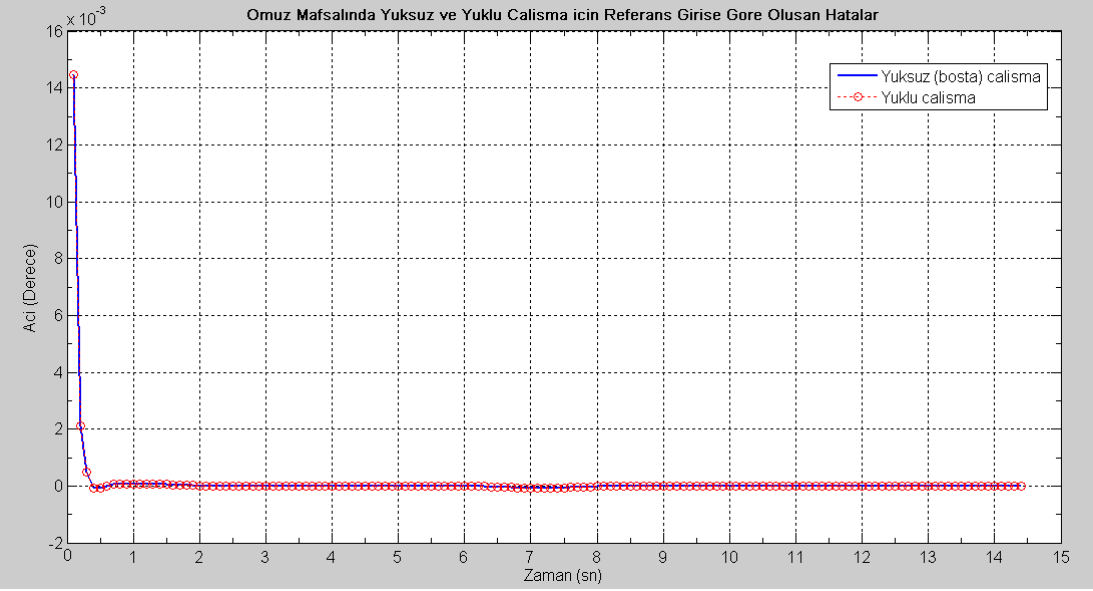
Mafsal yörüngeleri önceki bölümlerde aktarıldığı üzere hız ve konumun denetlendiği iki kademeli denetleyiciler ile takip edilmektedir. Bu denetleyicilerin tasarımları her mafsal için ayrı olmak üzere öncelikle transfer fonksiyon yaklaşımı ile MATLAB üzerinde ardından Simulink Denetim Tasarımı (*Simulink Control Design*) yazılımı ile doğrudan doğruya model esaslı olarak gerçekleştirilmiştir.

MATLAB üzerinde transfer fonksiyonları SISO araçları yöneticisinde (*SISO Tools Manager*) üzerinde gerçekleştirilen denetim tasarımları model esaslı denetleyici tasarımının temelini oluşturur. İkinci seviye denetim tasarımı esas olarak 'denetim eniyilemesi' olarak değerlendirilmektedir (www.mathworks.com/help/toolbox/control/ 2011).

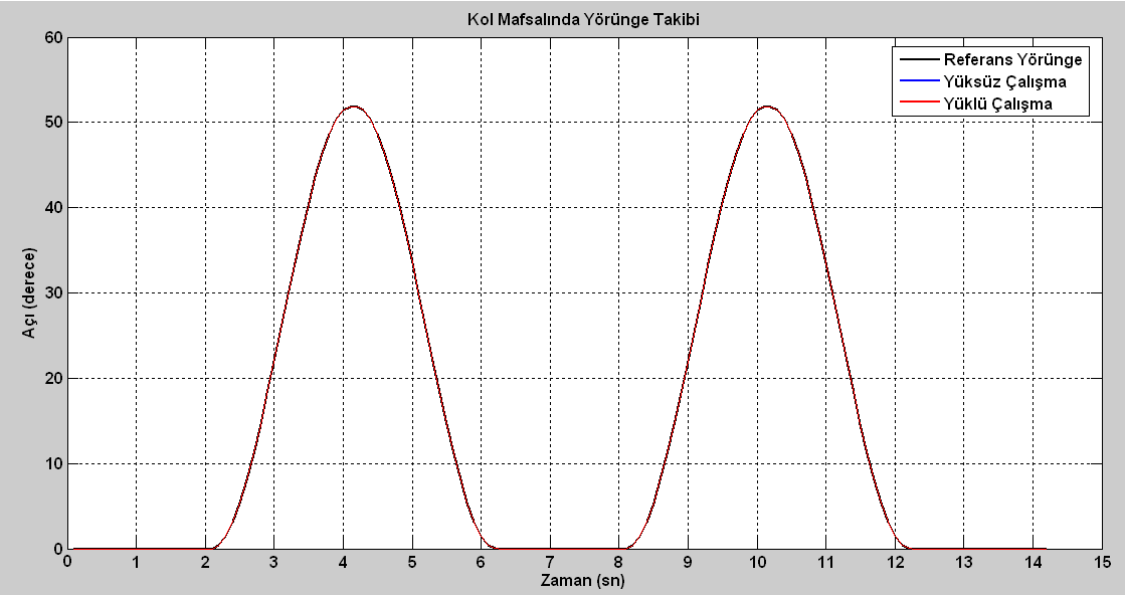


Şekil 4.2: Omuz mafsalı; yüklü ve yüksüz çalışma hali

Omuz mafsalında referans yörünge esas alınarak yüksüz (boşta) ve yüklü çalışma halinde elde edilen açısal konum/zaman diyagramı Şekil 4.2'de sunulmaktadır. Bu diyagramdan daha detaylı bir hata dökümü iki çalışma hali arasındaki fark esas alınarak oluşturulur. Şekil 4.3'e göre mevcut denetim alt yapısında en yüksek hata mafsalın harekete başlama anında ve $-14{,}5x10^{-3}$ ° civarında gerçekleşir. Ardından açısal hata hızla azalarak ihmal edilecek mertebeye geriler.

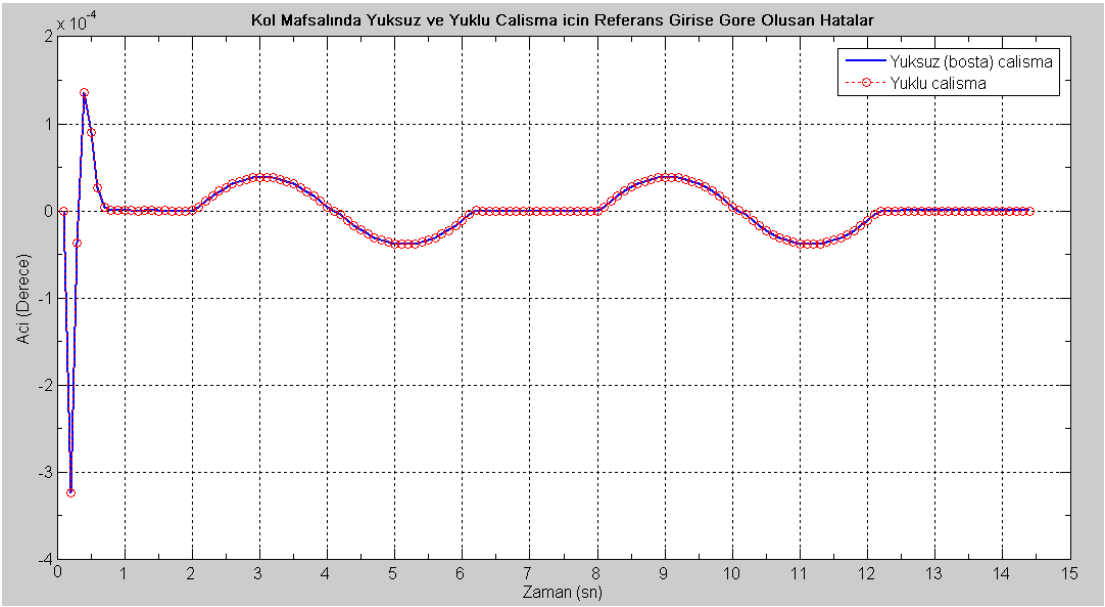


Şekil 4.3: Referans girişe göre omuz mafsal hatası.

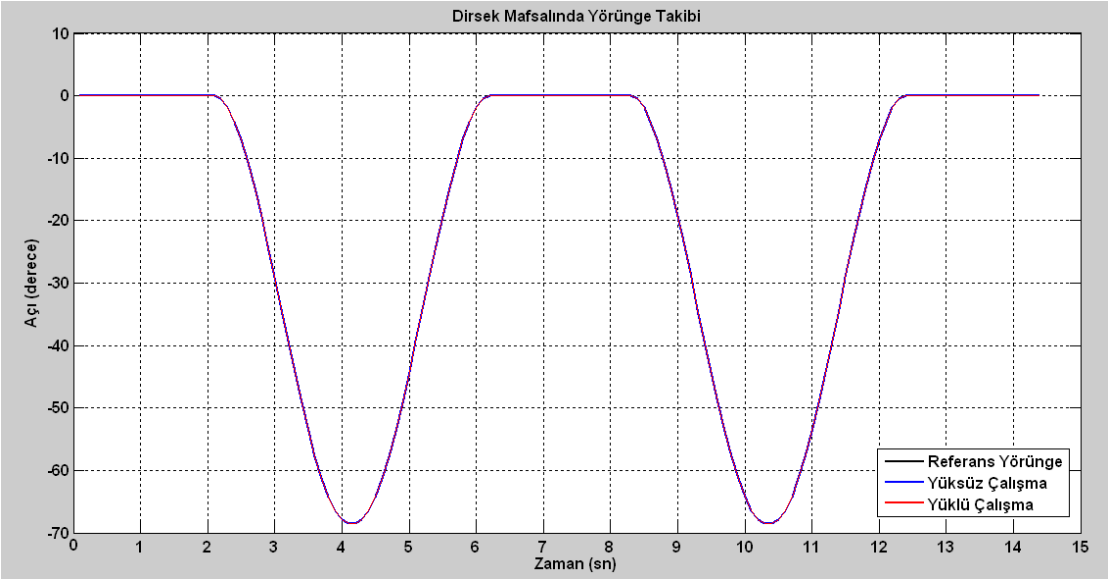


Şekil 4.4: Kol mafsalı; yüklü ve yüksüz çalışma hali

Bu çalışma kapsamında dinamik modeli ve denetleyici tasarımı detaylı biçimde anlatılan kol mafsalına ait yörünge takip başarımı Şekil 4.4'de görülmektedir. Kol mafsalında gözlene en yüksek hata miktarı başlangıç anındaki $3{,}3x10^{-4}$ derecelik hatadır. Mafsal denetleyicisi bu hatayı ortadan kaldırır. Aynı şekilde yön değiştirme anlarında gerçekleşen açısal hatalar hızla azaltılır (Şekil 4.5).

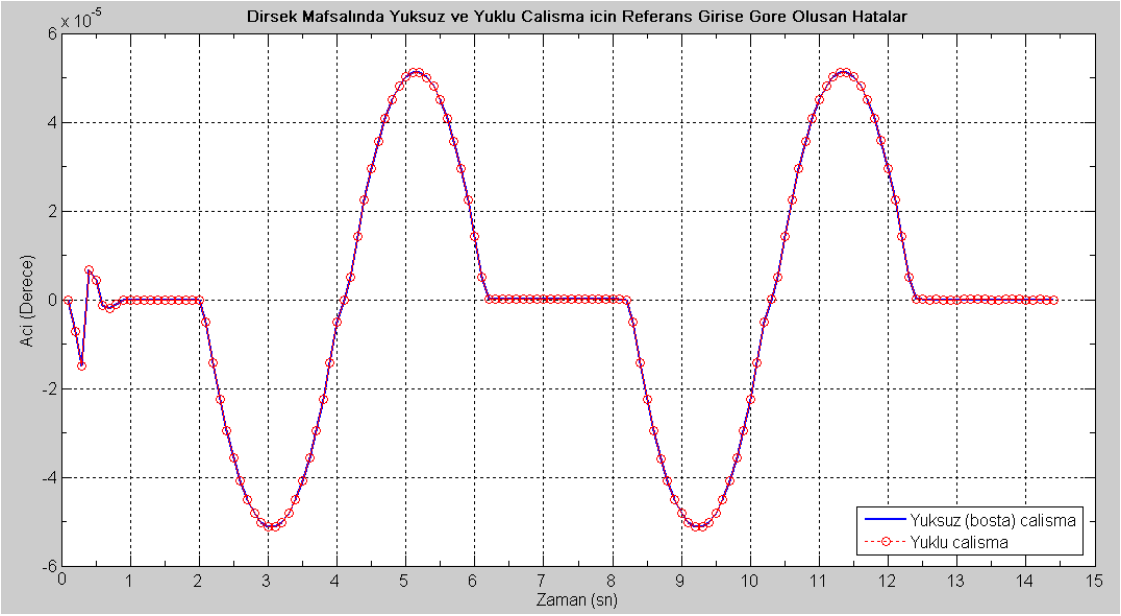


Şekil 4.5: Kol mafsalında meydana gelen hata

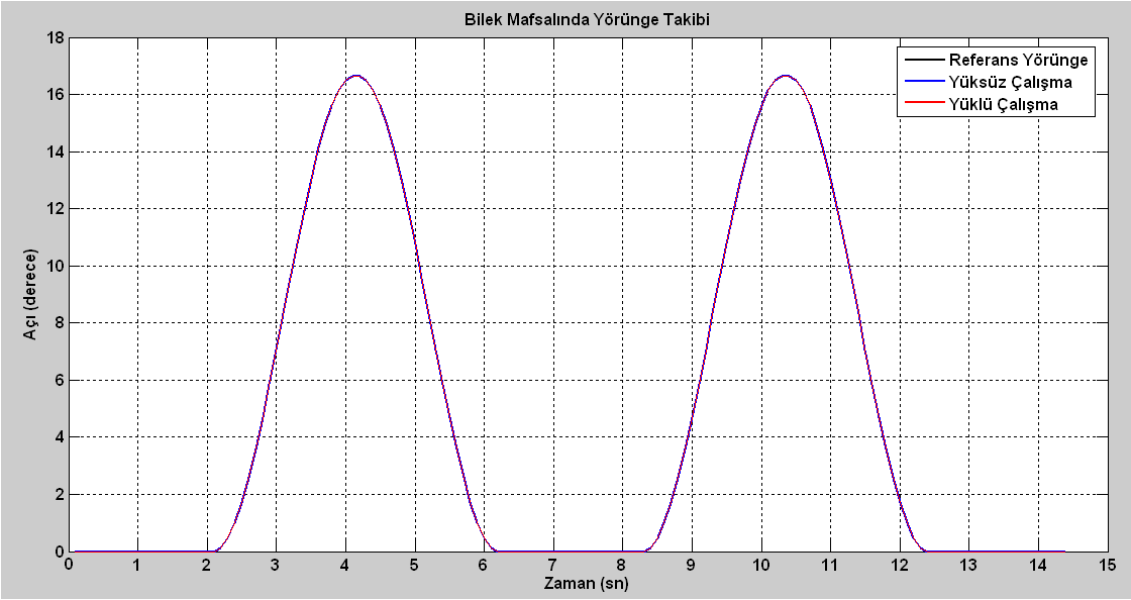


Şekil 4.6: Dirsek mafsalı; yüklü ve yüksüz çalışma hali.

Dirsek mafsalında referans yörünge sinyalinin takibi Şekil 4.6'da görülmektedir. Dirsek mafsalında kritik konumlarda ($4{\sim}6sn\ ve\ 10{\sim}12sn$) ortaya çıkan hatalar $5x10^{-5}$ derece düzeyindedir. Bu hatalar denetim algoritması tarafından ortadan kaldırılmaktadır (Şekil 4.7).

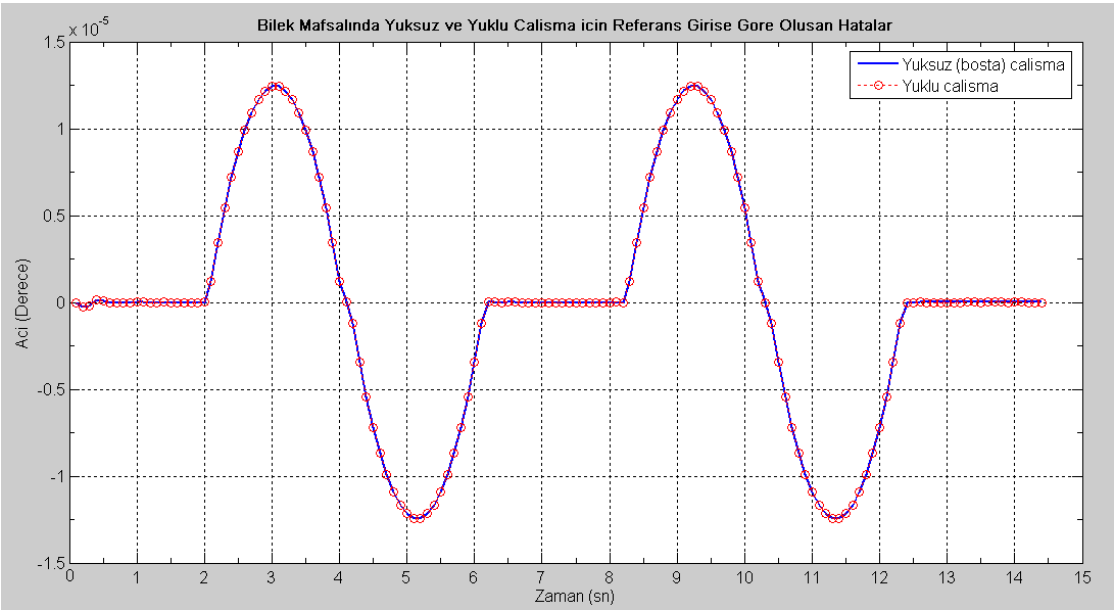


Şekil 4.7: Dirsek mafsalında meydana gelen hata



Şekil 4.8: Bilek mafsalı; yüklü ve yüksüz çalışma hali.

Bilek, önkol ve uç eyleyici mafsallarında yüksek hassasiyetli BTD serisi motorlar kullanılmıştır. Robotun tutmakta olduğu parça veya aparatın uzaydaki *yönelimini* belirleyen bu üç mafsalda yüksek dinamik nitelikler ikinci plandadır. Her ne kadar önkol ve uç eyleyici mafsallarına yörüngeler atanmamış olsa da bilek mafsalının yörünge takip başarımı diğer iki mafsalı temsil etmektedir. Bilek mafsalının davranışı Şekil 4.8'de sunulmaktadır. Meydana gelen hata $1{,}26x10^{-5}$ derece mertebesindedir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9: Bilek mafsalında oluşan hata

Mafsal cevap dökümlerinden elde edilebilecek bazı sonuçlar şunlardır:

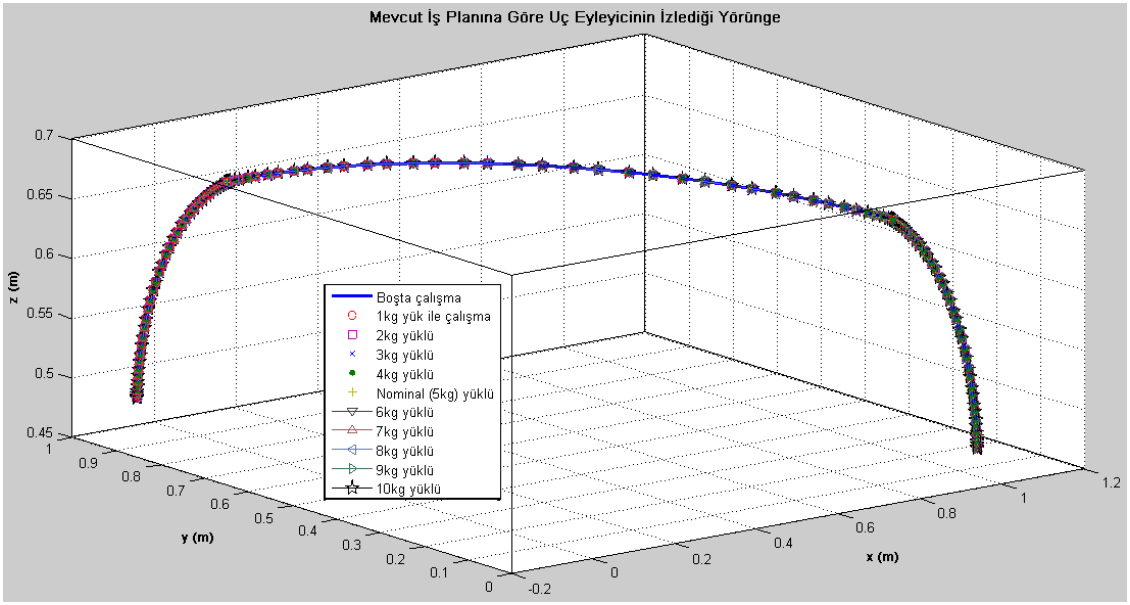
- Mafsal tasarımlarına göre nominal kabul edilen yükün etkisi altındaki sistem yüksüz çalışma durumundan büyük sapmalar göstermemektedir. Her iki çalışma halinde de kritik konumlardaki açısal hatalar hemen hemen aynı mertebededir.
- Denetleyici tasarımlarından kaynaklanan sebeplerle özellikle dirsek ve bilek mafsallarında yüklü ve boşta çalışma halinde gecikmeler meydana gelmektedir. Bu durum kayda değer hatalara sebebiyet vermemekle birlikte sistem genel başarımının artırılması amacıyla tasarımlarda iyileştirmeye gidilebilir.
- Konumun oransal artı türev, hızın oransal artı integral etkiyle denetlendiği iki katlı denetim anlayışında kritik konumlarda ve genel yörünge takibinde elde edilen hassasiyet dikkat çekici biçimde yüksektir. Bu uygulama robot denetiminde karmaşık denetleyici yapılarının getirilerinin örneklenmesi görevini üstlenmiştir.

4.2. Konumlama Hassasiyetleri

Bu çalışmada robot uç eyleyicisinin genel konumlama hassasiyeti boşta çalışmadan nominal yük değerinin iki katına denk gelen 10kg'lık harici yük etkisinde çalışmaya kadar olan yelpazede değerlendirilmiştir. Robot boşta çalışırken dahi etkisi altında olduğu dinamik yükler sebebiyle belirli bir konumlama hatası ortaya çıkabilir. Bu hatanın ihmal edilecek düzeye veya ideal durumda sıfıra indirgenmesi ayrık mafsal denetleyici altyapısının görevidir.

Konumlama hassasiyetinin kritik noktalar için belirlenmesinden önce robotun genel yörünge takip becerisi hakkında bir fikir vermek yerinde olacaktır. Tasarım kıstası olan 5kg kütleli harici yükün iki katına kadar olan yüklemelerde dahi robot çalışma kararlılığını sürdürür. Robotun genel yörünge takibi Şekil 4.10'da görülmektedir.

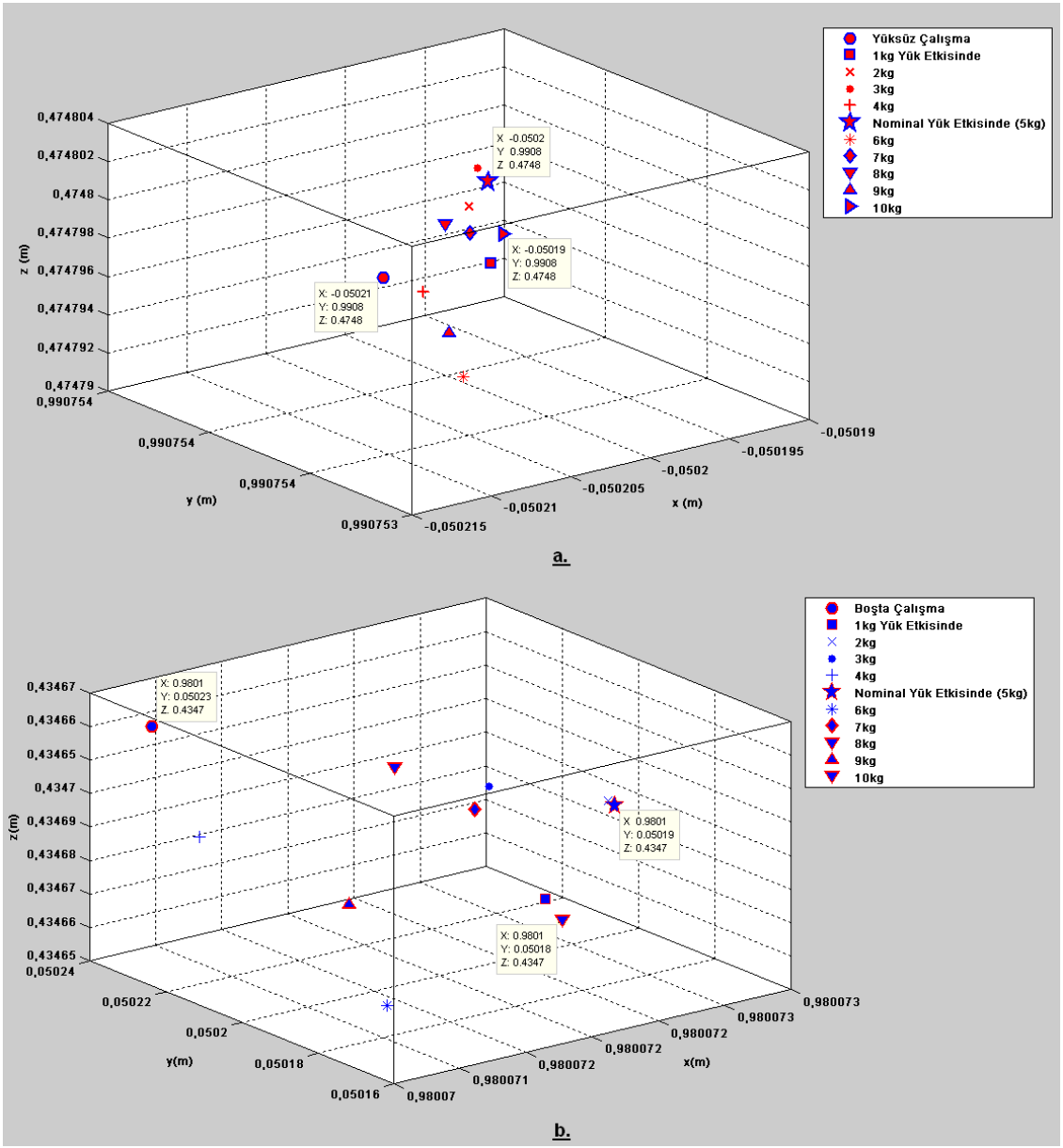
Şekil 4.10 başarılı bir konum denetimi yaklaşımıyla çalışıldığını göstermektedir. Robotun kritik noktalara konumlanmadaki kabiliyeti ise gerçekleştirilen denetim optimizasyonunun ne derece başarılı olduğuna dair bir fikir vermektedir.



Şekil 4.10: Yüklere göre uç eyleyicinin çizdiği yörünge

Robotun planlanan hareketi kritik konumlar ve bu konumlardaki yönelimler gözetilerek çalıştırılan ters kinematik analiz algoritmasının sonuçları doğrultusunda gerçekleştirilir. Bu çalışma yapısında robot harekete geçmeden önce bilinen bir uç eyleyici yörüngesi mevcut değildir. Dolayısıyla Şekil 4.10 farklı harici yüklerin etkisi altında iken robotun kararlı çalışma yapısını koruduğu dışında bir bilgi sunmaz. Tasarımın bu yöndeki başarımının belirlenmesi ancak bazı kritik konumlarda gerçekleştirilecek gözlemler sonucunda elde edilir.

Şekil 4.11a ve b'de Mevcut iş planına ait kritik noktalarda robot uç eyleyicisinin koordinatları görülmektedir. Bu konumların oluşturduğu dağılım robotun tekrarlayabilirliği hakkında da bir fikir verir. Bir tanım olarak tekrarlayabilirlik robotun çalışması esnasında elde edilen ve başarılı olarak değerlendirilen konum verilerinin birbirlerine yakınlığı olarak ifade edilir. (Ludwick 2005). Sadece robotik çalışmalarda değil genel makine tasarımında tekrarlayabilirlik kabiliyetinin mümkün olduğunca yüksek olması istenir.



Şekil 4.11: Birinci (a) ve ikinci (b) kritik noktada konumlama hassasiyetleri ve yüke bağlı tekrarlayabilirlik

Şekil 4.11a ve b, gerçeklenen tüm sonuçları içerisine alan en küçük hacimleri temsil etmektedir. Bu açıdan bakıldığında ayrık mafsal denetim altyapısının yüke bağlı olarak iyi bir tekrarlayabilirlik sunduğu söylenebilir.

Kritik noktalarda konumlama hassasiyeti robotun yüksüz çalışması ile nominal yük etkisi altındaki çalışması sırasında konumlandığı koordinatlar arasındaki farklardan yola çıkılarak tarif edilmiştir. Bu hesaplama yukarıda aktarıldığı üzere iş yörüngesinin her noktasına ayrı ayrı uygulanabilecek olsa da kritik noktalar genel çalışma hassasiyetini en iyi temsil eden konumlar olma özelliklerini korur.

Kritik konumlarda elde edilen koordinatlar ve konumlama hataları şu şekildedir:

1.Kritik Konum:

$$x_{hata} = x_{boşta} - x_{yükte} = -0.05021444 - (-0.05019531) = -1.91\text{x}10^{-5}\ \text{m}$$

$$y_{hata} = y_{boşta} - y_{yükte} = 0.99075319 - 0.99075416 = -9{,}8\text{x}10^{-7}\ \text{m}$$

$$z_{hata} = z_{boşta} - z_{yükte} = 0.47480142 - 0.47479850 = 2{,}91\text{x}10^{-6}\ \text{m}$$

2.Kritik Konum:

$$x_{hata} = x_{boşta} - x_{yükte} = 0.98007079 - 0.98007298 = -2{,}2\text{x}10^{-6}\ \text{m}$$

$$y_{hata} = y_{boşta} - y_{yükte} = 0.05023355 - 0.05018816 = 4{,}54\text{x}10^{-5}\ \text{m}$$

$$z_{hata} = z_{boşta} - z_{yükte} = 0.43469009 - 0.43467841 = 1{,}17\text{x}10^{-5}\ \text{m}$$

Mevcut modeller ve denetleyici optimizasyonları doğrultusunda robot uç eyleyicisinin kritik noktalarda konumlama hassasiyeti ortalama $1{,}37\text{x}10^{-5}$ m olarak elde edilmiştir. Bu değer üreticinin TX90 serisi antropomorfik robotlar için belirlemiş olduğu çalışma hassasiyeti değerini geride bırakmıştır ($yaklaşık\ 0{,}00004m$, http://www.staubli.com). Bu sonuç çalışmada yapılan kabuller (küçük açısal değerler için trigonometrik ifadelerin sadeleştirilmesi, doğrusallaştırılan sistemde denetim optimizasyonu vs.) sebebiyle elde edilmiş bir sonuç olup robot dinamiği ve denetim optimizasyonunun gerçek sistemi bire bir taklit edecek şekilde yapılandırılmasıyla bu başarımın gerilemesi beklenir.

5. SONUÇ

Gerçekleştirilmiş olan çalışmada esinlenme yoluyla tasarlanan bir model yerine STAUBLİ Robotics tarafından üretilen TX90 model altı serbestlik dereceli, altı döner mafsal ile hareketi sağlanan insansı kol yapılı robota ait CAD verilerinden yola çıkılmıştır. Çalışmanın özünde bu yapıdaki bir mekatronik sistemin her aşamasıyla modellenmesi, programlanması ve hareketinin denetlenmesi amacı bulunur. Bu çalışma fiziksel sistem üzerinde değil tamamen bilgisayar ortamında ve ilgili paket programların kullanılmasıyla ilerletilmiştir.

Robot kinematiğinin tanımlanmasında öncelikle ileri kinematik analiz üzerine geliştirilmiş olan Denavit-Hartenberg yönteminden yararlanılmıştır. Denavit-Hartenberg yöntemi ile uzuvlar ve eklemler arasındaki ilişkiler matematiksel biçimde ifade edilir. İleri kinematik ile ilgili bağlamların hazırlanmasının ardından robotun hareketi sırasında uğramış olduğu kritik (asal) noktalara göre mafsal açılarının alacağı en uygun değerlerin belirlenmesi işlemi gelir. Burada ters kinematik yaklaşımı kullanılır. Mafsallar için geçerli olan, matematiksel ve fiziksel açıdan mümkün ve en uygun açı seçeneklerinin bulunması ve geliştirilmesi için çalışma içerisinde bir algoritma önerilmiştir. Ters kinematiğin verileri robot mafsallarının referans yörüngelerini temsil etmiştir.

Robot dinamiğinin tanımlanması ve modellenmesi çalışmanın kilit aşamalarından birini teşkil etmektedir. Dinamik çerçevenin hazırlanmasında Lagrange-Euler denklemine başvurulmuştur. Lagrange-Euler denklemi robotik çalışmalarda genel geçer halini almış bir yaklaşımdır. Ancak Simulink ortamında modelleme sırasında yüksek serbestlik dereceli olan sistemde son derece karışık bir yapıya kavuşan tork denklemlerinin birtakım kabuller altında sadeleştirilerek modelleme işleminin gerçekleştirilmesi gerekmiştir.

Çalışmada ayrık mafsal denetimi yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımda ters kinematik analiz ile oluşturulan ve bir bütün olarak gerçekleştirilecek iş planı için mafsal yörüngelerini tayin eden bir yörünge algoritması önerilmiştir. Bu yaklaşım bağımsız denetimi kapsayacak (izleyecek) şekilde çalışır. Mafsalların verilen bu bütünlüğe ayrı ayrı uyarak iş planını gerçekleştirmelerini sağlar.

Robot dinamiğinin tam anlamıyla temsili Simulink/Simmechanics karma ortamının getirdiği imkanlar ile sağlanmıştır. CAD verilerinin MATLAB ortamına transferi ve bu verilerin gövde bloklarına atanmaları işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada denetleyici tasarım ve optimizasyon işlemleri MATLAB ortamında sunulan Simulink Denetim Tasarımı araç kutusu yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan modellerden ilki olan Simulink modelinde denetleyici tasarımı ve hassas ayarları Bode diyagramları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İkinci modelleme yaklaşımı ile oluşturulan Simulink/Simmechanics karma modelinde ise araç kutusu tarafından kullanıcıya sunulan otomatik denetleyici optimizasyonu seçeneği tercih edilmiştir. Simulink Denetim Tasarımı araç kutusu ile gerçekleştirilen denetleyici optimizasyonları gerek Simulink gerekse Simulink/Simmechanics karma modellerinde yüksek hassasiyet ve performans değerlerine ulaşmıştır.

Bu çalışmada sistemin modellenmesi sırasında çoğunlukla doğrudan transfer fonksiyon formları kullanılmıştır. Elektriksel sinyaller de gerçek fiziksel işleyişlerine göre değil bu formlar doğrultusunda üretilmekte ve iletilmektedir. Simmechanics kütüphanesinin de bağlı olduğu *Simscape* yazılımına ait elementlerin kullanılmasıyla gerek elektriksel gerekse mekanik kısımlar daha basit bileşenler (direnç, indüktans, dönel sönümleyici, motor ataleti vs.) seviyesinde modellenebilir. Ayrıca PMSM yapılarında kullanılan 'D-Eksen Eşdeğer Devreleri' terk edilerek gerçek anlamda sinüzoidal PWM mekanizması ile indüklenen ve tüm sinyal akışı sinüzoidal yapılı olarak modellenen motorlar kullanılabilir. Bu motorlar hazır olarak MATLAB kütüphanelerinden çalışmaya adapte edilebileceği gibi tamamen programcı tarafından da hazırlanabilir.

Bir sonuç olarak MATLAB paket programının mekanik modelleme ve benzetim konusundaki gücünü artıran Simmechanics ortamı sadece robotikte değil mekatronik disiplininin uzandığı her alanda kendisine kullanım şansı bulmaktadır.

Robotik bilimi üzerine gerçekleştirilen çalışmaların niceliği bir çığ gibi büyümektedir. Şüphesiz bu eğilimin en önemli etkenlerinden biri robotik biliminin endüstriyi doğrudan ilgilendiren açılımlara sahip olmasıdır. İnsan için risk ve tehlike arz eden veya insan algılama ve eyleme sınırlarının dışında kalan görevlerde robotlar büyük bir kararlılık ve verim göstermektedir.

KAYNAKLAR

Abedinpour, S., Shenai, K. 2007. Insulated Gate Bipolar Transistor: Power Electronics Handbook, Second Edition: Devices, Circuits and Applications, Editor(s): Rashid, M. H., Elsevier Inc., Ch. 5.

Arroyo, E. L. C. 2006. Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System. *M.Sc. Thesis,*University of Puerto-Rico Graduate School of Natural Sciences, Electrical Engineering, Brasil.

Asada, H., Slotine, J.J.E. 1986. Robot Analysis and Control. Wiley and Sons, Inc. USA, 269p.

Bingül, Z., Küçük, S. 2008. Robot Dinamiği ve Kontrolü. Birsen Yayınevi, İstanbul, 424s.

Bingül, Z., Küçük, S. 2009. Robot Kinematiği. Birsen Yayınevi, İstanbul, 348s.

Denavit, J., Hartenberg, R. S. 1955. A Kinematic Notation for Lower Pair Mechanisms. Applied Mechanics, 22:215-221.

Dung, L.T., Kang, H., Ro, Y. 2010. Robot Manipulator Modeling in Matlab-Simmechanics with PD Control and Online Gravity Compensation. IFOST 2010 Proceedings.

Espinoza, J.R., 2007. Inverters: Power Electronics Handbook, Second Edition: Devices, Circuits and Applications, Editor(s): Rashid, M. H., Elsevier Inc., Ch 15.

Falcon, J. S. 2005. Sensors and Actuators: Robotics and Automation Handbook, Editor(s): Kurfess, T. R., CRC Press, Ch. 12.

Halasz, S. 2002. Servo Drives: The Power Electronics Handbook, Editor(s): Skvarenina, T. L., CRC Press, Ch 15.

Hsia, S., Lasky, A., Guo, Z. 1991. Robust Independent Joint Controller Design for Industrial Robot Manipulators. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 38(1): 21-25.

Ludwick, S. 2005. Presicion Positioning of Rotary and Linear Systems: Robotics and Automation Handbook, Editor(s): Kurfess, T. R., CRC Press, Ch 13.

Rahman, M. F., Patterson, D., Cheok, A., Betz, R. 2007. Motor Drives: Power Electronics Handbook, Second Edition: Devices, Circuits and Applications, Editor(s): Rashid, M. H., Elsevier Inc., Ch 33.

Shakweh, Y. 2007. Drives Types and Spesifications: Power Electronics Handbook, Second Edition: Devices, Circuits and Applications, Editor(s): Rashid, M. H., Elsevier Inc., Ch 32.

Söylemez, E. 2000. Mekanizma Tekniği. Prestij Ajans Matbaacılık, Ankara, 434s.

Spong, M.W., Hutchinson, S., Vidyasagar, M. 2006. Robot Modeling and Control. John Wiley&Sons, Inc., New Jersey,USA, 420p.

Toprak, T. 1998. Mekanik Titreşimler. Birsen Yayınevi, İstanbul, 319s.

Turgut, M. 2008. CATIA ile İmalat ve Analiz. Seçkin Yayınevi, Ankara, 584s.

Uicker, J.J., Pennock, G.R., Shigley, J.E. 2003. Theory of Machines and Mechanisms. Oxford University Press, New York, USA, 740p.

Vatansever, F. 2007. Algoritma Geliştirme ve Programlamaya Giriş. Seçkin Yayıncılık, Ankara, 424s.

Yüksel, İ. 2009. Otomatik Kontrol: Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 402s.

Anonim 2007. 6 Axis Industrial Robot TX-90 Product Leaflet. http://www.STAUBLİ.com/tr/robotics/products/6-axis-scara-industrial-robot/medium-payload-6-axis-robot/6-axis-industrial-robot-tx90/ (Son Erişim Tarihi: 03.06.2011)

Anonim 2011. Bonfiglioli VECTRON Synchronous Motors Sales Catalogue. http://www.bonfiglioli.it/pdf/bc/bc0007/bc.pdf

Anonim 2011. Symbolic Math Toolbox 5 User's Guide. http://www.mathworks.com/help/toolbox/symbolic/ (Son Erişim Tarihi: 03.06.2011)

Anonim 2011. Sim Power Systems Toolbox User's Guide. http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/powersys/ (Son Erişim Tarihi: 31.07.2011)

Anonim 2011. Control System Toolbox 9 User's Guide. http://www.mathworks.com/help/toolbox/control/control_product_page.html (Son Erişim Tarihi: 03.06.2010).

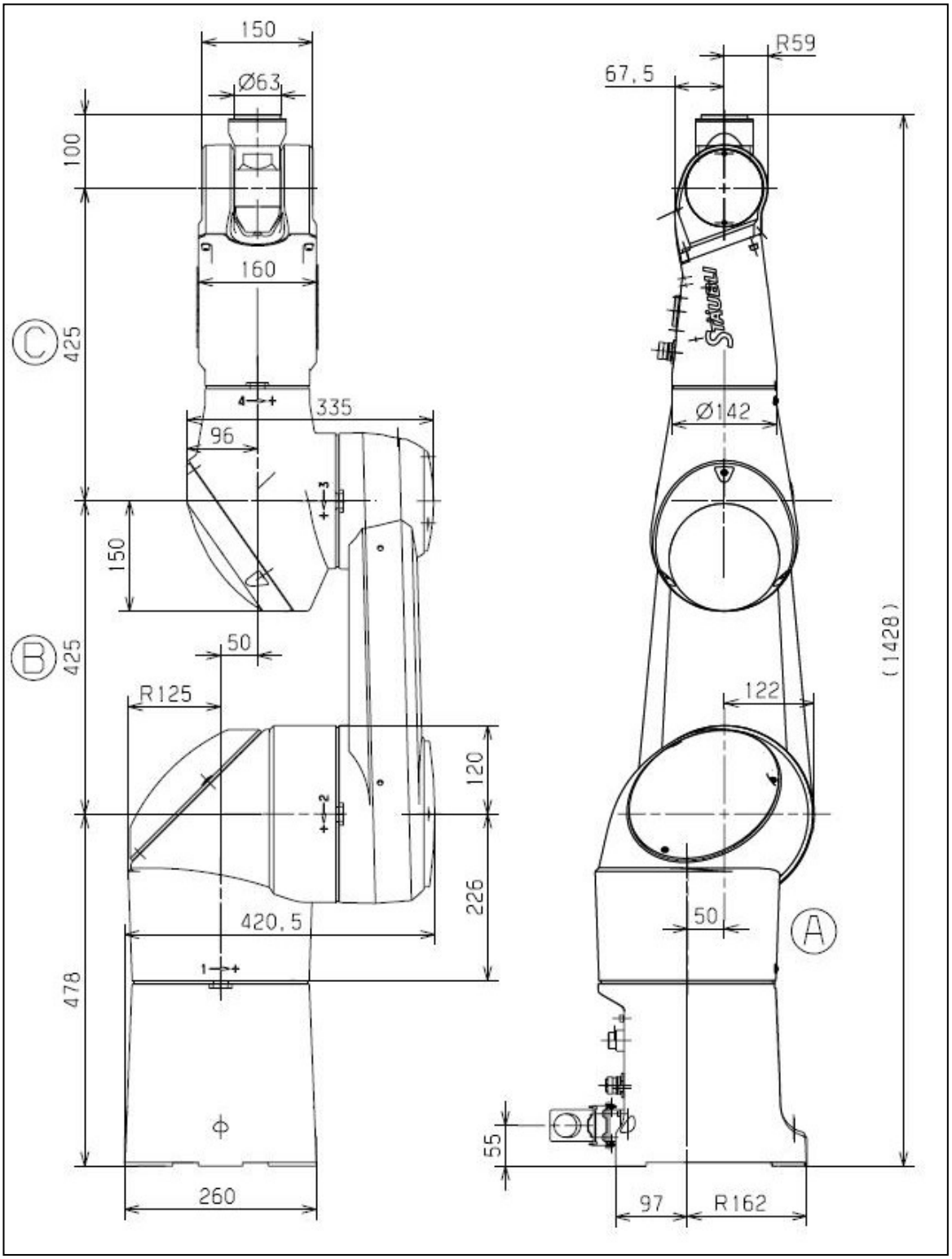
Anonim 2011. SimMechanics 3 User's Guide. http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/mech/ (Son Erişim Tarihi: 03.06.2011).

Anonim 2011. 1973: The First KUKA Robot: FAMULUS. http://www.kuka-robotics.com/en/company/group/milestones/1973.htm (Son Erişim Tarihi: 04.06.2011).

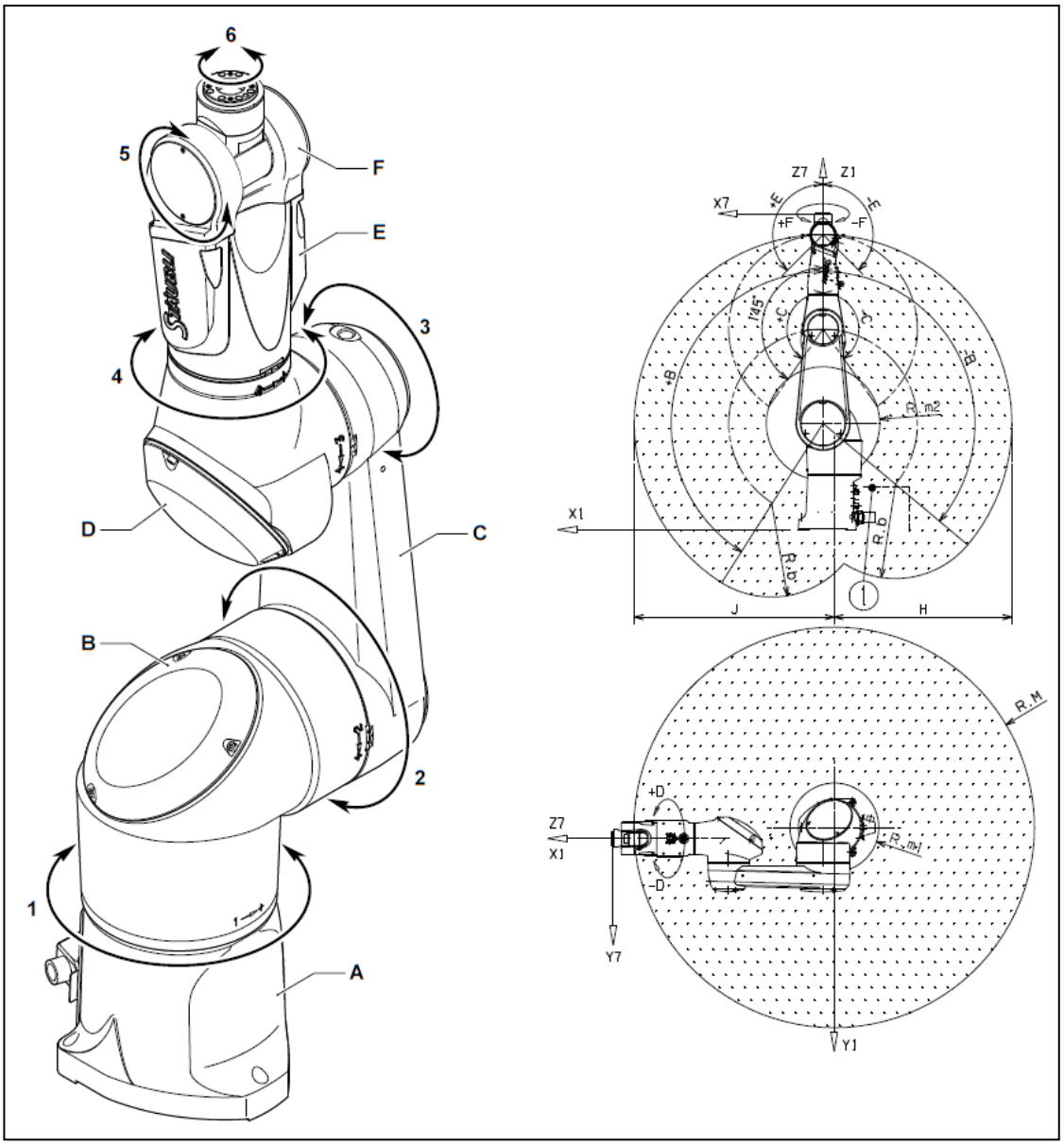
Anonim 2011. Industrial Robot Integration – Available Applications. http://www.robots.com/applications.php (Son Erişim Tarihi: 04.06.2011).

EKLER

EK-1: Çalışmada Kullanılan Robota Ait Teknik Veriler



Robota ait ölçüler



TX90 Mafsal dönüş yönleri ve çalışma uzayı

Çalışmada başvurulan teknik özellikler (www.staubli.com/en/robotics)

ROBOT KARAKTERİSTİKLERİ (STAUBLI ROBOTICS TX90)		
En yüksek yükleme		20kg
En uygun yükleme		7kg
Erişim		1000mm
Serbestlik Derecesi		6
Çalışma Hassasiyeti - ISO 9283		0.03mm
Uzuv Ağırlıkları	1. Uzuv: Omuz	16,935kg
	2. Uzuv: Kol	12,980kg
	3. Uzuv: Dirsek	7,502kg
	4. Uzuv: Önkol	4,540kg
	5. Uzuv: Bilek	0,569kg
	6. Uzuv: Tutucu	0,031kg
Mafsal Hareket Sığaları	1. Mafsal: Omuz	±180º
	2. Mafsal: Kol	+147,5º / -130º
	3. Mafsal: Dirsek	±145º
	4. Mafsal: Önkol	±270º
	5. Mafsal: Bilek	+140º / -115º
	6. Mafsal: Tutucu	±270º
Ulaşılan En Yüksek Mafsal Hızları	Omuz	400º/s
	Kol	400º/s
	Dirsek	430º/s
	Önkol	540º/s
	Bilek	475º/s
	Tutucu	760º/s
Tutucu Uç Noktasında Ulaşılan En Yüksek Hız		10,42m/s
En Yüksek Atalet Momentleri	5. Eksen	1,5kgm²
	6. Eksen	0,25kgm²
Toplam Ağırlık		111kg
Frenler		Tüm Mafsallar

EK-2: Çalışmada Kullanılan Servo Motorlar

Omuz ve Kol Mafsalları: <u>Bonfiglioli Vectron BCR8 1150 20 400</u>

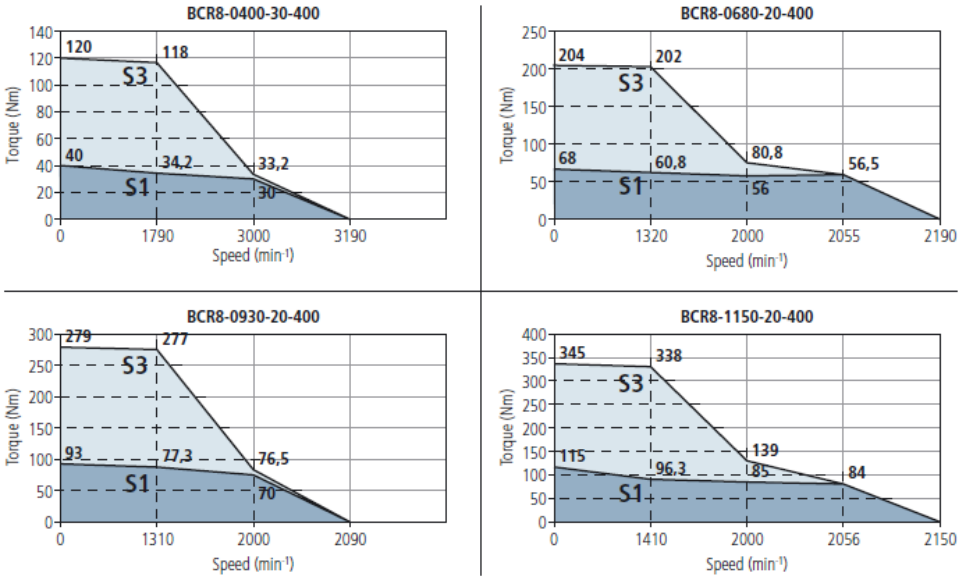
BONFIGLIOLI VECTRON

BCR8 400V

Motor		BCR8-0400-30-400	BCR8-0680-20-400	BCR8-0930-20-400	BCR8-1150-20-400
Stall torque	M_o [Nm]	40	68	93	115
Rated speed	n_n [min^{-1}]	3000	2000	2000	2000
Inverter DC-bus	V_{dc} [V]	560	560	560	560
Rated AC motor voltage	V_n [V]	350	350	350	350
Motor poles number	p_{mot}	6	6	6	6
Resolver poles number	p_{res}	2	2	2	2
Rated torque	M_n [Nm]	30.0	56.0	70.0	85.0
Rated AC current	I_n [A]	17.8	22.0	25.3	32.4
Stall AC current	I_o [A]	21.8	25.4	33.1	42.1
Torque peak	M_{max} [Nm]	120	204	279	345
Current peak	I_{max} [A]	85	99	129	164
EMF constant	K_E [V/1000min^{-1}]	111	162	170	165
Torque constant	K_T [Nm/A]	1.84	2.7	2.8	2.7
Rated power	P_n [W]	9420	11730	14660	17800
Phase to phase stator resistance	R_{pp} [Ω]	0.25	0.24	0.15	0.11
Phase to phase stator inductance	L_{pp} [mH]	5.7	6.3	4.8	3.4
Rotor inertia	J_m [kgcm^2]	76	114	153	190
Electrical time constant	τ_{el} [ms]	23	26	32	31
Thermal time constant	τ_{th} [min]	47	65	79	90
Mechanical time constant	τ_{mec} [ms]	1.0	0.7	0.5	0.5
Weight without brake	m_M [kg]	41	56	73	89
Weight with brake	m_{MF} [kg]	50.5	65.5	92.5	98.5

All motor characteristics are referred to following conditions:
T_{amb} = 40 °C (ambient temperature)
ΔT = 105 °C (winding heating temperature)
S1 curve = for continuous duty
S3 curve = for intermittent duty

Torque-speed characteristic:
ambient temperature 40°C



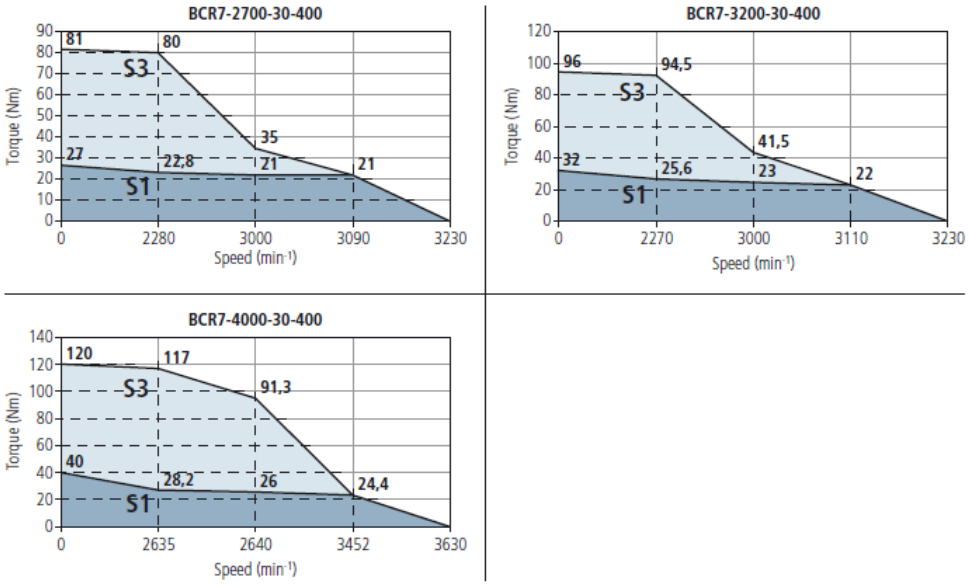
Dirsek Mafsalı: <u>Bonfiglioli Vectron BCR7 4000 30 400</u>

BCR7 400V

Motor		BCR7-2700-30-400	BCR7-3200-30-400	BCR7-4000-30-400
Stall torque	M_0 [Nm]	27	32	40
Rated speed	n_n [min^{-1}]	3000	3000	3000
Inverter DC-bus	V_{dc} [V]	560	560	560
Rated AC motor voltage	V_n [V]	330	330	330
Motor poles number	p_{mot}	6	6	6
Resolver poles number	p_{res}	2	2	2
Rated torque	M_n [Nm]	21.0	23.0	26.0
Rated AC current	I_n [A]	13.5	15.0	17.9
Stall AC current	I_0 [A]	16.0	19.0	24.7
Torque peak	M_{max} [Nm]	81.0	96.0	120.0
Current peak	I_{max} [A]	62	74	96
EMF constant	K_E [V/1000min^{-1}]	102	102	98
Torque constant	K_T [Nm/A]	1.69	1.69	1.62
Rated power	P_n [W]	6600	7160	8170
Phase to phase stator resistance	R_{pp} [Ω]	0.43	0.35	0.23
Phase to phase stator inductance	L_{pp} [mH]	4.4	3.8	2.7
Rotor inertia	J_m [kgcm^2]	36.1	39.0	45.5
Electrical time constant	τ_{el} [ms]	10.2	10.8	11.7
Thermal time constant	τ_{th} [min]	60	67	72
Mechanical time constant	τ_{mec} [ms]	0.9	0.8	0.7
Weight without brake	m_M [kg]	23.5	26.0	31.5
Weight with brake	m_{MF} [kg]	26.75	29.25	34.4

All motor characteristics are referred to following conditions:
T_{amb} = 40 °C (ambient temperature)
ΔT = 105 °C (winding heating temperature)
S1 curve = for continuous duty
S3 curve = for intermittent duty

Torque-speed characteristic:
ambient temperature 40°C



Önkol ve Bilek Mafsalları: Bonfiglioli Vectron BTD5 1160 30 400

BONFIGLIOLI VECTRON

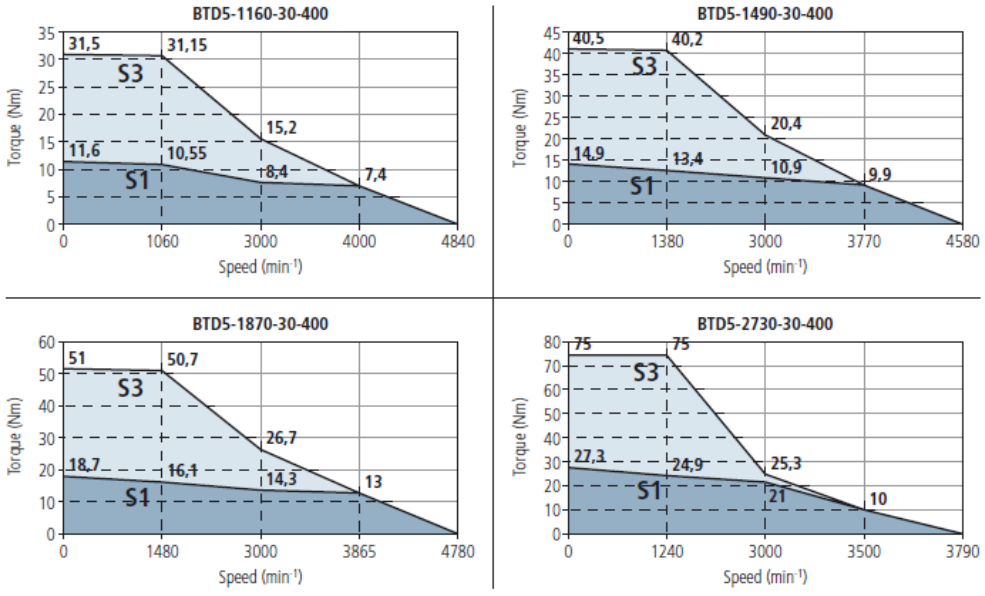
BTD5 400V

Motor		BTD5-1160-30-400	BTD5-1490-30-400	BTD5-1870-30-400	BTD5-2730-30-400
Stall torque	M_o [Nm]	11.6	14.9	18.7	27.3
Rated speed	n_n [min^{-1}]	3000	3000	3000	3000
Inverter DC-bus	V_{dc} [V]	560	560	560	560
Rated AC motor voltage	V_n [V]	330	330	330	330
Motor poles number	p_{mot}	10	10	10	10
Resolver poles number	p_{res}	2	2	2	2
Rated torque	M_n [Nm]	8.4	10.9	14.3	21
Rated AC current	I_n [A]	7.9	9.6	13.1	14.9
Stall AC current	I_o [A]	10.4	12.5	16.4	19
Torque peak	M_{max} [Nm]	32	41	51	75
Current peak	I_{max} [A]	49	49	61	68
EMF constant	K_E [V/1000min^{-1}]	68	72	69	87
Torque constant	K_T [Nm/A]	1.12	1.19	1.14	1.44
Rated power	P_n [W]	2640	3420	4490	6600
Phase to phase stator resistance	R_{pp} [Ω]	0.71	0.48	0.35	0.32
Phase to phase stator inductance	L_{pp} [mH]	11.4	8.5	6.4	6.8
Rotor inertia	J_m [kgcm^2]	6.8	8.3	11.0	15.3
Electrical time constant	τ_{el} [ms]	16.0	16.8	18.3	21
Thermal time constant	τ_{th} [min]	50	55	60	75
Mechanical time constant	τ_{mec} [ms]	0.7	0.5	0.5	0.4
Weight without brake	m_M [kg]	8.100	10.100	12.100	16.100
Weight with brake	m_{MF} [kg]	9.180	11.180	13.180	17.180

All motor characteristics are referred to following conditions:

T_{amb} = 40 °C (ambient temperature)
ΔT = 105 °C (winding heating temperature)
S1 curve = for continuous duty
S3 curve = for intermittent duty

Torque-speed characteristic:
ambient temperature 40°C



Uç Eyleyici Mafsalı: Bonfiglioli Vectron BTD3 0325 30 400

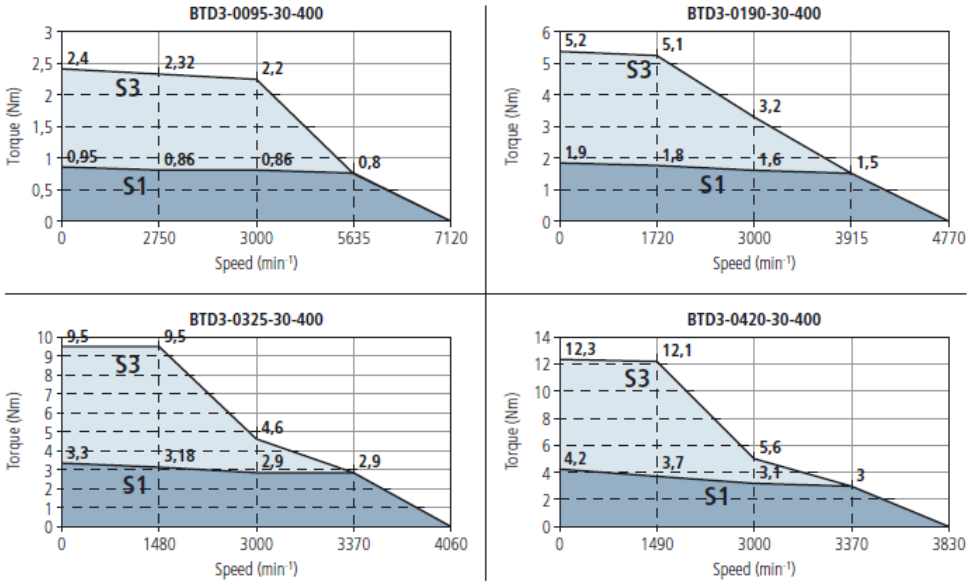
BTD3 400V

Motor		BTD3-0095-30-400	BTD3-0190-30-400	BTD3-0325-30-400	BTD3-0420-30-400
Stall torque	M_o [Nm]	0.95	1.9	3.25	4.2
Rated speed	n_n [min^{-1}]	3000	3000	3000	3000
Inverter DC-bus	V_{dc} [V]	560	560	560	560
Rated AC motor voltage	V_n [V]	330	330	330	330
Motor poles number	p_{mot}	10	10	10	10
Resolver poles number	p_{res}	2	2	2	2
Rated torque	M_n [Nm]	0.86	1.6	2.9	3.1
Rated AC current	I_n [A]	1.28	1.46	2.3	2.3
Stall AC current	I_o [A]	1.32	1.66	2.4	3
Torque peak	M_{max} [Nm]	2.4	5.2	9.5	12.3
Current peak	I_{max} [A]	4.9	6.7	10.6	12.9
EMF constant	K_E [V/1000min^{-1}]	43.5	69	81	86
Torque constant	K_T [Nm/A]	0.72	1.14	1.34	1.42
Rated power	P_n [W]	270	500	910	970
Phase to phase stator resistance	R_{pp} [Ω]	12.6	11.6	6.5	4.6
Phase to phase stator inductance	L_{pp} [mH]	38	42.3	30.6	26.1
Rotor inertia	J_m [kgcm^2]	0.5	0.7	1.1	1.5
Electrical time constant	τ_{el} [ms]	3	3.6	4.7	5.7
Thermal time constant	τ_{th} [min]	25	30	33	36
Mechanical time constant	τ_{mec} [ms]	2.1	1.1	0.7	0.6
Weight without brake	m_M [kg]	1.525	2.090	3.220	4.350
Weight with brake	m_{MF} [kg]	2.115	2.680	3.810	4.940

All motor characteristics are referred to following conditions:

T_{amb} = 40 °C (ambient temperature)
ΔT = 105 °C (winding heating temperature)
S1 curve = for continuous duty
S3 curve = for intermittent duty

Torque-speed characteristic:
ambient temperature 40°C



EK-3: Ters Kinematik Analiz ile Mafsal Yörüngelerini Oluşturan Program

Robot yörüngelerinin oluşturulmasında ters kinematik analiz verilerinin kullanıldığı üçüncü bölümde anlatılmıştı. Ters kinematik analiz açık kinematik zincirin belirli bir konumu için mekanizmanın sahip olduğu belirli kıstaslar çerçevesinde bir dizi çözüm üretir. Ancak robotik uygulamalarda sayıları birkaç düzineye ulaşan bu çözümlerin sadece birkaçı fiziksel olarak gerçeklenebilecek durumdadır. En uygun seçimin tercih edilmesi aşamaları yine üçüncü bölüm içerisinde aktarılmıştır.

Gerçekleştirilen çalışma sırasında hazırlanan ve her aşamada takip edilen iş planı karmaşık bir uygulama getirmemektedir. Dolayısıyla robot mafsallarının en uygun hareketleri algoritma halinde verilen eleme aşamalarına ihtiyaç duymadan belirlenebilmektedir. Aşağıda M-Dosya formunda, Matlab içerisinde yazılan mafsal yörünge programı aktarılmaktadır. Program içerisindeki açıklamalar olduğu gibi korunmuştur.

```
%--------- İNVERS KİNEMATİK ANALİZ YARDIMIYLA KONUM KONTROLÜ ---------
-
%Antropomorfik kol yapılı 'STAUBLİ Robotics TX-90' endüstriyel robotun
%altı mafsalından dördünün kullanıldığı bir iş planı hazırlanmıştır.
%Plana göre robot sıfır konumundan itibaren önce SHOULDER motoru
üzerinde
%90 derecelik bir dönüş yapmaktadır. Hesaplama yükünün azalması
yanısıra
%efektif güç kullanımının da sağlanması amacıyla bu aşamada diğer
%mafsallara yörünge denklemleri atanmaz.
%
%Hareketin ikinci safhasında robot, 2. 3. ve 5. mafsal değişkenlerini
%kullanarak ileri doğru uzanmaktadır. Bu hareketi esas olarak sağlayan
%ikinci ve üçüncü mafsalların açısal yer değiştirmeleri, Euler BİLEĞİ
%(küresel bilek) yaklaşımı doğrultusunda elde edilir. Son üç dönme
ekseninin
%kesiştiği noktanın koordinatları bulunur. Böylece 2. ve 3. mafsal
%değişkenleri, problemin tanımı gereği bilinenler hanesinde yer alan
uç
%eyleyiciye ait 3x3 oryantasyon matrisi yardımı ile geometrik olarak
çözülür.
%Uç eyleyici oryantasyonunun sabit kalması arzu edilmektedir. 4. ve 6.
%mafsalların hareketsiz olduğu iş planına göre bu sabitlik 5. mafsal
%değişkeni ile sağlanır.
%
%Sıralı gerçekleşen hareketlerin tipik bir PICK AND PLACE operasyonuna
ait
%oldukları farzedilmektedir. İlgili polinom denklemlerinin ve sıralı
%hareket tercihlerinin adapte edildiği yörüngeler, hedeflenen zaman
göz
%önünde bulundurularak derlenir.
%
%---------- ---------- ---------- ---------- ---------- ----------
```

```
r11=1;
r21=0;
a1=425;
a2=425;
a3=100;
ox=-50.2;
hedef_zaman=2;

zaman_theta1=0:0.1:14.3;
zaman_theta1=transpose(zaman_theta1);
zaman_theta2=0:0.1:14.1;
zaman_theta2=transpose(zaman_theta2);
zaman_theta3=0:0.1:14.3;
zaman_theta3=transpose(zaman_theta3);
zaman_theta5=0:0.1:14.3;
zaman_theta5=transpose(zaman_theta5);

sayac_1=0:0.1:2;
sayac_2=1:20;
sayac_3=1:20;
sayac_4=1:20;
sayac_5=1:20;
sayac_6=1:21;
sayac_7=1:18;

sayac_1=transpose(sayac_1);
sayac_2=transpose(sayac_2);
sayac_3=transpose(sayac_3);
sayac_4=transpose(sayac_4);
sayac_5=transpose(sayac_5);

oy=741.699+103.4005*sayac_1;
oz=203.557-101.7785*sayac_1;
omega=atan2(r21,r11);
ocy=oy-a3*cos(omega);
ocz=oz-a3*sin(omega);
ifade=(ocy.^2+ocz.^2-a1^2-a2^2)/(2*a1*a2);
theta1=45*sayac_1;
theta3=(atan2((1-ifade.^2).^0.5,ifade));
theta2=pi/2-(atan2(a2*sin(theta3),a1+a2*cos(theta3))+atan2(ocz,ocy));
theta5=pi/2-omega-(theta2+theta3);

theta2=180*theta2/pi;
theta3=180*theta3/pi;
theta5=180*theta5/pi;

%Robot 'theta1' mafsal değişkeninin alacağı değer aralığını, girilen
uç
%eyleyici başlangıç ve bitiş konumlarına göre sentezler.
%Not: Yörünge planlamaları ilgili bölümlerde yapılacaktır.
%-------------------- --------------------
%Theta1'e has ters kinematik analiz
zaman=0:0.1:2;
zaman=transpose(zaman);

s=1;
ox(s)=791.699;
oy(s)=50.2;
```

```
oz(s)=203.557;
r(s)=(ox(s)^2+oy(s)^2)^0.5;
theta1_teorik(s)=atan2(oy(s),ox(s));
beta(s)=atan2(50/r(s),(1-(50/r(s))^2)^0.5);
theta1(s)=theta1_teorik(s)-beta(s);
theta1(s)=theta1(s)*180/pi;
theta1(s)=transpose(theta1(s));

s=2;
ox(s)=-50.2;
oy(s)=791.699;
oz(s)=203.557;
r(s)=(ox(s)^2+oy(s)^2)^0.5;
theta1_teorik(s)=atan2(oy(s),ox(s));
beta(s)=atan2(50/r(s),(1-(50/r(s))^2)^0.5);
theta1(s)=theta1_teorik(s)-beta(s);
theta1(s)=theta1(s)*180/pi;
theta1(s)=transpose(theta1(s));

%theta1 parametresinin başlangıç ve bitiş değerleri doğrultusunda
%hareketine dair üçüncü dereceden polinom denklemi çıkarılacak.
%Takip eden planlama bu hareketi baz alıyor.

theta1_plnm_1=theta1(1)+3*(theta1(2)-
theta1(1))*zaman.^2/hedef_zaman.^2-...
    2*(theta1(2)-theta1(1))*zaman.^3/hedef_zaman.^3;
theta1_bekle_1(sayac_2,1)=90;
theta1_bekle_2(sayac_3,1)=90;
theta1_plnm_2=theta1(2)+3*(theta1(1)-
theta1(2))*zaman.^2/hedef_zaman.^2-...
    2*(theta1(1)-theta1(2))*zaman.^3/hedef_zaman.^3;
theta1_bekle_3(sayac_6,1)=0;
theta1_bekle_4(sayac_5,1)=0;
theta1_bekle_5(sayac_6,1)=0;
theta1_yorunge=[theta1_plnm_1;theta1_bekle_1;theta1_bekle_2;...
    theta1_plnm_2;theta1_bekle_3;theta1_bekle_4;theta1_bekle_5];
theta1_genel=[zaman_theta1 theta1_yorunge];

%-------------------- --------------------
%theta2, theta3 ve theta5 parametrelerindeki degisimi, dejenere
etmeden
%temsil eden 3. dereceden polinom denklemleri cikarilacaktir.
%SimMechanics sadece '0' baslangic kosullarina kendini adapte
edebiliyor!
%Dolayısıyla azalıcı hareketler 0'dan eksi değerlere, artıcı
hareketler ise
%0'dan pozitif değerlere doğru karakterize edilecek ancak toplam
acisal yer
%değistirme bilgileri korunacaktır.
%-------------------- --------------------

theta2_bekle_1(sayac_2,1)=0;
theta2_bsl_1=0;
theta2_ayd_1=theta2(21,1)-theta2(1,1);
theta2_plnm_1=theta2_bsl_1+3*theta2_ayd_1*sayac_1.^2/hedef_zaman^2-...
    2*theta2_ayd_1*sayac_1.^3/hedef_zaman^3;
theta2_bsl_2=theta2_ayd_1;
theta2_ayd_2=theta2(1,1)-theta2(21,1);
```

```
theta2_plnm_2=theta2_bsl_2+3*theta2_ayd_2*sayac_1.^2/hedef_zaman^2-...
    2*theta2_ayd_2*sayac_1.^3/hedef_zaman^3;
theta2_bekle_2(sayac_7,1)=0;
theta2_plnm_3=theta2_plnm_1;
theta2_plnm_4=theta2_plnm_2;
theta2_bekle_3(sayac_4,1)=0;
theta2_yorunge=[theta2_bekle_1;theta2_plnm_1;theta2_plnm_2;...
    theta2_bekle_2;theta2_plnm_3;theta2_plnm_4;theta2_bekle_3];
theta2_genel=[zaman_theta2 theta2_yorunge];
%--------------------
theta3_bekle_1(sayac_2,1)=0;
theta3_bsl_1=0;
theta3_ayd_1=theta3(21,1)-theta3(1,1);
theta3_plnm_1=theta3_bsl_1+3*theta3_ayd_1*sayac_1.^2/hedef_zaman^2-...
    2*theta3_ayd_1*sayac_1.^3/hedef_zaman^3;
theta3_bsl_2=theta3_ayd_1;
theta3_ayd_2=theta3(1,1)-theta3(21,1);
theta3_plnm_2=theta3_bsl_2+3*theta3_ayd_2*sayac_1.^2/hedef_zaman^2-...
    2*theta3_ayd_2*sayac_1.^3/hedef_zaman^3;
theta3_bekle_2(sayac_3,1)=0;
theta3_plnm_3=theta3_plnm_1;
theta3_plnm_4=theta3_plnm_2;
theta3_bekle_3(sayac_4,1)=0;
theta3_yorunge=[theta3_bekle_1;theta3_plnm_1;theta3_plnm_2;...
    theta3_bekle_2;theta3_plnm_3;theta3_plnm_4;theta3_bekle_3];
theta3_genel=[zaman_theta3 theta3_yorunge];
%--------------------
theta5_bekle_1(sayac_2,1)=0;
theta5_bsl_1=0;
theta5_ayd_1=theta5(21,1)-theta5(1,1);
theta5_plnm_1=theta5_bsl_1+3*theta5_ayd_1*sayac_1.^2/hedef_zaman^2-...
    2*theta5_ayd_1*sayac_1.^3/hedef_zaman^3;
theta5_bsl_2=theta5_ayd_1;
theta5_ayd_2=theta5(1,1)-theta5(21,1);
theta5_plnm_2=theta5_bsl_2+3*theta5_ayd_2*sayac_1.^2/hedef_zaman^2-...
    2*theta5_ayd_2*sayac_1.^3/hedef_zaman^3;
theta5_bekle_2(sayac_3,1)=0;
theta5_plnm_3=theta5_plnm_1;
theta5_plnm_4=theta5_plnm_2;
theta5_bekle_3(sayac_4,1)=0;
theta5_yorunge=[theta5_bekle_1;theta5_plnm_1;theta5_plnm_2;...
    theta5_bekle_2;theta5_plnm_3;theta5_plnm_4;theta5_bekle_3];
theta5_genel=[zaman_theta5 theta5_yorunge];
%--------------------
%--- PROGRAM SONU ---
```

EK–4: KOL Mafsalının Dinamiğini İfade Eden Denklemler

Bu bölümde üzerinde çalışmanın gerçekleştirildiği STAUBLİ TX90 6SD Antropomorfik robot kola özgü dinamik denklemlerin yapıları hakkında fikirler verilecektir.

6 Serbestlik derecesinin getirdiği son derece kompleks yapılanma sebebiyle motorlar üzerindeki dinamik yükleri temsil eden tork denklemleri de eş derecede karmaşık hale gelmiştir. Bu sebeple dinamik denklemlerin bir ek halinde sunulması uygun görülmüştür. Ancak tüm mafsallara ait hesaplanmış torkların ifadesi kısaltma terimlerinin de dahil edilmesiyle onlarca sayfa işgal edeceği için bu ek içerisinde sadece kol mafsalına ait denklemin bileşenleri verilmiştir.

Aktarılan denklemlerin aritmetik toplamı yapıldığında, o mafsala ait tork ifadesine ulaşılacağı ilgili bölümde belirtilmiştir.

İlgili tork denklemlerinin çıkarılışında ilgili bölümlerde de anlatıldığı üzere Lagrange-Euler enerji enerji kullanılmıştır. Her bir tork denklemi aşağıdaki bileşenlerden oluşur:

- Uzuv Kütle Matrisi, $D(\theta)$
  - Uzuv Jakobiyeni, $J(\theta)$; Uzuv Atalet Tensörü, I
- Coriolis ve Merkezkaç kuvvetlerin oluşturduğu Hız Bağlaşım Vektörü, $C(\theta, \dot{\theta})$
  - Bileşke Uzuv Kütle Matrisi, $D(\theta)$
- Yerçekimi Vektörü, $G(\theta)$

Bu bilinenler doğrultusunda tüm denklem şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\tau_i = D(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta)$$

Dinamik denklem ifadelerinde kullanılan değişkenler '*syms*' fonksiyonu ile pratik olarak çalışma uzayına aktarılır. Problemde kullanılan Lagrange-Euler denkleminde ihtiyaç duyulan değişken setini şu şekilde ifade edebiliriz:

- Açısal konum değişkenleri: $t1 \dots t6$ (Gerçek gösterim: $\theta_1 \dots \theta_6$)
- Açısal hız değişkenleri: $w1 \dots w6$ (Gerçek gösterim: $\omega_1 \dots \omega_6$)
- Açısal ivme değişkenleri: $alpha1 \dots alpha6$ (Gerçek gösterim: $\alpha_1 \dots \alpha_6$)

kol mafsalına ait yerçekimi bileşeni ilgili kısımda sunulmuş olduğu için burada tekrar verilmeyecektir. Denklemlerin aktarılmasına geçmeden önce Matlab *Symbolic Math Toolbox*® içerisinde yer alan ve bu aşamada kullanılacak olan iki fonksiyondan çok kısa biçimde bahsedelim (http://www.mathworks.com/help/toolbox/symbolic/ 2011):

- **vpa(sym(x))** : Matlab sembolik işlemler sırasında sabit olarak tanımlanan değerleri de sembolik algılamakta, bu sebeple tüm bu ifadeleri rasyonel formatta düzenlemektedir. *vpa* fonksiyonu önceden tanımlanan bir hane (*digit*) sayısına sadık kalacak biçimde sembolik veri kümelerinde yer alan rasyonel sayıları kayar nokta gösterimine dönüştürür.
- **pretty(sym(x))** : *vpa* fonksiyonu ifadelerdeki rasyonel sayıları nispeten daha anlaşılır hale getiriyor olsa da, ifadelerin kullanışlılığı üzerinde *pretty* fonksiyonu kadar etkili değildir. *pretty* fonksiyonu kendisine tanımlanan sembolik ifade içerisinde bariz ve lüzumlu değişken dönüşümlerini yaparak bu çalışmada olduğu gibi uzun ve girift denklemleri düzenler.

Uzuv Jakobiyen Matrisi

Uzuv Jakobiyenleri uzuvların doğrusal ve açısal hızlarının temsil edildiği matrislerdir. 6xn (n uzuv sayısı) boyutundaki matrislerin ilk üç satırları uzvun doğrusal, son üç satırları ise açısal hızlarını temsil etmektedir. Jakobiyen matris Lagrange-Euler denkleminde uzuv kütle matrisinin sentezini sağlar.

Kol mafsalı için Hız Jakobiyeni:

>> pretty(vpa(J1))

```
[-0.06910 sin(t1) - 0.06420 cos(t1) , 0 , 0 , 0 , 0 , 0]
[0.06910 cos(t1) - 0.06420 sin(t1) ,  0 , 0 , 0 , 0 , 0]
[0 ,                                  0 , 0 , 0 , 0 , 0]
[sin(t1) ,                            0 , 0 , 0 , 0 , 0]
[-cos(t1) ,                           0 , 0 , 0 , 0 , 0]
[0 ,                                  0 , 0 , 0 , 0 , 0]
```

>>

Kütle Bağlaşım Vektör Bileşeni

Uzuv kütlelerinin dinamik davranışları kütle bağlaşım vektörü ile modellenmektedir. Öncelikle her biri 6xn boyutlu olan kütle matrislerinin toplamı hesaplanır. Bu bileşke uzuv bağımsız parametrelerinin (burada açısal konum) ikinci türevlerinin (burada açısal ivme) oluşturduğu ivme vektörü (nx1) ile çarpılarak Kütle Bağlaşım Vektörü'ne ulaşılır. Her bir mafsaldaki dinamik yükün hesaplanmasında bu vektörün ilgili elemanı dikkate alınır.

Denklemlerde **%Sayı** biçimindeki her bir terimin MATLAB Symbolic Math Toolbox tarafından atanan bir kısaltma teşkil ettiği hatırlatılmalıdır. Denklemlerin genelinde kullanılan 300 civarı kısaltmaya bu bölümde yer verilmemiştir. İlgili veriler *.MAT* uzantılı bir dosya şeklinde hazırlanarak CD içeriğinde sunulmuştur.

Kol mafsalı için Kütle Bağlaşım Vektör Bileşeni:

>> pretty(vpa(D_vektor(1,1)))

```
((-1.170 sin(t1) - 1.087 cos(t1)) (-0.06910 sin(t1) - 0.06420 cos(t1))

 + (1.170 cos(t1) - 1.087 sin(t1)) (0.06910 cos(t1) - 0.06420 sin(t1))

 + (                          2                    2                      2
sin(t1) (0.2223 cos(t1)  + 0.1571 sin(t1) ) - 0.06520 cos(t1)  sin(t1)

                                    2
) sin(t1) - 1. (0.06520 sin(t1)  cos(t1)

                                  2                    2
 - 1. cos(t1) (0.2223 sin(t1)  + 0.1571 cos(t1) )) cos(t1) + (

-6.803 sin(t1) cos(t2) + 2.871 sin(t1) sin(t2) + 1.190 cos(t1)

 - 0.6490 sin(t1)) (-0.5241 sin(t1) cos(t2) + 0.2212 sin(t1) sin(t2)

 + 0.09170 cos(t1) - 0.05000 sin(t1)) + (6.803 cos(t1) cos(t2)

 - 2.871 cos(t1) sin(t2) + 1.190 sin(t1) + 0.6490 cos(t1)) (

0.5241 cos(t1) cos(t2) - 0.2212 cos(t1) sin(t2) + 0.09170 sin(t1)

 + 0.05000 cos(t1)) + (sin(t1) (

                  2          2                      2          2                    2
0.4246 cos(t1)  cos(t2)  + 0.05450 cos(t1)  sin(t2)  + 0.4516 sin(t1)

) - 1. cos(t1) %65) sin(t1) - 1. (sin(t1) %65 - 1. cos(t1) (

                  2        2                      2        2                    2
0.4246 sin(t1)  cos(t2)  + 0.05450 sin(t1)  sin(t2)  + 0.4516 cos(t1)

)) cos(t1) + %64 (-0.003300 %14 + 0.003300 %13 - 0.06500 cos(t1)

 - 0.001200 %12 - 0.001200 %11 - 0.4250 sin(t1) cos(t2)

 - 0.05000 sin(t1)) + %63 (0.003300 %2 - 0.003300 %1 - 0.06500 sin(t1)
```

```
 + 0.001200 %6 + 0.001200 %5 + 0.4250 cos(t1) cos(t2)
 + 0.05000 cos(t1)) + %62 sin(t1) - 1. %61 cos(t1) + %52 (0.2792 %17
 - 0.2792 cos(t1) sin(t4) + 0.09890 %15 + 0.09890 cos(t1) cos(t4)
 + 0.4250 %12 + 0.4250 %11 - 0.4250 sin(t1) cos(t2) - 0.05000 cos(t1)
 - 0.05000 sin(t1)) + %51 (0.2792 %7 - 0.2792 sin(t1) sin(t4)
 + 0.09890 %3 + 0.09890 sin(t1) cos(t4) - 0.4250 %6 - 0.4250 %5
 + 0.4250 cos(t1) cos(t2) - 0.05000 sin(t1) + 0.05000 cos(t1))
 + %50 sin(t1) - 1. %49 cos(t1) + %44 (0.02280 %18 cos(t5)
 + 0.02280 %20 + 0.0002000 %18 sin(t5) - 0.0002000 %16 - 0.08950 %15
 - 0.08950 cos(t1) cos(t4) + 0.4250 %12 + 0.4250 %11
 - 0.4250 sin(t1) cos(t2) - 0.05000 cos(t1) - 0.05000 sin(t1)) + %43 (
0.02280 %8 cos(t5) + 0.02280 (%6 + %5) sin(t5) + 0.0002000 %8 sin(t5)
 - 0.0002000 (%6 + %5) cos(t5) - 0.08950 %3 - 0.08950 sin(t1) cos(t4)
 - 0.4250 %6 - 0.4250 %5 + 0.4250 cos(t1) cos(t2) - 0.05000 sin(t1)
 + 0.05000 cos(t1)) + %42 sin(t1) - 1. %40 cos(t1) + %22 (
-0.006300 %21 - 0.006300 %19 + 0.01070 %18 sin(t5) - 0.01070 %16
 - 0.08950 %15 - 0.08950 cos(t1) cos(t4) + 0.4250 %12 + 0.4250 %11
 - 0.4250 sin(t1) cos(t2) - 0.05000 cos(t1) - 0.05000 sin(t1)) + %10 (
-0.006300 %9 cos(t6) - 0.006300 %4 sin(t6) + 0.01070 %8 sin(t5)
 - 0.01070 (%6 + %5) cos(t5) - 0.08950 %3 - 0.08950 sin(t1) cos(t4)
 - 0.4250 %6 - 0.4250 %5 + 0.4250 cos(t1) cos(t2) - 0.05000 sin(t1)
 + 0.05000 cos(t1))) alpha1 + ((-6.803 sin(t1) cos(t2)
 + 2.871 sin(t1) sin(t2) + 1.190 cos(t1) - 0.6490 sin(t1))
(-0.5241 cos(t1) sin(t2) - 0.2212 cos(t1) cos(t2)) + (
```

6.803 cos(t1) cos(t2) - 2.871 cos(t1) sin(t2) + 1.190 sin(t1)

+ 0.6490 cos(t1)) (-0.5241 cos(t1) sin(t2) - 0.2212 cos(t1) cos(t2))

+ (sin(t1) (

$$0.4246 \cos(t1)^2 \cos(t2)^2 + 0.05450 \cos(t1)^2 \sin(t2)^2 + 0.4516 \sin(t1)^2$$

) - 1. cos(t1) %65) sin(t1) - 1. (sin(t1) %65 - 1. cos(t1) (

$$0.4246 \sin(t1)^2 \cos(t2)^2 + 0.05450 \sin(t1)^2 \sin(t2)^2 + 0.4516 \cos(t1)^2$$

)) cos(t1) + %64 (-0.003300 %5 - 0.003300 %6 - 0.001200 %1

+ 0.001200 %2 - 0.4250 cos(t1) sin(t2)) + %63 (-0.003300 %5

- 0.003300 %6 - 0.001200 %1 + 0.001200 %2 - 0.4250 cos(t1) sin(t2))

+ %62 sin(t1) - 1. %61 cos(t1) + %52 (0.2792 %60 + 0.09890 %53

+ 0.4250 %1 - 0.4250 %2 - 0.4250 cos(t1) sin(t2)) + %51 (0.2792 %60

+ 0.09890 %53 + 0.4250 %1 - 0.4250 %2 - 0.4250 cos(t1) sin(t2))

+ %50 sin(t1) - 1. %49 cos(t1) + %44 (0.02280 %58 + 0.02280 %57

+ 0.0002000 %55 - 0.0002000 %54 - 0.08950 %53 + 0.4250 %1 - 0.4250 %2

- 0.4250 cos(t1) sin(t2)) + %43 (0.02280 %58 + 0.02280 %57

+ 0.0002000 %55 - 0.0002000 %54 - 0.08950 %53 + 0.4250 %1 - 0.4250 %2

- 0.4250 cos(t1) sin(t2)) + %42 sin(t1) - 1. %40 cos(t1) + %22 (

-0.006300 (%58 + %57) cos(t6) + 0.006300 %56 + 0.01070 %55

- 0.01070 %54 - 0.08950 %53 + 0.4250 %1 - 0.4250 %2

- 0.4250 cos(t1) sin(t2)) + %10 (-0.006300 (%58 + %57) cos(t6)

+ 0.006300 %56 + 0.01070 %55 - 0.01070 %54 - 0.08950 %53 + 0.4250 %1

- 0.4250 %2 - 0.4250 cos(t1) sin(t2))) alpha2 + (

%64 (-0.003300 %6 - 0.003300 %5 + 0.001200 %2 - 0.001200 %1)

```
 + %63 (-0.003300 %6 - 0.003300 %5 + 0.001200 %2 - 0.001200 %1)
 + %62 (-1. %5 - 1. %6) + %61 (-1. %5 - 1. %6) + (sin(t1)
((0.05890 %2 - 0.05890 %1) %24 + (-0.05690 %6 - 0.05690 %5) %59) - 1.
cos(t1)
((0.05890 %14 - 0.05890 %13) %24 + (-0.05690 %12 - 0.05690 %11) %59))
(-1. %5 - 1. %6)
 + %52 (0.2792 %60 + 0.09890 %53 - 0.4250 %2 + 0.4250 %1)
 + %51 (0.2792 %60 + 0.09890 %53 - 0.4250 %2 + 0.4250 %1)
 + %50 (-1. %5 - 1. %6) + %49 (-1. %12 - 1. %11) + (sin(t1)
(%48 %24 cos(t4) + (0.03840 %6 + 0.03840 %5) %23 - 1. %47 %24 sin(t4))
 - 1. cos(t1) (
%46 %24 cos(t4) + (0.03840 %12 + 0.03840 %11) %23 - 1. %45 %24 sin(t4)
)) %59 + %44 (0.02280 %58 + 0.02280 %57 + 0.0002000 %55
 - 0.0002000 %54 - 0.08950 %53 - 0.4250 %2 + 0.4250 %1) + %43 (
0.02280 %58 + 0.02280 %57 + 0.0002000 %55 - 0.0002000 %54
 - 0.08950 %53 - 0.4250 %2 + 0.4250 %1) + %42 (-1. %5 - 1. %6)
 + %40 (-1. %12 - 1. %11) + %36 %59 + %22 (
-0.006300 (%58 + %57) cos(t6) + 0.006300 %56 + 0.01070 %55
 - 0.01070 %54 - 0.08950 %53 - 0.4250 %2 + 0.4250 %1) + %10 (
-0.006300 (%58 + %57) cos(t6) + 0.006300 %56 + 0.01070 %55
 - 0.01070 %54 - 0.08950 %53 - 0.4250 %2 + 0.4250 %1)) alpha3 + (%52 (
-0.2792 %3 - 0.2792 sin(t1) cos(t4) + 0.09890 %7
 - 0.09890 sin(t1) sin(t4)) + %51 (-0.2792 %3 - 0.2792 sin(t1) cos(t4)
 + 0.09890 %7 - 0.09890 sin(t1) sin(t4)) + %50 %4 + %49 %38 - 1. (
```

```
sin(t1)
(%48 %24 cos(t4) + (0.03840 %6 + 0.03840 %5) %23 - 1. %47 %24 sin(t4))
 - 1. cos(t1) (
%46 %24 cos(t4) + (0.03840 %12 + 0.03840 %11) %23 - 1. %45 %24 sin(t4)
)) %24 sin(t4) + %44 (0.02280 %4 cos(t5) + 0.0002000 %4 sin(t5)
 - 0.08950 %7 + 0.08950 sin(t1) sin(t4)) + %43 (0.02280 %4 cos(t5)
 + 0.0002000 %4 sin(t5) - 0.08950 %7 + 0.08950 sin(t1) sin(t4))
 + %42 %4 + %40 %38 - 1. %36 %24 sin(t4) + %22 (
-0.006300 %4 cos(t5) cos(t6)
 - 0.006300 (-1. %7 + sin(t1) sin(t4)) sin(t6) + 0.01070 %4 sin(t5)
 - 0.08950 %7 + 0.08950 sin(t1) sin(t4)) + %10 (
-0.006300 %4 cos(t5) cos(t6)
 - 0.006300 (-1. %7 + sin(t1) sin(t4)) sin(t6) + 0.01070 %4 sin(t5)
 - 0.08950 %7 + 0.08950 sin(t1) sin(t4))) alpha4 + (%44 (
-0.02280 %8 sin(t5) + 0.02280 (%6 + %5) cos(t5) + 0.0002000 %8 cos(t5)
 + 0.0002000 (%6 + %5) sin(t5)) + %43 (-0.02280 %8 sin(t5)
 + 0.02280 (%6 + %5) cos(t5) + 0.0002000 %8 cos(t5)
 + 0.0002000 (%6 + %5) sin(t5)) + %42 %41 + %40 %37 + %36 %25 + %22 (
-0.006300 (-1. %8 sin(t5) + (%6 + %5) cos(t5)) cos(t6)
 + 0.01070 %8 cos(t5) + 0.01070 (%6 + %5) sin(t5)) + %10 (
-0.006300 (-1. %8 sin(t5) + (%6 + %5) cos(t5)) cos(t6)
 + 0.01070 %8 cos(t5) + 0.01070 (%6 + %5) sin(t5))) alpha5 + (
%22 (0.006300 %9 sin(t6) - 0.006300 %4 cos(t6))
 + %10 (0.006300 %9 sin(t6) - 0.006300 %4 cos(t6))) alpha6
```

Hız Bağlaşım Vektör Bileşeni

Coriolis etki ve merkezkaç kuvvet vektörü olarak da tanımlanmaktadır. Robot dinamiğinin en karmaşık ifadelerini içeren ifade olma özelliğini taşır. Elemanları ilgili uzvun hız bağlaşım matrisinin (6xn), hız denklik matrisi (6xn) ile eleman elemana çarpılması ve çarpımların toplamı yoluyla bulunur. Bu hesaplama iterasyon yoluyla sağlanabilir. Her bir hız bağlaşım matrisi, hız bağlaşım vektörünün bir elemanını oluşturur: 6 serbestlik dereceli bir robot için 6 elemanlı bir vektör söz konusudur.

Hız Denklik Matrisi:

>> Cdenklik

Cdenklik =

[w1^2, w1*w2, w1*w3, w1*w4, w1*w5, w1*w6]

[w1*w2, w2^2, w2*w3, w2*w4, w2*w5, w2*w6]

[w1*w3, w2*w3, w3^2, w3*w4, w3*w5, w3*w6]

[w1*w4, w2*w4, w3*w4, w4^2, w4*w5, w4*w6]

[w1*w5, w2*w5, w3*w5, w4*w5, w5^2, w5*w6]

[w1*w6, w2*w6, w3*w6, w4*w6, w5*w6, w6^2]

Vektör oluşturulurken iç içe iki '*for*' döngüsünün kullanıldığı basit bir programın yazılması işlem hızını artıracaktır:

```
“
Cvektor_1=0;
for j=1:6
for k=1:6
Cvektor_1=Cvektor_1+Cmatris_1(j,k)*Cdenklik(j,k);
end
end

“
```

Buradan hareketle Kol mafsalına ait Hız Bağlaşım Vektörü:

>> pretty(vpa(Cvektor_1))

(%99 %245 + %226 %246 + %89 %245 - 1. %226 %244) w3 w6 + (-1. %167 cos(t1)
- 1. %166 cos(t1) + %165 sin(t1) + %164 sin(t1) - 0.5000 %223 sin(t1)
- 0.5000 %222 cos(t1) + 0.5000 %221 cos(t1) - 0.5000 %220 sin(t1)
- 0.5000 %219 sin(t1) - 0.5000 %217 cos(t1) + 0.5000 %216 cos(t1)
- 0.5000 %214 sin(t1) - 0.5000 %211 sin(t1) - 0.5000 %210 cos(t1)
+ 0.5000 %209 cos(t1) - 0.5000 %207 sin(t1) + %225 %64 + %227 %81
+ %226 %63 + %87 %203 + %99 %168 + %224 %61 + %91 %251 + %101 %189
+ %83 %247 + %89 %192 + %93 %250 + %95 %249 - 0.5000 %225 %72
- 0.5000 %226 %75 - 0.5000 (-0.0001952 (%53 + %52) cos(t6)
+ 0.0001952 %51 + 0.0003315 %50 - 0.0003315 %49
- 0.002772 (%8 + %7) sin(t4) + 0.01317 %10 - 0.01317 %9) %63
- 0.5000 %226 %48 - 0.5000 %225 %70 + 0.5000 (0.01297 %53
+ 0.01297 %52 + 0.0001138 %50 - 0.0001138 %49
- 0.05090 (%8 + %7) sin(t4) + 0.2417 %10 - 0.2417 %9) %72 - 0.5000 (
0.01297 %53 + 0.01297 %52 + 0.0001138 %50 - 0.0001138 %49
- 0.05090 (%8 + %7) sin(t4) + 0.2417 %10 - 0.2417 %9) %64 + 0.5000 (
-0.0001952 (%53 + %52) cos(t6) + 0.0001952 %51 + 0.0003315 %50
- 0.0003315 %49 - 0.002772 (%8 + %7) sin(t4) + 0.01317 %10
- 0.01317 %9) %48
+ 0.5000 (0.02475 %8 + 0.02475 %7 - 0.009002 %10 + 0.009002 %9) %58
- 0.5000 %227 %58 - 0.5000 %224 %62 + 0.5000 (1.268 (%8 + %7) cos(t4)
+ 0.4490 (%8 + %7) sin(t4) + 1.930 %10 - 1.930 %9) %62
- 0.5000 %227 %79 - 0.5000 %224 %78 - 0.5000 (1.268 (%8 + %7) cos(t4)
+ 0.4490 (%8 + %7) sin(t4) + 1.930 %10 - 1.930 %9) %61

- 0.5000 (0.02475 %8 + 0.02475 %7 - 0.009002 %10 + 0.009002 %9) %81
- 1. %40 cos(t1) + %34 sin(t1)) w1 w3 + (%56 %192 + %91 %234
+ %163 (-1. %2 + %1) + %77 %251 + %89 %231 + %258 (-1. %2 + %1)
+ %307 %309 + (sin(t1) ((-0.05890 %5 - 0.05890 %4) %173
+ (0.05890 %2 - 0.05890 %1) %171 + (0.05690 %1 - 0.05690 %2) %171
+ (-0.05690 %4 - 0.05690 %5) %309) - 1. cos(t1) (
(-0.05890 %7 - 0.05890 %8) %173 + (0.05890 %10 - 0.05890 %9) %171
+ (0.05690 %9 - 0.05690 %10) %171 + (-0.05690 %8 - 0.05690 %7) %309))
(-1. %5 - 1. %4) + %108 (-1. %2 + %1) + %166 (-1. %5 - 1. %4)
+ %310 %171 + %165 (-1. %5 - 1. %4) - 1. %77 %250 + %101 %232
+ %167 (-1. %8 - 1. %7) + %266 %171 + %159 (-1. %2 + %1) + %93 %234
- 0.5000 %162 (-1. %8 - 1. %7) + %143 (-1. %10 + %9) + %95 %233
+ %83 %233 + %164 (-1. %5 - 1. %4) + %147 (-1. %10 + %9) + %71 %203
+ %34 (-1. %5 - 1. %4) + %87 %232 + %262 %309 - 1. %71 %189
- 1. %56 %168 + %99 %231 + %40 (-1. %8 - 1. %7) - 1. %59 %249
+ %59 %247 + %158 (-1. %2 + %1) - 0.5000 %159 (%8 + %7)
- 0.5000 %158 (%8 + %7)
- 0.5000 (sin(t1) %259 + sin(t1) %256) (-1. %5 - 1. %4)
- 0.5000 %115 (-1. %5 - 1. %4) - 0.5000 %154 (-1. %5 - 1. %4)
- 0.5000 %163 (%8 + %7) - 0.5000 %136 (-1. %5 - 1. %4)
- 0.5000 %258 (%8 + %7) - 0.5000 %157 (-1. %8 - 1. %7)
- 0.5000 %147 (-1. %5 - 1. %4) - 0.5000 %143 (-1. %5 - 1. %4)
- 0.5000 %255 %171 - 0.5000 %239 %171 - 0.5000 %123 (-1. %5 - 1. %4)
- 0.5000 %108 (%8 + %7)) w2 w3 + (-1. %167 cos(t1) - 1. %166 cos(t1)

+ %56 %88 + %165 sin(t1) + %99 (-0.006300 (%230 + %69) cos(t6)
+ 0.006300 %229 + 0.01070 %228 - 0.01070 %66 - 0.08950 %65
+ 0.4250 %4 + 0.4250 %5 - 0.4250 cos(t1) cos(t2)) + %93 (0.2792 %67
+ 0.09890 %65 + 0.4250 %4 + 0.4250 %5 - 0.4250 cos(t1) cos(t2))
+ %97 (-0.5241 cos(t1) cos(t2) + 0.2212 cos(t1) sin(t2)) + %57 %84
+ %85 (-0.5241 cos(t1) cos(t2) + 0.2212 cos(t1) sin(t2)) + %95 (
-0.003300 %2 + 0.003300 %1 - 0.001200 %4 - 0.001200 %5
- 0.4250 cos(t1) cos(t2)) + %59 %82 + %83 (-0.003300 %2 + 0.003300 %1
- 0.001200 %4 - 0.001200 %5 - 0.4250 cos(t1) cos(t2)) - 1. %71 %100
- 1. %56 %98 + %77 %90 + %91 (0.2792 %67 + 0.09890 %65 + 0.4250 %4
+ 0.4250 %5 - 0.4250 cos(t1) cos(t2)) + %71 %86 + %164 sin(t1) + %87
(0.02280 %230 + 0.02280 %69 + 0.0002000 %228 - 0.0002000 %66
- 0.08950 %65 + 0.4250 %4 + 0.4250 %5 - 0.4250 cos(t1) cos(t2))
- 0.5000 %163 cos(t1) + 0.5000 %162 cos(t1) - 0.5000 %159 sin(t1)
- 0.5000 %158 cos(t1) + 0.5000 %157 cos(t1) - 0.5000 %154 sin(t1)
- 0.5000 %147 sin(t1) - 0.5000 %144 - 0.5000 %143 sin(t1)
- 0.5000 %136 sin(t1) - 0.5000 %127 + 0.5000 %125
- 0.5000 %123 sin(t1) - 0.5000 %120 + 0.5000 %115 cos(t1)
- 0.5000 %108 cos(t1) - 1. %40 cos(t1) - 1. %57 %96 - 1. %59 %94
- 1. %77 %92 + %101 (0.02280 %230 + 0.02280 %69 + 0.0002000 %228
- 0.0002000 %66 - 0.08950 %65 + 0.4250 %4 + 0.4250 %5
- 0.4250 cos(t1) cos(t2)) + %34 sin(t1) + %89 (
-0.006300 (%230 + %69) cos(t6) + 0.006300 %229 + 0.01070 %228
- 0.01070 %66 - 0.08950 %65 + 0.4250 %4 + 0.4250 %5

$$
\begin{aligned}
&\quad 2 \\
&- 0.4250 \cos(t1) \cos(t2))) \, w2^{2} \\
&+ (0.5000 \,\%252 \,\%305 + 0.5000 \,\%93 \,\%306 \\
&+ 0.5000 \,\%93 \,\%305 + 0.5000 \,\%91 \,\%306 + 0.5000 \,\%154 \,\%22 \\
&+ 0.5000 \,\%163 \,\%45 + 0.5000 \,\%162 \,\%36 + 0.5000 \,\%143 \,\%22 \\
&- 0.5000 \,\%255 \,\%173 \sin(t4) + 0.5000 \,\%242 \,\%300 + 0.5000 \,\%101 \,\%301 \\
&+ 0.5000 \,\%101 \,\%300 + 0.5000 \,\%87 \,\%301 + 0.5000 \,\%136 \,\%22 \\
&+ 0.5000 \,\%158 \,\%45 + 0.5000 \,\%157 \,\%36 + 0.5000 \,\%147 \,\%22 \\
&- 0.5000 \,\%239 \,\%173 \sin(t4) + 0.5000 \,\%238 \,\%308 + 0.5000 \,\%99 \,\%304 \\
&+ 0.5000 \,\%99 \,\%308 + 0.5000 \,\%89 \,\%304) \, w1 \, w4 + (-1. \,\%307 \,\%171 \sin(t4) \\
&- 0.5000 \,\%154 \,\%22 - 0.5000 \,\%163 \,\%45 - 0.5000 \,\%162 \,\%36 \\
&- 0.5000 \,\%143 \,\%22 + 0.5000 \,\%239 \,\%173 \sin(t4) - 1. \,\%262 \,\%171 \sin(t4) \\
&- 0.5000 \,\%136 \,\%22 - 0.5000 \,\%158 \,\%45 - 0.5000 \,\%157 \,\%36 \\
&- 0.5000 \,\%147 \,\%22 - 1. \,\%158 \,(-1. \,\%5 - 1. \,\%4) \sin(t4) \\
&- 1. \,\%266 \,\%173 \sin(t4) + \%40 \,\%36 + \%71 \,\%300 - 1. \,\%71 \,\%301 \\
&- 1. \,\%56 \,\%304 + \%77 \,\%305 + \%286 + \%287 + \%99 \,\%288 + \%165 \,\%22 \\
&+ \%56 \,\%308 + \%101 \,\%277 - 1. \,\%147 \,(-1. \,\%8 - 1. \,\%7) \sin(t4) \\
&- 1. \,\%143 \,(-1. \,\%8 - 1. \,\%7) \sin(t4) - 1. \,\%163 \,(-1. \,\%5 - 1. \,\%4) \sin(t4) \\
&+ \%167 \,\%36 + \%87 \,\%277 + \%34 \,\%22 - 1. \,\%77 \,\%306 + \%89 \,\%288 \\
&- 1. \,\%310 \,\%173 \sin(t4) + 0.5000 \,\%255 \,\%173 \sin(t4)) \, w2 \, w4 \\
&+ (\%99 \,\%312 + \%311 \,\%308 + \%89 \,\%312 - 1. \,\%311 \,\%304) \, w4 \, w6 + (\\
&0.006300 \,\%99 \,\%169 \sin(t6) + \%311 \,\%237 + 0.006300 \,\%89 \,\%169 \sin(t6) \\
&- 1. \,\%311 \,\%236) \, w5 \, w6 + (0.5000 \,\%163 \cos(t1) - 0.5000 \,\%162 \cos(t1) \\
&+ 0.5000 \,\%159 \sin(t1) + 0.5000 \,\%158 \cos(t1) - 0.5000 \,\%157 \cos(t1) \\
&+ 0.5000 \,\%154 \sin(t1) + 0.5000 \,\%147 \sin(t1) + 0.5000 \,\%144 \\
&+ 0.5000 \,\%143 \sin(t1) + 0.5000 \,\%136 \sin(t1) + 0.5000 \,\%127
\end{aligned}
$$

- 0.5000 %125 + 0.5000 %123 sin(t1) + 0.5000 %120

- 0.5000 %115 cos(t1) + 0.5000 %108 cos(t1) + 0.5000 %101 %86

+ 0.5000 %93 %90 + 0.5000 %95 %82 + 0.5000 %242 %86

+ 0.5000 %101 %100 + 0.5000 %87 %100 + 0.5000 %238 %88

+ 0.5000 %99 %98 + 0.5000 %89 %98 + 0.5000 %99 %88 + 0.5000 %97 %84

+ 0.5000 (-6.803 cos(t1) cos(t2) + 2.871 cos(t1) sin(t2)

- 1.190 sin(t1) - 0.6490 cos(t1)) %84 + 0.5000 %97 %96

+ 0.5000 %85 %96 + 0.5000 %248 %82 + 0.5000 %95 %94 + 0.5000 %83 %94

+ 0.5000 %252 %90 + 0.5000 %93 %92 + 0.5000 %91 %92) w1 w2

+ (%99 %245 + %311 %192 + %89 %245 - 1. %311 %168) w3 w6 + (%101 %202

+ %71 %241 + %87 %202 + %34 %16 + %158 (%6 - 1. %3) + %40 %35

+ %147 (%18 - 1. %17) + %266 %175 + %262 %261 + %99 %191 + %56 %237

+ %89 %191 - 1. %71 %240 - 0.5000 %136 %16 - 0.5000 %158 %128

- 0.5000 %157 %35 - 0.5000 %147 %16 - 0.5000 %239 %175 - 1. %56 %236)

w2 w5 + (%99 %245 + %311 %88 + %89 %245 - 1. %311 %98) w2 w6 + (

0.5000 (0.0001952 %243 - 0.0001952 %45 cos(t6)) %48 + %99 %244

+ %311 %63 + %89 %246 - 0.5000 %311 %75

- 0.5000 (0.0001952 %243 - 0.0001952 %45 cos(t6)) %63

- 0.5000 %311 %48) w1 w6 + (-1. %307 %171 sin(t4)

- 1. %262 %171 sin(t4) - 1. %158 (-1. %5 - 1. %4) sin(t4)

- 1. %266 %173 sin(t4) + %40 %36 + %286 + %287 + %99 %288 + %165 %22

+ %101 %277 - 1. %147 (-1. %8 - 1. %7) sin(t4)

- 1. %143 (-1. %8 - 1. %7) sin(t4) - 1. %163 (-1. %5 - 1. %4) sin(t4)

+ %167 %36 + %87 %277 + %34 %22 + %89 %288 + %226 %308 + %224 %305

+ %225 %300 - 1. %225 %301 - 1. %224 %306 - 1. %226 %304

- 0.5000 %219 %22 - 0.5000 %217 %45 - 0.5000 %216 %36

- 0.5000 %214 %22 - 0.5000 %223 %22 - 0.5000 %222 %45

- 0.5000 %221 %36 + 0.5000 %260 %173 sin(t4) + 0.5000 ((%8 + %7) %296

+ (-1. %5 - 1. %4) %254 + (-1. %5 - 1. %4) %253

+ (-1. %8 - 1. %7) %296) %173 sin(t4) - 0.5000 %220 %22

- 1. %310 %173 sin(t4)) w3 w4 + (%101 (-0.02280 %15 cos(t5)

- 0.02280 (%4 + %5) sin(t5) - 0.0002000 %15 sin(t5)

+ 0.0002000 (%4 + %5) cos(t5)) + %190 %241 + %87 (

-0.02280 %15 cos(t5) - 0.02280 (%4 + %5) sin(t5)

- 0.0002000 %15 sin(t5) + 0.0002000 (%4 + %5) cos(t5)) + %201 %16

+ %158 %27 + %200 %35 + %147 %38 + %198 %175

+ %262 (%176 + %172 sin(t5)) + %99 (

-0.006300 (-1. %15 cos(t5) - 1. (%4 + %5) sin(t5)) cos(t6)

- 0.01070 %15 sin(t5) + 0.01070 (%4 + %5) cos(t5)) + %170 %237 + %89

(-0.006300 (-1. %15 cos(t5) - 1. (%4 + %5) sin(t5)) cos(t6)

- 0.01070 %15 sin(t5) + 0.01070 (%4 + %5) cos(t5)) - 1. %190 %240

- 0.5000 %188 %16 - 0.5000 %186 %128 - 0.5000 %185 %35

- 0.5000 %183 %16

- 0.5000 (%128 %177 + %16 %179 + %16 %178 + %35 %177) %175

                    2
- 1. %170 %236) w5 + (%93 %306 + %101 %301 + %99 %304 + %89 %308

- 1. %284 cos(t1) + %91 %305 + %295 sin(t1) - 1. %294 cos(t1)

+ %270 %64 + %87 %300 + %289 sin(t1) + %269 %63 + %285 %61

- 0.5000 %280 sin(t1) - 0.5000 %279 cos(t1) - 0.5000 %285 %62
- 0.5000 %269 %48 + 0.5000 (-1.268 %41 - 1.268 cos(t1) cos(t4)
+ 0.4490 %43 - 0.4490 cos(t1) sin(t4)) %62 + 0.5000 %278 cos(t1) -
0.5000 (-0.0001952 %303 - 0.0001952 %302 + 0.0003315 %45 sin(t5)
- 0.002772 %43 + 0.002772 cos(t1) sin(t4)) %63 - 0.5000 %285 %78 +
0.5000 (-0.0001952 %303 - 0.0001952 %302 + 0.0003315 %45 sin(t5)
- 0.002772 %43 + 0.002772 cos(t1) sin(t4)) %48 - 0.5000 %275 sin(t1)
+ 0.5000 %272 cos(t1) - 0.5000 %271 sin(t1) - 0.5000 %270 %72
- 0.5000 %269 %75 - 0.5000 (0.01297 %45 cos(t5)
+ 0.0001138 %45 sin(t5) - 0.05090 %43 + 0.05090 cos(t1) sin(t4)) %64
- 0.5000 (-1.268 %41 - 1.268 cos(t1) cos(t4) + 0.4490 %43
- 0.4490 cos(t1) sin(t4)) %61 - 0.5000 %270 %70 - 0.5000 %274 sin(t1)
+ 0.5000 (0.01297 %45 cos(t5) + 0.0001138 %45 sin(t5) - 0.05090 %43
+ 0.05090 cos(t1) sin(t4)) %72 - 0.5000 %273 cos(t1)) w1 w4 + (
0.006300 %99 %169 sin(t6) + %170 %246 + 0.006300 %89 %169 sin(t6)
- 1. %170 %244) w5 w6
+ (%99 %312 + %269 %246 + %89 %312 - 1. %269 %244) w4 w6 + (
0.5000 %163 cos(t1) - 0.5000 %162 cos(t1) + 0.5000 %159 sin(t1)
+ 0.5000 %158 cos(t1) - 0.5000 %157 cos(t1) + 0.5000 %154 sin(t1)
+ 0.5000 %147 sin(t1) + 0.5000 %144 + 0.5000 %143 sin(t1)
+ 0.5000 %136 sin(t1) + 0.5000 %127 - 0.5000 %125
+ 0.5000 %123 sin(t1) + 0.5000 %120 - 0.5000 %115 cos(t1)
+ 0.5000 %108 cos(t1) + 0.5000
(-1.170 cos(t1) + 1.087 sin(t1)) (-0.06910 sin(t1) - 0.06420 cos(t1))

+ 0.5000 %252 %62 + 0.5000 %93 %78 + 0.5000 %93 %61 + 0.5000 %91 %62

+ 0.5000 %238 %48 + 0.5000 (0.06520 sin(t1)^2 cos(t1)

- 1. cos(t1) (0.2223 sin(t1)^2 + 0.1571 cos(t1)^2)) sin(t1)

+ 0.5000 %99 %75 + 0.5000 %99 %63 + 0.5000

(-1.170 sin(t1) - 1.087 cos(t1)) (-0.06910 cos(t1) + 0.06420 sin(t1))

+ 0.5000

(-1.170 sin(t1) - 1.087 cos(t1)) (0.06910 cos(t1) - 0.06420 sin(t1))

+ 0.5000 %89 %48 + 0.5000

(1.170 cos(t1) - 1.087 sin(t1)) (-0.06910 sin(t1) - 0.06420 cos(t1))

+ 0.5000

(cos(t1) (0.2223 cos(t1)^2 + 0.1571 sin(t1)^2) - 0.06520 cos(t1)^3)

sin(t1) + 0.5000 (-6.803 cos(t1) cos(t2) + 2.871 cos(t1) sin(t2)

- 1.190 sin(t1) - 0.6490 cos(t1)) %60 + 0.5000 %85 %60

+ 0.5000 %97 %80 + 0.5000 %101 %70 + 0.5000 %97 (

-0.5241 cos(t1) cos(t2) + 0.2212 cos(t1) sin(t2) - 0.09170 sin(t1)

- 0.05000 cos(t1)) + 0.5000 %101 %64 + 0.5000 %87 %72

+ 0.5000 %242 %72 + 0.5000 %248 %58 + 0.5000 %95 %79 + 0.5000 %95 %81

+ 0.5000 %83 %58 + 0.5000 (

sin(t1) (0.2223 cos(t1)^2 + 0.1571 sin(t1)^2) - 0.06520 cos(t1)^2 sin(t1)

) cos(t1) - 0.5000

(-0.06520 sin(t1)^3 + sin(t1) (0.2223 sin(t1)^2 + 0.1571 cos(t1)^2))

2
cos(t1)) w1 + (%99 (0.006300 %27 cos(t6) + 0.006300 %22 sin(t6))

+ %311 %246 + %89 (0.006300 %27 cos(t6) + 0.006300 %22 sin(t6))

2
- 1. %311 %244) w6 + (%91 %234 + %163 (-1. %2 + %1) + %89 %231

+ %258 (-1. %2 + %1) + %307 %309 + (sin(t1) (

(-0.05890 %5 - 0.05890 %4) %173 + (0.05890 %2 - 0.05890 %1) %171

+ (0.05690 %1 - 0.05690 %2) %171 + (-0.05690 %4 - 0.05690 %5) %309)

- 1. cos(t1) ((-0.05890 %7 - 0.05890 %8) %173

+ (0.05890 %10 - 0.05890 %9) %171 + (0.05690 %9 - 0.05690 %10) %171

+ (-0.05690 %8 - 0.05690 %7) %309)) (-1. %5 - 1. %4)

+ %108 (-1. %2 + %1) + %166 (-1. %5 - 1. %4) + %310 %171

+ %165 (-1. %5 - 1. %4) + %101 %232 + %167 (-1. %8 - 1. %7)

+ %266 %171 + %159 (-1. %2 + %1) + %93 %234 + %143 (-1. %10 + %9)

+ %95 %233 + %83 %233 + %164 (-1. %5 - 1. %4) + %147 (-1. %10 + %9)

+ %34 (-1. %5 - 1. %4) + %87 %232 + %262 %309 + %99 %231

+ %40 (-1. %8 - 1. %7) + %158 (-1. %2 + %1) + %227 %247

- 1. %227 %249 - 1. %226 %168 + %225 %203 - 1. %224 %250 + %226 %192

+ %224 %251 - 1. %225 %189 - 0.5000 ((-1. %5 - 1. %4) %257

+ (-1. %5 - 1. %4) %256 + (-1. %5 - 1. %4) (%205 %173 + %204 %171))

(%8 + %7) - 0.5000 %219 (-1. %5 - 1. %4) - 0.5000 %217 (%8 + %7)

- 0.5000 %216 (-1. %8 - 1. %7) - 0.5000 %214 (-1. %5 - 1. %4) -

0.5000 ((%8 + %7) %296 + (-1. %5 - 1. %4) %254 + (-1. %5 - 1. %4) %253

+ (-1. %8 - 1. %7) %296) %171 - 0.5000 %223 (-1. %5 - 1. %4)

- 0.5000 %222 (%8 + %7) - 0.5000 %221 (-1. %8 - 1. %7)

- 0.5000 %211 (-1. %5 - 1. %4) - 0.5000 %210 (%8 + %7)

- 0.5000 %209 (-1. %5 - 1. %4) - 0.5000 %207 (%8 + %7) - 0.5000 (

(%8 + %7) %257 + (-1. %5 - 1. %4) %259 + (%8 + %7) %256

+ (-1. %5 - 1. %4) %257 + (%8 + %7) (%205 %173 + %204 %171))

(-1. %5 - 1. %4) - 0.5000 %220 (-1. %5 - 1. %4) - 0.5000 %260 %171)

2
w3 + (0.5000 (-0.01297 %44 sin(t5) + 0.01297 %42

+ 0.0001138 %44 cos(t5) + 0.0001138 %46) %72 + %101 %240 + %190 %64

+ %87 %241 + %201 sin(t1) - 1. %200 cos(t1) + 0.5000

(-0.0001952 %235 + 0.0003315 %44 cos(t5) + 0.0003315 %46) %48

+ %99 %236 + %170 %63 + %89 %237 - 0.5000 %190 %70 - 0.5000 (

-0.01297 %44 sin(t5) + 0.01297 %42 + 0.0001138 %44 cos(t5)

+ 0.0001138 %46) %64 - 0.5000 %190 %72 - 0.5000 %188 sin(t1)

- 0.5000 %186 cos(t1) + 0.5000 %185 cos(t1) - 0.5000 %183 sin(t1)

- 0.5000 %170 %75 - 0.5000

(-0.0001952 %235 + 0.0003315 %44 cos(t5) + 0.0003315 %46) %63

- 0.5000 %170 %48) w1 w5 + (%101 %202 + %190 %86 + %87 %202

+ %201 sin(t1) - 1. %200 cos(t1) + %99 %191 + %170 %88 + %89 %191

- 1. %190 %100 - 0.5000 %188 sin(t1) - 0.5000 %186 cos(t1)

+ 0.5000 %185 cos(t1) - 0.5000 %183 sin(t1) - 1. %170 %98) w2 w5 + (

%101 %299 + %190 %300 + %87 %299 + %201 %22 + %200 %36

- 1. %198 %173 sin(t4) + %99 %298 + %170 %308 + %89 %298

- 1. %190 %301 - 0.5000 %188 %22 - 0.5000 %186 %45 - 0.5000 %185 %36

- 0.5000 %183 %22

+ 0.5000 (%128 %177 + %16 %179 + %16 %178 + %35 %177) %173 sin(t4)

- 1. %170 %304) w4 w5 + (-1. (sin(t1) (%293 %173 cos(t4)
- 1. %142 %173 sin(t4) - 1. %292 %173 sin(t4) - 1. %140 %173 cos(t4))
- 1. cos(t1) (%291 %173 cos(t4) - 1. %138 %173 sin(t4)
- 1. %290 %173 sin(t4) - 1. %137 %173 cos(t4))) %173 sin(t4)
+ 0.5000 (%45 %177 + %22 %179 + %22 %178 + %36 %177) %173 sin(t4)
+ %294 %36 + %147 %281 + %91 (-0.2792 %14 + 0.2792 sin(t1) sin(t4)
- 0.09890 %21 - 0.09890 sin(t1) cos(t4)) + %269 %308 + %89 (
-0.006300 %267 cos(t5) cos(t6)
- 0.006300 (%21 + sin(t1) cos(t4)) sin(t6) + 0.01070 %267 sin(t5)
+ 0.08950 %21 + 0.08950 sin(t1) cos(t4)) + %295 %22
- 1. %307 %173 cos(t4) - 1. %297 %173 sin(t4) - 1. %262 %173 cos(t4)
+ %284 %36 - 1. %285 %306 + %143 %281 + %87 (0.02280 %267 cos(t5)
+ 0.0002000 %267 sin(t5) + 0.08950 %21 + 0.08950 sin(t1) cos(t4)) +
%101 (0.02280 %267 cos(t5) + 0.0002000 %267 sin(t5) + 0.08950 %21
+ 0.08950 sin(t1) cos(t4)) + %163 %267 + %285 %305 + %93 (-0.2792 %14
+ 0.2792 sin(t1) sin(t4) - 0.09890 %21 - 0.09890 sin(t1) cos(t4))
+ %289 %22 - 1. %269 %304 - 1. %270 %301 + %270 %300 + %99 (
-0.006300 %267 cos(t5) cos(t6)
- 0.006300 (%21 + sin(t1) cos(t4)) sin(t6) + 0.01070 %267 sin(t5)
+ 0.08950 %21 + 0.08950 sin(t1) cos(t4)) + %158 %267
- 0.5000 %280 %22 - 0.5000 %279 %45 - 0.5000 %272 %36
- 0.5000 %271 %22 - 0.5000 %274 %22 - 0.5000 %273 %45
- 0.5000 %278 %36 - 0.5000 %275 %22
+ 0.5000 (%45 %296 + %22 %254 + %22 %253 + %36 %296) %173 sin(t4))

```
 2
w4  + (%101 %299 + %270 %241 + %87 %299 + %289 %16 + %158 %22 sin(t5)
 + %284 %35 + %147 %36 sin(t5) + %297 %175
 - 1. %262 %173 sin(t4) sin(t5) + %99 %298 + %269 %237 + %89 %298
 - 1. %270 %240 - 0.5000 %274 %16 - 0.5000 %273 %128 - 0.5000 %272 %35
 - 0.5000 %271 %16
 - 0.5000 (%45 %177 + %22 %179 + %22 %178 + %36 %177) %175
 - 1. %269 %236) w4 w5 + (
0.5000 %238 %246 + 0.5000 %99 %244 + 0.5000 %99 %246 + 0.5000 %89 %244
) w1 w6 + (%286 + %287 + %99 %288 + %101 %277 + %87 %277 + %89 %288
 - 1. %285 %250 + %297 %171 + %285 %251 + %269 %192 - 1. %269 %168
 + %294 (-1. %8 - 1. %7) + %284 (-1. %8 - 1. %7)
 + %295 (-1. %5 - 1. %4) + (sin(t1) (%293 %173 cos(t4)
 - 1. %142 %173 sin(t4) - 1. %292 %173 sin(t4) - 1. %140 %173 cos(t4))
 - 1. cos(t1) (%291 %173 cos(t4) - 1. %138 %173 sin(t4)
 - 1. %290 %173 sin(t4) - 1. %137 %173 cos(t4))) %171 + %270 %203
 + %289 (-1. %5 - 1. %4) - 1. %270 %189
 - 0.5000 (%45 %296 + %22 %254 + %22 %253 + %36 %296) %171
 - 0.5000 %271 (-1. %5 - 1. %4)
 - 0.5000 (%45 %177 + %22 %179 + %22 %178 + %36 %177) %171
 - 0.5000 %272 (-1. %8 - 1. %7) - 0.5000 %273 (%8 + %7)
 - 0.5000 %275 (-1. %5 - 1. %4) - 0.5000 %274 (-1. %5 - 1. %4)
 - 0.5000 %280 (-1. %5 - 1. %4) - 0.5000 %279 (%8 + %7)
 - 0.5000 %278 (-1. %8 - 1. %7)) w3 w4 + (%295 sin(t1)
```

- 1. %294 cos(t1) + %289 sin(t1) + %99 %288 + %89 %288 + %287 + %286

- 1. %285 %92 - 1. %270 %100 - 1. %269 %98 + %285 %90

- 1. %284 cos(t1) - 0.5000 %280 sin(t1) - 0.5000 %279 cos(t1)

+ 0.5000 %278 cos(t1) + %101 %277 + %87 %277 - 0.5000 %275 sin(t1)

- 0.5000 %274 sin(t1) - 0.5000 %273 cos(t1) + 0.5000 %272 cos(t1)

- 0.5000 %271 sin(t1) + %270 %86 + %269 %88) w2 w4 + (%101 %202

+ %225 %241 + %87 %202 + %34 %16 + %158 (%6 - 1. %3) + %40 %35

+ %147 (%18 - 1. %17) + %266 %175 + %262 %261 + %99 %191 + %226 %237

+ %89 %191 - 1. %225 %240 - 0.5000 %223 %16 - 0.5000 %222 %128

- 0.5000 %221 %35 - 0.5000 %220 %16 - 0.5000 %260 %175 - 1. %226 %236

) w3 w5 + (0.5000 %162 (-1. %8 - 1. %7) + 0.5000 %159 (%8 + %7)

+ 0.5000 %158 (%8 + %7)

+ 0.5000 (sin(t1) %259 + sin(t1) %256) (-1. %5 - 1. %4)

+ 0.5000 %115 (-1. %5 - 1. %4) + 0.5000 %154 (-1. %5 - 1. %4)

+ 0.5000 %163 (%8 + %7) + 0.5000 %136 (-1. %5 - 1. %4)

+ 0.5000 %258 (%8 + %7) + 0.5000 %157 (-1. %8 - 1. %7)

+ 0.5000 %147 (-1. %5 - 1. %4) + 0.5000 %143 (-1. %5 - 1. %4)

+ 0.5000 %255 %171 + 0.5000 %239 %171 + 0.5000 %123 (-1. %5 - 1. %4)

+ 0.5000 %108 (%8 + %7) + 0.5000 %99 %168 + 0.5000 %101 %189

+ 0.5000 %93 %250 + 0.5000 %95 %249 + 0.5000 %242 %203

+ 0.5000 %93 %251 + 0.5000 %87 %189 + 0.5000 %252 %251

+ 0.5000 %89 %168 + 0.5000 %95 %247 + 0.5000 %101 %203

+ 0.5000 %91 %250 + 0.5000 %99 %192 + 0.5000 %83 %249

+ 0.5000 %248 %247 + 0.5000 %238 %192) w1 w3

+ (%99 %245 + %56 %246 + %89 %245 - 1. %56 %244) w2 w6 + (

0.5000 %242 %241 + 0.5000 %101 %240 + 0.5000 %101 %241

+ 0.5000 %87 %240 + 0.5000 %136 %16 + 0.5000 %158 %128

+ 0.5000 %157 %35 + 0.5000 %147 %16 + 0.5000 %239 %175

+ 0.5000 %238 %237 + 0.5000 %99 %236 + 0.5000 %99 %237

+ 0.5000 %89 %236) w1 w5 + (-1. %167 cos(t1) - 1. %166 cos(t1)

+ %165 sin(t1) + %164 sin(t1) + %91 %234 + %89 %231 + %101 %232

+ %93 %234 + %95 %233 + %83 %233 + %87 %232 + %99 %231 + %224 %90

+ %227 %82 - 1. %227 %94 + %225 %86 - 1. %226 %98 + %226 %88

- 1. %225 %100 - 1. %224 %92 - 0.5000 %223 sin(t1)

- 0.5000 %222 cos(t1) + 0.5000 %221 cos(t1) - 0.5000 %220 sin(t1)

- 0.5000 %219 sin(t1) - 0.5000 %217 cos(t1) + 0.5000 %216 cos(t1)

- 0.5000 %214 sin(t1) - 0.5000 %211 sin(t1) - 0.5000 %210 cos(t1)

+ 0.5000 %209 cos(t1) - 0.5000 %207 sin(t1) - 1. %40 cos(t1)

+ %34 sin(t1)) w2 w3 + (%101 %202 + %190 %203 + %87 %202

+ %201 (-1. %5 - 1. %4) + %200 (-1. %8 - 1. %7) + %198 %171

+ %99 %191 + %170 %192 + %89 %191 - 1. %190 %189

- 0.5000 %188 (-1. %5 - 1. %4) - 0.5000 %186 (%8 + %7)

- 0.5000 %185 (-1. %8 - 1. %7) - 0.5000 %183 (-1. %5 - 1. %4)

- 0.5000 (%128 %177 + %16 %179 + %16 %178 + %35 %177) %171

- 1. %170 %168) w3 w5 + (-1. %167 cos(t1) - 1. %166 cos(t1)

+ %165 sin(t1) + %164 sin(t1) - 0.5000 %163 cos(t1)

+ 0.5000 %162 cos(t1) - 0.5000 %159 sin(t1) - 0.5000 %158 cos(t1)

+ 0.5000 %157 cos(t1) - 0.5000 %154 sin(t1) - 0.5000 %147 sin(t1)

- 0.5000 %144 - 0.5000 %143 sin(t1) - 0.5000 %136 sin(t1)

- 0.5000 %127 + 0.5000 %125 - 0.5000 %123 sin(t1) - 0.5000 %120

+ 0.5000 %115 cos(t1) - 0.5000 %108 cos(t1) + %101 %100 + %99 %98

+ %97 %96 + %95 %94 + %93 %92 + %77 %61 + %91 %90 + %71 %64 + %56 %63

+ %89 %88 + %87 %86 + %57 %80 + %85 %84 + %59 %81 + %83 %82 - 0.5000

(0.02475 %7 + 0.02475 %8 + 0.009002 %9 - 0.009002 %10

+ 3.188 sin(t1) sin(t2)) %81 - 0.5000 %71 %72

- 0.5000 (6.803 sin(t1) sin(t2) + 2.871 sin(t1) cos(t2)) %80

- 0.5000 %59 %79 - 0.5000 %77 %78

+ 0.5000 (6.803 sin(t1) sin(t2) + 2.871 sin(t1) cos(t2)) %60 + 0.5000

(0.02475 %7 + 0.02475 %8 + 0.009002 %9 - 0.009002 %10

+ 3.188 sin(t1) sin(t2)) %58 - 0.5000 %77 %62 - 0.5000 %56 %75 +

0.5000 (0.01297 %53 + 0.01297 %52 + 0.0001138 %50 - 0.0001138 %49

- 0.05090 (%8 + %7) sin(t4) - 0.2417 %9 + 0.2417 %10

+ 0.2417 sin(t1) sin(t2)) %72 - 0.5000 %71 %70 - 0.5000 (0.01297 %53

+ 0.01297 %52 + 0.0001138 %50 - 0.0001138 %49

- 0.05090 (%8 + %7) sin(t4) - 0.2417 %9 + 0.2417 %10

+ 0.2417 sin(t1) sin(t2)) %64 - 0.5000 (

-0.0001952 (%53 + %52) cos(t6) + 0.0001952 %51 + 0.0003315 %50

- 0.0003315 %49 - 0.002772 (%8 + %7) sin(t4) - 0.01317 %9

+ 0.01317 %10 + 0.01317 sin(t1) sin(t2)) %63 + 0.5000 (

1.268 (%8 + %7) cos(t4) + 0.4490 (%8 + %7) sin(t4) - 1.930 %9

+ 1.930 %10 + 1.930 sin(t1) sin(t2)) %62 - 0.5000 (

1.268 (%8 + %7) cos(t4) + 0.4490 (%8 + %7) sin(t4) - 1.930 %9

+ 1.930 %10 + 1.930 sin(t1) sin(t2)) %61 - 0.5000 %57 %60

- 0.5000 %59 %58 - 0.5000 %57 (-0.5241 cos(t1) cos(t2)

+ 0.2212 cos(t1) sin(t2) - 0.09170 sin(t1) - 0.05000 cos(t1))

- 0.5000 %56 %48 + 0.5000 (-0.0001952 (%53 + %52) cos(t6)

+ 0.0001952 %51 + 0.0003315 %50 - 0.0003315 %49

- 0.002772 (%8 + %7) sin(t4) - 0.01317 %9 + 0.01317 %10

+ 0.01317 sin(t1) sin(t2)) %48 - 1. %40 cos(t1) + %34 sin(t1)) w1 w2

ÖZGEÇMİŞ

Adı, Soyadı	: Orçun EKİN
Doğum Yeri ve Tarihi	: Aydın - 15.10.1984
Yabancı Dili	: İngilizce, Almanca

Eğitim Durumu

Lise	: Aydın Efeler Lisesi
Lisans	: Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü

E-Posta : orcunekin@yahoo.com