

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ AYAKLI YÜRÜME HAREKETİNİN
MODELLENMESİ VE KONTROLU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Mesut ACAR**

Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Programı : SİSTEM DİNAMİĞİ VE KONTROL

HAZİRAN 2007

**İKİ AYAKLI YÜRÜME HAREKETİNİN
MODELLENMESİ VE KONTROLU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Mesut ACAR
(503041609)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Haziran 2007**

TEZ DANIŞMANI Yrd.Doç.Dr. Z. Yağız BAYRAKTAROĞLU

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Ahmet KUZUCU (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Hakan TEMELTAŞ (İ.T.Ü.)

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Otomatik Kontrol Laboratuvarında “İki Ayaklı Yürüme Hareketi Modellemesi Kontrolü ve Prototip İmalatı” Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Çalışmam esnasında karşılaştığım problemlerin çözümünde bana yön gösteren, bir prototip çalışmasında görev almamı sağlayan ve teşvikleriyle motivasyonumu sürekli yüksek tutan değerli danışman hocam sayın Yrd.Doç.Dr. Zeki Yağız BAYRAKTAROĞLU’na, engin tecrübesi, yaratıcı fikirleri ile karşılaştığım problemlerde bana yön gösteren sayın Prof.Dr. Ahmet KUZUCU’ya teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca giriştiğim her konuda bana destek veren aileme, fikir alışverişinde bulunduğum ve yardımlarını aldığım tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Haziran 2007

Mesut ACAR

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1 GİRİŞ	1
2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE GERÇEKLEŞTİRİLMİŞ PROTOTİPLER	2
2.1 Literatür Özeti	2
2.2 HRP Prototipi	4
2.3 Honda Tarafından Gerçekleştirilen Prototipler	6
2.4 Münih Teknik Üniversitesi Tarafından Geliştirilen Prototip	7
3 MODEL YAPISI: BOYUTLAR, SERBESTLİK DERECELERİ, İSİMLENDİRME, VE NUMARALANDIRMA	9
3.1 Modelin Serbestlik Dereceleri	10
3.2 Uzun Boyutları	12
3.3 İsimlendirme ve Numaralandırma	13
3.4 Uzunların Kütleleri ve Atalet Tensörleri	15
4 BENZETİM ORTAMI	17
5 KİNEMATİK MODEL	19
5.1 Düz Kinematik	20
5.1.1 Bacak Uzunları Üzerine Yerleştirilen Ardışık Eksen Takımları Arasındaki $A_1^{0(b)}, A_2^{(b)}, A_3^{2(b)}, A_4^{3(b)}, A_5^{4(b)}, A_6^{5(b)}$ Homojen Dönüşüm Matrislerinin Elde Edilmesi	23
5.1.2 Bacak Uzunları Üzerindeki Eksen Takımları İle Gövde Üzerindeki $O_0^{(b)}$ Eksen Takımları Arasındaki $A_1^{0(b)}, A_2^{0(b)}, A_3^{0(b)}, A_4^{0(b)}, A_5^{0(b)}, A_6^{0(b)}$ Homojen Dönüşüm Matrislerinin Elde Edilmesi	25
5.1.3 Gövde Üzerine Yerleştirilen O_g İle $O_0^{(b)}$ Eksen Takımları Arasındaki $A_0^{g(b)}$ Homojen Dönüşüm Matrislerinin Elde Edilmesi	25
5.1.4 $O_g, O_6^{(b)}$ Eksen Takımları İle O_y Eksen Takımı Arasındaki $A_g^y, A_6^{y(b)}$ Homojen Dönüşüm Matrislerinin Elde Edilmesi	26
5.2 Ters Kinematik	27
5.3 Yörünge Planlaması	30

6 KONTROL YÖNTEMİ	33
6.1 İki Serbestlik Dereceli Manipülatör Üzerinde Eklem Kontrol Tekniğinin Uygulanması	34
6.2 Yürüme Fazları	38
6.3 Statik Denge Durumları	39
6.4 Moment ve Atalet Hesaplarında Kullanılacak Vektörlerin $O_0^{(b)}$ Eksen Takımlarına Göre Elde Edilmesi	39
6.4.1 Eklem Dönme Eksenleri Doğrultusundaki ${}^{(0)}\mathbf{e}_j^{(b)}$ Vektörlerinin Elde Edilmesi	40
6.4.2 Uzun Ağırlık Merkezi Konumlarını Gösteren ${}^{(0)}\mathbf{r}_{cm_i}^{(b)}$ Vektörlerinin Bulunması	41
6.4.3 Eklem Konumlarını Gösteren ${}^{(0)}\mathbf{r}_{e_j}^{(b)}$ Vektörlerinin Elde Edilmesi	43
6.5 Elde Edilen ${}^{(0)}\mathbf{e}_j^{(b)}$, ${}^{(0)}\mathbf{r}_{cm_i}^{(b)}$, ${}^{(0)}\mathbf{r}_{e_j}^{(b)}$ Vektörlerinin O_y Eksen Takımına Göre İfadelerinin Elde Edilmesi	44
6.5.1 Örnek Koordinat Dönüştürme İşlemi	44
6.5.2 Örnek Vektör Dönüştürme İşlemi	46
6.5.3 ${}^{(0)}\mathbf{e}_j^{(b)}$ Vektörlerinin O_y Eksen Takımına Göre İfadeleri	47
6.5.4 ${}^{(0)}\mathbf{r}_{cm_i}^{(b)}$ Vektörlerinin O_y Eksen Takımına Göre İfadeleri	47
6.5.5 ${}^{(0)}\mathbf{r}_{e_j}^{(b)}$ Vektörlerinin O_y Eksen Takımına Göre İfadeleri	48
6.5.6 O_y Eksen Takımına Göre $\mathbf{f}_{cm_i}$ Ağırlık Kuvveti Vektörlerinin Elde Edilmesi	49
6.6 Uzunların Eklemler Üzerinde Oluşturdukları Ağırlık Momentlerinin Elde Edilmesi	49
6.6.1 Örnek Ağırlık Momenti Hesabı	49
6.6.2 i. Uzun j. Eklem Üzerinde Oluşturduğu M_{ij} Ağırlık Momentinin Elde Edilmesi	50
6.6.2.1 Uzunların Sağ Bacak Eklemleri Üzerinde Oluşturdukları Ağırlık Momentlerinin Elde Edilmesi	50
6.6.2.2 Uzunların Sol Bacak Eklemleri Üzerinde Oluşturdukları Ağırlık Momentlerinin Elde Edilmesi	51
6.6.3 $\mathbf{M}$ Ağırlık Momentleri Matrisinin Elde Edilmesi	51
6.7 Uzunların Eklemlere Göre Atalet Momentlerinin Elde Edilmesi	51
6.7.1 Örnek Atalet Momenti Hesabı	52
6.7.2 i. Uzun j. Ekleme Göre I_{ij} Atalet Momentinin Elde Edilmesi	52
6.7.3 $\mathbf{I}$ Atalet Momentleri Matrisinin Elde Edilmesi	53
6.8 Fazlara Göre Eklemler İçin Toplam Ağırlık ve Atalet Momentlerinin Elde Edilmesi	53
6.8.1 TDF_l Fazında j. Eklem İçin Toplam Ağırlık Momenti $MTDF_{l_{top_j}}$, in ve Toplam Atalet Momenti $ITDF_{l_{top_j}}$ in Elde Edilmesi	53

6.8.2	TDF ₂ Fazında j. Eklem İçin Toplam Ağırlık Momenti MTDF _{2_{top_j}} ' in ve Toplam Atalet Momenti ITDF _{2_{top_j}} ' in Elde Edilmesi	55
6.8.3	ÇDF Fazında j. Eklem İçin Toplam Ağırlık Momenti MÇDF _{2_{top_j}} ' in ve Toplam Atalet Momenti İÇDF _{2_{top_j}} ' in Elde Edilmesi	56
6.9	Eklem Kontrolörü Tasarımı	58
6.9.1	Faz Geçişlerini Yumuşatmak İçin Ağırlık Katsayılarının Kullanılması	58
6.10	Temas Modeli	61
7	BENZETİM SONUÇLARI	64
7.1	Benzetim Parametreleri	67
7.2	Benzetim Senaryoları	67
8	SONUÇLAR, TARTIŞMA VE GELECEK ÇALIŞMALAR	70
8.1	Benzetim Sonuçları Hakkındaki Yorumlar	70
8.2	Gelecek Çalışmalar	71
	KAYNAKLAR	72
	EK A. ÇÖMELME – KALKMA BENZETİMLERİ	74
1.	Çömelleme Kalkma Benzetimi	74
2.	Çömelleme-Kalkma Benzetimi	77
3.	Çömelleme-Kalkma Benzetimi:	80
4.	Çömelleme-Kalkma Benzetimi	83
	EK B YANA ÇÖMELME HAREKETİ BENZETİMLERİ	86
1.	Yana Çömelleme Hareketi Benzetimi:	86
2.	Yana Çömelleme Hareketi Benzetimi	89
	EK C - AYAK KALDIRMA HAREKETİ BENZETİMİ	92
	EK D - YÜRÜME HAREKETİ BENZETİMLERİ	95
1.	Yürüme Hareketi	95
2.	Yürüme Hareketi	98
3.	Yürüme Hareketi	101
4.	Yürüme Hareketi	104
5.	Yürüme Hareketi	107
6.	Yürüme Hareketi	110
7.	Yürüme Hareketi	113
8.	Yürüme Hareketi	116
9.	Yürüme Hareketi	119
10.	Yürüme Hareketi	122
11.	Yürüme Hareketi	125
12.	Yürüme Hareketi	128
	ÖZGEÇMİŞ	131

KISALTMALAR

TDF_1	: Tek destek fazı 1
TDF_2	: Tek destek fazı 2
$\mathcal{CDF}$	: Çift destek fazı

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 : Eklemlerin Numaralandırılması	15
Tablo 3.2 : Uzuvların Kütleleri ve Atalet Tensörleri	16
Tablo 5.1 : Eklem Açılarının Başlangıç Değerleri ve Değişim Aralıkları	20
Tablo 5.2 : Uzuvlar Üzerindeki Eksen Takımları	22
Tablo 5.3 : Sağ Bacak Uzuvları İçin D-H Parametre Tablosu	23
Tablo 5.4 : Sol Bacak Eklemleri İçin D-H Parametre Tablosu	23
Tablo 6.1 : İki Serbestlik Dereceli Manipülatörün Uzuvlarının Özellikleri.....	34
Tablo 6.2 : Uzuvların Üzerlerinde Taşıdıkları Eksen Takımlarına Göre Ağırlık Merkezlerinin Konumları.....	42
Tablo 7.1 : Benzetim Parametrelerinin Açıklamaları.....	67
Tablo 7.2 : Benzetim Senaryoları.....	68

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : HRP Prototipi	4
Şekil 2.2 : ASIMO	7
Şekil 2.3 : Münih Teknik Üniversitesinde Yapılan Johnnie	8
Şekil 3.1 : İki Ayaklı Robot Modelinin Genel Yapısı	10
Şekil 3.2 : Modelin Serbestlik Dereceleri	11
Şekil 3.3 : üst_bacak, alt_bacak Uzuvarı Boyutları.....	12
Şekil 3.4 : gövde Uzunun Boyutları.....	12
Şekil 3.5 : ayak Uzunun Boyutları.....	13
Şekil 3.6 : Uzuvar ve Eklemlerin İsimlendirilmesi.....	14
Şekil 4.1 : Simulink ve ADAMS Yazılımlarının İnteraktif Çalıştırılması	18
Şekil 5.1 : Eklemlerin Pozitif Dönme Yönleri.....	19
Şekil 5.2: Temel Eksen Takımları	21
Şekil 5.3 : D-H Yaklaşımına Göre Uzuvar Üzerine Yerleştirilen Eksen Takımları. 22	
Şekil 5.4 : Gövde Yörüngesinin Yandan Görünüşü	31
Şekil 5.5 : Gövde Yörüngesinin Üstten Görünüşü	31
Şekil 5.6 : Ayak Yörüngesinin Yandan Görünüşü	31
Şekil 5.7 : Gövdenin Düşey ve Yanal Hareketi	32
Şekil 6.1 : İki Serbestlik Dereceli Manipülatörün Genel Yapısı	34
Şekil 6.2 : Birinci Eklem Kontrolörü Blok Diyagramı	37
Şekil 6.3 : İkinci Eklem Kontrolörü Blok Diyagramı.....	37
Şekil 6.4 : Sırasıyla TDF_1 , $\dot{C}DF$, TDF_2 Fazları	38
Şekil 6.5 : Sırasıyla TDF_1 , $\dot{C}DF$, TDF_2 Fazlarındaki Destek Çokgenleri.....	39
Şekil 6.6: Eklem Dönme Eksenleri Doğrultusundaki e Vektörleri.....	41
Şekil 6.7 : Örnek Koordinat Dönüştürme İşlemi	44
Şekil 6.8 : Örnek Vektör Dönüştürme İşlemi	46
Şekil 6.9 : Örnek Ağırlık Momenti Hesabı.....	49
Şekil 6.10 : Örnek Atalet Momenti Hesabı.....	52

Şekil 6.11 : TDF ₁ Fazında Sağ ve Sol Diz Eklemlerinin Ağırlıklarını Dengelemek Zorunda Oldukları Uzunluklar.....	54
Şekil 6.12 : TDF ₂ Fazında Sol ve Sağ Diz Eklemlerinin Ağırlıklarını Dengelemek Zorunda Oldukları Uzunluklar.....	56
Şekil 6.13 : ÇDF Fazında Sağ ve Sol Diz Eklemlerinin Ağırlıklarını Dengelemek Zorunda Oldukları Uzunluklar.....	57
Şekil 6.14 : Ağırlık Katsayılarının 0 ve 1 Olduğu Durumlar.....	59
Şekil 6.15 : Ağırlık Katsayılarının Yanal Hareket Miktarıyla Değişimi	59
Şekil 6.16 : Kontrollü Sistemin Genel Blok Diyagramı	60
Şekil 6.17 : Temas Modelindeki Genel Parametreler	61
Şekil 6.18 : c Damper Sönümleme Katsayısının p Dalma Miktarı İle Değişimi.....	62
Şekil 6.19 : Ayak İle Zemin Arasındaki Temas Modeli	63
Şekil 7.1 : 1. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri.....	64
Şekil 7.2 : 1. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri.....	65
Şekil 7.3 : 1. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	65
Şekil 7.4 : 1. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri.....	66
Şekil 7.5 : 1. Yürüme Hareketinde Gövde ve Ayakların İzledikleri Yörüngeler	66
Şekil A.1 : 1. Çömelme-Kalma Benzetimi Sağ Bacak Eklem Momentleri.....	74
Şekil A.2 : 1. Çömelme-Kalma Benzetimi Sol Bacak Eklem Momentleri.....	75
Şekil A.3 : 1.Çömelme Kalkma Benzetimi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri.....	75
Şekil A.4 : 1. Çömelme Kalkma Benzetimi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	76
Şekil A.5 : 1. Çömelme-Kalkma Hareketi Süperpoze Görüntüsü	76
Şekil A.6 : 2. Çömelme Kalkma Benzetimi Sağ Bacak Eklem Momentleri	77
Şekil A.7 : 2. Çömelme Kalkma Benzetimi Sol Bacak Eklem Momentleri.....	77
Şekil A.8 : 2. Çömelme Kalkma Benzetimi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri.....	78
Şekil A.9 : 2. Çömelme Kalkma Benzetimi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	78
Şekil A.10 : 2. Çömelme Kalkma Benzetimi Süperpoze Görüntüsü.....	79
Şekil A.11 : 3. Çömelme-Kalkma Benzetimi Sağ Bacak Eklem Momentleri.....	80
Şekil A.12 : 3. Çömelme-Kalkma Benzetimi Sol Bacak Eklem Momentleri.....	80
Şekil A.13 : 3. Çömelme-Kalkma Benzetimi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	81
Şekil A.14 : 3. Çömelme-Kalkma Benzetimi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri.....	81
Şekil A.15 : 3. Çömelme-Kalkma Benzetimi Süperpoze Görüntüsü.....	82
Şekil A.16 : 4. Çömelme-Kalkma Benzetimi Sağ Bacak Eklem Momentleri.....	83
Şekil A.17 : 4. Çömelme-Kalkma Benzetimi Sol Bacak Eklem Momentleri.....	83
Şekil A.18 : 4. Çömelme-Kalkma Benzetimi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	84

Şekil A.19 : 4. Çömelme-Kalkma Benzetimi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri.....	84
Şekil A.20 : 4. Çömelme-Kalkma Benzetimi Süperpoze Görüntüsü.....	85
Şekil B.1 : 1. Yana Çömelme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri	86
Şekil B.2 : 1. Yana Çömelme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri	87
Şekil B.3 : 1. Yana Çömelme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri.....	87
Şekil B.4 : 1. Yana Çömelme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	88
Şekil B.5 : 1. Yana Çömelme Hareketi Süperpoze Görüntüsü	88
Şekil B.6 : 2. Yana Çömelme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri	89
Şekil B.7 : 2. Yana Çömelme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri	89
Şekil B.8 : 2. Yana Çömelme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri.....	90
Şekil B.9 : 2. Yana Çömelme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	90
Şekil B.10 : 2. Yana Çömelme Hareketi Süperpoze Görüntüsü	91
Şekil C.1 : Ayak Kaldırma Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri	92
Şekil C.2 : Ayak Kaldırma Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri	93
Şekil C.3 : Ayak Kaldırma Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri.....	93
Şekil C.4 : Ayak Kaldırma Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	94
Şekil C.5 : Ayak Kaldırma Hareketi Süperpoze Görüntüsü	94
Şekil D.1 : 1. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri	95
Şekil D.2 : 1. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri.....	96
Şekil D.3 : 1. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	96
Şekil D.4 : 1. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri.....	97
Şekil D.5 : 1. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri	97
Şekil D.6 : 2. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri	98
Şekil D.7 : 2. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri.....	98
Şekil D.8 : 2. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	99
Şekil D.9 : 2. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri.....	99
Şekil D.10 : 2. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri	100
Şekil D.11 : 3. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri	101
Şekil D.12 : 3. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri.....	101
Şekil D.13 : 3. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	102
Şekil D.14 : 3. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri.....	102
Şekil D.15 : 3. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri	103
Şekil D.16 : 4. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri	104
Şekil D.17 : 4. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri.....	104
Şekil D.18 : 4. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	105

Şekil D.19 : 4. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	105
Şekil D.20 : 4. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri	106
Şekil D.21 : 5. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri	107
Şekil D.22 : 5. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri	107
Şekil D.23 : 5. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	108
Şekil D.24 : 5. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	108
Şekil D.25 : 5. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri	109
Şekil D.26 : 6. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri	110
Şekil D.27 : 6. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri	110
Şekil D.28 : 6. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	111
Şekil D.29 : 6. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	111
Şekil D.30 : 6. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri	112
Şekil D.31 : 7. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri	113
Şekil D.32 : 7. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri	113
Şekil D.33 : 7. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	114
Şekil D.34 : 7. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	114
Şekil D.35 : 7. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri	115
Şekil D.36 : 8. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri	116
Şekil D.37 : 8. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri	116
Şekil D.38 : 8. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	117
Şekil D.39 : 8. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	117
Şekil D.40 : 8. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri	118
Şekil D.41 : 9. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri	119
Şekil D.42 : 9. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri	119
Şekil D.43 : 9. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	120
Şekil D.44 : 9. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	120
Şekil D.45 : 9. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri	121
Şekil D.46 : 10. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri	122
Şekil D.47 : 10. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri	122
Şekil D.48 : 10. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	123
Şekil D.49 : 10. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	123
Şekil D.50 : 10. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri	124
Şekil D.51 : 11. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri	125
Şekil D.52 : 11. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri	125
Şekil D.53 : 11. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	126

Şekil D.54 : 11. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri.....	126
Şekil D.55 : 11. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri.....	127
Şekil D.56 : 12. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri	128
Şekil D.57 : 12. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri.....	128
Şekil D.58 : 12. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri	129
Şekil D.59 : 12. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri.....	129
Şekil D.60 : 12. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri.....	130

SEMBOL LİSTESİ

$u1_u2^{(b)}$	: b. bacaktaki u1 u2 uzuvları arasındaki eklem
$\theta_j^{(b)}$	: b. bacaktaki j. eklemin dönme açısı [rd]
$O_i^{(b)}$	: b. bacaktaki i. uzuv üzerine yerleştirilen eksen takımı
A_b^c	: b ve c eksen takımları arasındaki homojen dönüşüm matrisi
R_b^c	: b ve c eksen takımlarının birbirlerine göre dönmesini gösteren rotasyon matrisi
a_y	: Adım yüksekliği [m]
a_u	: Adım uzunluğu [m]
c_m	: Yere çömelme miktarı [m]
y_m	: Gövdenin yana hareket miktarı [m]
p	: Ayağın yerle temas esnasında yere dalma miktarı [m]
d	: Maksimum dalma miktarı [m]
x	: Kürenin merkezinin yere olan uzaklığı [m]
x_1	: Kürenin yarıçapı [m]
F_n	: Temas esnasında oluşan normal kuvvet [N]
F_s	: Temas esnasında oluşan sürtünme kuvveti [N]
F_t	: Toplam temas kuvveti [N]
k	: Temas rijitliği [N/m]
e	: Kuvvet ekponenti
c	: Temas sönümleme katsayısı [Ns/m]
μ	: Sürtünme katsayısı
m	: Kütle [kg]
I	: Atalet momenti [kgm ²]
τ	: Eklem momenti [Nm]
b	: Eklem viskoz sürtünme katsayısı [Ns/m]
G_t	: Ekleme etkiyen toplam ağırlık momenti [Nm]
I_t	: Ekleme etkiyen toplam atalet momenti [kgm ²]
k_p	: Oransal kontrol katsayısı
k_v	: Türevsel kontrol katsayısı
t_s	: Yerleşme zamanı [s]
ξ	: Sönüm oranı
ω_n	: Doğal frekans [rd/s]
${}^{(0)}e_j^{(b)}$	: b. bacaktaki j. eklemin dönme doğrultusunu gösteren vektörün 0. eksen takımına göre ifadesi

${}^{(0)}\mathbf{r}_{cm_i}^{(b)}$	: b. bacaktaki i. uzvun ağırlık merkezinin konumunu 0. eksen takımına göre gösteren vektör
${}^{(0)}\mathbf{r}_{e_j}^{(b)}$	: b. bacaktaki j. eklemin konumunu 0. eksen takımına göre gösteren vektör
$\mathbf{e}_j^{(b)}$	: b. bacaktaki j. eklemin dönme doğrultusunu gösteren vektörün yer eksen takımına göre ifadesi
$\mathbf{r}_{cm_i}^{(b)}$	: b. bacaktaki i. uzvun ağırlık merkezinin konumunu yer eksen takımına göre gösteren vektör
$\mathbf{r}_{e_j}^{(b)}$	: b. bacaktaki j. eklemin konumunu yer eksen takımına göre gösteren vektör
E	: Tüm eklemlerin dönme doğrultularını gösteren vektörleri içeren matris
RCM	: Tüm uzuvların ağırlık merkezlerinin konumlarını gösteren vektörleri içeren matris
RE	: Tüm eklemlerin konumlarını gösteren vektörleri içeren matris
$\mathbf{f}_{cm_i}$	: i. uzvun ağırlık kuvvetini gösteren vektör
M_L	: L doğrultusuna göre hesaplanan moment [Nm]
M_{ij}	: i. uzvun j. eklem üzerinde oluşturduğu ağırlık momentinin büyüklüğü [Nm]
M	: Tüm uzuvların tüm eklemler üzerinde oluşturdukları ağırlık momentlerinin büyüklüklerini içeren matris
I_{ij}	: i. uzvun j. eklem üzerinde oluşturduğu atalet momentinin büyüklüğü [kgm ²]
$\mathbf{I}_{cm}$	: Uzvun ağırlık merkezine yerleştirilen eksen takımına göre atalet tensörü
I	: Tüm uzuvların tüm eklemler üzerinde oluşturdukları atalet momentlerinin büyüklüklerini içeren matris
$MTDF1_{top_j}$	: TDF ₁ de j. ekleme etkiyen toplam ağırlık momenti
$ITDF1_{top_j}$	: TDF ₁ de j. ekleme etkiyen toplam atalet momenti
$MTDF2_{top_j}$	: TDF ₂ de j. ekleme etkiyen toplam ağırlık momenti
$ITDF2_{top_j}$	: TDF ₂ de j. ekleme etkiyen toplam atalet momenti
$M\dot{C}DF_{top_j}$	: ÇDF de j. ekleme etkiyen toplam ağırlık momenti
$I\dot{C}DF_{top_j}$	: ÇDF de j. ekleme etkiyen toplam atalet momenti
M_{s_j}	: ÇDF de ağırlık katsayıları kullanılarak hesaplanan, ekleme etkiyen ağırlık momenti
I_{s_j}	: ÇDF de ağırlık katsayıları kullanılarak hesaplanan, ekleme etkiyen atalet momenti
A(a : b, c)	: A matrisinin c. sütununun a. satırdan b. satıra kadar olan kısmı
A(:, c)	: A matrisinin c. sütunu
 	: veya operatörü
&&	: ve operatörü

İKİ AYAKLI YÜRÜME HAREKETİNİN MODELLENMESİ VE KONTROLU

ÖZET

Son yıllarda özellikle algılayıcı, eyleyici, imalat ve bilgisayar teknolojilerinde yaşanan gelişmeler robotikte yeni ufukların açılmasına neden olmuştur. Doğadan esinlenen robotlar buna en güzel örneklerdir. Dünyanın çeşitli yerlerinde araştırmacılar doğal sistemlerin, içinde bulunduğu ortam şartlarında en iyi tasarım olduğu düşüncesinden yola çıkarak çeşitli işlerin yerine getirilmesi için doğal sistemleri taklit eden makinalar tasarlamışlardır. Bu makinalar örümceklerden, köpeklerle, çekirgelerden balıklara kadar çok çeşitli hayvanların hareket ilkelerini örnek almaktadır. Elbette bu robotlardaki çeşitlilik doğadaki çeşitlilikle doğru orantılıdır.

Doğadan esinlenen yapay robotlar alanında en çok ilgi çeken konulardan birisi yerdeki sabit bir referansa göre hareket (*locomotion*) konusudur. Bu konuda doğadaki çeşitlilik çok zengindir. Doğadaki hayvanlar sularda kuyruk ve vücut dalgalanmalarıyla, havada kanat çırparak, karada sürünerek, zıplayarak, ya da yürüyerek hareket edebilmektedirler. Tüm bu hareket yöntemlerinin hayvanların çeşitli ortamlara adaptasyonunun sonuçları olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın konusu doğada mevcut hareket yöntemlerinden insansı iki ayaklı yürüme hareketinin modellenmesi ve dinamik benzetimidir. Çünkü eğer insana benzer, insan gibi hareket eden, insanların bulunduğu ortamlarda insanla birlikte çalışması düşünülen bir robot tasarlanması planlanıyorsa, bu robotun insanın bulunduğu ortama yeterince adapte olabilmesi ancak hareket ilkelerinin de insana yeterince benzemesi ile mümkün olabilecektir. Bu hem robotun insanın bulunduğu ortamlarda rahat hareket edebilmesi hem de insanla yapacağı ortak işlerde başarılı olabilmesi ve insana zarar vermemesi için gereklidir.

İki ayaklı yürüyen bir robot çok çeşitli alanlarda kullanılabilir. Özellikle insanla işbirliği yapacak ya da insanın yaptığı işleri yapacak bir robotun hareket yönteminin insana benzemesi gerekir. Bu tür robotların öngörülen başlıca kullanım alanları fabrikalardaki sanayi üretiminden insan sağlığına zararlı ortamlarda gerçekleştirilecek çok çeşitli görevlere kadar uzanmaktadır. Askeri uygulamalarda kullanılmak üzere elbette robot askerler, eğlence sektöründe kullanılmak üzere bir kısım iki ayaklı yürüyen robotlar, ev işlerinde ve restoran, hastane, otel gibi yerlerde kullanılmak üzere robot hizmetçiler tasarlanabilir.

Bu çalışmada iki ayaklı bir robotun mekanik özellikleri bilgisayar ortamında incelenmiş, yürüyüşe etki eden temel parametrelerle bazı benzetimler gerçekleştirilmiş ve statik yürüme hareketi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın devamında ise öncelikle prototipin temel özellikleri belirlenecek ve çalışmadan elde edilen bilgi birikimi ile iki ayaklı yürüyen bir prototip gerçekleştirilecektir. Daha ileri aşamalarda ise çeşitli kontrol yöntemleri ile prototipin yürüme performansının arttırılmasına ve otonom hale getirilmesine çalışılacaktır. Özetle, iki ayaklı yürüyen bir robot prototipini gerçekleştirmek için gerekli tasarım, optimizasyon ve benzetim çalışmaları yapılacaktır. Değişik boyutlandırma değerleri, serbestlik dereceleri, eklem yapıları, kontrol yöntemleri ile bilgisayar benzetimleri yapılacak ve böyle bir robotun tasarımında söz konusu olan parametrelere karar verilecektir.

MODELING AND CONTROL OF BIPED LOCOMOTION

SUMMARY

Recent developments in the fields of sensory, actuator, manufacturing, and computer technology has opened new horizons in the field of robotics. Biomimetic robotics is one of the good examples of this state. Inspired by the thought that “natural systems are best designs in the environmental conditions in which they are”, researchers around the world have designed a lot of machines that are mimicking natural systems to accomplish various tasks. These machines mimic a spider, a grasshopper, or a fish. Surely, diversity of these kinds of robots is proportional to diversity in nature.

One of the most interesting subjects in the field of biomimetic robotics is “locomotion”. A rich diversity can be seen in the nature about this subject. Motion in water by tail and body oscillations, in air by flapping wings, on ground by dragging, hoping, or walking are some of the good examples. Obviously, each of these locomotion types has some different advantages for different environments. However, biped locomotion is more interesting and more important than other locomotion types, because human beings are bipeds. And also, if one plans to design a human-like robot moving like a humanbeing, cooperating with human, the only way of good adaptation of this robot to the environment in which human live is to make locomotion technique similar to the human’s. This is necessary for robot not only to move easily among environments in which human live, but also to succeed in cooperation with human and not to injure humanbeings.

Biped robots can be used in many application fields. Especially, a robot which is designed to cooperate with human or to do some tasks instead of human, should has a similar locomotion technique to human. For example, after the sufficient development in this branch and some other branches of robotics, to employ in unhealthy environments in manufacturing, robot workers can be utilized (For

example mines). Robot soldiers to use in military applications, some bipeds to use in entertainment sector and robot servants to use in houseworks, restaurants, hospitals, hotels can be designed.

In conclusion, in this project mechanical properties of a biped robot will be investigated by computer, some simulations will be executed by the fundamental parameters that affect the walking, and first values of these fundamental parameters will be obtained. After this project, with the results of this project it is planned to realize a prototype. In more advanced stages of the research, it is planned to improve robot's locomotion technique by using various control methods and to make robot autonomus. In summary, design, optimization, and simulation studies which are necessary for realizing a biped robot prototype will be conducted. Simulations will be done by using various dimensioning values, degrees of freedoms, joint structures, control methods and it will be determined that parameters related to design of such a robot prototype.

1 GİRİŞ

İnsansı robotlar özellikle son yıllarda ilgi çekici bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bilgisayar ve eyleyici teknolojilerindeki gelişmeler başarılı iki ayaklı robot prototiplerinin üretilmesine zemin hazırlamıştır.

İnsanın kendi benzeri bir makina yapma fikri aslında çok eski zamanlara dayanmaktadır. İnsanın özelliklerini belirli ölçüde taklit edebilen robotların yapılması son yıllarda gerçekleştirilebilmiştir. Fakat gerçekleştirilen en başarılı prototipler bile insanın özelliklerini istenen düzeyde taklit etmekten yoksundur.

İnsansı robotik konusu çok farklı disiplinleri ilgilendiren bir konudur. İki ayaklı yürüme hareketi, elle manipülasyon işlemlerinin gerçekleştirilmesi, yüz ve ses tanıma yöntemleri bunlara örnektir. İnsansı robotlar konusunda en dikkat çekici çalışmalar Japonya’da yapılmaktadır. Japonya’da birçok kamusal araştırma merkezinde ve özel sektöre ait kuruluşlarda çok çeşitli prototipler üretilmiş ve bu prototiplerin üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Amaç her yönüyle insana benzeyen insanın bulunduğu ortamlarda bulunacak ve insana işlerinde yardım edecek bir robot yapmaktır. Günümüzde üretilen prototipler ticari ürün olabilme potansiyelini taşımakla birlikte henüz bu amaçtan çok uzaktır.

İnsansı robotlar konusunda en temel çalışma alanlarından birisi iki ayak üzerinde yürüme hareketidir. İnsanın doğal bir fonksiyonu olan yürüme hareketinin iki ayaklı yapay mekanizmalar tarafından uygulanabilmesi için gerçekleştirilmesi gereken mühendislik tasarım problemi söz konusudur. İki ayaklı yürüme hareketi konusu hali hazırda çözülmemiş birçok problemi barındırmaktadır.

2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE GERÇEKLEŞTİRİLMİŞ PROTOTİPLER

2.1 Literatür Özeti

Konu üzerine çok çeşitli disiplinlerden araştırmacılar çalışmalarını ortaya koymuşlardır. Bu, konunun disiplinler arası olma özelliğinden kaynaklanan bir sonuçtur. Aşağıda konu hakkında göze çarpan en temel çalışmaların bir özeti ve yaptıkları katkılar verilecektir.

İki ayaklı yürüme hareketi üzerine yapılan çalışmalar enerji dönüştürme prensipleri bakımından başlıca iki başlık altında toplanabilir. Bunlar 1-Pasif Yürüme Hareketi, 2-Aktif Yürüme hareketidir. Pasif yürüyücüler eklemlerin aktif kontrolüne ihtiyaç duymadan tek bir eyleyicinin oluşturduğu titreşim kuvvetlerini ya da yerçekimi kuvvetlerini mekanik yapıları aracılığıyla yürüme hareketine dönüştürürler. Bu tür robotların tarihçesi çok eskilere dayanmaktadır ve gerçekleştirilen ilk iki ayaklı yürüyen robot prototipleri bu yöntemle çalışmaktadır. Diğer bir sınıflandırma ise robotun devrilme kararlılığını sağlama prensibi açısından 1-Statik Yürüme ve 2-Dinamik Yürüme ve şeklinde yapılabilir.

Vaughan iki ayaklı yürüme hareketinin temel özelliklerini çalışmasında göstermiştir [1].

İki ayaklı robotların statik denge kavramı üzerine Shih çalışmalarda bulunmuştur [2]. Statik yürüme hareketi robotun ağırlık merkezini her an ayak basma alanı içerisinde tutmasıyla dengenin sağlandığı yürüme şeklidir. Statik yürüme hareketi üzerine yapılan çalışmaların bir özeti için Todd [3] ve Raibert [4]'in çalışmalarına bakılabilir.

Statik yürümeyi başaran ilk iki ayaklı robot prototipi Kato tarafından geliştirilmiştir [5].

Kajita, Yamaura ve Kobayashi iki ayaklı yürüme hareketi için ayakların kütsüz olduğu kabulüyle basit bir lineer dinamik model çıkarmışlar ve hafif ayaklı bir prototipi düz zeminde yürütmeyi başarmışlardır [6]. Miller robotun yapay sinir

ağlarıyla modellenmesi üzerine çalışmalar yapmıştır [7]. İki ayaklı yürüme dinamiği üzerine geçmişten günümüze yapılan çalışmaların bir özeti olarak [8]'e bakılabilir.

İki ayaklı yürüyüş hakkında en temel çalışmalardan birisi M. Vukobratovic'e aittir [9]. Vukobratovic yaklaşık 35 sene önce Sıfır Moment Noktası (ZMP-Zero Moment Point) yöntemini ortaya atmıştır. Bu yöntem iki ayaklı yürüme hareketinde dinamik kararlılığı tanımlayan en temel yöntemdir ve iki ayaklı yürüyen bir robotun kontrolünde yapılan tüm çalışmalar bir şekilde bu yöntemden faydalanırlar. Arakawa ve Fukuda ayağın kenarı etrafında dönmenin denge kararsızlığıyla olan ilgisi üzerine araştırmalar yapmışlardır [10]. Daha sonra bu kavram Goswami tarafından geliştirilmiş ve Ayak Dönme Belirteci(Foot Rotation Indicator) kavramı ortaya atılmıştır [11].

İki ayaklı robotların yürümesi esnasında ayakların yere basma durumlarına göre çeşitli fazlar oluşur. Bu durumlardan her iki ayağında yerde olduğu durumda robotun kontrolü üzerine Shih çalışmalarda bulunmuştur [12].

Waseda Üniversitesi geliştirdiği Wabian isimli insansı robotuyla son 30 yılda bu konuda yapılan çalışmalara öncülük etmiştir. Wabian'dan esinlenilerek daha sonra birçok robot prototipi gerçekleştirilmiştir.

Münih Teknik Üniversitesi Johnnie isimli iki ayaklı yürüyen bir robot prototipi geliştirmiştir [13, 14].

Konuda en göze çarpan çalışmalar Honda tarafından gerçekleştirilmiştir. Honda yaptığı çalışmalar sırasında birçok prototip geliştirmiştir. Bu prototiplerden en önemli ikisi P3, ve ASIMO'dur. ASIMO prototipler arasında en son ve en gelişmiş olanıdır [15, 16]. Hirai ASIMO'nun geliştirilme aşamalarını anlatmıştır [17].

Yine Japonya'da Akıllı Sistemler Araştırma Enstitüsü tarafından HRP prototipleri geliştirilmişlerdir [18, 19, 20].

Fujitsu HOAP-1 isimli bir prototip geliştirmiştir. Robot 20 serbestlik dereceli ve 6kg ağırlığındadır.

Sony SDR-3X isimli 24 serbestlik dereceli ve 5kg ağırlığında bir prototip geliştirmiştir.

Ayrıca, bu konuda yapım yılı 1700 lü yıllara dayanan çok eski bazı prototiplere de rastlamak mümkündür. O dönemlerde yapılan çalışmalar pasif yürüyüş tekniğine

göre tasarlanmış bir kısım prototiplerdir ve genellikle eğlence amaçlı kullanılmışlardır.

2.2 HRP Prototipi



Şekil 2.1 : HRP Prototipi

AIST (Intelligent Systems Research Institute) bünyesinde çalışmalarını yürüten İnsansı Robot Çalışma Gurubu, Kawada Industries Inc. ve Tokyo Üniversitesi işbirliği ile Japonya’da insansı robotlar üzerine birçok ar-ge çalışması yapmış ve çeşitli özelliklerde prototipler ve yazılımlar geliştirmişlerdir. Projenin ismi HRP (Humanoid Robotics Project)’tir. HRP prototiplerinin genel yapısı Şekil 2.1’de görülmektedir. Geliştirilen prototipler arasında geline son nokta HRP-2 isimli prototiptir. Bu prototip 1540mm boyunda 58kg ağırlığındadır ve 30 serbestlik derecesine sahiptir. Prototip için geliştirilen yazılım platformu ise dinamik bir simülatördür ve robotun tüm dinamik simülasyonları ve kontrol işlemleri bu yazılım ile gerçekleştirilmektedir. HRP projesinin hedefi insansı robotik çalışmaları için bir insansı robotik platformu geliştirmek olarak betimlenmiştir. Proje kapsamında geliştirilen insansı robotların ilki HRP-1 prototipidir. Bu prototip Honda R&D tarafından geliştirilmiştir. Ayrıca bu prototipin iki ayaklı yürüme için geliştirilen kontrolörü de Honda R&D ye aittir. HRP-1 prototipi insansı robotların fabrikalarda bakım-onarım işleri ve ev ve ofis güvenlik hizmetleri alanlarındaki

uygulamalarındaki araştırmalarda kullanılmıştır. AIST bu prototipin kontrol yazılımını hareketlerde daha fazla esneklik için yeniden geliştirmiştir. Prototipin bu yeni yazılımla ismi HRP-1S olarak değiştirilmiştir. Geliştirilen bu yeni yazılımla robotun kol ve bacakları eşzamanlı olarak kontrol edilebilir hale gelmiştir. HRP-1S prototipinde endüstriyel araçların teleopratif kontrolü ve insana yardım uygulamaları üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Ayrıca insansı robotlar için dinamik simülatör de geliştirilmiştir. Bu paket bir simülatör ve bir hareket kontrol yazılımından oluşmaktadır ve OpenHRP (Open Architecture Humanoid Robotics Platform) olarak isimlendirilmiştir. HRP projesi kapsamında ayrıca yeni bir insansı robot donanımı da geliştirilmiştir. Bu donanımın bacak modülü insansı yürüme hareketinde gerekli bacak özelliklerini incelemek için kullanılmıştır. Modül HRP-2L olarak isimlendirilmiştir. Kol modülü ise insanla işbirliği işlerinde robotun performansını değerlendirmek için geliştirilmiştir ve HRP-2A olarak isimlendirilmiştir. Daha sonra modüller birleştirilerek yeni bir insansı robot prototipi geliştirilmiş ve HRP-2P olarak isimlendirilmiştir. Daha sonra HRP-2P üzerinde bazı modifikasyonlara gidilerek yeni prototipin son halini alması sağlanmıştır. Son prototipin ismi HRP-2'dir. OpenHRP yazılımı HRP-2L, HRP-2A, HRP-2P, HRP-2 ve HRP-1S prototiplerinin hepsinde ortak olarak kullanılmıştır. Son prototip HRP-2 üzerinde insanla işbirliği görevleri üzerinde araştırmalar yapılmaktadır.

HRP-2 prototipinin ardılı olarak HRP-3P prototipi geliştirilmeye başlanmıştır. Bu geliştirilen son prototipin mekanik yapısı kirli ve sulu ortamlarda çalışma imkanı verecek şekilde tasarlanmaktadır.

HRP-1P 1600mm boyunda, 120kg ağırlığında, ve 30 serbestlik derecesine sahip bir prototiptir. Başında iki eklem, her bir kolunda 7 eklem, her bir elinde 1 eklem, ve her bir bacağında 6 eklem vardır. Bu prototip Honda P3 prototipinin geliştirilmiş bir versiyonudur. Prototip iki efendi-kol'a ve başa takılan bir göstergesi bulunan teleoperasyon kokpitine sahiptir ve bu kokpit robota optik fiber kablo veya ethernet vasıtasıyla bağlanabilmektedir.

HRP-2P ve HRP-2 prototiplerinin elektriksel özellikleri tasarlanırken hafiflik ve ince bir yapıda olabilmesi göz önüne alınmıştır. Bilgisayara veri giriş-çıkışında PCI bus yeterli olmamış bu yüzden yeni bir arabirim kartı geliştirilmiştir. Robotun servo sürücülerini de piyasadaki ürünlerin istenen kompaktlıkta olmamasından dolayı özel olarak geliştirilmiştir. Robotta 3 kamera ünitesi bulunmaktadır. Bu kameralar ile

Çalışma ortamının 3 boyutlu haritası çıkarılabilmekte ve hedef nesnelerin pozisyon ve oryantasyonu bulunabilmektedir. Robotun üzerinde 2 adet Pentium III, 1GHz işlemcili kart bulunmaktadır. Kartlardan birisi hareketlerin gerçek-zamanlı kontrolu için kullanılmış diğeri ise kamera sistemi için kullanılmıştır. İşletim sistemi ART-Linux'tur. İşletim sistemi özellikle gerçek-zamanlı işlemlerde avantaj sağlamaktadır. HRP-2 robotunda ise HRP-2P robotundan daha güçlü motorlar kullanılmış, motorlar için bir soğutma sistemi geliştirilmiş, ve daha iyi bir g nitesi kullanılmıştır. Bu sayede HRP-2 60dak boyunca 1.25km/saat hızla yürüyebilmektedir. Ayrıca HRP-2'de mekanizmanın rijitliği artırılarak daha kararlı bir yürüyüş sağlanmıştır. HRP-2 nin dış görünüşü de profesyonel bir tasarımcı tarafından tasarlanmıştır.

OpenHRP platformu CORBA (Common Object Request Broker Architecture) mimarisi üzerinde gerçeklenmiştir. Bu sayede değişik kontrol algoritmalarının gerçeklenmesinde işletim sistemi ve dil bağımlılığı ortadan kalkmıştır.

2.3 Honda Tarafından Gerçekleştirilen Prototipler

Honda iki ayaklı ve iki kollu bir robot geliştirdiğini ilk defa 1996 yılı sonunda duyurmuştur. Honda insansı robot çalışmalarına 1986 yılında başlamıştır. alışmalarında robotun akıllı ve hareket kabiliyeti yüksek bir robot olmasını dikkate almışlardır. Ayrıca robotun insanla aynı ortamlarda bulunabilir olması ve insanın yapamadığı işlerde insanla işbirliği yapabilmesi amaçlanmıştır. Robot ticari bir gdyle ve hizmet robotiği alanında ilk ticari ürünü ortaya çıkarmak için yapılmıştır. İlk başlarda tekerlekli, kolları ve kamerası olan bir robot tasarlanması düşünüldüyse de bunun hareket kabiliyeti açısından yeterli olmayacağı düşünülerek robotun iki ayaklı bir robot olması planlanmıştır. Robotun bacak tasarımında 7 temel çalışma alanında araştırma yapılmıştır [17]. Bunlar:

- 1- Bacak eklemlerinin yrmedeki etkinliği
- 2- Bacak eklemlerinin yerleri
- 3- Bacak eklemlerinin hareket aralıkları
- 4- Bacak boyutları, ağırlıkları ve ağırlık merkezleri
- 5- Yürüme esnasında eklemlerin momentleri
- 6- Yrmeyle ilgili sensörler

7- Yürüme esansında ayağın yere konulması sırasında bacak eklemlerinde oluşan tepkiler

Honda tarafından geliştirilmiş en önemli iki prototip P3 ve ASIMO prototipleridir. ASIMO Şekil 2-5’de görülmektedir.



Şekil 2.2 : ASIMO

P3 yaklaşık 200kg ağırlığında oldukça yavaş hareket eden bir prototiptir. ASIMO ise günümüzün en gelişmiş iki ayaklı robotudur. ASIMO 34 serbestlik derecesine sahiptir, 130cm boyunda ve 45cm genişliğindedir. Ağırlığı 54kg’dır. Güç ünitesi üzerindedir. En yüksek ulaşabildiği yürüme hızı ise 6km/saat’tir.

2.4 Münih Teknik Üniversitesi Tarafından Geliştirilen Prototip

Münih Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilen bu prototipin ismi Johnnie’dır. Her bacakta 6 serbestlik derecesi olmak üzere toplam 17 serbestlik derecesine sahiptir. Boyu 180cm ağırlığı 40kg’dır. Üzerinde güç ünitesi yoktur, gerekli güç bir kablo vasıtasıyla robota iletilmektedir. Ulaşabildiği en yüksek yürüme hızı 2km/saat’tir. Johnnie Şekil 2.3’de görülmektedir.



Şekil 2.3 : Münih Teknik Üniversitesinde Yapılan Johnnie

Münih Teknik Üniversitesi Johnnie'nin ardından daha yüksek yürüme hızlarına ulaşabilecek yeni bir prototipin tasarımına başlamıştır.

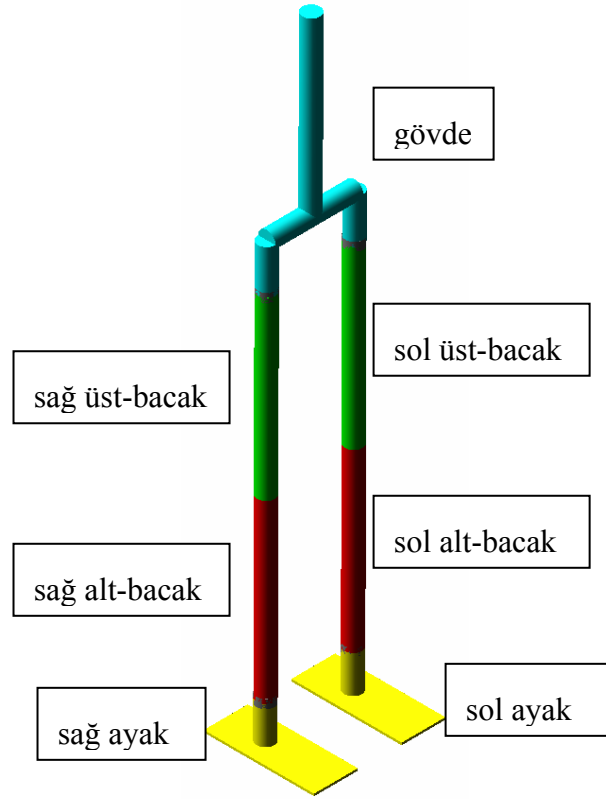
3 MODEL YAPISI: BOYUTLAR, SERBESTLİK DERECELERİ, İSİMLENDİRME, VE NUMARALANDIRMA

Robot tasarımında toplam serbestlik derecesi sayısının, eklemlerin konumlarının ve uzuvların boyutlarının seçimi büyük önem taşımaktadır. Robotun bu yapısal mekanik özelliklerinin belirli bir çalışma alanı içerisinde robotun gerçekleştirmesi istenen göreve göre belirlenmesi gerekmektedir. Genellikle bir robottan istenen görev, son uzvunu çalışma alanı içerisinde kalan çeşitli yörüngelerde hareket ettirmesini gerektirir. Bu geometrik bir problemdir. Eğer serbestlik derecesi gereğinden az seçilirse veya eklemler uygun pozisyonlara yerleştirilmezse ya da uzuvların boyutları gereğinden kısa veya uzun seçilirse robotun son uzvunu istenen konum ve oryantasyona getirmesi mümkün olmayacaktır. Gerekenden fazla serbestlik derecesi seçildiği durumda ise robot istenen görevi yerine getirebilecek fakat bu sefer de robotun kinematik analizi gereksiz yere karmaşıklaşacak hatta bazen imkânsız hale gelebilecektir. Tüm bu olumsuzluklardan kaçınmak için robotun mekanik yapısının optimum bir şekilde seçilmesi gereklidir.

İnsan bacağına kemik ve kas yapısı incelendiğinde oldukça karmaşık bir yapıya sahip olduğu görülür. İnsan bacağı birçok kemik, eklem ve kastan oluşmaktadır. Bu haliyle insanın yürüyüşünü taklit edecek bir robot yapmak günümüz teknolojik imkanları içerisinde oldukça karmaşık bir problemdir. Her eklem ve kemik temel hareketler açısından aynı derecede öneme sahip değildir. Bu da düşük bir serbestlik derecesiyle benzer davranışları gerçekleştirebilecek bir robot tasarımını mümkün kılmaktadır.

Önerilen iki ayaklı yürüyen robot modeli insanın boyut ve serbestlik dereceleri örnek alınarak oluşturulmuştur. Model bir gövde ve ona bağlı iki bacedan oluşmaktadır. Bacaklar dışında gövdeye bağlı herhangi bir uzuv modellenmemiştir. Gövde tek bir uzuvdur. Her bir bacak ise **üst_bacak**, **alt_bacak**, ve **ayak** olmak üzere üç uzuvdan meydana gelmektedir. Ayrıca modellemede kolaylık sağlaması açısından her bir bacakta üçer adet sözde uzuv kullanılmıştır. Sözde uzuvlar kütesiz ve ataletsizdir. Bu uzuvların fonksiyonları daha sonra ayrıntılı olarak verilecektir.

Model sözde uzuvlar hariç toplamda yedi uzva sahiptir. Uzuvların yerleri ve isimleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : İki Ayaklı Robot Modelinin Genel Yapısı

3.1 Modelin Serbestlik Dereceleri

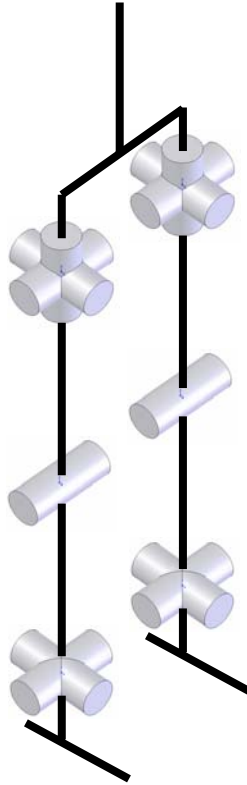
İnsan bacağı tüm serbestlikler göz önüne alındığında çok yüksek serbestlik derecesine sahiptir. Fakat bacağın temel fonksiyonları açısından bu serbestliklerin hepsi aynı derecede öneme sahip değildir. Bacağın temel fonksiyonlarını gerçekleştirebilmesini sağlayan altı temel eklem vardır. Bu eklemlerin üçü kalçada biri dizde ikisi ise ayak bileğindedir. Bu sayede insan, bacağın son uzvu olan ayağını çalışma alanı içerisinde gövdeye göre uzayda herhangi bir konum ve oryantasyona getirebilmektedir.

Uzayda herhangi bir katı cismin altı serbestliği vardır. Bunlardan üçü cismin konumunu, üçü de cismin oryantasyonunu göstermektedir. Herhangi bir endüstriyel manipülatörün de son uzvunu istenen bir konum ve oryantasyona getirebilmesi için birbiriyle aynı görevi görmeyen en az altı serbestlik derecesine sahip olması gereklidir. Endüstriyel manipülatörlerin birçoğu altı serbestlik derecesine sahiptir ve

son üç eklemlerinin dönme eksenleri bir noktada kesişmektedir. Bu tür manipülatörlerin analiz ve tasarımı üzerine oldukça fazla çalışılmış ve önemli bir bilgi birikimi oluşturulmuştur.

İki ayaklı yürüyen robot modelinin eklem sayısı ve eklem yerlerinin seçimi sırasında hem insan bacağının yapısı hem de endüstriyel manipülatörler göz önünde bulundurulmuştur. Buna göre robotun her bir bacağının altı serbestlik derecesine sahip olması gerektiği düşünülmüştür. Robotun eklemleri insan bacağının temel eklemleriyle aynı pozisyonlara yerleştirilmiştir. İlk üç eklem dönme eksenlerinin bir noktada kesişmesi sağlanmıştır. Böylelikle altı serbestlik dereceli endüstriyel manipülatörler için kullanılan tüm yöntemlerin iki ayaklı robot modeli içinde kullanılması mümkün duruma gelmiştir.

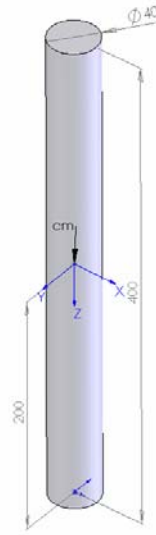
Serbestlik derecelerinin üçü kalça eklemine gövdeyle üst-bacak arasında biri diz eklemine üst-bacakla alt-bacak arasında ikisi ise bilek eklemine alt-bacakla ayak arasındadır. Üretilmiş birçok iki ayaklı yürüyen robot prototipinin bacak konfigürasyonları bu şekildedir. Modelin serbestlik dereceleri Şekil 3-2’de gösterilmiştir.



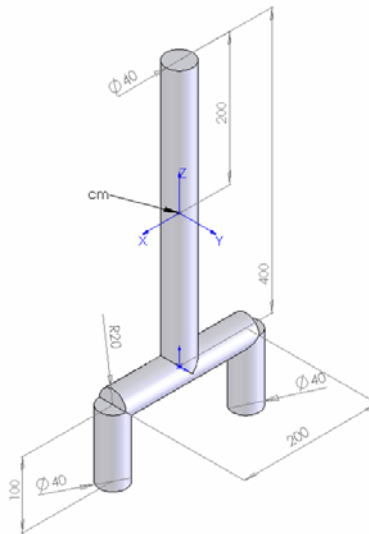
Şekil 3.2 : Modelin Serbestlik Dereceleri

3.2 Uzun Boyutları

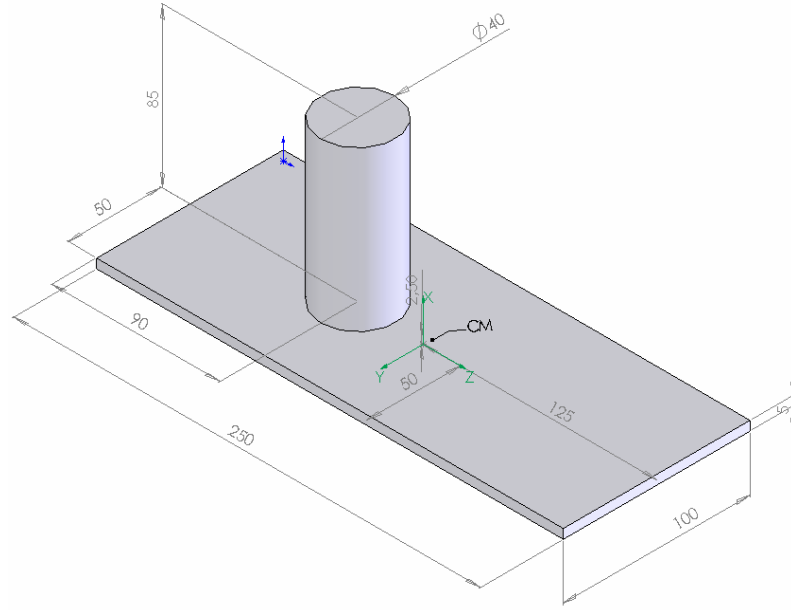
İnsan bacağının kemik sayısı ve yapısı incelendiğinde oldukça fazla sayıda ve çok çeşitli boyut ve şekillerde kemiklerin bulunduğu görülür. Fakat bacağın temel fonksiyonlarını gerçekleştiren üç adet kemik vardır. Bu kemikler uyluk, kaval ve ayak kemikleridir. Robot modeli oluşturulurken de bu temel kemikler göz önüne alınmıştır. Modelin bacak uzuvlarının temel boyutları orta boylu bir insanınki ile hemen hemen aynıdır. Uzunların boyutları, ağırlık merkezlerinin yerleri ve ağırlık merkezlerine yerleştirilen eksen takımları Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : üst_bacak, alt_bacak Uzunları Boyutları



Şekil 3.4 : gövde Uzununun Boyutları



Şekil 3.5 : ayak Uzunluğun Boyutları

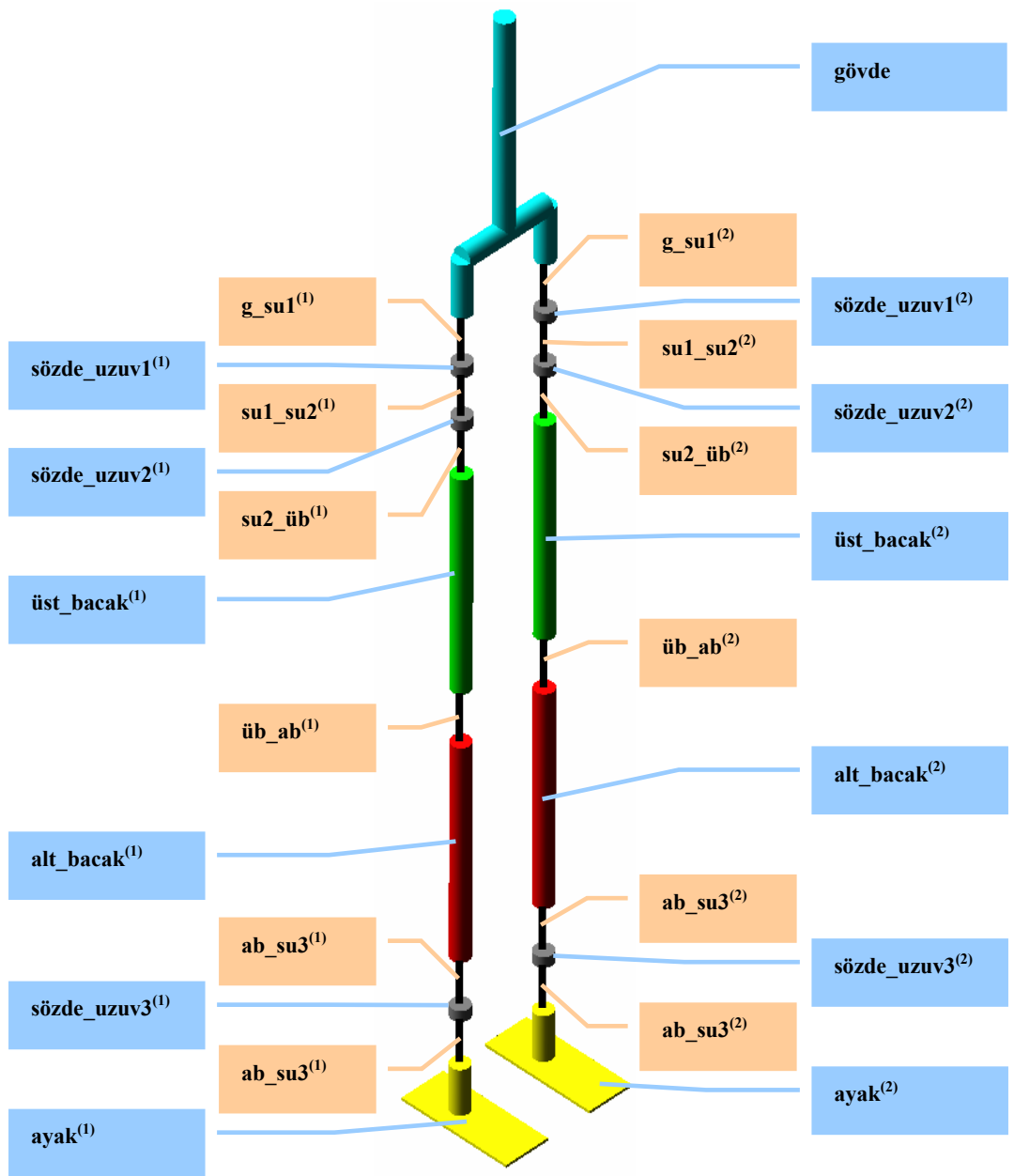
3.3 İsimlendirme ve Numaralandırma

Daha önce de belirtildiği gibi robotun üç ayrı fazı için üç ayrı model geliştirilecektir. Tüm bu modelleme işlemlerinde ortak bir notasyon kullanılacaktır. Bunun için her bir uzva ve her bir ekleme bir numara verilmiştir.

Robota ait herhangi bir özelliğin numaralandırılmasında iki temel yaklaşım kullanılacaktır. Bunlardan birincisi özelliğin robotun genelindeki numarasını belirten global numaralandırma, ikincisi özelliğin herhangi bir bacak üzerindeki numarasını belirten lokal numaralandırma. Robotun toplam uzuv sayısı 13'tür. Dolayısıyla uzuvlarla alakalı herhangi bir özelliğin global numarası 1-13 arasındadır. Modelin toplam eklem sayısı 12'dir. Dolayısıyla eklemlere ait herhangi bir özelliğin global numarası 1-12 arasındadır. Robotun bir bacakta toplam uzuv sayısı ise 6'dır. Dolayısıyla uzuvlarla alakalı herhangi bir özelliğin lokal numarası 1-6 arasındadır. Aynı şekilde bir bacakta toplam eklem sayısı 6 olduğundan eklemlerle alakalı herhangi bir özelliğin lokal numarası 1-6 arasında değişmektedir.

Global ve lokal numaralar sağ alt indis olarak gösterilmiştir. Sağ üstte parantez içerisinde gösterilen indis ise bacak numarasını göstermektedir. (1) sağ bacak için, (2) ise sol bacak için kullanılmıştır. Eğer sağ üst indis belirtilmezse sağ alt indis global numarayı göstermektedir. Sol üst indisin belirtildiği durumda ise sağ alt indis

lokal numarayı belirtmektedir. Robot uzuv ve eklemlerinin isimlendirilmesi Şekil 3.6’da görülmektedir. Eklemlerin numaralandırılması Tablo 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.6 : Uzuv ve Eklemlerin İsimlendirilmesi

Tablo 3.1 : Eklemlerin Numaralandırılması

Eklem Numarası	Eklem ismi	Açı	Eklemin Bağladığı Uzuvlar
1	$g_su1^{(1)}$	$\theta_1^{(1)}$	gövde – sözde_uzuv1 ⁽¹⁾
2	$su1_su2^{(1)}$	$\theta_2^{(1)}$	sözde_uzuv1 ⁽¹⁾ - sözde_uzuv2 ⁽¹⁾
3	$su2_üb^{(1)}$	$\theta_3^{(1)}$	sözde_uzuv2 ⁽¹⁾ – üst_bacak ⁽¹⁾
4	$üb_ab^{(1)}$	$\theta_4^{(1)}$	üst_bacak ⁽¹⁾ – alt_bacak ⁽¹⁾
5	$ab_su3^{(1)}$	$\theta_5^{(1)}$	alt_bacak ⁽¹⁾ – sözde_uzuv3 ⁽¹⁾
6	$su3_a^{(1)}$	$\theta_6^{(1)}$	sözde_uzuv3 ⁽¹⁾ – ayak ⁽¹⁾
7	$g_su1^{(2)}$	$\theta_1^{(2)}$	gövde – sözde_uzuv1 ⁽²⁾
8	$su1_su2^{(2)}$	$\theta_2^{(2)}$	sözde_uzuv1 ⁽²⁾ - sözde_uzuv2 ⁽²⁾
9	$su2_üb^{(2)}$	$\theta_3^{(2)}$	sözde_uzuv2 ⁽²⁾ – üst_bacak ⁽²⁾
10	$üb_ab^{(2)}$	$\theta_4^{(2)}$	üst_bacak ⁽²⁾ – alt_bacak ⁽²⁾
11	$ab_su3^{(2)}$	$\theta_5^{(2)}$	alt_bacak ⁽²⁾ – sözde_uzuv3 ⁽²⁾
12	$su3_a^{(2)}$	$\theta_6^{(2)}$	sözde_uzuv3 ⁽²⁾ – ayak ⁽²⁾

3.4 Uzuvların Kütleleri ve Atalet Tensörleri

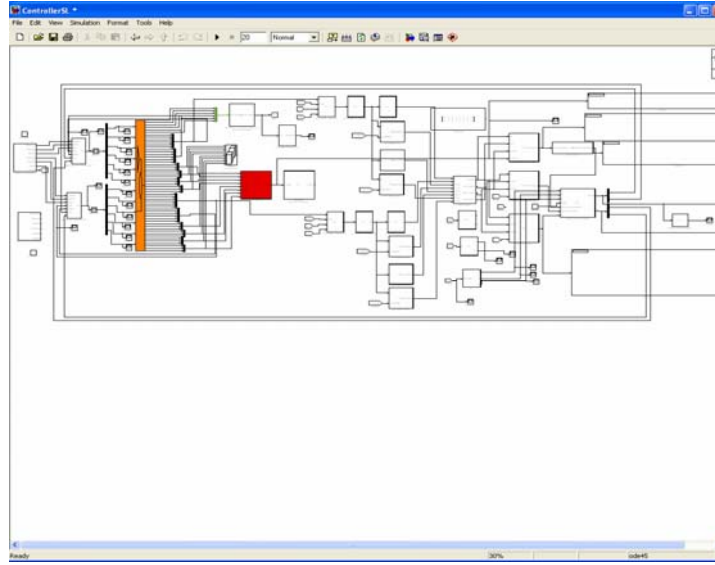
Robot modelinin uzuvlarının kütleleri ve atalet tensörleri malzemenin çelik olduğu kabulüyle hesaplanmıştır. Modelin toplam kütlesi 21.5562kg dır. Uzuvların kütleleri ve ağırlık merkezlerine göre atalet tensörleri Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2 : Uzuvarların Kütleleri ve Atalet Tensörleri

Uzuv İsmi	Kütle(kg)	Atalet tensörü(kgm ²) $\mathbf{I}_{cm} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}$
gövde	3.9212	$\begin{bmatrix} 0.05267 & 0 & 0 \\ 0 & 0.05267 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0007842 \end{bmatrix}$
üst_bacak ⁽¹⁾ üst_bacak ⁽²⁾	3.9212	$\begin{bmatrix} 0.05267 & 0 & 0 \\ 0 & 0.05267 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0007842 \end{bmatrix}$
alt_bacak ⁽¹⁾ alt_bacak ⁽²⁾	3.9212	$\begin{bmatrix} 0.05267 & 0 & 0 \\ 0 & 0.05267 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0007842 \end{bmatrix}$
ayak ⁽¹⁾ ayak ⁽²⁾	0.9751	$\begin{bmatrix} 0.005891 & 0 & 0 \\ 0 & 0.00508 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0008146 \end{bmatrix}$

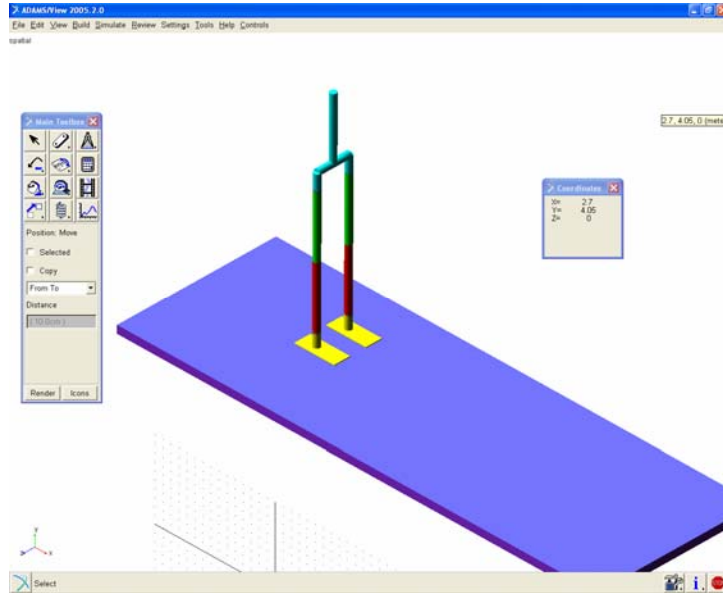
4 BENZETİM ORTAMI

Çalışmada temel olarak iki yazılım kullanılmıştır. Bu yazılımlar MSC.ADAMS® ve MATLAB®-Simulink® yazılımlarıdır. ADAMS yazılımı mekanik sistemlerin belirli kuvvetler ve kısıtlar altında davranışını hesaplamaktadır. Robotun tüm geometrik özellikleri, eklemler ve zeminle temas gibi kinematik kısıtları ve kütle ve ataletler gibi dinamik özellikleri ADAMS yazılımında modellenmiştir. Simulink yazılımı kontrol sistemleri geliştirmekte kullanılan bir yazılımdır. Robotun tüm kinematik hesaplamaları ve kontrol algoritması Simulink yazılımında gerçekleştirilmiştir. Kısacası ADAMS yazılımı robotun ileri dinamiğinin çözülmesinden sorumludur ve kontrol edilen sistemi ve ölçme sistemini modellemektedir. Simulink yazılımı ise kontrolörü modellemektedir. Bu iki program interaktif olarak çalıştırılmaktadır. ADAMS'tan Simulink'e kontrol için gerekli tüm ölçümler(eklem açısal konumları, eklem açısal hızları, temas kuvvetleri) gönderilmekte Simulink'ten de ADAMS'a eklem momentleri gönderilmektedir. Her iki yazılımın genel yapısı ve etkileşimleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Eklem Momentleri

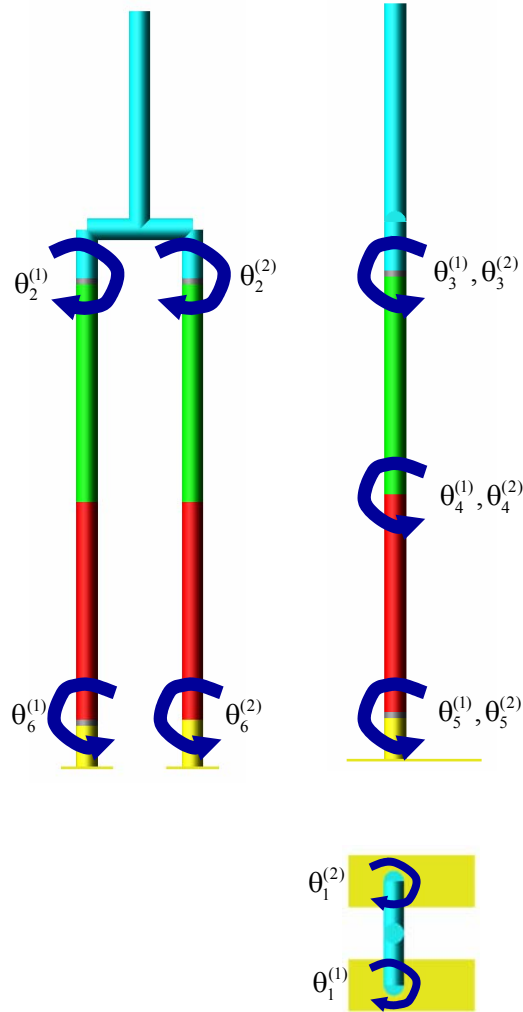
**Eklem Açısal Konumları
Eklem Açısal Hızları
Temas Kuvvetleri
Gövde Konum ve Oryantasyonu**



Şekil 4.1 : Simulink ve ADAMS Yazılımlarının İnteraktif Çalıştırılması

5 KİNEMATİK MODEL

Robotun kinematik modeli manipülatörlerin modellenmesinde kullanılan yöntemler kullanılarak elde edilmiştir. Analiz Denavit–Hartenberg yaklaşımı göz önüne alınarak yapılmıştır [21, 22]. Bu yöntemle göre her bir uzuv üzerine bir eksen takımı yerleştirilmiş ve homojen dönüşüm matrisleri kullanılarak eksen takımları arasındaki dönüşümler ifade edilmiştir. Robotun hiçbir uzvu sabit bir referansa bağlı değildir. Bu yüzden sağ ve sol bacağın her biri gövdeye bağlı altı serbestlik dereceli bir manipülatör olarak düşünülmüş ve bu kabule göre eksen takımları yerleştirilmiştir. Her bir bacak için 0. eksen takımı gövdeye 6. eksen takımı ise ayağa yerleştirilmiştir.



Şekil 5.1 : Eklemlerin Pozitif Dönme Yönleri

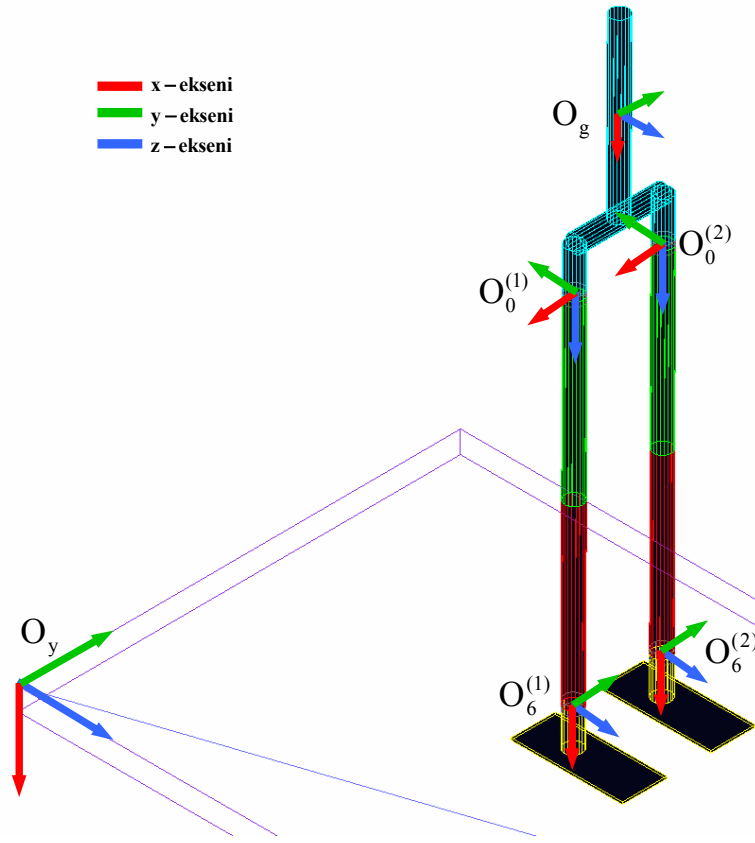
Robotun eklem açılarının pozitif yönleri Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Eklemlere uygulanan momentler de aynı pozitif yön kabulüyle uygulanmıştır. Eklem açılarının başlangıç değerleri ve ters kinematik çözümün geçerli olabilmesi için kalması gerekli aralıklar Tablo 5.1’de gösterilmiştir.

Tablo 5.1 : Eklem Açılarının Başlangıç Değerleri ve Değişim Aralıkları

Açı	Açısal konumun başlangıç değeri (Şekil 5.1’deki konfigürasyon) (rd)	Açısal konumun değişim aralığı (rd)
$\theta_1^{(1)}$	0	$-\pi/2, +\pi/2$
$\theta_2^{(1)}$	$-\pi/2$	$-\pi, 0$
$\theta_3^{(1)}$	0	$-\pi/2, +\pi/2$
$\theta_4^{(1)}$	0	$-\pi, 0$
$\theta_5^{(1)}$	0	$-\pi/2, +\pi/2$
$\theta_6^{(1)}$	0	$-\pi/2, +\pi/2$
$\theta_1^{(2)}$	0	$-\pi/2, +\pi/2$
$\theta_2^{(2)}$	$-\pi/2$	$-\pi, 0$
$\theta_3^{(2)}$	0	$-\pi/2, +\pi/2$
$\theta_4^{(2)}$	0	$-\pi, 0$
$\theta_5^{(2)}$	0	$-\pi/2, +\pi/2$
$\theta_6^{(2)}$	0	$-\pi/2, +\pi/2$

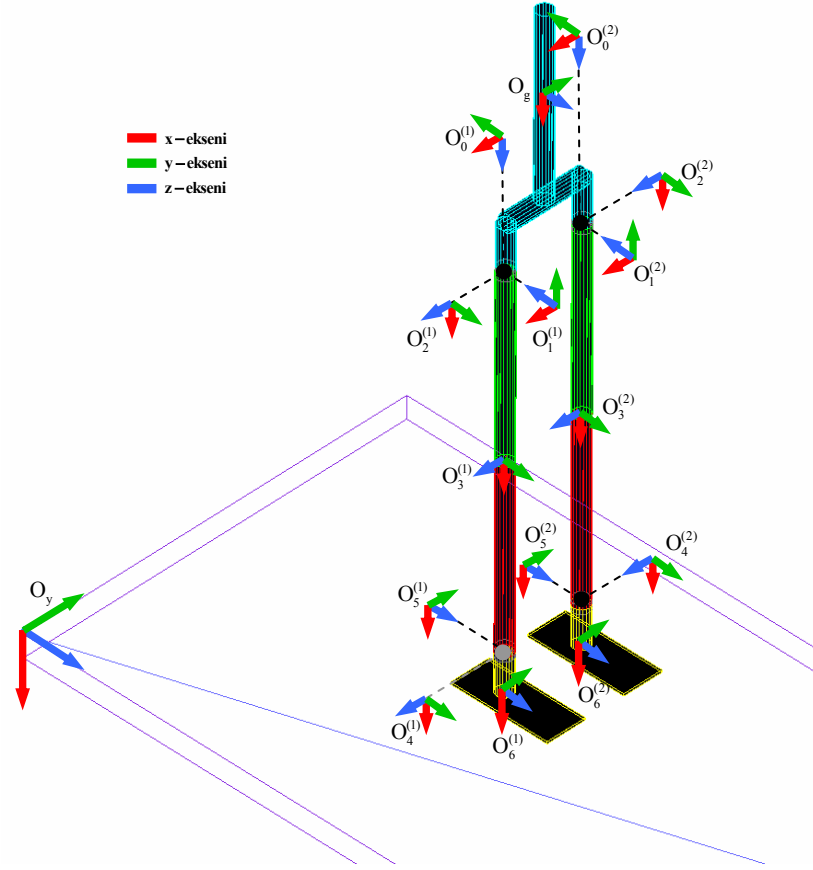
5.1 Düz Kinematik

Robot üzerine ve yere yerleştirilen temel eksen takımları Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Robotun düz kinematik modeli bu eksen takımları arasındaki dönüşüm matrisleri kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 5.2: Temel Eksen Takımları

Bacaklar üzerine yerleştirilen eksen takımları Şekil9 da gösterilmiştir. Eksen takımları Denavit-Hartenberg yaklaşımına uygun olarak eklem eksenlerinin kesiştikleri noktalara ve z eksenleri eklem eksenini gösterecek şekilde yerleştirilmiştir. Buna göre örnek olarak sağ bacak üzerinde i. uzuv üzerine yerleştirilen eksen takımının z eksenini $(i+1)$. eklem eksenini doğrultusundadır. İlk üç dönme eksen ve ayrıca son iki dönme eksen bir noktada kesişmektedir. Bu özellik daha sonra ters kinematik çözümün yapılmasında kolaylık sağlayacaktır. Kalça ve bilek gibi iki uzuv arasında birden fazla dönmenin olduğu bu gibi durumlarda araya sözde uzuvlar konulmuş ve uygun eksen takımları bu uzuvların üzerine yerleştirilmiştir. Buna göre gövdeyle üst_bacak arasına iki adet sözde uzuv alt_bacak ile ayak arasına da bir adet sözde uzuv yerleştirilmiştir. Sanal uzuvlar kütsüz ve ataletsizdir. Görevleri eksen takımlarını üzerinde taşımak ve karmaşık dönme işlemlerini basitleştirmektir. Şekil 5.3’de ve Tablo 5.2’de uzuvlar ve üzerlerine yerleştirilen eksen takımları toplu halde gösterilmiştir.



Şekil 5.3 : D-H Yaklaşımına Göre Uzuvlar Üzerine Yerleştirilen Eksen Takımları

Tablo 5.2 : Uzuvlar Üzerindeki Eksen Takımları

Uzuv Numarası	Uzuv İsmi	Üzerindeki Eksen Takımı
1	sanal_uzuv1 ⁽¹⁾	$O_1^{(1)}$
2	sanal_uzuv2 ⁽¹⁾	$O_2^{(1)}$
3	üst_bacak ⁽¹⁾	$O_3^{(1)}$
4	alt_bacak ⁽¹⁾	$O_4^{(1)}$
5	sanal_uzuv3 ⁽¹⁾	$O_5^{(1)}$
6	ayak ⁽¹⁾	$O_6^{(1)}$
7	sanal_uzuv1 ⁽²⁾	$O_1^{(2)}$
8	sanal_uzuv2 ⁽²⁾	$O_2^{(2)}$
9	üst_bacak ⁽²⁾	$O_3^{(2)}$
10	alt_bacak ⁽²⁾	$O_4^{(2)}$
11	sanal_uzuv3 ⁽²⁾	$O_5^{(2)}$
12	ayak ⁽²⁾	$O_6^{(2)}$
13	gövde	$O_g, O_0^{(1)}, O_0^{(2)}$

5.1.1 Bacak Uzuvları Üzerine Yerleştirilen Ardışık Eksen Takımları Arasındaki $A_1^{(b)}, A_2^{(b)}, A_3^{(b)}, A_4^{(b)}, A_5^{(b)}, A_6^{(b)}$ Homojen Dönüşüm Matrislerinin Elde Edilmesi

Tüm bu uzuv boyutları ve yerleştirilen eksen takımları kullanılarak her iki bacak uzuvları için ayrı ayrı Denavit-Hartenberg parametre tablosu Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'teki gibi oluşturulmuştur.

Tablo 5.3 : Sağ Bacak Uzuvları İçin D-H Parametre Tablosu

Uzuv Numarası(i)	$\alpha_i(\text{radyan})$	$a_i(\text{m})$	$d_i(\text{m})$	$\theta_i(\text{radyan})$
1	$-\pi/2$	0	0	$\theta_1^{(1)}$
2	$-\pi/2$	0	0	$\theta_2^{(1)}$
3	0	0.4	0	$\theta_3^{(1)}$
4	0	0.4	0	$\theta_4^{(1)}$
5	$-\pi/2$	0	0	$\theta_5^{(1)}$
6	0	0.09	0	$\theta_6^{(1)}$

Tablo 5.4: Sol Bacak Eklemleri İçin D-H Parametre Tablosu

Uzuv Numarası(i)	$\alpha_i(\text{radyan})$	$a_i(\text{m})$	$d_i(\text{m})$	$\theta_i(\text{radyan})$
7	$-\pi/2$	0	0	$\theta_1^{(2)}$
8	$-\pi/2$	0	0	$\theta_2^{(2)}$
9	0	0.4	0	$\theta_3^{(2)}$
10	0	0.4	0	$\theta_4^{(2)}$
11	$-\pi/2$	0	0	$\theta_5^{(2)}$
12	0	0.09	0	$\theta_6^{(2)}$

D-H parametre tablosu kullanılarak iki ardışık eksen takımı arasındaki homojen dönüşüm Denlem 5.1'deki gibi tanımlanabilir.

$$\mathbf{A}_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Buna göre her bir bacak için $O_0^{(b)} - O_6^{(b)}$ eksen takımları arasındaki ardışık dönüşüm matrisleri Denklem 5.2-7'deki gibi elde edilmiştir.

$$\mathbf{A}_1^{0(b)} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1^{(b)} & 0 & -\sin \theta_1^{(b)} & 0 \\ \sin \theta_1^{(b)} & 0 & \cos \theta_1^{(b)} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$\mathbf{A}_2^{1(b)} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2^{(b)} & 0 & -\sin \theta_2^{(b)} & 0 \\ \sin \theta_2^{(b)} & 0 & \cos \theta_2^{(b)} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$\mathbf{A}_3^{2(b)} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3^{(b)} & -\sin \theta_3^{(b)} & 0 & 0.4 \cos \theta_3^{(b)} \\ \sin \theta_3^{(b)} & \cos \theta_3^{(b)} & 0 & 0.4 \sin \theta_3^{(b)} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$\mathbf{A}_4^{3(b)} = \begin{bmatrix} \cos \theta_4^{(b)} & -\sin \theta_4^{(b)} & 0 & 0.4 \cos \theta_4^{(b)} \\ \sin \theta_4^{(b)} & \cos \theta_4^{(b)} & 0 & 0.4 \sin \theta_4^{(b)} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$\mathbf{A}_5^{4(b)} = \begin{bmatrix} \cos \theta_5^{(b)} & 0 & -\sin \theta_5^{(b)} & 0 \\ \sin \theta_5^{(b)} & 0 & \cos \theta_5^{(b)} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$\mathbf{A}_6^{5(b)} = \begin{bmatrix} \cos \theta_6^{(b)} & -\sin \theta_6^{(b)} & 0 & 0.09 \cos \theta_6^{(b)} \\ \sin \theta_6^{(b)} & \cos \theta_6^{(b)} & 0 & 0.09 \sin \theta_6^{(b)} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

5.1.2 Bacak Uzuyları Üzerindeki Eksen Takımları İle Gövde Üzerindeki $O_0^{(b)}$

Eksen Takımları Arasındaki $A_1^{0(b)}, A_2^{0(b)}, A_3^{0(b)}, A_4^{0(b)}, A_5^{0(b)}, A_6^{0(b)}$ Homojen Dönüşüm Matrislerinin Elde Edilmesi

Bir önceki bölümde elde edilen ardışık homojen dönüşüm matrisleri kullanılarak $O_0^{(b)}$ eksen takımı ile bacak uzuvları üzerindeki eksen takımları arasındaki homojen dönüşüm matrisleri Denklem 5.8'deki gibi elde edilebilir.

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_2^{0(b)} &= \mathbf{A}_1^{0(b)} \mathbf{A}_2^{1(b)} \\ \mathbf{A}_3^{0(b)} &= \mathbf{A}_1^{0(b)} \mathbf{A}_2^{1(b)} \mathbf{A}_3^{2(b)} \\ \mathbf{A}_4^{0(b)} &= \mathbf{A}_1^{0(b)} \mathbf{A}_2^{1(b)} \mathbf{A}_3^{2(b)} \mathbf{A}_4^{3(b)} \\ \mathbf{A}_5^{0(b)} &= \mathbf{A}_1^{0(b)} \mathbf{A}_2^{1(b)} \mathbf{A}_3^{2(b)} \mathbf{A}_4^{3(b)} \mathbf{A}_5^{4(b)} \\ \mathbf{A}_6^{0(b)} &= \mathbf{A}_1^{0(b)} \mathbf{A}_2^{1(b)} \mathbf{A}_3^{2(b)} \mathbf{A}_4^{3(b)} \mathbf{A}_5^{4(b)} \mathbf{A}_6^{5(b)} \end{aligned} \quad (5.8)$$

5.1.3 Gövde Üzerine Yerleştirilen O_g İle $O_0^{(b)}$ Eksen Takımları Arasındaki

$A_0^{g(b)}$ Homojen Dönüşüm Matrislerinin Elde Edilmesi

O_g ve $O_0^{(b)}$ eksen takımları aynı uzuv (gövde) üzerinde yer almaktadır ve birbirlerine göre hareketsizdirler. Bu eksen takımları arasındaki homojen dönüşüm matrisi Şekil 3.4'te gösterilen gövde uzvunun boyutları ve Şekil 5.2 kullanılarak Denklem 5.9'daki gibi elde edilmiştir. Bu iki eksen takımı birbirine göre hareketsiz olduğundan

dönüşüm matrisi sabittir. Her iki bacak için dönüşüm matrisleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir;

$$\mathbf{A}_0^{g^{(1)}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.3 \\ -1 & 0 & 0 & -0.1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{A}_0^{g^{(2)}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.3 \\ -1 & 0 & 0 & 0.1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

5.1.4 $O_g, O_6^{(b)}$ Eksen Takımları İle O_y Eksen Takımı Arasındaki $A_g^y, A_6^{y(b)}$

Homojen Dönüşüm Matrislerinin Elde Edilmesi

ADAMS yazılımında gövdenin üzerindeki O_g eksen takımının konum ve oryantasyonu yer eksen takımı O_y ' ye göre ölçülerek Simulink' e gönderilmektedir. Ölçülen parametreler O_g ' nin O_y ' ye göre konumunu belirleyen X,Y,Z ve O_g ' nin O_y ' ye göre oryantasyonunu belirleyen ϕ, θ, ψ Euler açılarıdır (zxz). Bu parametreler kullanılarak gövde ile yer arasındaki homojen dönüşüm matrisi Denklem 5.10'daki gibi elde edilmiştir.

$$\mathbf{A}_g^y = \begin{bmatrix} \cos(\phi)\cos(\psi)-\sin(\phi)\cos(\theta)\sin(\psi) & -\cos(\phi)\sin(\psi)-\sin(\phi)\cos(\theta)\cos(\psi) & \sin(\phi)\sin(\theta) & X \\ \sin(\phi)\cos(\psi)+\cos(\phi)\cos(\theta)\sin(\psi) & -\sin(\phi)\sin(\psi)+\cos(\phi)\cos(\theta)\cos(\psi) & -\cos(\phi)\sin(\theta) & Y \\ \sin(\theta)\sin(\psi) & \sin(\theta)\cos(\psi) & \cos(\theta) & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Daha önce elde edilen dönüşüm matrisleri de kullanılarak herhangi bir ayak için $O_6^{(b)}$ ' dan O_y ' ye homojen dönüşüm matrisi Denklem 5.11'deki gibi bulunabilir.

$$\mathbf{A}_6^{y(b)} = \mathbf{A}_g^y \mathbf{A}_0^{g^{(b)}} \mathbf{A}_6^{0^{(b)}} \quad (5.11)$$

Elde edilen bu son dönüşüm matrisiyle birlikte artık eklem açıları ve gövdenin yere göre konum ve oryantasyon parametreleri bilinirken ayakların yere göre konum ve oryantasyonları Denklem 5.10'dan bulunabilir.

$\mathbf{A}$ dönüşüm matrisleri iki eksen takımı arasındaki dönme ve ötelenmeyi tam olarak ifade ederler. $\mathbf{A}$ matrislerinin ilk üç satır ve üç sütunu dönme matrisini, son sütununun ilk üç satırı ise ötelenmeyi göstermektedir. Bu durum Denklem 5.12'de herhangi iki a ve b eksen takımları arasındaki $\mathbf{A}_b^a$ dönüşüm matrisinde gösterilmiştir.

$$\mathbf{A}_b^a = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_b^a & \mathbf{x}_b^a \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Diğer bir ifadeyle;

$$\mathbf{R}_b^a = \mathbf{A}_b^a(1:3, 1:3) \text{ ve } \mathbf{x}_b^a = \mathbf{A}_b^a(1:3, 4) \quad (5.13)$$

Şeklinde gösterilebilir.

5.2 Ters Kinematik

Robotikte genel bir tanım olarak ters kinematik problem son uzvun istenen herhangi bir yörüngeyi takip etmesi için eklem açılarının takip etmesi gereken yörüngelerin belirlenmesi olarak verilebilir. İki ayaklı robot modelinde ise bu problem gövde ve ayakların takip etmesi istenen yörüngeler bilinirken eklem açılarının takip etmesi gereken yörüngelerin elde edilmesi olarak ifade edilebilir. Ters kinematik problem özellikle serbestlik derecesi yüksek olan robotlarda oldukça karmaşık hesaplamalar gerektirebilmektedir. Bu problemin çözümü için temelde üç yöntem vardır. Bunlardan birincisi “analitik yöntem”dir. Bu yöntemde robotun düz kinematik denklemleri kullanılarak çeşitli işlemlerle eklem açılarının denklemin bir tarafında yalnız bırakılmasına çalışılır. Fakat homojen dönüşüm matrislerinin birbiriyle çarpımından sonra içerisinde birçok trigonometrik ifadenin çarpımını barındıran çok karmaşık denklemler ortaya çıkar ki bu denklemlerden açılar çekmek oldukça güç hatta imkansız olabilir [26]. Ters kinematik problemine çözüm getirmekte kullanılan ikinci yöntem “sayısal yöntem”dir. Sayısal yöntemler oldukça kolay programlanabilirler. Bu açıdan analitik yöntemle kıyaslandığında oldukça kolaydırlar. Fakat kapalı formda analitik bir sonuç vermemesi ve bazen çözümün uzun zaman alması gerçek zamanda problem teşkil edebilir. Bu yüzden robot kontrolü gibi gerçek zaman problemlerinin çözümünde sayısal yöntemin kullanılabilmesi ancak çok etkin algoritmalar ve çok kısa çözüm zamanları ile olabilir. Ayrıca sayısal çözümde yakınsamanın da garanti altında olması gereklidir. Bir diğer üçüncü yöntem aslında analitik yöntemin bir uzantısı olan “geometrik yöntem”dir. Bu yöntemde düz kinematik ifadeler geometrik bazı kısıtlar göz önünde bulundurularak sadeleştirilir ve basitleştirilmiş bu denklemler üzerinden açılar çekilmeye çalışılır. Bu yüzden geometrik yöntemin etkin olabilmesi için robotun eklem yapısının çözüme uygun kısıtlarla belirlenmesi uygun olacaktır.

İki ayaklı robot modelinin ters kinematik probleminin çözümünde geometrik yöntem kullanılmıştır. Bu sayede kapalı formda eklem açılarının ayak ve gövde yörüngelerine olan bağıntısı elde edilmiştir. Çözüm kapalı formda olduğundan gerçek zamanda çok hızlı bir şekilde çözüme ulaşmak mümkündür.

Altı serbestlik dereceli bir manipülatörün ters kinematik probleminin analitik çözümünün olabilmesi için yeter şart herhangi üç ardışık eklem ekseninin bir noktada kesişmesidir [23]. Buna göre robotun bacağının ilk üç eklem (kalça eklemleri) eksenini bir noktada kesişecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu sayede robotun ters kinematiğinin analitik çözümü olabilmesi için yeter şart yerine getirilmiştir.

Çözümün ilk aşamasında başlangıç noktası ayak bileği bitiş noktası kalça olan bir vektör tanımlanacaktır. Bu vektör daha önce elde edilen homojen dönüşüm matrisleri kullanılarak elde edilecektir. Bunun için önce yere göre kalça eklemini gösteren $\mathbf{x}_k^{(b)}$ vektörü elde edilecek daha sonra yere göre ayak bileği eklemini gösteren $\mathbf{x}_b^{(b)}$ vektörü bulunacaktır. Bu iki vektör birbirinden çıkarılarak bilekten kalçaya olan $\mathbf{x}_b^{k(b)}$ vektörü elde edilecektir.

Kalçada olan eksen takımı $O_0^{(b)}$ ' dan yerdeki eksen takımı O_y ' ye olan dönüşüm matrisi Denklem 5.14'deki gibi elde edilebilir.

$$\mathbf{A}_0^{y(b)} = \mathbf{A}_g^y \mathbf{A}_0^{g(b)} \quad (5.14)$$

Daha önce de belirtildiği gibi $\mathbf{A}_0^{y(b)}$ matrisinin son sütununun ilk dört satırı $\mathbf{x}_k^{(b)}$ vektörüdür. Bu vektör Denklem 5.15'deki gibi tanımlanabilir.

$$\mathbf{x}_k^{(b)} = \mathbf{A}_0^{y(b)} (1:4,4) \quad (5.15)$$

Ayak bileğinin $O_6^{(b)}$ eksen takımına göre konumu $[-0.09 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ vektörüyle ifade edilebilir. Ayak bileğinin yere göre konumunu gösteren $\mathbf{x}_b^{(b)}$ vektörü ise Denklem 5.16 ile bulunabilir.

$$\mathbf{x}_b^{(b)} = \mathbf{A}_6^{y(b)} \begin{bmatrix} -0.09 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

$\mathbf{x}_k^{(b)}$ ve $\mathbf{x}_b^{(b)}$ vektörleri kullanılarak $\mathbf{x}_b^{k(b)}$ vektörü Denklem 5.17 ile bulunabilir.

$$\mathbf{x}_b^{k(b)} = \mathbf{x}_k^{(b)} - \mathbf{x}_b^{(b)} \quad (5.17)$$

Kalçanın konumunun O_6 eksen takımına göre ifade eden vektör $\mathbf{uvw}^{(b)}$ olmak üzere Denklem 5.18'deki ifade yazılabilir.

$$\mathbf{uvw}^{(b)} = \left(\mathbf{R}_6^{y^{(b)}} \right)^{-1} \mathbf{x}_b^{k(b)} \quad (5.18)$$

Bu tanımdan sonra $\theta_j^{(b)}$ açıları Denklem 5.19-24'deki gibi bulunabilir.

$$\theta_6^{(b)} = \arctan(-\mathbf{uvw}^{(b)}(2) / \mathbf{uvw}^{(b)}(1)) \quad (5.19)$$

$$b^{(b)} = (\mathbf{uvw}^{(b)}(1)^2 + \mathbf{uvw}^{(b)}(2)^2 + \mathbf{uvw}^{(b)}(3)^2 - 0.4^2 - 0.4^2) / (2 \times 0.4 \times 0.4)$$

$$\theta_4^{(b)} = \arctan2(-\sqrt{1-b^{(b)^2}}, b^{(b)}) \quad (5.20)$$

$$a^{(b)} = (-0.4 \sin \theta_4^{(b)}) / \sqrt{\mathbf{uvw}^{(b)}(1)^2 + \mathbf{uvw}^{(b)}(2)^2 + \mathbf{uvw}^{(b)}(3)^2}$$

$$\theta_5^{(b)} = \pi - [\arctan2(a^{(b)}, -\sqrt{1-a^{(b)^2}}) - \arctan2(\mathbf{uvw}^{(b)}(3), \sqrt{\mathbf{uvw}^{(b)}(1)^2 + \mathbf{uvw}^{(b)}(2)^2})] \quad (5.21)$$

$$\mathbf{R}_6^{3(b)} = \mathbf{R}_4^{3(b)} \mathbf{R}_5^{4(b)} \mathbf{R}_6^{5(b)}$$

$$\mathbf{r}^{(b)} = \mathbf{R}_6^{3(b)} \left(\mathbf{R}_6^{y^{(b)}} \right)^{-1} \mathbf{R}_g^y \mathbf{R}_0^g$$

$$\theta_2^{(b)} = \arctan 2(\sqrt{1-\mathbf{r}^{(b)}(3,3)^2}, \mathbf{r}^{(b)}(3,3)) - \pi \quad (5.22)$$

$$c^{(b)} = \mathbf{r}^{(b)}(2,3) / \sin \theta_2^{(b)}$$

$$\theta_3^{(b)} = \arctan 2(c^{(b)}, \sqrt{1-c^{(b)^2}}) \quad (5.23)$$

$$d^{(b)} = -r(3,2) / \sin \theta_2^{(b)}$$

$$\theta_1^{(b)} = \arctan 2(d^{(b)}, \sqrt{1-d^{(b)2}}) \quad (5.24)$$

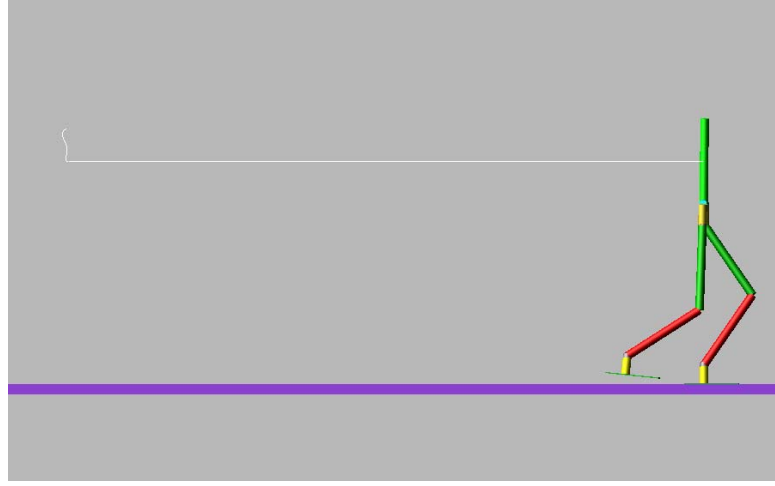
İki ayaklı robotun ters kinematik çözümünde daha ayrıntılı bilgi için [24].

Bu yöntemle elde edilen denklemler kullanılarak gövde ve iki ayağın istenen konum ve oryantasyonları için eklem açısı konumlarının ne olması gerektiği elde edilebilir.

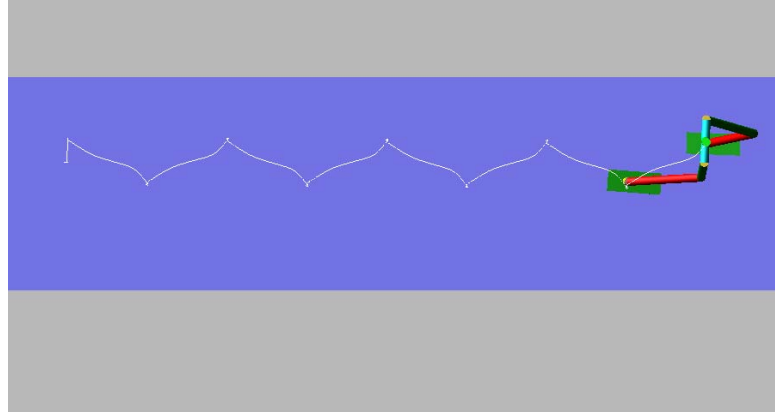
5.3 Yörünge Planlaması

Statik yürüme hareketi esnasında ağırlık merkezinin izdüşümünün sürekli olarak destek çokgeni içerisinde kalması gerekmektedir. Bu yüzden uzuvların yörünge planlaması bu şartı sağlayacak şekilde yapılmıştır. Bir adım periyodunda öncelikle ayaklardan birisi gövde ve diğer ayak konumlarını değiştirmezken ileriye doğru transfer edilir. Transfer edilen ayak yere bastıktan sonra gövde konumunu gerideki ayaktan ilerideki ayağa doğru değiştirir. Daha sonra gerideki ayak yerden kaldırılarak ileriye doğru transfer edilir. Tüm bu transferler esnasında gövde ayakların oryantasyonları değiştirilmeden sabit tutulmuştur. Ayakların yere basma ve yerden kaldırma esnasında yere paralel bir oryantasyonda olmaları sağlanmıştır.

Gövdenin transferi sadece iki ayağın yere bastığı ÇDF fazında gerçekleşmektedir. Bu fazda gövde bir ayak üzerindeki TDF fazından diğer ayak üzerindeki TDF fazına doğru geçiş yapmaktadır. Gövde hareketini statik denge şartını sağlamak üzere ağırlık merkezinin izdüşümünü ÇDF fazındaki destek çokgeni içerisinde tutacak şekilde yapmaktadır. Yürüme esnasında gövdenin belirli bir yörüngeyi takibi istenmemiştir. Bunun yerine noktadan noktaya hareket etmesi sağlanmıştır. Noktalar arasına eklem düzeyinde polinomlar uydurulmuştur [27]. Yavaş bir yürüme esnasında değişik perspektiflerden gövdenin izlediği yörüngeler Şekil 5.4 ve 5.5'te gösterilmiştir.

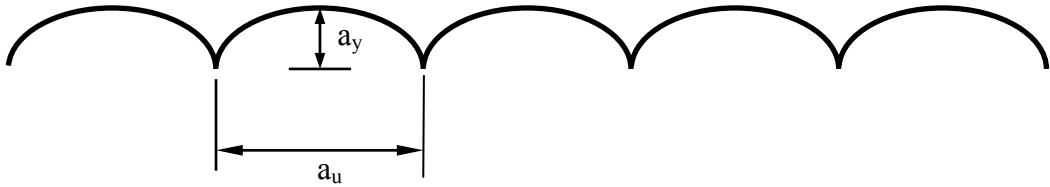


Şekil 5.4 : Gövde Yörüngesinin Yandan Görünüşü

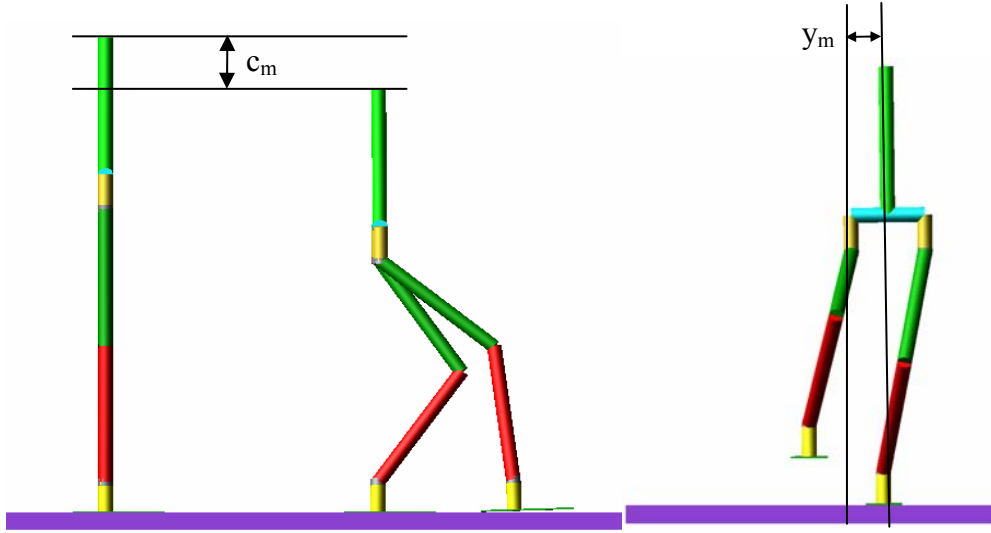


Şekil 5.5 : Gövde Yörüngesinin Üstten Görünüşü

Yürüme hareketi esnasında ayakların yarım elips bir yörünge üzerinde hareket etmesi öngörülmüştür. Böylelikle adım yüksekliği ve adım uzunluğu gibi parametreler değiştirilerek farklı hızlarda ve konfigürasyonlarda yürüme hareketi tekrarlanmıştır. Ayakların izlemesi istenen yörüngeler aşağıdaki Şekil 5.6’da görülebilmektedir.



Şekil 5.6 : Ayak Yörüngesinin Yandan Görünüşü



Şekil 5.7 : Gövdenin Düşey ve Yanal Hareketi

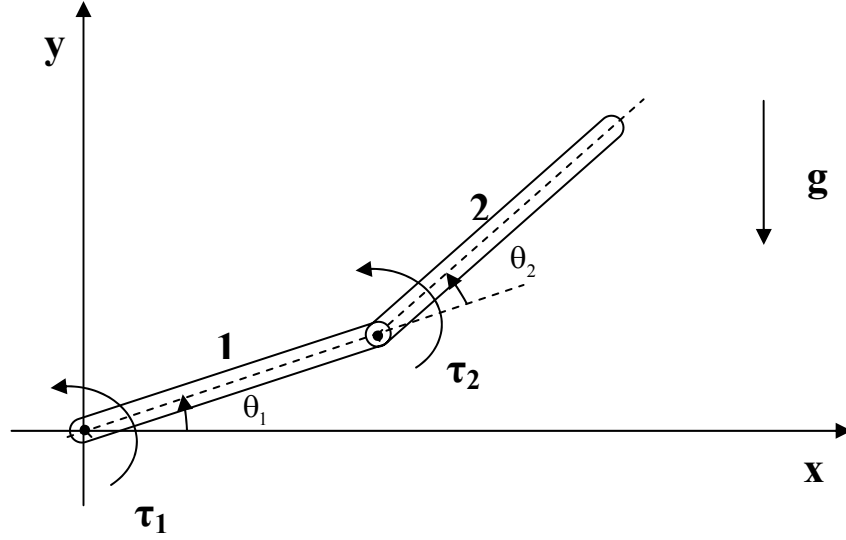
Şekil 5.6. ve Şekil 5.7’de gösterilen a_y , a_u , c_m , y_m sırasıyla adım yüksekliği, adım uzunluğu, çömelme miktarı, gövdenin yanal hareket miktarını göstermektedir.

6 KONTROL YÖNTEMİ

İki ayaklı yürüyen robot modelinin kontrolünde klasik manipülatörlerin kontrolünde kullanılan tekniğin uyarlanmış bir hali kullanılacaktır. Bu uyarlamalar problemin klasik manipülatör kontrolünden farklı olan yanlarının üstesinden gelmek için yapılmıştır. İki ayaklı robotlarla klasik manipülatörler arasında model tabanlı kontrol açısından üç temel fark mevcuttur. Bunlardan birincisi manipülatörlerde yere sabit bir uzuv bulunurken iki ayaklı robotlarda yere sabit bir uzvun olmamasıdır. Bu durum hem kinematik modelleme hem de dinamik modelleme açısından problemler oluşturmaktadır ve iki ayaklı robotlarda ekstra olarak robotun denge kararlılığının sağlanması gerekmektedir. Bu da ancak düşük hızlarda yörünge planlamasının uygun bir şekilde yapılması ile yüksek hızlarda ise hem yörünge planlamasının uygun bir şekilde yapılması hem de atalet kuvvetlerini dikkate alarak robotu ayağı etrafında döndürecek herhangi bir devrilme momentinin oluşmamasının sağlanması ile mümkün olabilmektedir. İkinci önemli fark ise iki ayaklı robotun klasik manipülatörlerden farklı olarak ayaklarının yere basma durumuna göre modelinin değişmesidir. Robotun yürütmesinde iki temel faz mevcuttur. Birinci faz sadece tek ayağın yere bastığı durum olan Tek Destek Fazı(TDF), ikinci faz ise her iki ayağın birden yere bastığı durum olan Çift Destek Fazı(ÇDF)dır. Bu iki faz için oluşturulan modeller birbirinden çok farklıdır ve kontrolde ciddi problemlere neden olmaktadır. Üçüncü önemli fark ise iki ayaklı robotların yerle olan temas kuvvetlerinin robotun dinamiği açısından büyük önem taşımasıdır. Klasik manipülatörlerde temas kuvvetleri özel görevler dışında çok ciddi problemler oluşturmazlar. İki ayaklı robotlarda ise özellikle yüksek hızlarda temas kuvvetlerini dikkate almadan robotu kontrol etmek neredeyse imkânsızdır. Temas kuvvetlerini dikkate alan bir kontrolör tasarlamak zor bir görev olmakla birlikte asıl problem bu kuvvetlerin ölçülmesinde ortaya çıkmaktadır. Çünkü temas olayı son derece karmaşık süreksizliklerin ve ani yükselme ve alçalmaların çok olduğu non-lineer bir olay olmasına rağmen elimizde bu olayı modellemek açısından yeterli bilgi birikimi yoktur.

6.1 İki Serbestlik Dereceli Manipülator Üzerinde Eklem Kontrol Tekniğinin Uygulanması

Kontrol yönteminin daha iyi anlaşılabilmesi için önce basit bir iki serbestlik dereceli manipülator üzerinde uygulaması yapılacaktır. Şekil 6.1’de manipülatorün genel yapısı görülmektedir.



Şekil 6.1 : İki Serbestlik Dereceli Manipülatorün Genel Yapısı

Tablo 6.1 : İki Serbestlik Dereceli Manipülatorün Uzunlarının Özellikleri

Uzun Numarası	Ağırlık Merkezine Göre Atalet Momenti	Kütle	Boy
1	I_1	m_1	l_1
2	I_2	m_2	l_2

Eklem matematiksel modelleri elde edilirken sürtünme ve ağırlık kuvvetleri dışında bir etki göz önüne alınmayacaktır. Buna göre eklem modelleri Tablo 6.1’deki parametreler kullanılarak Denklem 6.1,2 deki gibi elde edilebilir.

$$\tau_1 = I_{t1}\ddot{\theta}_1 + b\dot{\theta}_1 + G_{t1} \quad (6.1)$$

$$\tau_2 = I_{t2}\ddot{\theta}_2 + b\dot{\theta}_2 + G_{t2} \quad (6.2)$$

Bu denklemlerde G_{t1} ve G_{t2} sırasıyla birinci ve ikinci ekleme gelen toplam ağırlık momentini temsil etmektedir ve Denklem 6.3,4’teki gibi ifade edilebilirler.

$$G_{t1} = m_1 g \frac{l_1}{2} \cos \theta_1 + m_2 g \left(l_1 \cos \theta_1 + \frac{l_2}{2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \right) \quad (6.3)$$

$$G_{t2} = m_2 g \frac{l_2}{2} \cos \theta_2 \quad (6.4)$$

I_{t1} ve I_{t2} sırasıyla birinci ve ikinci eklem gelen toplam atalet momentini temsil etmektedir ve Denklem 6.5,6'teki gibidir.

$$I_{t1} = I_1 + m_1 \left(\frac{l_1}{2} \right)^2 + I_2 + m_2 \left[\left(l_1 \cos \theta_1 + \frac{l_2}{2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \right)^2 + \left(l_1 \sin \theta_1 + \frac{l_2}{2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \right)^2 \right]$$

$$I_{t2} = I_2 + m_2 \left(\frac{l_2}{2} \right)^2 \quad (6.5, 6.6)$$

b ise eklem viskoz sürtünme katsayısıdır ve her iki eklem için aynı alınmıştır.

Her iki eklem için aynı formda genel bir model elde edilmiştir. Bu model Denklem 6.7'deki gibidir ve bundan sonra yapılacak tüm işlemler bu genel model üzerinden gerçekleştirilecektir.

$$\tau = I_t \ddot{\theta} + b \dot{\theta} + G_t \quad (6.7)$$

Bu model için kontrol kuralı belirlenmeden önce model ayrıştırılacaktır ve ‘‘Hesaplanmış Moment Yöntemi’’ uygulanacaktır [21]. Bu sayede eldeki non-lineer model birim ataletin modeline indirgenecektir. Bu işlem bazı avantajlar sağlayacaktır. İlk olarak ayrıştırma işlemi sayesinde model birim ataletin dinamik matematiksel modeline indirgenir. Böylelikle karmaşık bir model yerine basit bir model üzerinde çalışma şansı elde edilir. İkinci olarak ayrıştırma işlemi sayesinde kontrol katsayıları sistem parametrelerinden bağımsız hale gelir. Son olarak bu sayede karmaşık yörünge takip problemi basit bir regülasyon problemine dönüştürülmüş olur.

Ayrıştırma işlemi için iki ara değişken α ve β tanımlanması gerekmektedir [25]. Bu değişkenler Denklem 6.8 ve 6.9'daki gibi ifade edilirler.

$$\alpha = I_t \quad (6.8)$$

$$\beta = b \dot{\theta} + G_t \quad (6.9)$$

Bu değişkenler model denklemi Denklem 6.7'de yerine konulursa;

$$\tau = \alpha\tau' + \beta$$

ve

$$\tau' = \ddot{\theta} \quad (6.10)$$

elde edilir. Elde edilen 6.10 denklemi üzerine τ' momenti uygulanan birim ataletin matematiksel modelidir.

Sistemin herhangi bir θ_r açısal yörüngesini takip edebilmesi için PD(oransal + türevsel) kontrolör kullanılırsa Denklem 6.11'deki gibi bir kontrol kuralı elde edilir.

$$\tau' = \ddot{\theta}_r + k_v \dot{e} + k_p e \quad (6.11)$$

Burada e açısal hatayı, k_p oransal kontrol katsayısını, k_v ise türevsel kontrol katsayısını temsil etmektedir. Elde edilen bu kontrolör bir sapma kontrolörüdür ve takip edilmesi istenen yörüngeden sapmalara karşı çalışmaktadır.

Kontrol kuralı ile modelin ayrıştırılmış hali birleştirilirse

$$\ddot{\theta}_r + k_v \dot{e} + k_p e = \ddot{\theta} \quad (6.12)$$

denklemi elde edilir. Bu denklemden de Denklem 6.13 elde edilir.

$$\ddot{e} + k_v \dot{e} + k_p e = 0 \quad (6.13)$$

Bu denklem hatanın dinamik davranış denklemidir. Denklemin her iki tarafının Laplace dönüşümü alınırsa

$$\mathcal{L}(\ddot{e} + k_v \dot{e} + k_p e) = \mathcal{L}(0)$$

$$s^2 E(s) + k_v s E(s) + k_p E(s) = 0 \quad (6.14)$$

elde edilir. Buradan $E(s)$ transfer fonksiyonu Denklem 6.15'deki gibi elde edilir.

$$E(s) = \frac{1}{s^2 + k_v s + k_p} \quad (6.15)$$

Bu transfer fonksiyonu üzerinden kontrol katsayılarını belirlemek için performans kriterleri belirlenmelidir. Aşağıda istenen yerleşme zamanı(t_s) ve sönüm oranı(ξ) için kontrol katsayıları hesaplanmıştır.

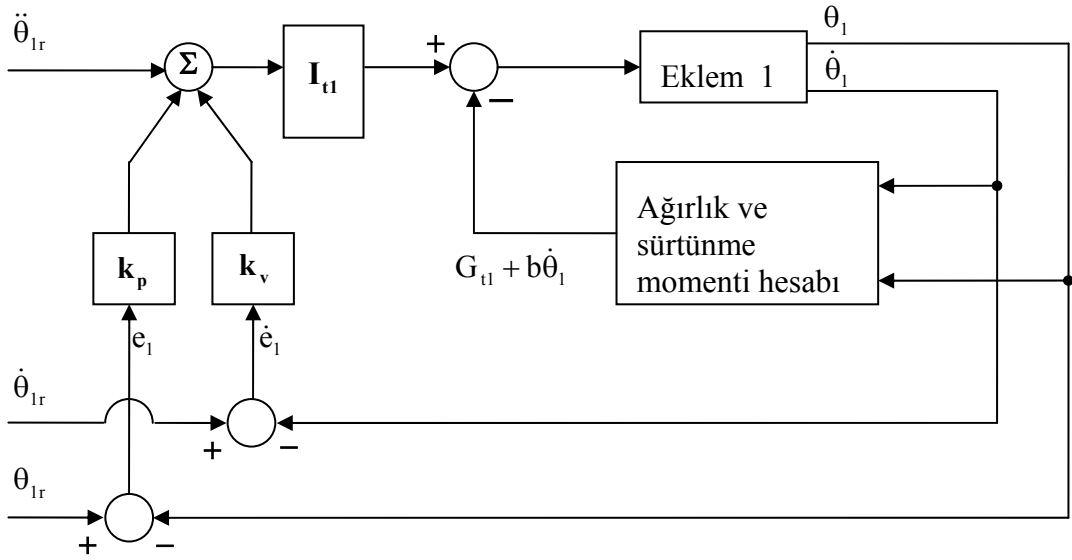
$$t_s = 0.5s \text{ için} \\ \xi = 1$$

$$\omega_n = \frac{4}{\xi t_s} = \frac{4}{1 \times 0.5} = 8 \quad (6.16)$$

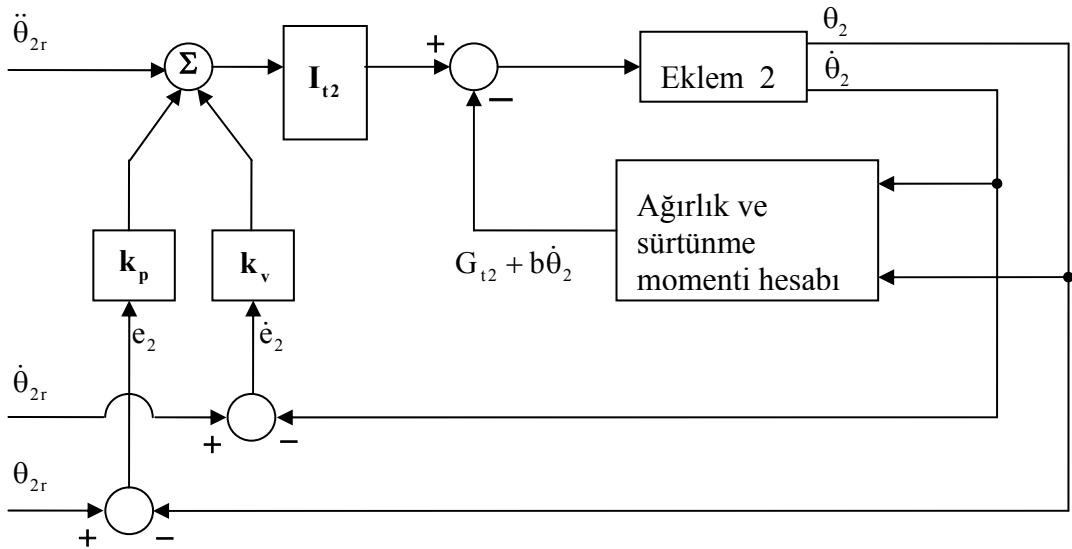
$$k_p = \omega_n^2 = 8^2 = 64 \quad (6.17)$$

$$k_v = 2\xi\omega_n = 2 \times 1 \times 8 = 16 \quad (6.18)$$

Kontrollü sistemin blok diyagramı Şekil 6.2, 3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.2 : Birinci Eklem Kontrolörü Blok Diyagramı

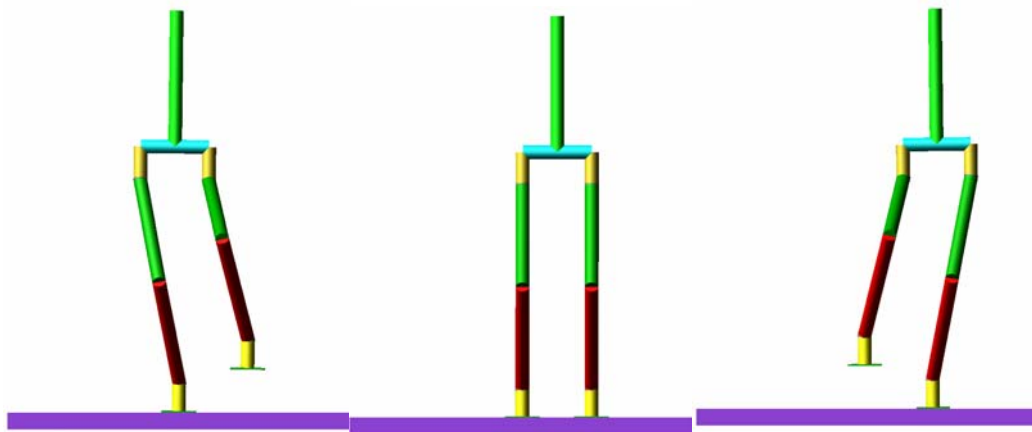


Şekil 6.3 : İkinci Eklem Kontrolörü Blok Diyagramı

Elde edilen bu kontrolör ağırlık kuvvetlerini kompanse etmektedir. Eklemlere gelen atalet momentleri her an için tam olarak hesaplanmaktadır. Atalet kuvvetleri ise dikkate alınmamaktadır. İki ayaklı robotta da eklem kontrolörü olarak atalet hesaplamalarında yapılan küçük bir basitleştirmeye bu kontrolörün aynısı kullanılacaktır.

6.2 Yürüme Fazları

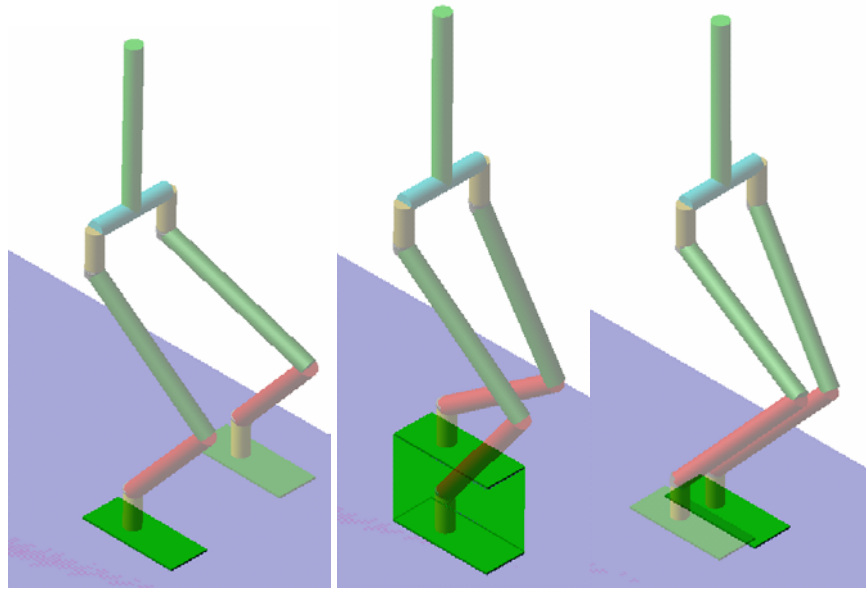
Modelin hareketinde iki temel faz bulunmaktadır. Bu fazlar Çift Destek Fazı ve Tek Destek Fazıdır. Çift Destek Fazında her iki ayak da yerdedir. TDF 'nda ise sadece tek bir ayak yerdedir. TDF 'nda ya sadece sağ ayak yerdedir ya da sadece sol ayak yerle temas halindedir. Bu iki durum birbirinin simetriği olmakla birlikte bundan sonra sadece sağ ayağın yerde olduğu faz TDF_1 , sadece sol ayağın yerde olduğu faz ise TDF_2 olarak isimlendirilecektir. ÇDF, TDF_1 , TDF_2 fazlarında robotun yerden aldığı destek farklı olduğundan üç ayrı model söz konusudur. TDF_1 fazında robot sabit uzvu sağ ayak olan bir manipülatör olarak modellenmiştir. Benzer şekilde TDF_2 fazında robot sabit uzvu sol ayak olan bir manipülatör olarak modellenmiştir. Bu iki faz için iki serbestlik dereceli manipülatörün kontrolunda kullanılan yöntemin aynısı kullanılmıştır. ÇDF fazında ise robot iki ayağı üzerinde dengede kalmak durumunda olduğundan ağırlık dengelemesinde yapılan küçük bir değişiklikle yine aynı yöntem kullanılmıştır. Fazlar Şekil 6.4'te görülmektedir.



Şekil 6.4 : Sırasıyla TDF_1 , ÇDF, TDF_2 Fazları

6.3 Statik Denge Durumları

Robotun fazlara göre üç ayrı statik denge durumu vardır. TDF_1 fazında robotun statik dengede olabilmesi için robotun ağırlık merkezinin izdüşümünün sağ ayağın yere basma alanının içine düşmesi gerekmektedir. TDF_2 fazında ise robotun ağırlık merkezinin izdüşümünün sol ayağın yere basma alanı içine düşmesi gerekir. ÇDF fazında ise ağırlık merkezi izdüşümünün her iki ayağın yere basma alanları tarafından oluşturulan destek çokgeni içerisine düşmesi gerekmektedir. Bu üç durum Şekil 6.5'te gösterilmiştir.



Şekil 6.5 : Sırasıyla TDF_1 , ÇDF, TDF_2 Fazlarındaki Destek Çokgenleri

6.4 Moment ve Atalet Hesaplarında Kullanılacak Vektörlerin $O_0^{(b)}$ Eksen Takımlarına Göre Elde Edilmesi

Eklem üzerine etkiyen ağırlık ve atalet momentlerinin hesaplanabilmesi için öncelikle eklem dönme doğrultularını gösteren vektörlerin, eklem konumlarını gösteren vektörlerin ve de uzuv ağırlık merkezlerini gösteren vektörlerin elde edilmesi gereklidir. Bu vektörler öncelikle $O_0^{(b)}$ eksen takımlarına göre elde edilecek daha sonra gerekli dönüştürme işlemleri yapılacaktır.

6.4.1 Eklem Dönme Eksenleri Doğrultusundaki ${}^{(0)}\mathbf{e}_j^{(b)}$ Vektörlerinin Elde Edilmesi

Daha önce eklemlerin pozitif dönme yönleri gösterilmişti. Ayrıca düz kinematik hesaplamalarında da her bir uzuv üzerine yerleştirilen eksen takımları arasındaki dönüşümler elde edilmişti. Denavit-Hartenberg yaklaşımıyla yerleştirilen bu eksen takımlarının z-eksenleri eklemlerin pozitif dönme yönlerini göstermektedir. Bu bilgiler ışığında $\mathbf{A}_1^{(0(b))}, \mathbf{A}_2^{(0(b))}, \mathbf{A}_3^{(0(b))}, \mathbf{A}_4^{(0(b))}, \mathbf{A}_5^{(0(b))}$ dönüşüm matrislerini kullanarak ${}^{(0)}\mathbf{e}_j^{(b)}$ vektörleri aşağıdaki gibi elde edilebilir.

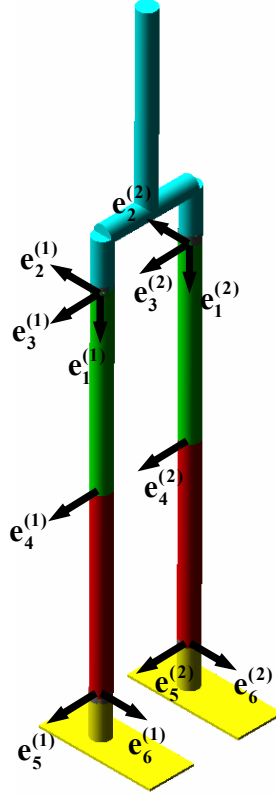
1. eklem dönme eksenini gösteren vektör Denklem 6.19’te elde edilmiştir.

$${}^{(0)}\mathbf{e}_1^{(b)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

Diğer eklemlerin ($j = 2, \dots, 6$) dönme eksenleri doğrultusundaki vektörler Denklem 6.20’deki gibi elde edilebilir.

$${}^{(0)}\mathbf{e}_j^{(b)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{j-1}^{(0(b))}(:, 3) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

${}^{(0)}\mathbf{e}_j^{(b)}$ vektörleri (4×1) boyutundadırlar. İlk üç satır vektörün x, y, z koordinatlarını göstermektedir. Son satırda bulunan 1 ise homojen dönüşüm işlemlerinde vektörün kullanılabilmesi için eklenmiştir. ${}^{(0)}\mathbf{e}_j^{(b)}$ vektörleri Şekil 6.6’da gösterilmiştir.



Şekil 6.6: Eklem Dönme Eksenleri Doğrultusundaki e Vektörleri

6.4.2 Uzun Ağırlık Merkezi Konumlarını Gösteren ${}^{(0)}r_{cm_i}^{(b)}$ Vektörlerinin Bulunması

Eklemlere gelen ağırlık momentlerinin hesaplanabilmesi için uzuvların ağırlık merkezlerinin konumlarını gösteren vektörlerin bulunması gereklidir. Bunun için öncelikle her bir uzvun ağırlık merkezlerinin koordinatları kendi üzerindeki eksen takımına göre verilecek daha sonra düz kinematik modellemede elde edilen homojen dönüşüm matrisleri kullanılarak ağırlık merkezlerini gösteren vektörler $O_0^{(b)}$ eksen takımlarına göre ifade edilecektir.

Bacak uzuvlarının üzerlerinde taşıdıkları eksen takımlarına göre ağırlık merkezlerinin koordinatları Tablo 6.2’de gösterilmiştir.

Tablo 6.2 : Uzuvarların Üzerlerinde Taşıdıkları Eksen Takımlarına Göre Ağırlık Merkezlerinin Konumları

Uzuvar Numarası	Uzuvar İsmi	Ağırlık Merkezinin koordinatları $O_j^{(b)}$ eksen takımına göre
1, 7	sanal_uzuvar1 ^(b)	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
2, 8	sanal_uzuvar2 ^(b)	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
3, 9	üst_bacak ^(b)	$\begin{bmatrix} -0.2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
4, 10	alt_bacak ^(b)	$\begin{bmatrix} -0.2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
5, 11	sanal_uzuvar3 ^(b)	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
6, 12	ayak ^(b)	$\begin{bmatrix} -0.0025 \\ 0 \\ 0.035 \\ 1 \end{bmatrix}$

Ağırlık merkezlerinin $O_0^{(b)}$ eksen takımlarına göre konumlarını gösteren ${}^{(0)}\mathbf{r}_{cm_i}^{(b)}$ vektörleri Denklem 6.21'deki gibi bulunabilir. $i=(1,...,6)$ olmak üzere

$$\begin{aligned} {}^{(0)}\mathbf{r}_{cm_1}^{(b)} &= \mathbf{A}_1^{0(b)} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad {}^{(0)}\mathbf{r}_{cm_2}^{(b)} = \mathbf{A}_2^{0(b)} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad {}^{(0)}\mathbf{r}_{cm_3}^{(b)} = \mathbf{A}_3^{0(b)} \begin{bmatrix} -0.2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ {}^{(0)}\mathbf{r}_{cm_4}^{(b)} &= \mathbf{A}_4^{0(b)} \begin{bmatrix} -0.2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad {}^{(0)}\mathbf{r}_{cm_5}^{(b)} = \mathbf{A}_5^{0(b)} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad {}^{(0)}\mathbf{r}_{cm_6}^{(b)} = \mathbf{A}_6^{0(b)} \begin{bmatrix} -0.0025 \\ 0 \\ 0.035 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.21)$$

6.4.3 Eklem Konumlarını Gösteren ${}^{(0)}\mathbf{r}_{e_i}^{(b)}$ Vektörlerinin Elde Edilmesi

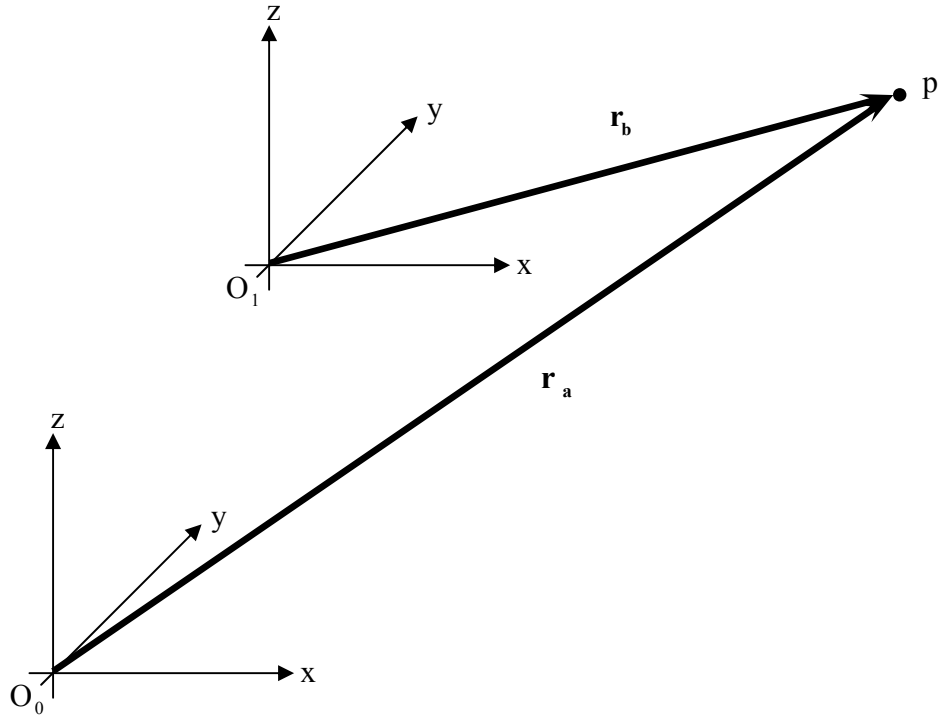
Eklemlere etkileyen ağırlık momentleri ve atalet momentlerinin hesaplanabilmesi için eklem konumlarını gösteren vektörlerin de hesaplanması gereklidir. Her bir eklemün bulunduğu noktada bir eksen takımı bulunmaktadır. Bu eksen takımlarının $O_0^{(b)}$ eksen takımlarına göre dönüşüm matrisleri kullanılarak eklem konumlarını $O_0^{(b)}$ eksen takımlarına göre gösteren ${}^{(0)}\mathbf{r}_{e_i}^{(b)}$ vektörleri Denklem 6.22'deki gibi elde edilebilir.

$$\begin{aligned} {}^{(0)}\mathbf{r}_{e_1}^{(b)} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ {}^{(0)}\mathbf{r}_{e_2}^{(b)} &= \mathbf{A}_1^{0(b)}(:,4) \\ {}^{(0)}\mathbf{r}_{e_3}^{(b)} &= \mathbf{A}_2^{0(b)}(:,4) \\ {}^{(0)}\mathbf{r}_{e_4}^{(b)} &= \mathbf{A}_3^{0(b)}(:,4) \\ {}^{(0)}\mathbf{r}_{e_5}^{(b)} &= \mathbf{A}_4^{0(b)}(:,4) \\ {}^{(0)}\mathbf{r}_{e_6}^{(b)} &= \mathbf{A}_5^{0(b)}(:,4) \end{aligned} \quad (6.22)$$

6.5 Elde Edilen ${}^{(0)}\mathbf{e}_j^{(b)}$, ${}^{(0)}\mathbf{r}_{cm_i}^{(b)}$, ${}^{(0)}\mathbf{r}_{e_j}^{(b)}$ Vektörlerinin O_y Eksen Takımına Göre İfadelerinin Elde Edilmesi

Bundan önceki bölümlerde eklem eksenini doğrultusundaki ${}^{(0)}\mathbf{e}_j^{(b)}$ vektörleri, ağırlık merkezlerinin konumlarını gösteren ${}^{(0)}\mathbf{r}_{cm_i}^{(b)}$ vektörleri ve eklem pozisyonlarını gösteren ${}^{(0)}\mathbf{r}_{e_j}^{(b)}$ vektörleri elde edilmişti. Bu vektörler $O_0^{(b)}$ eksen takımlarına göre ifade edilmişlerdi. Fakat $O_0^{(b)}$ eksen takımları hareket eden eksen takımları olduğundan atalet eksen takımları değildir. Bu yüzden ${}^{(0)}\mathbf{e}_j^{(b)}$ vektörünün bir atalet koordinat sistemi olan O_y eksen takımına göre ifade edilmesi gereklidir. Ayrıca ${}^{(0)}\mathbf{r}_{cm_i}^{(b)}$, ${}^{(0)}\mathbf{r}_{e_j}^{(b)}$ vektörlerinin gösterdikleri konumların da O_y eksen takımında ifade edilmesi gereklidir. Bu işlemler yine eksen takımları arasındaki homojen dönüşüm matrisleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Öncelikle bu dönüştürme işlemleri örnek bir vektör ve eksen takımları üzerinde uygulanacak daha sonra elde edilen vektörler bu işlemlere tabi tutulacaktır.

6.5.1 Örnek Koordinat Dönüştürme İşlemi



Şekil 6.7 : Örnek Koordinat Dönüştürme İşlemi

Şekil 6.7’de herhangi bir p noktasını göz önüne alalım. p noktasının her iki eksen takımına göre koordinatları Denklem 6.23’deki gibi olsun;

$${}^{(0)}\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix}, {}^{(1)}\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

Bu durumda p noktasının O_0 eksen takımına göre konumunu gösteren ${}^{(0)}\mathbf{r}_a$ vektörü Denklem 6.24 ile bulunabilir.

$${}^{(0)}\mathbf{r}_a = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.24)$$

Aynı şekilde ${}^{(1)}\mathbf{r}_b$ vektörü Denklem 6.25 ile elde edilebilir.

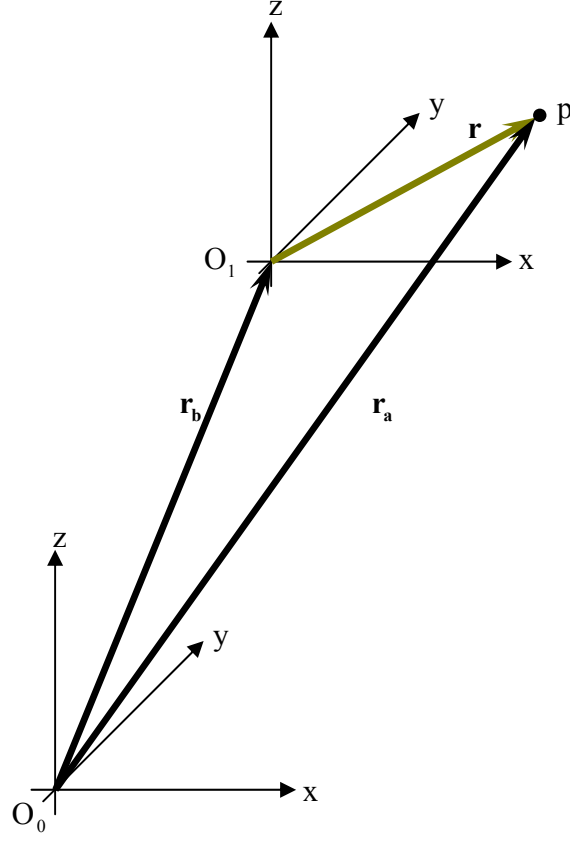
$${}^{(1)}\mathbf{r}_b = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.25)$$

O_1 ve O_0 eksen takımları arasındaki homojen dönüşüm matrisinin $\mathbf{A}_1^0$ olduğu düşünülürse ${}^{(0)}\mathbf{r}_a$ vektörü Denklem 6.26’daki gibidir.

$${}^{(0)}\mathbf{r}_a = \mathbf{A}_1^0 {}^{(1)}\mathbf{r}_b \quad (6.26)$$

Böylelikle herhangi bir O_1 eksen takımına göre koordinatları bilinen bir noktanın başka bir O_0 eksen takımına göre koordinatları aradaki dönüşüm matrisi kullanılarak bulunmuş olur.

6.5.2 Örnek Vektör Dönüştürme İşlemi



Şekil 6.8 : Örnek Vektör Dönüştürme İşlemi

Bu bölümde herhangi bir eksen takımına göre ifade edilmiş olan bir vektörün başka bir eksen takımına göre ifadesinin nasıl bulunacağı gösterilecektir.

Şekil 6.8’de $\mathbf{r}$ herhangi bir vektör olmak üzere p noktası bu vektörün bitiş noktasını gösteriyor olsun. p noktasının her iki eksen takımına göre koordinatları Denklem 6.27’de verilmiştir.

$${}^{(0)}\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix}, {}^{(1)}\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.27)$$

Koordinat ifadeleri kullanılarak ${}^{(1)}\mathbf{r}$ vektörü Denklem 6.28’deki gibi elde edilebilir.

$${}^{(1)}\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.28)$$

Daha önceki koordinat dönüştürme işlemlerinden faydalanarak;

$$\begin{aligned} {}^{(0)}\mathbf{r} &= {}^{(0)}\mathbf{r}_a - {}^{(0)}\mathbf{r}_b \\ {}^{(0)}\mathbf{r} &= \mathbf{A}_1^0 {}^{(1)}\mathbf{r} - \mathbf{A}_1^0(:,4) \end{aligned} \quad (6.29)$$

şeklinde elde edilir.

6.5.3 ${}^{(0)}\mathbf{e}_j^{(b)}$ Vektörlerinin O_y Eksen Takımına Göre İfadeleri

Daha önce elde edilen $\mathbf{e}$ vektörleri $O_0^{(b)}$ eksen takımlarına göre ifade edilmişti. Şimdi bu vektörler moment hesaplamalarında kullanılabilmeleri için O_y eksen takımına göre ifade edilecektir. Daha önce irdelenen vektör dönüşüm işlemi kullanılarak $\mathbf{e}_j^{(b)}$ vektörü Denklem 6.30'daki gibi elde edilebilir.

$$\mathbf{e}_j^{(b)} = \mathbf{A}_g^y \mathbf{A}_0^{g^{(b)}} {}^{(0)}\mathbf{e}_j^{(b)} - \mathbf{A}_g^y \mathbf{A}_0^{g^{(b)}}(:,4) \quad (6.30)$$

Burada elde edilen $\mathbf{e}_j^{(b)}$ vektörleri eklemlerin dönme doğrultularını gösteren vektörlerdir ve O_y eksen takımında ifade edilmişlerdir. Bundan sonraki matematiksel işlemlerde kolaylık olması açısından $\mathbf{e}_j^{(b)}$ vektörleri bir matris içerisine yerleştirilecektir. Bu $\mathbf{E}$ matrisi Denklem 6.31'de gösterilmiştir.

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1^{(1)} & \mathbf{e}_2^{(1)} & \mathbf{e}_3^{(1)} & \mathbf{e}_4^{(1)} & \mathbf{e}_5^{(1)} & \mathbf{e}_6^{(1)} & \mathbf{e}_1^{(2)} & \mathbf{e}_2^{(2)} & \mathbf{e}_3^{(2)} & \mathbf{e}_4^{(2)} & \mathbf{e}_5^{(2)} & \mathbf{e}_6^{(2)} \end{bmatrix} \quad (6.31)$$

Oluşturulan bu $\mathbf{E}$ matrisi (4×12) boyutundadır ve 12 eklemün tümünün dönme doğrultusunu gösteren $\mathbf{e}$ vektörlerini içermektedir. İlk 6 sütun sağ bacak eklemlerini son 6 sütun ise sol bacak eklemlerini göstermektedir. Böylelikle örneğin 9. eklem olan sol bacak diz eklemünün dönme eksenini gösteren vektör $\mathbf{E}(:,9)$ şeklinde ifade edilebilir.

6.5.4 ${}^{(0)}\mathbf{r}_{cm_i}^{(b)}$ Vektörlerinin O_y Eksen Takımına Göre İfadeleri

Eklemler üzerindeki ağırlık momentlerinin hesabında kullanılmak üzere ağırlık merkezlerinin konumlarını yere göre ifade eden $\mathbf{r}_{cm_i}^{(b)}$ vektörleri bulunacaktır. Bu vektörler daha önce elde edilen ${}^{(0)}\mathbf{r}_{cm_i}^{(b)}$ vektörleri kullanılarak koordinat dönüşümü işlemi ile elde edilecektir. Bu işlem Denklem 6.32'de gösterilmiştir.

$$\mathbf{r}_{cm_i}^{(b)} = \mathbf{A}_g^y \mathbf{A}_0^{g^{(b)}(0)} \mathbf{r}_{cm_i}^{(b)} \quad (6.32)$$

Bulunan bu ifade ile sağ ve sol bacaktaki toplam 12 uzvun yere göre konumları hesaplanabilecektir. 13. uzuv olan gövde uzvunun yere göre konumu ise $\mathbf{A}_g^y$ matrisi kullanılarak Denklem 6.33'deki gibi elde edilebilir.

$$\mathbf{r}_{cm_g} = \mathbf{A}_g^y(:, 4) \quad (6.33)$$

Yine daha sonraki moment hesaplamalarında kolaylık olması açısından uzuv ağırlık merkezlerinin yere göre konumlarını gösteren $\mathbf{r}_{cm_i}^{(b)}$ vektörleri bir matrise yerleştirilecektir. Bu matrisin Denklem 6.34'deki gibidir.

$$\mathbf{RCM} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{cm_1}^{(1)} & \mathbf{r}_{cm_2}^{(1)} & \mathbf{r}_{cm_3}^{(1)} & \mathbf{r}_{cm_4}^{(1)} & \mathbf{r}_{cm_5}^{(1)} & \mathbf{r}_{cm_6}^{(1)} & \mathbf{r}_{cm_1}^{(2)} & \mathbf{r}_{cm_2}^{(2)} & \mathbf{r}_{cm_3}^{(2)} & \mathbf{r}_{cm_4}^{(2)} & \mathbf{r}_{cm_5}^{(2)} & \mathbf{r}_{cm_6}^{(2)} & \mathbf{r}_{cm_g} \end{bmatrix} \quad (6.34)$$

$\mathbf{RCM}$ matrisi (4×13) boyutundadır. Bu matris kullanılarak örneğin 4. uzuv olan sağ alt_bacak'ın ağırlık merkezinin konumunu yere göre gösteren vektör $\mathbf{RCM}(:, 4)$ şeklinde elde edilebilir.

6.5.5 ${}^{(0)}\mathbf{r}_{e_j}^{(b)}$ Vektörlerinin O_y Eksen Takımına Göre İfadeleri

Daha önce elde edilen eklemlerin konumlarını $O_0^{(b)}$ eksen takımına göre gösteren ${}^{(0)}\mathbf{r}_{e_j}^{(b)}$ vektörleri kullanılarak koordinat dönüşümü ile eklemlerin konumlarını yere göre gösteren vektörler bulunacaktır. Bu vektörler Denklem 6.35'teki işlemle elde edilebilirler.

$$\mathbf{r}_{e_j}^{(b)} = \mathbf{A}_g^y \mathbf{A}_0^{g^{(b)}(0)} \mathbf{r}_{e_j}^{(b)} \quad (6.35)$$

Elde edilen bu vektörler yine daha sonraki işlemlerde kolaylık olması açısından bir matris içerisine yerleştirilecektir. Bu matris Denklem 6.36'da gösterilmiştir.

$$\mathbf{RE} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{e_1}^{(1)} & \mathbf{r}_{e_2}^{(1)} & \mathbf{r}_{e_3}^{(1)} & \mathbf{r}_{e_4}^{(1)} & \mathbf{r}_{e_5}^{(1)} & \mathbf{r}_{e_6}^{(1)} & \mathbf{r}_{e_1}^{(2)} & \mathbf{r}_{e_2}^{(2)} & \mathbf{r}_{e_3}^{(2)} & \mathbf{r}_{e_4}^{(2)} & \mathbf{r}_{e_5}^{(2)} & \mathbf{r}_{e_6}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (6.36)$$

6.5.6 O_y Eksen Takımına Göre f_{cm_i} Ağırlık Kuvveti Vektörlerinin Elde Edilmesi

Her bir uzva etki eden ağırlık kuvveti mg büyüklüğünde bir vektördür. Bu vektörün yönü ise O_y eksen takımına göre $+x$ yönündedir. Dolayısıyla herhangi bir uzva etki eden ağırlık kuvveti vektörü Denklem 6.37'deki gibi elde edilebilir.

$$f_{cm_i} = \begin{bmatrix} m_i g \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.37)$$

Bu vektörlerde bir matris içerisine yerleştirilirse;

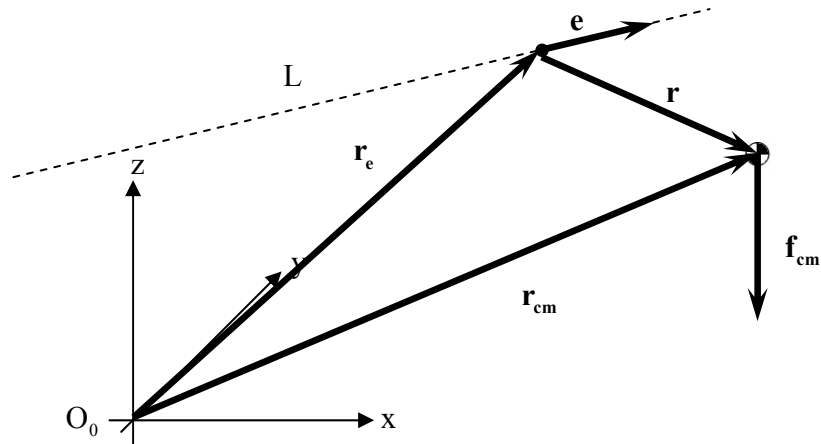
$$FCM = \begin{bmatrix} f_{cm_1} & f_{cm_2} & f_{cm_3} & f_{cm_4} & f_{cm_5} & f_{cm_6} & f_{cm_7} & f_{cm_8} & f_{cm_9} & f_{cm_{10}} & f_{cm_{11}} & f_{cm_{12}} & f_{cm_{13}} \end{bmatrix} \quad (6.38)$$

bulunur.

6.6 Uzuvarların Eklemler Üzerinde Oluşturdukları Ağırlık Momentlerinin Elde Edilmesi

Bu bölümde öncelikle herhangi bir dönme eksenine göre bir kuvvetin oluşturduğu moment hesaplanacak daha sonra bu yöntem eklemlere etki eden ağırlık momentlerinin hesabında kullanılacaktır.

6.6.1 Örnek Ağırlık Momenti Hesabı



Şekil 6.9 : Örnek Ağırlık Momenti Hesabı

Şekilde 6.9’da $\mathbf{f}_m$ ağırlık kuvvetini gösteren vektördür. $\mathbf{r}_{cm}$ ağırlık merkezinin konumunu gösteren vektör, $\mathbf{r}_e$ ise eklem konumunu gösteren vektördür. $\mathbf{e}$ ise eklem pozitif dönme yönünü gösteren vektördür. L eklem dönme doğrultusudur. Bu şekle göre ağırlık kuvvetinin eklem üzerinde oluşturduğu momentin büyüklüğü Denklem 6.39’deki gibi hesaplanabilir [28].

$$\begin{aligned}\mathbf{r} &= \mathbf{r}_{cm} - \mathbf{r}_e \\ M_L &= [\mathbf{e} \cdot (\mathbf{r} \times \mathbf{f})] \cdot \mathbf{e}\end{aligned}\tag{6.39}$$

6.6.2 i. Uzun j. Eklem Üzerinde Oluşturduğu M_{ij} Ağırlık Momentinin Elde Edilmesi

Bu bölümde daha önce anlatılan moment hesabı yöntemi kullanılarak herhangi bir ekleme herhangi bir uzuv tarafından etkiyen ağırlık momenti hesap edilecektir. Bu hesap için bir atalet koordinat sistemi olan O_y eksen takımına göre ifade edilmiş $\mathbf{r}_{cm_i}^{(b)}$, $\mathbf{r}_{e_j}^{(b)}$, $\mathbf{e}_j^{(b)}$, ve $\mathbf{f}_{cm_i}$ vektörlerine ihtiyaç vardır. Daha önceki bölümlerde hesap edilen bu vektörler kullanılarak moment hesabı yapılacaktır. Öncelikle sağ bacak eklemlerine gelen momentler hesaplanacak daha sonra sol bacak eklemlerine gelen momentler hesaplanacaktır.

6.6.2.1 Uzunların Sağ Bacak Eklemleri Üzerinde Oluşturdukları Ağırlık Momentlerinin Elde Edilmesi

Sağ bacak üzerindeki eklemler $j = (1, \dots, 6)$ arasındaki eklemlerdir. Bu bacadaki herhangi bir j eklemi için kendisinden önce ve sonra gelen uzuvların oluşturduğu momentlerin hesabı farklıdır. $i \geq j$ ve $i \leq 6$ olduğu durumda M momenti Denklem 6.40 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\begin{aligned}\mathbf{r} &= \mathbf{r}_{cm_i} - \mathbf{r}_{e_j} \\ M_{ij} &= [\mathbf{e}_j \cdot (\mathbf{r} \times \mathbf{f}_i)] \cdot \mathbf{e}_j\end{aligned}\tag{6.40}$$

Diğer durumlarda ise moment Denklem 6.41’deki gibi hesaplanmalıdır.

$$\begin{aligned}\mathbf{r} &= \mathbf{r}_{cm_i} - \mathbf{r}_{e_j} \\ M_{ij} &= -[\mathbf{e}_j \cdot (\mathbf{r} \times \mathbf{f}_i)] \cdot \mathbf{e}_j\end{aligned}\tag{6.41}$$

6.6.2.2 Uzunların Sol Bacak Eklemleri Üzerinde Oluşturdukları Ağırlık Momentlerinin Elde Edilmesi

Sol bacak eklemleri $j = (7, \dots, 12)$ arasındaki eklemlerdir. Ağırlık momentleri $i \geq j$ ve $i \leq 12$ olduğu durumda Denklem 6.42 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= \mathbf{r}_{\text{cm}_i} - \mathbf{r}_{\text{e}_j} \\ M_{ij} &= [\mathbf{e}_j \cdot (\mathbf{r} \times \mathbf{f}_i)] \cdot \mathbf{e}_j \end{aligned} \quad (6.42)$$

Diğer durumlarda Denklem 6.43 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= \mathbf{r}_{\text{cm}_i} - \mathbf{r}_{\text{e}_j} \\ M_{ij} &= -[\mathbf{e}_j \cdot (\mathbf{r} \times \mathbf{f}_i)] \cdot \mathbf{e}_j \end{aligned} \quad (6.43)$$

6.6.3 M Ağırlık Momentleri Matrisinin Elde Edilmesi

M_{ij} ağırlık momentleri tek bir matris içerisine yerleştirilirse (13×12) boyutlarında $\mathbf{M}$ matrisi Denklem 6.44'deki gibi elde edilebilir.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & \cdots & M_{1,12} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{13,1} & \cdots & M_{13,12} \end{bmatrix}_{13 \times 12} \quad (6.44)$$

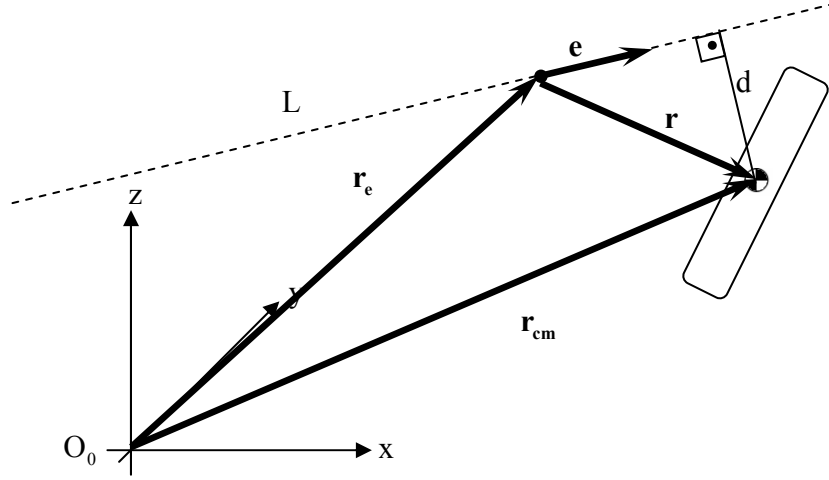
Bu matrisin elemanları i . uzvun j . eklem üzerinde oluşturduğu ağırlık momentini temsil etmektedir.

6.7 Uzunların Eklemlere Göre Atalet Momentlerinin Elde Edilmesi

Bu bölümde daha önce elde edilen $\mathbf{r}_{\text{cm}_i}^{(b)}$, $\mathbf{r}_{\text{e}_j}^{(b)}$, $\mathbf{e}_j^{(b)}$ ve $\mathbf{f}_{\text{cm}_i}$ vektörleri kullanılarak herhangi bir uzvun herhangi bir ekleme göre atalet momenti hesaplanacaktır. İki serbestlik dereceli manipülatör üzerinde anlatılan örnekte ekleme gelen toplam atalet momenti tam olarak hesaplanmıştı. Fakat oldukça fazla dönmenin olduğu iki ayaklı robotta bir uzvun bir eklem üzerinde oluşturduğu ataleti hesap etmek oldukça karmaşıktır ve hesap yükünü çok artırmaktadır. Bu yüzden her bir uzvun tüm ağırlığının ağırlık merkezinde toplanmış olduğu farz edilerek hesaplar

basitleştirilmiştir. Bu sayede hem hesap yükü azaltılmış hem de yaklaşım etkin olduğundan kontrolde herhangi problem yaşanmamıştır.

6.7.1 Örnek Atalet Momenti Hesabı



Şekil 6.10 : Örnek Atalet Momenti Hesabı

Şekil 6.10'daki uzvun L dönme eksenine göre ataletini hesaplayabilmek için d uzunluğunun bilinmesi gereklidir. Bu uzunluk aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir;

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_{cm} - \mathbf{r}_e$$

$$d = \frac{|\mathbf{r} \times \mathbf{e}|}{|\mathbf{e}|} \quad (6.45)$$

Atalet momenti ise;

$$I = md^2 \quad (6.46)$$

ifadesiyle hesaplanabilir. Burada dikkat edilmesi gerekli husus uzvun tüm kütesinin ağırlık merkezinde toplanmış olduğunun kabul edilmiş olmasıdır. Tam atalet momenti hesap edilmemiştir.

6.7.2 i. Uzun j. Ekleme Göre I_{ij} Atalet Momentinin Elde Edilmesi

Bir önceki bölümde anlatılan yöntemle göre atalet momentleri hesap edilecektir. Atalet momenti hesabında ağırlık momenti hesabında olduğu gibi iki bacak için farklı hesap gerekmemektedir. Atalet momenti her zaman pozitifdir. Dolayısıyla j. ekleme i. Uzun tarafından etkiyen atalet momenti Denklem 6.47 ile hesap edilebilir.

$$\begin{aligned}
\mathbf{r} &= \mathbf{r}_{cm_i} - \mathbf{r}_{e_j} \\
d &= \frac{|\mathbf{r} \times \mathbf{e}_j|}{|\mathbf{e}_j|} \\
I_{ij} &= m_i d^2
\end{aligned} \tag{6.47}$$

6.7.3 I Atalet Momentleri Matrisinin Elde Edilmesi

Kolaylık olması açısından hesap edilen atalet momentleri tek bir matris içerisine yerleştirilecektir. Bu matrisin i. satır j. sütunu i. uzvun j. eklem üzerinde oluşturduğu atalet momentini göstermektedir. Matris Denklem 6.48'de gösterilmiştir.

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{11} & \cdots & I_{1,12} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{13,1} & \cdots & I_{13,12} \end{bmatrix}_{13 \times 12} \tag{6.48}$$

6.8 Fazlara Göre Eklemler İçin Toplam Ağırlık ve Atalet Momentlerinin Elde Edilmesi

Daha önce robotun yürümesi esnasında ikisi birbiriyle simetrik olmak üzere üç faz olduğu belirtilmişti. Şimdi her bir faz için eklemlere gelen toplam ağırlık ve atalet momentleri hesap edilecektir.

6.8.1 TDF₁ Fazında j. Eklem İçin Toplam Ağırlık Momenti MTDF_{1,top,j} 'in ve Toplam Atalet Momenti ITDF_{1,top,j} 'in Elde Edilmesi

TDF₁ fazı robotun sağ ayağı üzerinde dengede olduğu durumu temsil etmektedir. Bu faza göre robotun sağ ayağı yerde ve sabit sol ayağı ise havada hareketlidir. Bu fazda robot açık zincir durumundadır ve robotun eklemleri kendisinden önceki uzuvların toplam ağırlığını dengelemek zorundadır. Ayrıca her bir ekleme etkiyen atalet momenti ise yine eklemin kendisinden önceki uzuvların toplam ataletine eşittir. Daha önce tüm uzuvların tüm eklemler üzerinde oluşturduğu ağırlık ve atalet momentleri hesap edilmişti ve sırasıyla **M** ve **I** matrislerine yerleştirilmişti. Bundan sonraki hesaplarda **M** ve **I** matrisleri kullanılacaktır.

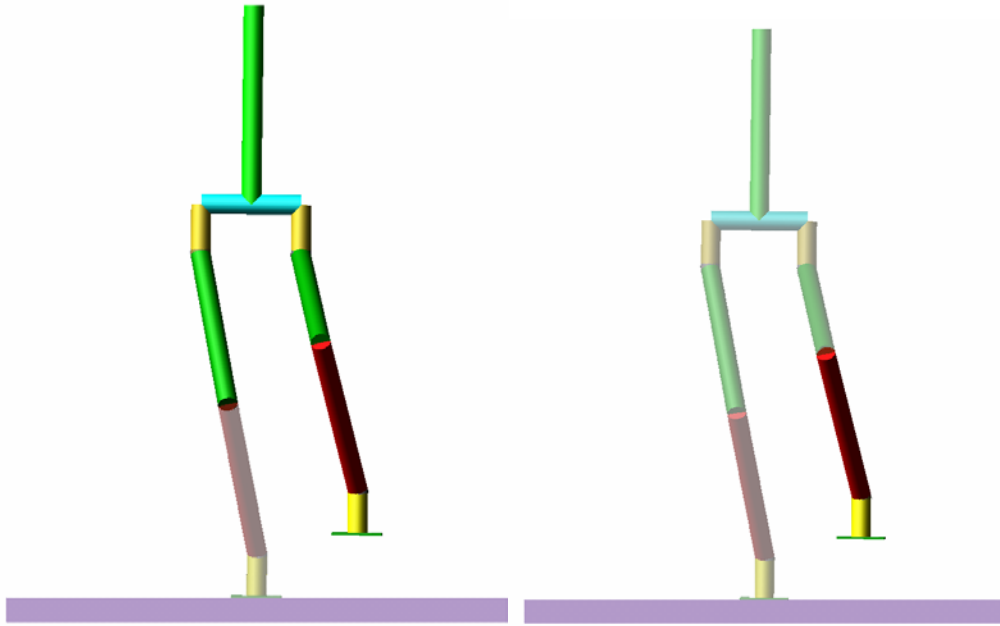
Bu fazda sağ bacakta her bir eklem kendisinden önceki uzuvların ve sol bacak uzuvlarının eklem üzerinde oluşturduğu ağırlığı dengelemek durumundadır. Sağ

bacak eklemlerine etkiyen atalette kendisinden önceki her bir uzvun eklem üzerinde oluşturduğu ataletlerin toplamına eşittir. Buna göre sağ bacak eklemleri için TDF_1 fazında üzerine gelen toplam ağırlık kuvveti ve toplam atalet momenti aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

M_{ij} ' ler ve I_{ij} ' ler $i < j$ || ($i \leq 13$ && $i \geq 7$) şartını sağlamak üzere;

$$\begin{aligned} MTDF1_{top_j} &= \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{12} M_{ij} \\ ITDF1_{top_j} &= \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{12} I_{ij} \end{aligned} \quad (6.49)$$

şeklinde ifade edilebilir. Örneğin 4. sağ bacak eklemi için $MTDF1_{top_4}$, $\mathbf{M}$ matrisinde 4. sütunun son 6 satırındaki elemanlar ile ilk 3 satırındaki elemanların toplamına eşittir. Aynı şekilde $ITDF1_{top_4}$, $\mathbf{I}$ matrisinde 4. sütunun son 6 satırındaki elemanlar ile ilk 3 satırındaki elemanların toplamına eşittir. 4. eklemin ağırlıklarını dengelemek zorunda olduğu uzuvlar Şekil 6.11'de gösterilmiştir.



Şekil 6.11 : TDF_1 Fazında Sağ ve Sol Diz Eklemlerinin Ağırlıklarını Dengelemek Zorunda Oldukları Uzuvlar

Bu fazda sol bacak eklemleri sadece kendilerinden sonraki uzuvların ağırlık momentlerini dengelemek zorundadır ve üzerlerine gelen atalette sadece

kendilerinden sonraki uzuvların ataletlerinin toplamıdır. Sol bacak üzerindeki herhangi bir uzva etki eden toplam ağırlık ve atalet momenti aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

M_{ij} ' ler ve I_{ij} ' ler $i \geq j$ & $i \neq 13$ şartını sağlamak üzere;

$$\begin{aligned} \text{MTDF1}_{\text{top}_j} &= \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{12} M_{ij} \\ \text{ITDF1}_{\text{top}_j} &= \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{12} I_{ij} \end{aligned} \quad (6.50)$$

şeklinde ifade edilebilir. Örneğin 4. sol bacak eklemi olan diz eklemine gelen toplam ağırlık momenti $\text{MTDF1}_{\text{top}_{10}}$, $\mathbf{M}$ matrisinin 10. sütununun 10. satırından 12. satırına kadar olan terimlerin toplamına eşittir. Aynı şekilde bu eklemeye gelen toplam atalet $\text{ITDF1}_{\text{top}_{10}}$, $\mathbf{I}$ matrisinin 10. sütununun 10. satırından 12. satırına kadar olan terimlerin toplamına eşittir.

6.8.2 TDF₂ Fazında j. Eklem İçin Toplam Ağırlık Momenti $\text{MTDF2}_{\text{top}_j}$ ' in ve Toplam Atalet Momenti $\text{ITDF2}_{\text{top}_j}$ ' in Elde Edilmesi

TDF₂ fazı robotun sol ayağı üzerinde dengede olduğu durumu temsil etmektedir. Bu fazda sol bacak eklemleri bacak üzerinde kendilerinden önce gelen tüm sol bacak uzuvlarının, sağ bacak uzuvlarının ve de gövdenin ağırlıklarını dengelemek zorundadırlar. Sol bacak eklemleri için toplama işlemi aşağıdaki gibi yapılabilir;

M_{ij} ' ler ve I_{ij} ' ler $i < j$ || $i = 13$ şartını sağlamak üzere;

$$\begin{aligned} \text{MTDF2}_{\text{top}_j} &= \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{12} M_{ij} \\ \text{ITDF2}_{\text{top}_j} &= \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{12} I_{ij} \end{aligned} \quad (6.51)$$

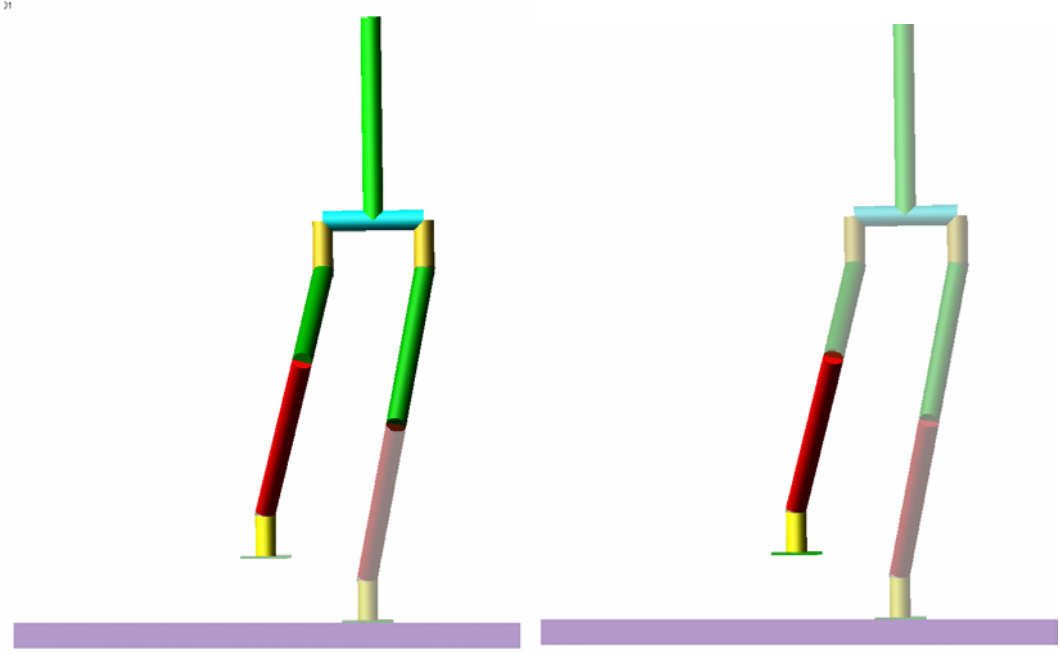
şeklinde ifade edilebilir. Örneğin sol bacağın 4. eklemi üzerine gelen toplam ağırlık momenti $\text{MTDF2}_{\text{top}_{10}}$, $\mathbf{M}$ matrisinin 10. sütununun ilk 10 satırı ile 13. satırının toplamına eşittir. Bu durum Şekil 6.12'de görülebilir.

Bu fazda sağ bacak eklemleri sadece kendilerinden sonraki uzuvların ağırlıklarını dengelemek sorundur. Sağ bacak eklemlerine gelen toplam ağırlık ve atalet momenti aşağıdaki ifadeden hesaplanabilir;

M_{ij} ' ler ve I_{ij} ' ler $i \geq j$ && $i \leq 6$ şartını sağlamak üzere;

$$\begin{aligned} \text{MTDF2}_{\text{top}_j} &= \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{12} M_{ij} \\ \text{ITDF2}_{\text{top}_j} &= \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{12} I_{ij} \end{aligned} \quad (5.52)$$

şeklinde hesap edilebilir.



Şekil 6.12: TDF_2 Fazında Sol ve Sağ Diz Eklemlerinin Ağırlıklarını Dengelemek Zorunda Oldukları Uzunluklar

6.8.3 ÇDF Fazında j. Eklem İçin Toplam Ağırlık Momenti $\text{MÇDF}_{\text{top}_j}$ ' in ve Toplam Atalet Momenti $\text{İÇDF}_{\text{top}_j}$ ' in Elde Edilmesi

Bu fazda her iki ayakta yerle temas halindedir. Bu yüzden her bir bacak kendi uzunluklarının ağırlıklarını dengelemek durumundadır. Gövdenin ağırlığı ise iki bacak arasında paylaştırılacaktır.

Sağ bacakta herhangi bir eklem için ağırlık ve atalet momentleri toplamı aşağıdaki ifadeden bulunabilir;

M_{ij} ' ler ve I_{ij} ' ler $i < j$ şartını sağlamak üzere;

$$\begin{aligned}
M\check{C}DF_{top_j} &= \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{12} M_{ij} + \frac{M_{13j}}{2} \\
I\check{C}DF_{top_j} &= \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{12} I_{ij} + \frac{I_{13j}}{2}
\end{aligned}
\tag{6.53}$$

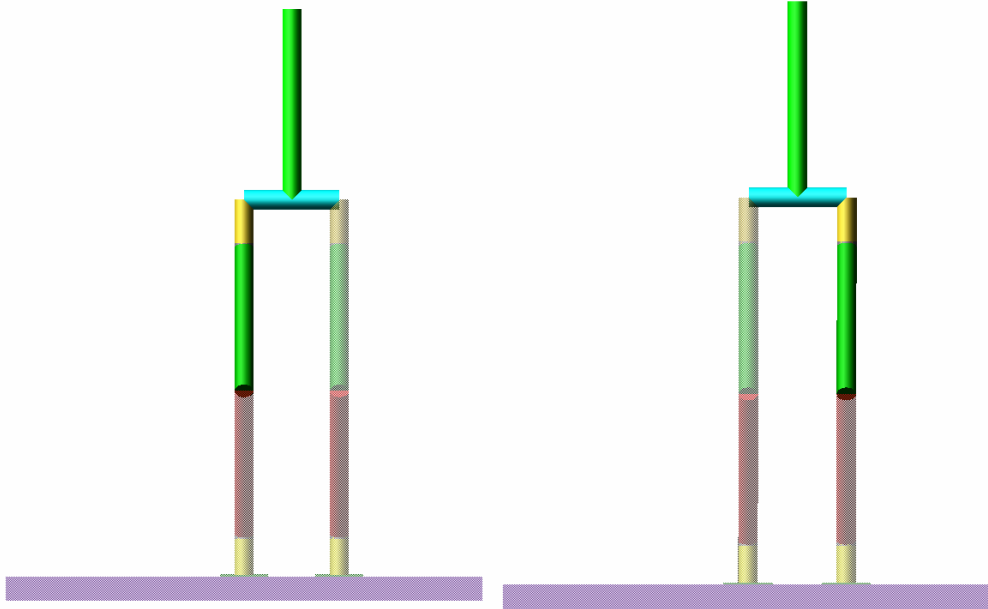
Şeklinde ifade edilebilir. Örneğin sağ bacağın 4. eklemi için $M\check{C}DF_{top_4}$, $I\check{C}DF_{top_4}$ sırasıyla 4. sütunun ilk üç satırı ile 13. satırın yarısının toplamına eşittir. Bu durum şekilde görülebilir.

Sol bacak içinde hesaplamalar sağ bacak için olanın aynısıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

M_{ij} ' ler ve I_{ij} ' ler ($i < j$ && $i \geq 7$) şartını sağlamak üzere;

$$\begin{aligned}
M\check{C}DF_{top_j} &= \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{12} M_{ij} + \frac{M_{13j}}{2} \\
I\check{C}DF_{top_j} &= \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{12} I_{ij} + \frac{I_{13j}}{2}
\end{aligned}
\tag{6.54}$$

Şeklinde ifade edilebilir. Bu durum Şekil 6.13'de görülebilir.



Şekil 6.13 : ÇDF Fazında Sağ ve Sol Diz Eklemlerinin Ağırlıklarını Dengelemek Zorunda Oldukları Uzunluklar

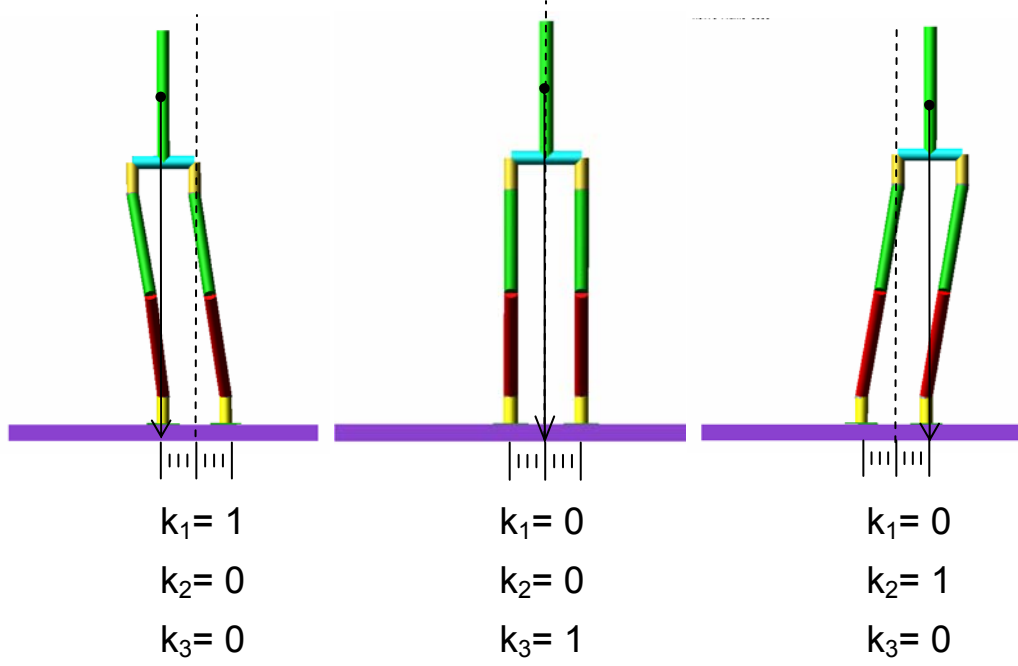
6.9 Eklem Kontrolörü Tasarımı

Her bir faz için eklemlere gelen toplam ağırlık ve atalet momentlerinin hesabından sonra artık eklem kontrolörü tasarlanabilir. Altısı sağ bacakta altısı sol bacakta olmak üzere toplam 12 eklem için 12 kontrolör vardır. Bu kontrolörlerin hepsinin yapısı aynıdır ve iki serbestlik dereceli manipülatör örneğindeki gibidir.

6.9.1 Faz Geçişlerini Yumuşatmak İçin Ağırlık Katsayılarının Kullanılması

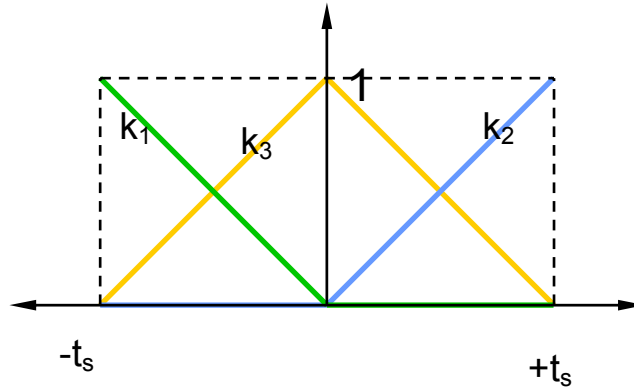
Her bir faz için hesap edilen eklemlere gelen ağırlık ve atalet momentleri hesapları birbirinden çok farklı değerlerdedir. Fakat robotun yürüyüşü esnasında bu fazlar arasında geçiş olmak zorundadır. Bu geçişler ani anahtarlamalar şeklinde yapıldığı durumda eklem momentlerindeki ani değişimler robotun kararsızlığa gitmesine neden olabilmektedir. Bu problemin üstesinden gelmek için faz geçişleri kademeli olarak yapılmıştır. Bu sayede eklem moment değerleri bir fazdan diğer faza geçerken süreksizlik göstermeden yumuşak bir şekilde değişmektedir.

Her bir faz için kontrole katkı katsayısı tanımlanmıştır. Bu katsayılar k_{TDF1} , k_{TDF2} , k_{CDF} katsayılarıdır ve sırasıyla TDF_1 , TDF_2 , CDF fazlarının kontrole katkısını belirlemektedir. Katsayılar 0-1 arasında değerler almaktadır. 0 değeri fazın hiç katkısının olmadığını 1 değeri ise fazın katkısının tam olduğunu göstermektedir. Katsayıların değeri gövdenin yanal konumuna göre belirlenmektedir. Katsayıların 1 ve 0 olduğu durumlar Şekil 6.14'te görülmektedir.



Şekil 6.14 : Ağırlık Katsayılarının 0 ve 1 Olduğu Durumlar

Ağırlık katsayılarının yanal hareket miktarına göre değişimi Şekil 6.15’te gösterilmiştir.

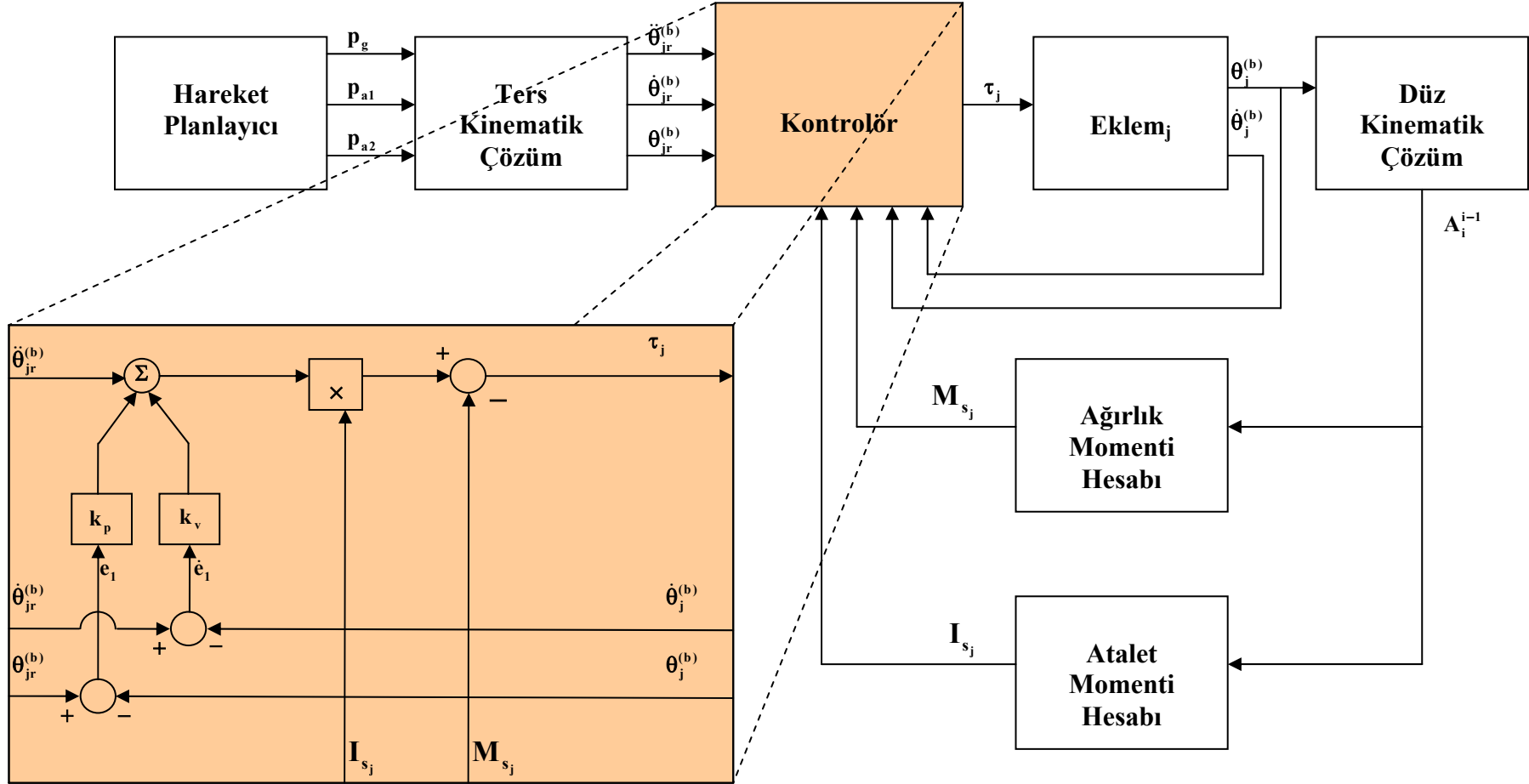


Şekil 6.15 : Ağırlık Katsayılarının Yanal Hareket Miktarıyla Değişimi

Bu son hesaplamalardan sonra i. eklemnin kontrolunda kullanılacak ağırlık momenti ve atalet momenti Denklem 6.55’teki gibi hesaplanabilir;

$$\begin{aligned}
 M_{s_j} &= k_{TDF1} \times MTDF1_{top_j} + k_{TDF2} \times MTDF2_{top_j} + k_{CDF} \times M_{CDF_{top_j}} \\
 I_{s_j} &= k_{TDF1} \times ITDF1_{top_j} + k_{TDF2} \times ITDF2_{top_j} + k_{CDF} \times I_{CDF_{top_j}}
 \end{aligned}
 \tag{6.55}$$

Kontrollü sistemin genel blok diyagramı Şekil 6.16’da gösterilmiştir.

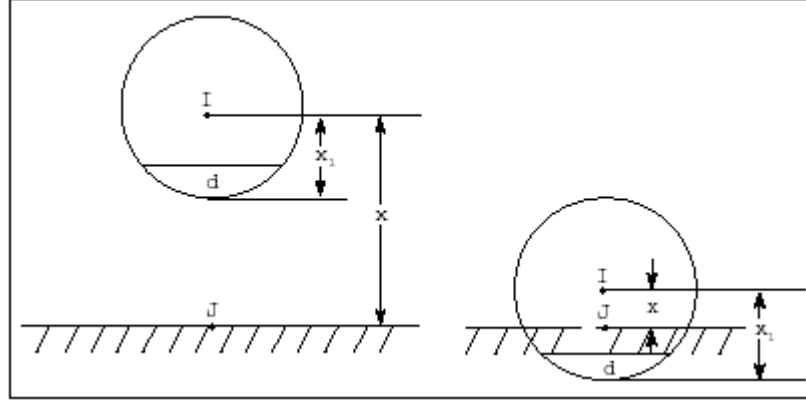


Şekil 6.16 : Kontrollü Sistemin Genel Blok Diyagramı

6.10 Temas Modeli

Yürüyen robotların ayakları yürümenin çeşitli safhalarında yerle temas halindedir ve bu temas yürüme üzerinde hayati bir etkiye sahiptir. Bu yüzden yürüme olayında mutlaka yerle olan temas modellenmelidir.

Şekil 6.17’de bir kürenin düz bir zeminle temasındaki parametreler gösterilmiştir.



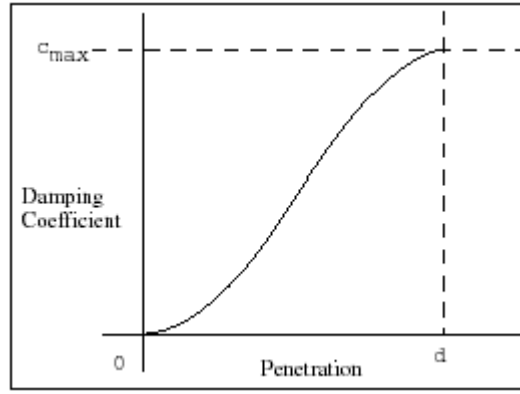
Şekil 6.17 : Temas Modelindeki Genel Parametreler

Burada x_1 kürenin yarıçapını, x kürenin merkezinin yere olan uzaklığını, d maksimum dalma miktarını göstermektedir. $x \geq x_1$ olduğu durumda kürenin yerle teması yoktur ve temas kuvveti oluşmaz. $x < x_1$ olduğu durumda ise küre yerle temas halindedir, dalma miktarı $p = x_1 - x$ dir ve bir temas kuvveti vardır. Bu temas kuvveti küreyle yer arasında nonlinear bir yay damper olduğu düşünülerek hesaplanabilir. Temas kuvvetinin hesabı aşağıdaki gibidir;

$$x \geq x_1 \text{ dalma yok, } F_n = 0 \quad (6.56)$$

$$x < x_1 \text{ dalma var, } F_n = kp^e + c\dot{p} \quad (6.57)$$

Burada F_n temas kuvvetinin normal bileşenini, p dalma miktarını göstermektedir. k yay katılık katsayısıdır. e kuvvet eksponentidir ve sabit bir sayıdır. Lineer yaylar için $e=1$, kısalдықça sertleşen yaylar için $e > 1$, kısalдықça yumuşayan yaylar için $e < 1$ alınır. c ise damper sönümlendirme katsayısıdır ve p 'nin fonksiyonudur. c , p arttıkça artmakta $p = d$ 'ye ulaştıktan sonra ise maksimum değerinde sabit kalmaktadır. c 'nin p ile değişimi Şekil 6.18’de gösterilmiştir.



Şekil 6.18 : c Damper Sönümlleme Katsayısının p Dalma Miktarı İle Değişimi

Küreyle zemin arasında kayma olmadığı varsayılmıştır. Bu yüzden sürtünme katsayısı sabittir ve statik sürtünme katsayısına eşittir. Küreyle zemin arasındaki sürtünme kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$x \geq x_1 \text{ dalma yok, } F_s = 0 \quad (6.58)$$

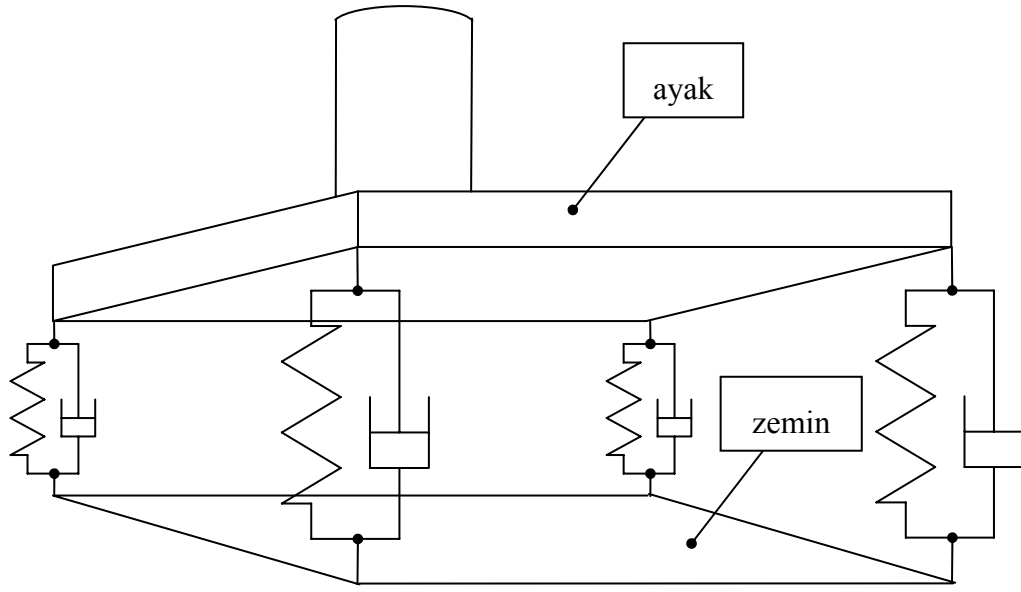
$$x < x_1 \text{ dalma var, } F_{s_{\max}} = \eta_s F_n \quad (6.59)$$

Burada sürtünme kuvvetinin bir tepki kuvveti olduğu ve yukarda hesaplanan değerin sürtünme kuvvetinin maksimum değerini verdiği unutulmamalıdır.

Sürtünme ve normal kuvvetin hesaplanmasından sonra toplam temas kuvveti Denklem 6.60 ile hesaplanabilir.

$$F_t = F_n + F_s \quad (6.60)$$

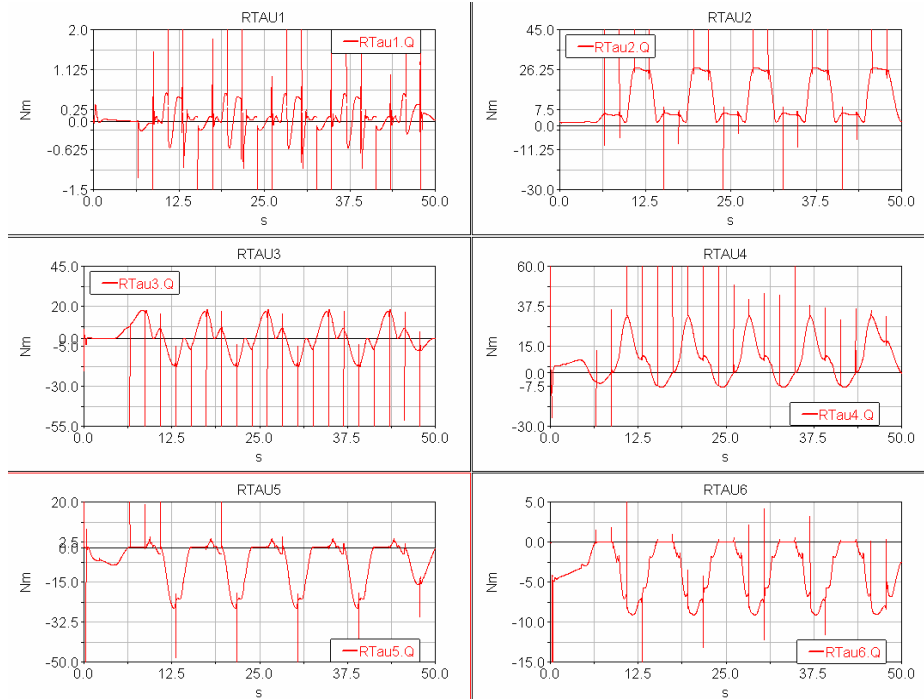
İki ayaklı robot modelinde ayak dikdörtgen prizma geometrisinde oluşturulmuştur. Ayağın yerle temasının ise alttaki dört köşesinden olduğu düşünülmüştür. Böylelikle temas esnasında ayağın dört köşesi ile zemin arasında nonlinear yay-damper sistemi olduğu kabul edilerek temas olayı modellenmiştir. Bu durum Şekil 6.19’da görülebilir.



Şekil 6.19 : Ayak İle Zemin Arasındaki Temas Modeli

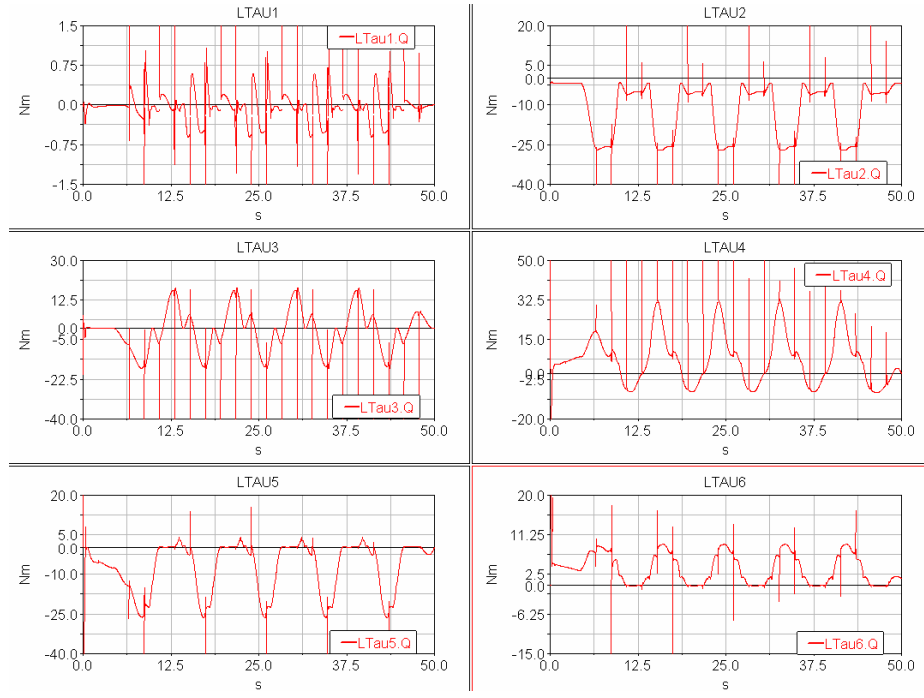
7 BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde yapılan benzetim senaryoları ve elde edilen sonuçlar anlatılacaktır. Toplam 10 adet benzetim gerçekleştirilmiştir. Bunlardan dördünde çömelme-kalkma hareketi, ikisinde gövdenin yana ve ileriye hareketi, birinde bacak kaldırma hareketi, üçünde de yürüme hareketi gerçekleştirilmiştir. Aşağıda 1. yürüme hareketi benzetiminin sonuçları verilmiştir. RTAU ifadeleri kalçadan bileğe doğru sağ bacak eklem momentlerini göstermektedir. 1. yürüme hareketi sağ bacak eklem momentleri Şekil 7.1’de gösterilmiştir.



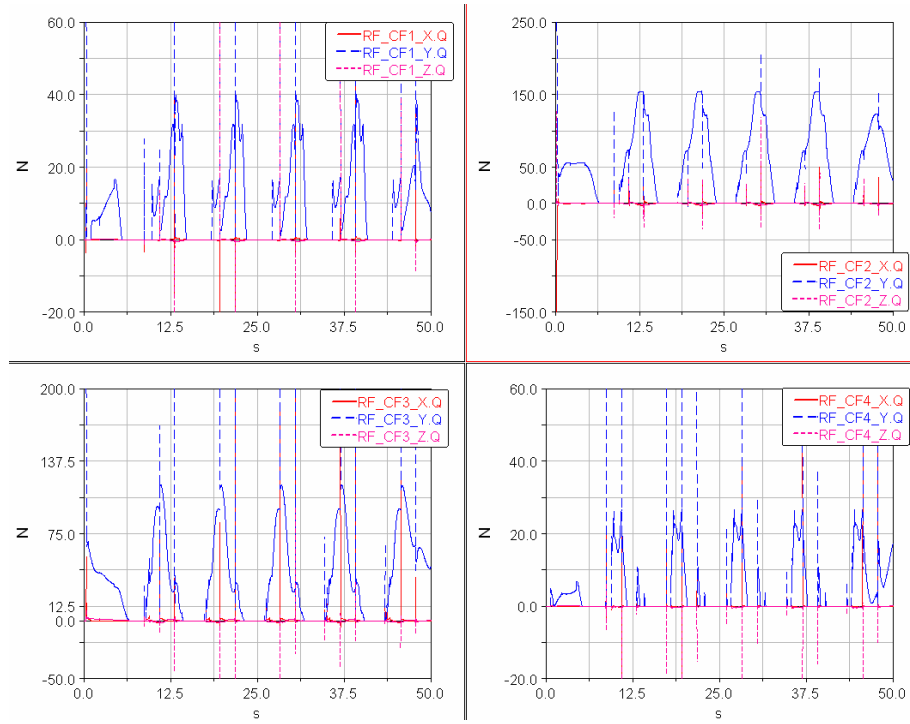
Şekil 7.1 : 1. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri

LTAU ifadeleri kalçadan bileğe doğru sol bacak eklem momentlerini göstermektedir. 1. yürüme hareketi sol bacak eklem momentleri Şekil 7.2’de gösterilmiştir.



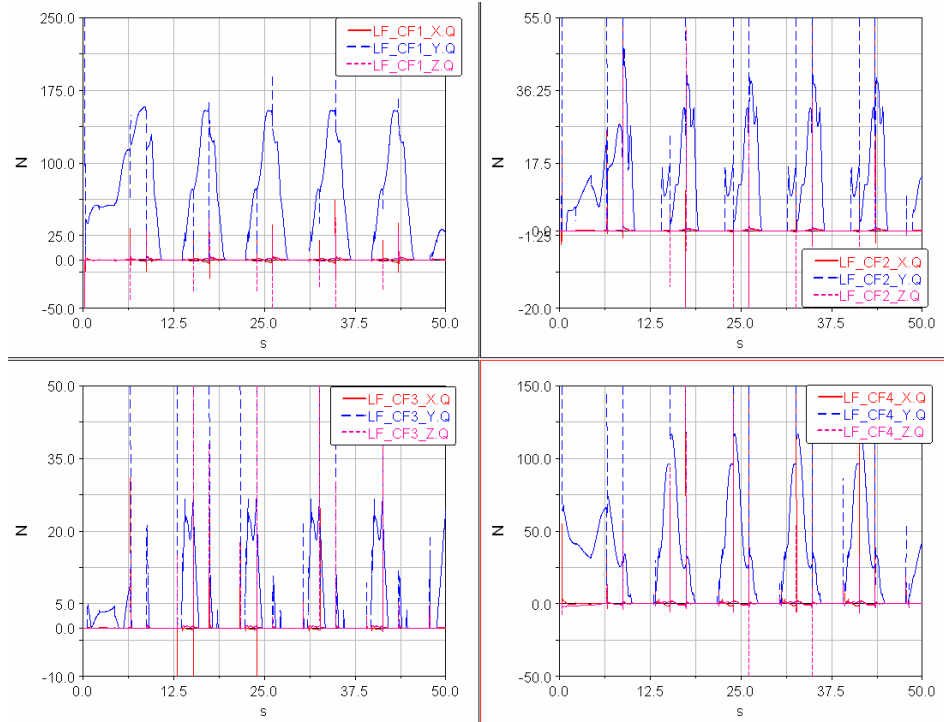
Şekil 7.2 : 1. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri

Şekil 7.3’de sağ ayağın yerle temasında ayak köşelerine yerleştirilen 4 sensörden okunan tepki kuvvetleri gösterilmiştir. Y normal kuvveti, X ilerleme doğrultusundaki sürtünme kuvvetini, Z ise yanal doğrultudaki sürtünme kuvvetini temsil etmektedir.



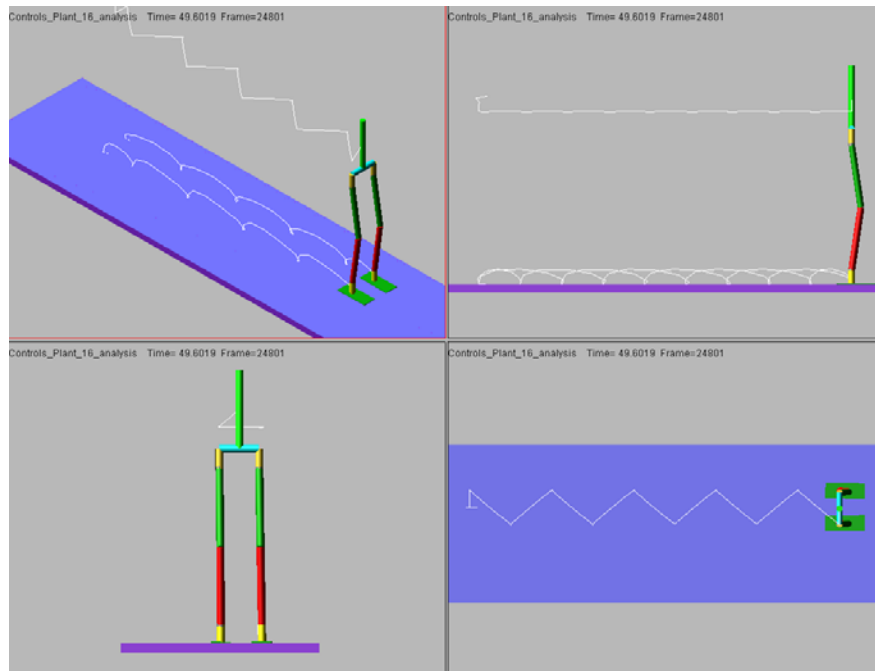
Şekil 7.3 : 1. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

Şekil 7.4'te sol ayağın yerle temasında ayak köşelerine yerleştirilen 4 sensörden okunan tepki kuvvetleri gösterilmiştir. X, Y, Z bileşenleri sağ ayakla aynıdır.



Şekil 7.4: 1. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

1. Yürüme Hareketinde gövde ve ayakların izledikleri yörüngeler Şekil 7.5'de gösterilmiştir.



Şekil 7.5 : 1. Yürüme Hareketinde Gövde ve Ayakların İzledikleri Yörüngeler

7.1 Benzetim Parametreleri

Senaryolarda etkin olan parametreler Tablo 7.1’de gösterilmiştir. Bu parametrelere çeşitli değerler verilerek benzetimler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7.1 : Benzetim Parametrelerinin Açıklamaları

Parametre	Açıklama
h_s [s]	Simulink ve ADAMS yazılımları arasındaki haberleşme aralığını temsil etmektedir.
c_m [m]	Gövdenin yere çömelme miktarını göstermektedir
y_m [m]	Gövdenin yanal hareket miktarını göstermektedir
a_u [m]	Adım uzunluğu
a_v [m]	Adım yüksekliği
μ	Ayakla yer arasındaki statik sürtünme katsayısı
b [s]	Hareketler arasındaki bekleme süresi
k [N/m]	Temas rijitliği (Tüm senaryolarda 10^8 alınmıştır)
e	Kuvvet exponenti (Tüm senaryolarda 2.2 alınmıştır)
c [Ns/m]	Temas sönümlleme oranı (Tüm senaryolarda 10^4 alınmıştır)
d [m]	Maksimum dalma miktarı (Tüm senaryolarda 10^{-4} alınmıştır)

7.2 Benzetim Senaryoları

Daha önce belirtilen benzetim parametreleri değiştirilerek çeşitli benzetimler yapılmıştır. Senaryolar Tablo 7.2’de görülebilir. Elde edilen en yüksek hızlar boyanmıştır.

Tablo 7.2 : Benzetim Senaryoları

Benzetim	h[s]	a_u[m]	a_y[m]	c_m[m]	y_m[m]	μ	b [s]	Hız [m/s]	Hız [km/saat]	Açıklama
1. Çömelme-Kalkma	0.0002	-	-	0.2	-	1	0.1	-	-	-
2. Çömelme-Kalkma	0.0002	-	-	0.2	-	1	0.1	-	-	-
3. Çömelme-Kalkma	0.0002	-	-	0.5	-	1	0.1	-	-	-
4. Çömelme-Kalkma	0.0002	-	-	0.5	-	1	0.1	-	-	-
1. Yanal Hareket	0.0002	-	-	0.2	0.12	1	0.1	-	-	-
2. Yanal Hareket	0.0002	-	-	0.2	0.12	1	0.1	-	-	-
1. Ayak Kaldırma	0.0002	-	0.13	0.2	0.12	1	0.1	-	-	-
1. Yürüme	0.0001	0.25	0.1	0.1	0.12	0.7	0	0.0535	0.1926	9adım 42s
2. Yürüme	0.0001	0.3	0.1	0.1	0.12	0.7	0	0.0627	0.22572	9adım 43s
3. Yürüme	0.0001	0.35	0.1	0.15	0.12	0.7	0	0.0777	0.27972	8adım 36s
4. Yürüme	0.0001	0.2	0.05	0.15	0.12	0.7	0	0.0486	0.17496	9adım 37s
5. Yürüme	0.0001	0.2	0.05	0.15	0.12	0.7	0	0.0514	0.18504	9adım 35s
6. Yürüme	0.0001	0.2	0.05	0.15	0.12	0.7	0	0.0545	0.1962	9adım 33s
7. Yürüme	0.0001	0.2	0.05	0.15	0.12	0.7	0	0.138	0.4968	9adım 13s
8. Yürüme	0.0001	0.25	0.05	0.15	0.12	0.7	0	0.116	0.4176	7adım 15s
9. Yürüme	0.0001	0.25	0.05	0.15	0.12	0.7	0	0.132	0.4752	9adım 17s
10. Yürüme	0.0001	0.3	0.05	0.15	0.12	0.7	0	0.158	0.5688	9adım 17s
11. Yürüme	0.0001	0.35	0.05	0.15	0.12	0.7	0	0.185	0.666	9adım 17s
12. Yürüme	0.0001	0.35	0.05	0.15	0.12	0.7	0	0.242	0.8712	9adım 13s

Bu benzetim senaryolarının sonuçları ekte verilmiştir. Grafiklerde görülen eklem momentlerindeki ve temas kuvvetlerindeki ani değişimler ayağın yerle temas ettiği anlarda oluşmuştur. Gövdenin yanal yer değiştirme miktarı statik denge konumlarına göre belirlenmiştir.

8 SONUÇLAR, TARTIŞMA VE GELECEK ÇALIŞMALAR

8.1 Benzetim Sonuçları Hakkındaki Yorumlar

Önerilen iki ayaklı robot modelinin gerçekleştirebileceği hareketler aşamalar halinde ele alınmıştır. Öncelikle 5 serbestlik dereceli bir model üzerinde kinematik analiz ve dinamik modelleme çalışmaları yapılmıştır. Daha sonra model son hali olan üç boyutlu bir mekanizmaya dönüştürülmüştür. Tüm bu çalışmalar esnasında ADAMS ile Simulink yazılımları arasındaki haberleşme aralığının benzetim sonuçları üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Özellikle robotun tekil noktalardaki hareketlerinin incelenmesi esnasında haberleşme aralığı yeterince küçük seçilmediği durumlarda ADAMS'ın çözümde hata yaptığı görülmektedir.

Yapılan çalışmalarda ayakla yer arasında meydana gelen temasın modellenmesinin yürüme kararlılığı açısından çok önemli olduğu görülmüştür. Temas parametrelerinin değişiminin gerçekleştirilen dinamik benzetim performanslarını önemli ölçüde etkilediği saptanmıştır. Dinamik yürüme hareketinde yerle olan temasın denge kararlılığı açısından çok daha fazla önem kazanacağı açıktır.

Benzetimlerde robot hareket ve eklem yörünge planlamasının robotun denge kararlılığı ve yürüyüşünün insaninkine benzer periyodik bir hareket olması açısından önemli olduğu görülmüştür. Başarılı bir prototipin gerçekleştirilmesi için yürüme kalıplarının çok iyi belirlenmesi gerektiği düşünülmektedir.

Benzetimlerde robotun hareketleri sistem parametrelerinin değişimi yoluyla incelenmiştir. Çömelme-kalkma, iki ayak üzerinde iken gövde ağırlığının bir ayaktan diğerine transferi, tek ayağı yerden kaldırma ve statik yürüme hareketlerinin dinamik benzetimleri başarıyla gerçekleştirilmiştir. İki ayağın yerde olduğu ÇDF fazında robotu modellemek oldukça güçtür. Bu fazda robotu kontrol etmek için önerilen kontrolör etkin sonuçlar vermiştir. Ağırlık katsayılarının kullanımı ile fazlar arasındaki geçişler yumuşatılarak sürekli hale getirilmiştir. Bu sayede eklem momentlerinin faz geçişleri esnasındaki ani değişimlerinin önüne geçilmiştir. Benzetim sonuçlarına bakıldığında faz geçişlerinde herhangi bir ani değişim

olmadığı görülebilir. Ağırlık katsayılarının dinamik yürüme hareketi için kullanılması durumunda robotun ÇDF fazındaki kontrol problemine ve de faz geçişlerindeki süreksizlik problemlerine iyi bir çözüm olabileceği düşünülmektedir.

8.2 Gelecek Çalışmalar

Gelecek çalışmalarda robotun eklem modelinin daha da iyileştirilmesine çalışılacaktır. Ayrıca ağırlık kuvvetlerinden başka atalet kuvvetleri de göz önüne alınarak robotun denge kararlılığının sağlanarak dinamik yürüme hareketi gerçekleştirilmeye çalışılacaktır.

Ayağın yerle olan temas kuvvetlerinin robotun dinamiği üzerindeki önemli etkisi vardır. Bu yüzden dinamik yürüme hareketinin gerçekleştirilebilmesi için yerle temastan kaynaklanan problemlere çözüm getirilmelidir. Bunun iki şekilde yapılabileceği düşünülmektedir. Birincisi temasın ayrıntılı bir modelini elde etmek ve bunu kontrol yaklaşımında dikkate almak, ikincisi ise ayağın mekanik tasarımını temas problemlerini azaltacak şekilde yapmaktır. İnsan ayağı çok fazla sayıda kemik ve eklemden meydana gelmektedir. Bu eklemlerin birçoğu pasif durumdadır. Pasif eklemlerin özellikle yürüme ve koşma esnasında yerle temastan kaynaklanan tepki kuvvet ve momentlerinin sönümlenmesinde etkin olduğu düşünülmektedir. Robot ayağının tasarımının insan ayağının bu özelliği dikkate alınarak yapılması durumunda temas probleminin önemli ölçüde kolaylaşacağı düşünülmektedir.

Yürüme ve koşma hareketleri periyodik hareketlerdir. Hareketin sürekliliğinin sağlanabilmesi bu periyodiklik sayesinde. Bu yüzden yürüyen robotların hareket planlaması oldukça önemlidir. Gelecek çalışmalarda bu yürüme ve koşma kalıpları incelenecek ve robot üzerinde uygulanmaya çalışılacaktır.

Gelecek çalışmaların nihai hedefi göz önüne alınan iki ayaklı robot modelinin koşma hareketinin dinamik benzetimidir. Bugüne kadar gerçekleştirilen birçok iki ayaklı robot prototipinden yalnızca bir kısmı dinamik yürüme hareketini başarıyla gerçekleştirmişlerdir. Fakat insanın koşma hareketine yaklaşan bir robot prototipi gerçekleştirilememiştir. Koşmanın klasik yaklaşımlarla değil yeni yaklaşımlarla gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir. Gelecek çalışmalarda robotun koşmasına imkan verecek yeni yaklaşımlar geliştirilmesi düşünülmektedir.

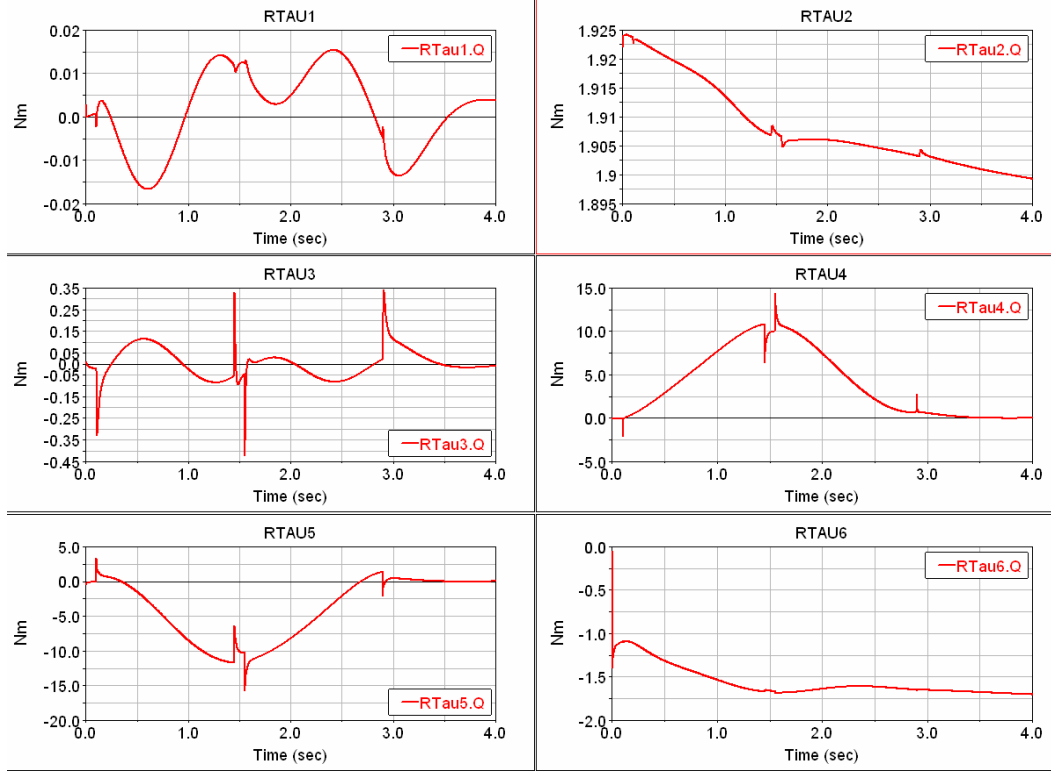
KAYNAKLAR

- [1] **Vaughan, C.L.**, 2002, Theories of bipedal walking: an odyssey, Journal of Biomechanics, Vol. 36 s.513-523
- [2] **Shih, C.-L.**, 1996, The dynamics and control of a biped walking robot with seven degrees of freedom, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 118 s.683-690
- [3] **Todd, D.**, 1985, Walking Machines: An Introduction to Legged Robots, Chapman and Hall, New York
- [4] **Raibert, M.**, 1986, Legged Robots That Balance, M.I.T. Press, Cambridge
- [5] **Kato, J.**, 1972, Pneumatically Powered Artificial Legs Walking Automatically Under Various Circumstances, Proc. Of 4th Int. Symposium in External Control of Human Extremities, s.458-470
- [6] **Kajita, S., Yamaura T., Kobayashi A.**, 1992, Dynamic walking control of a biped robot along a potential energy conserving orbit, IEEE Trans. Robot. Auto., Vol. 8 s.431-438
- [7] **Miller, W.**, 1994, Real-Time Neural Network Control of a Biped Walking Robot, IEEE Control Systems, s.41-48
- [8] **Vukobratovic, M., Potkonjak, V., Tzafestas, S.**, 2004, Human and Humanoid Dynamics, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 41 s.65-84
- [9] **Vukobratovic, M., Borovac, B., Surla, D., Stokic, D.**, 1990, Biped Locomotion, Springer-Verlag, Berlin
- [10] **Arakawa, T., Fukuda, T.**, 1997, Natural motion generation of biped locomotion robot using hierarchical trajectory generation method consisting of GA, EP layers, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 211-216
- [11] **Goswami, A.**, 1999, Foot rotation indicator (FRI) point: A new gait planning tool to evaluate postural stability of biped robots, Proceedings of the IEEE
- [12] **Shih, C.-L., Gruver, W.A.**, 1992, Control of a Biped Robot in the Double-Support Phase, IEEE Trans. on Sys. Man and Cybernetics, Vol. 22 s.729-735
- [13] **Lohmeirer, S., Löffler, K., Gienger, M., Ulbrich, H., Pfeiffer, F.**, 2004, Computer System and Control of Biped "Johnnie", Proc. of the IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation
- [14] **Löffler, K., Gienger, M., Pfeiffer, F.**, Sensor and Control Design of a Dynamically Stable Biped Robot

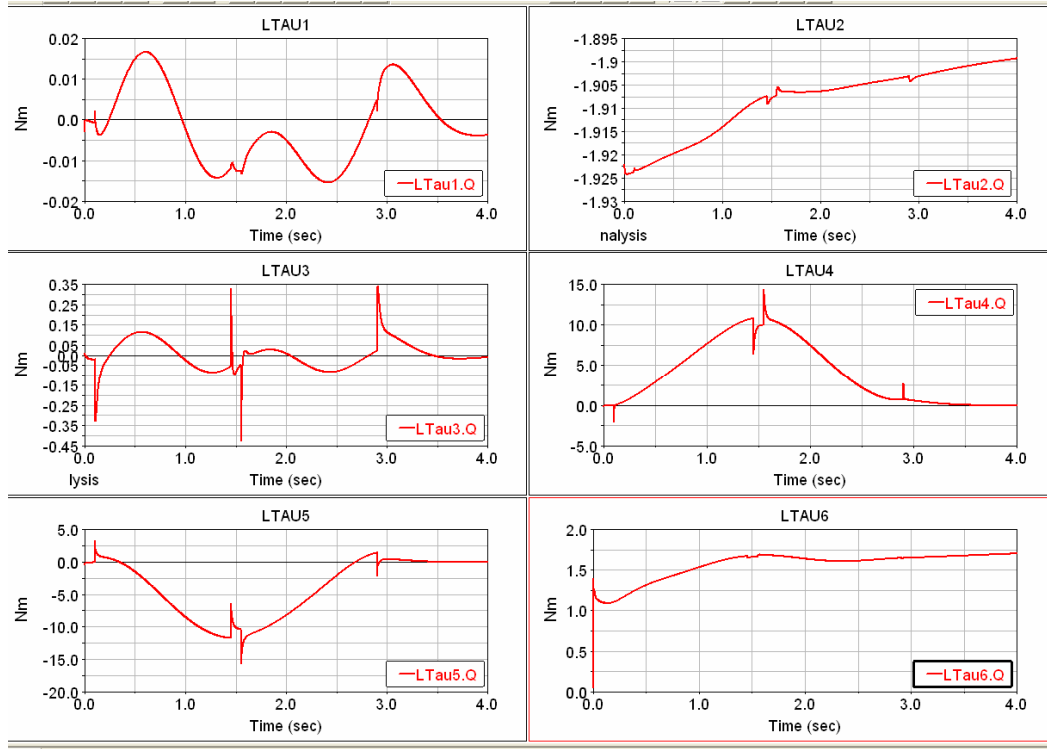
- [15] **Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y., Takenaka, T.,** 1998, The Development of Honda Humanoid Robot, IEEE International Conference on Robotics and Automation
- [16] **Takenaka, T.,** The control system for the Honda humanoid robot, Oxford University Press
- [17] **Hirai, K.,** Current and Future Perspective of Honda Humanoid Robot
- [18] **Akachi, K., Kaneko, K., Kanehira, N., Ota, S., Miyamori, G., Hirata, M., Kajita, S., Kanehiro, F.,** 2005, Development of Humanoid Robot HRP-3P, Proc. of 5th IEEE-RAS Int. Conf. On Humanoid Robots
- [19] **Kaneko, K., Kanehiro, F., Kajita, S., Hirukawa, H., Kawasaki, T., Hirata, M., Akachi, K., Isozumi, T.,** 2004, Humanoid Robot HRP-2, Proc. of the IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation
- [20] **Hirukawa, H., ...,** 2004, Humanoid robotics platforms developed in HRP, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 48 s.165-175
- [21] **Asada, H., Slotine, J.-J.E.,** 1985, Robot Analysis And Control, John Wiley and Sons, New York
- [22] **Tsai, L.-W.,** 1999, Robot Analysis, John Wiley and Sons, New York
- [23] **Pieper, D.L.,** 1969. The Kinematics Of Manipulators Under Computer Control, *PhD Thesis*, Stanford, Michigan
- [24] **Shih, C.-L., Gruver, W.A., Lee, T.-T.,** 1993, Inverse Kinematics and Inverse Dynamics for Control of Biped Walking Machine, Journal of Robotic Systems Vol. 10(4) s.531-555
- [25] **Craig, J.J.,** 1989, Introduction To Robotics, Addison Wesley Longman, New York
- [26] **Wolovich, W.A.,** 1987, Robotics: Basic Analysis and Design, Holt, Rinehart and Winston, New York
- [27] **Stadler, W.,** 1995, Analytical Robotics And Mechatronics, McGraw-Hill, New York
- [28] **Bedford, A., Fowler, W.,** 1999, Statics, Addison-Wesley, California

EK A. ÇÖMELME – KALKMA BENZETİMLERİ

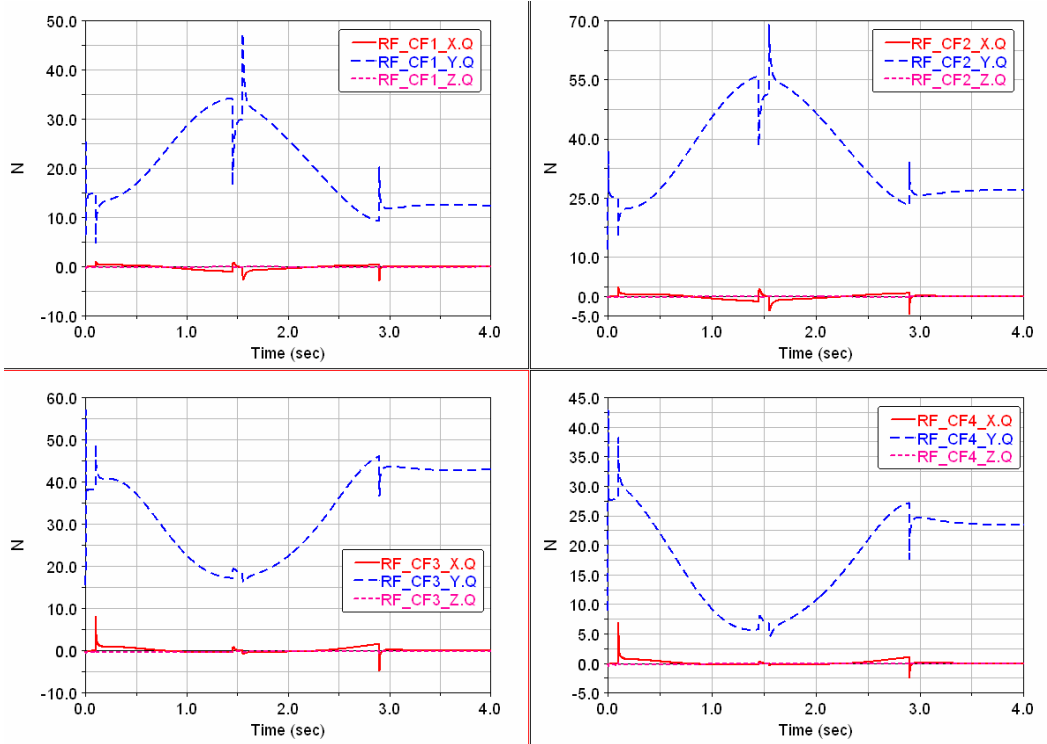
1. Çömelle Kalkma Benzetimi



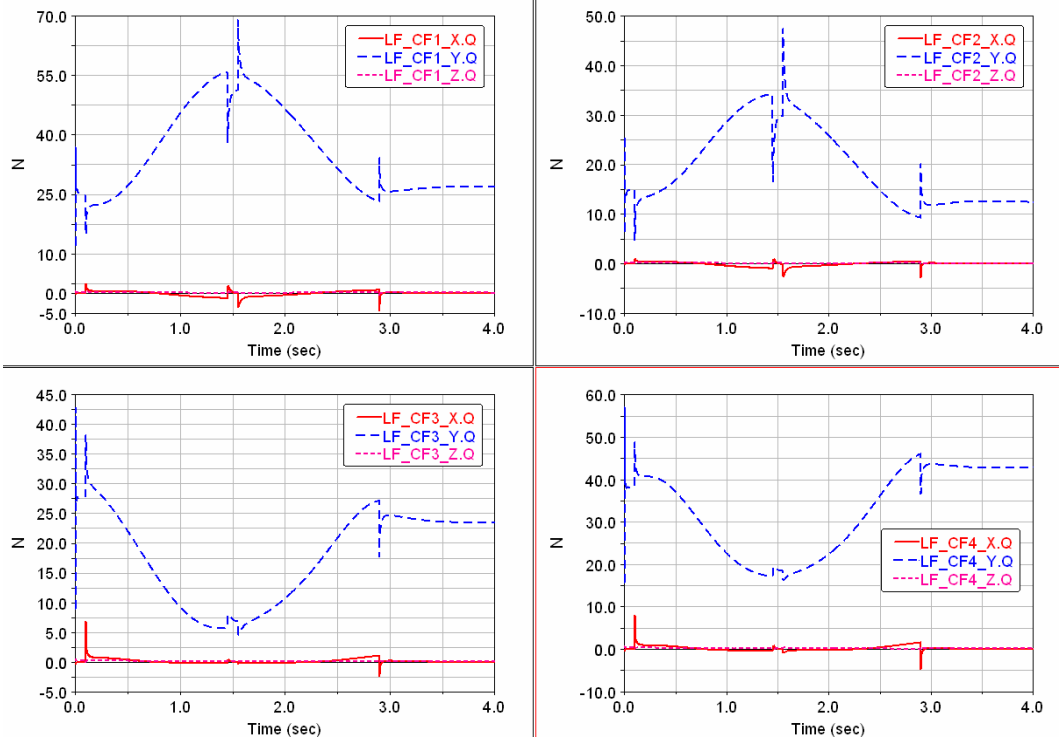
Şekil A.1 : 1. Çömelle-Kalkma Benzetimi Sağ Bacak Eklem Momentleri



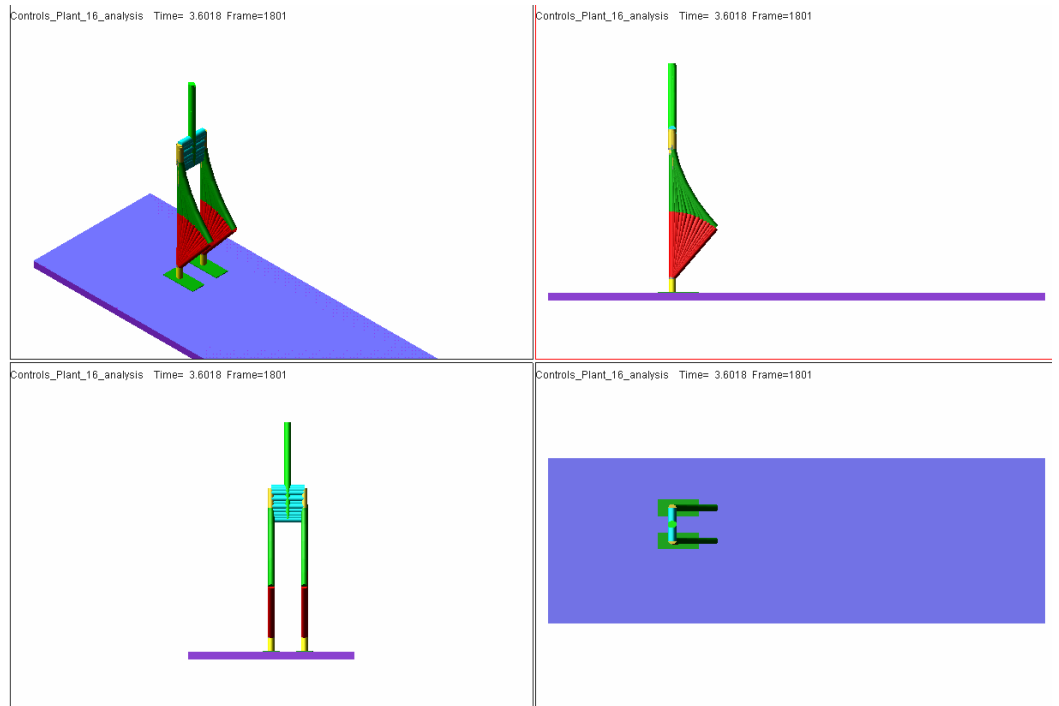
Şekil A.2 : 1. Çömélme-Kalma Benzetimi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil A.3 : 1.Çömélme Kalkma Benzetimi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

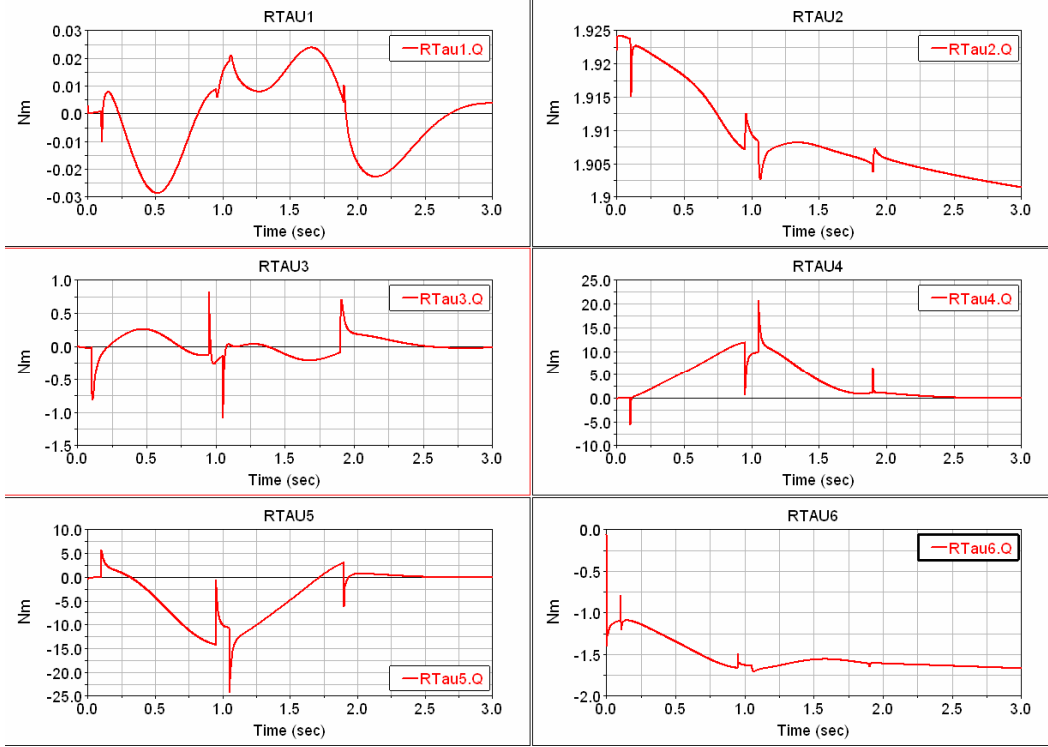


Şekil A.4 : 1. Çömelleme Kalkma Benzetimi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

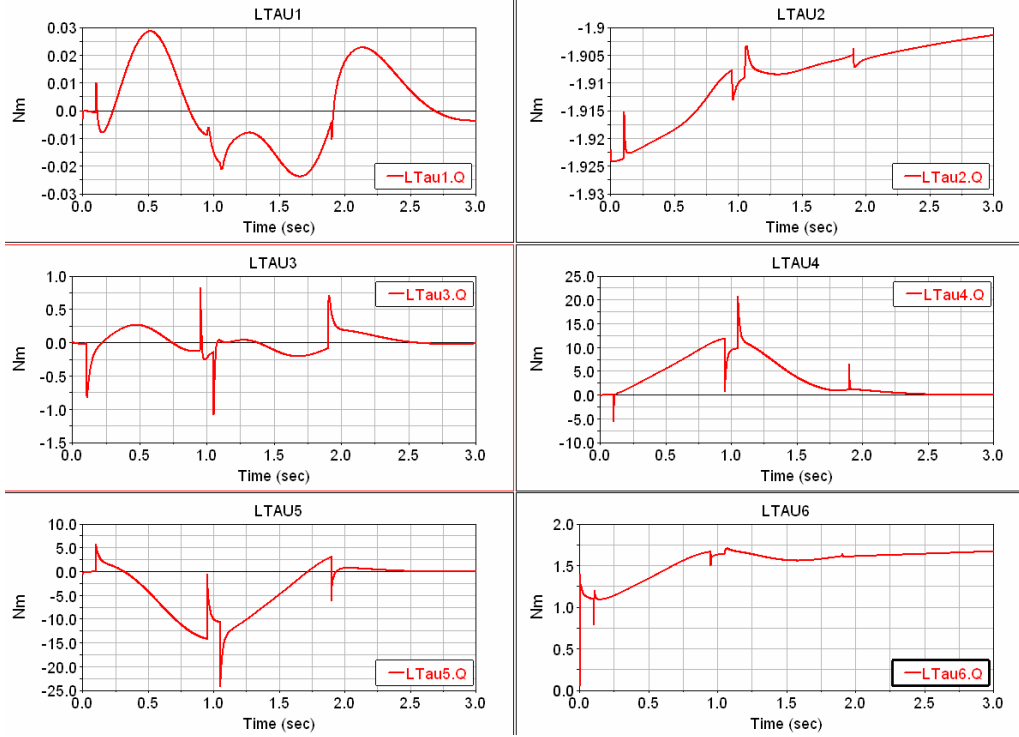


Şekil A.5 : 1. Çömelleme-Kalkma Hareketi Süperpoze Görüntüsü

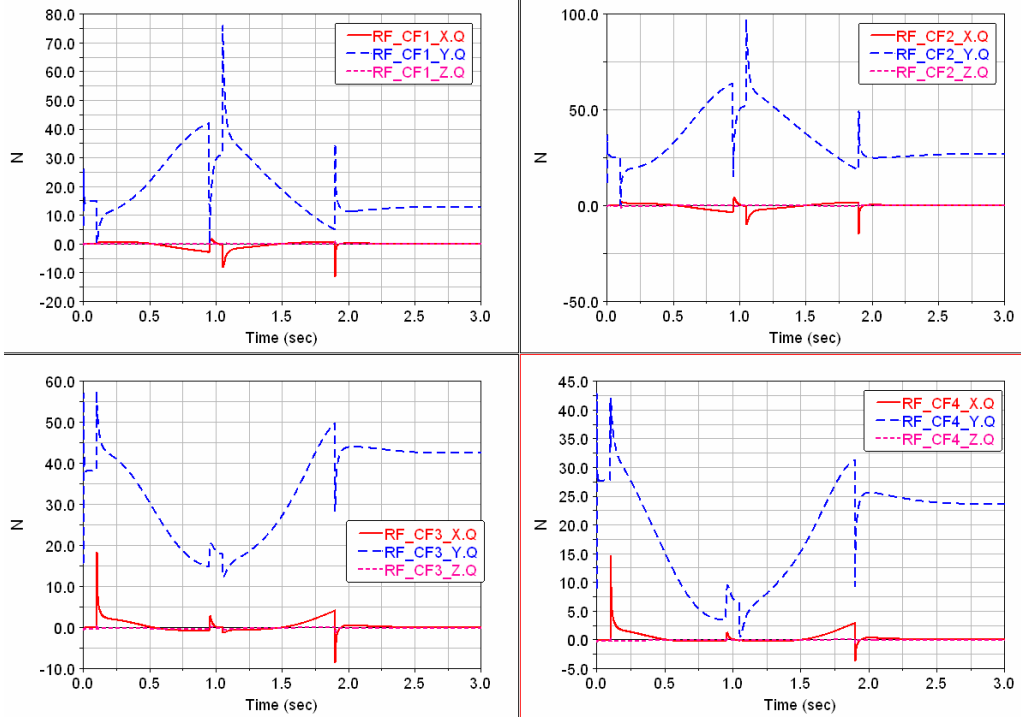
2. Çömelme-Kalkma Benzetimi



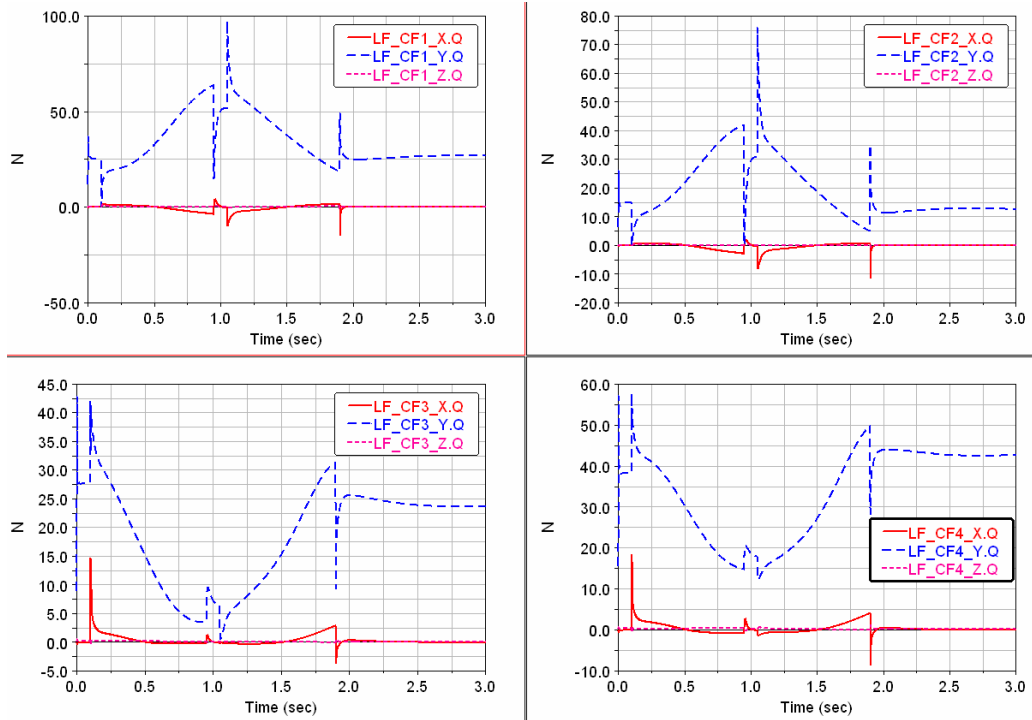
Şekil A.6 : 2. Çömelme Kalkma Benzetimi Sağ Bacak Eklem Momentleri



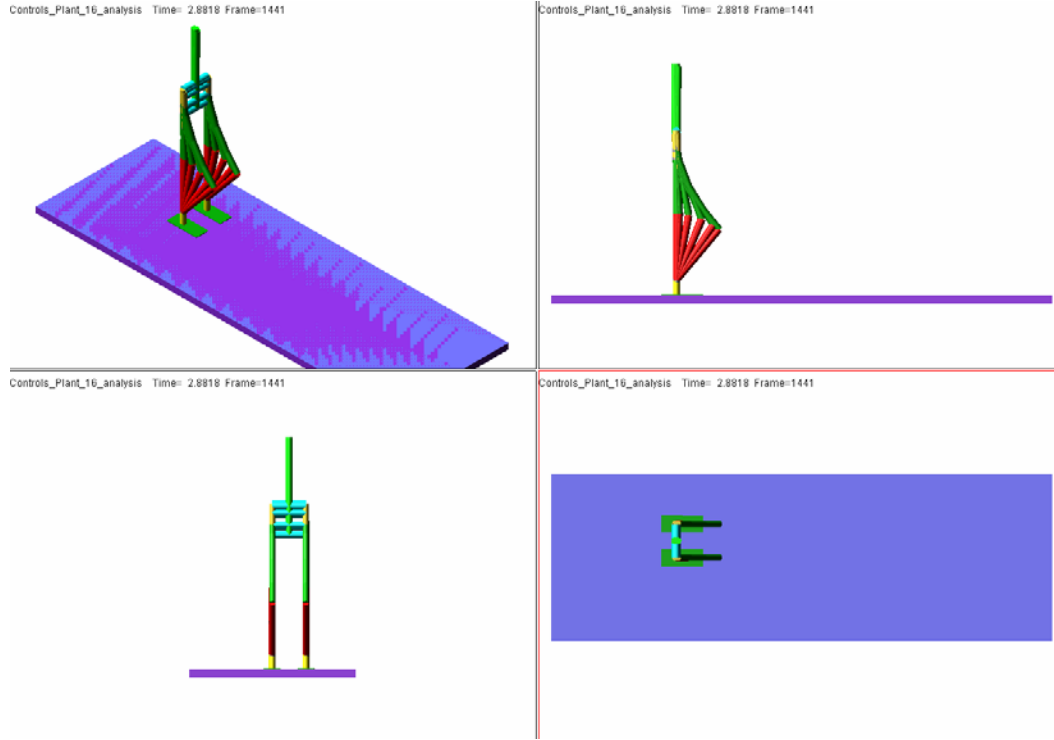
Şekil A.7 : 2. Çömelme Kalkma Benzetimi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil A.8 : 2. Çömelle Kalkma Benzetimi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

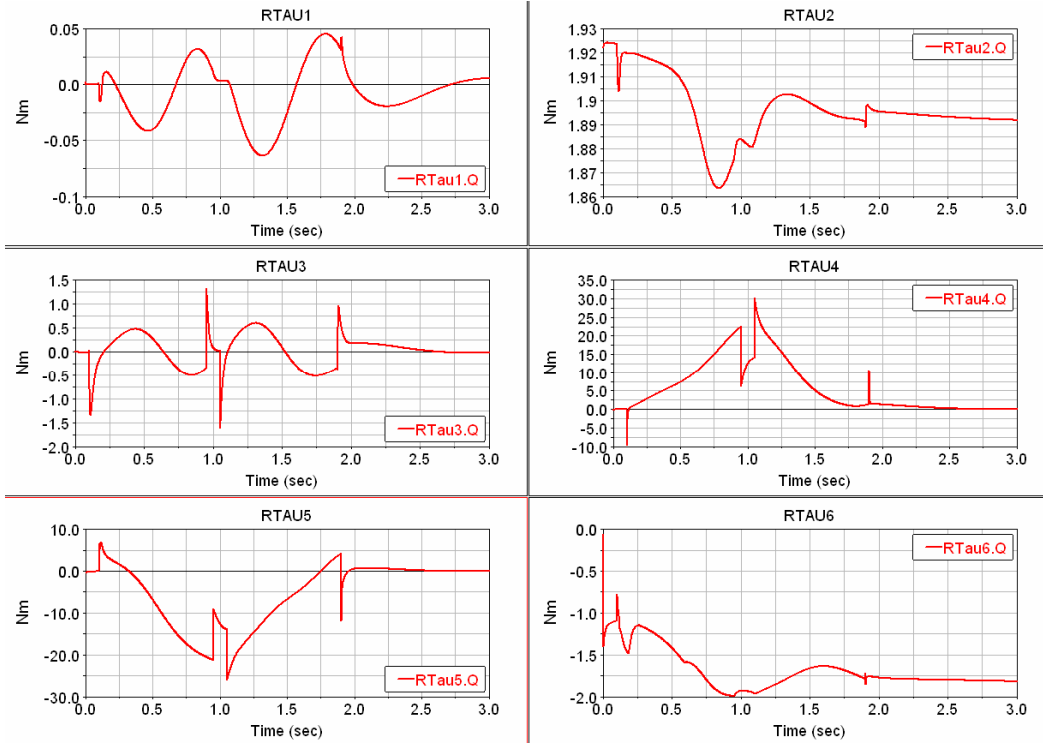


Şekil A.9 : 2. Çömelle Kalkma Benzetimi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

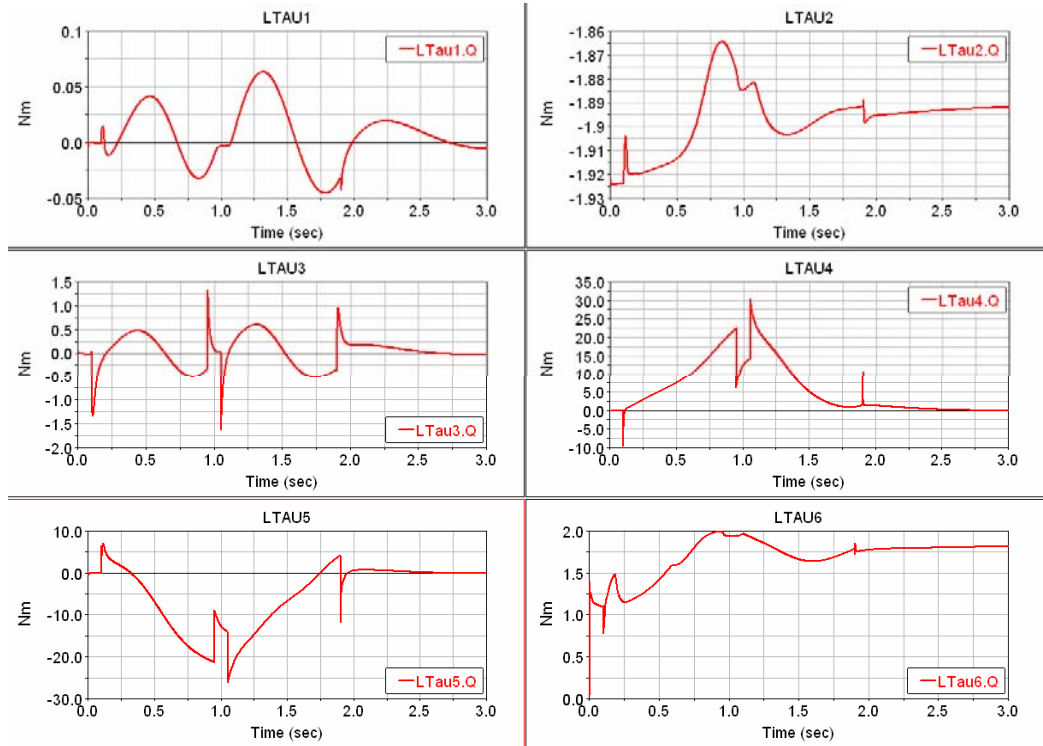


Şekil A.10 : 2. Çömelme Kalkma Benzetimi Süperpoze Görüntüsü

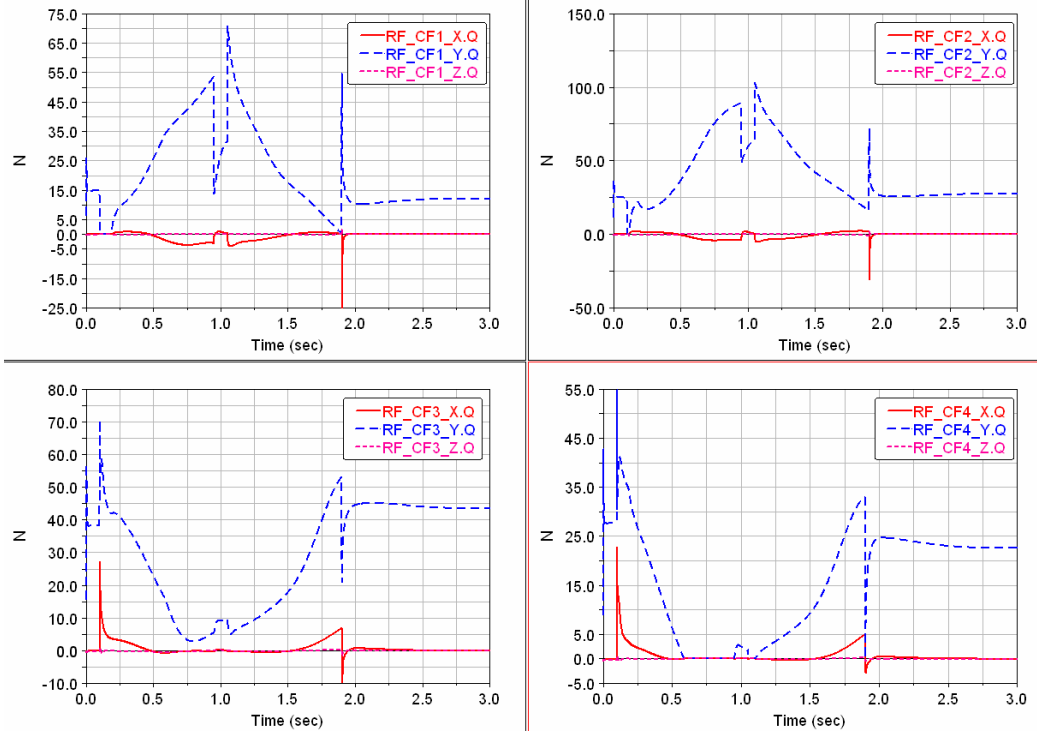
3. Çömelle-Kalkma Benzetimi:



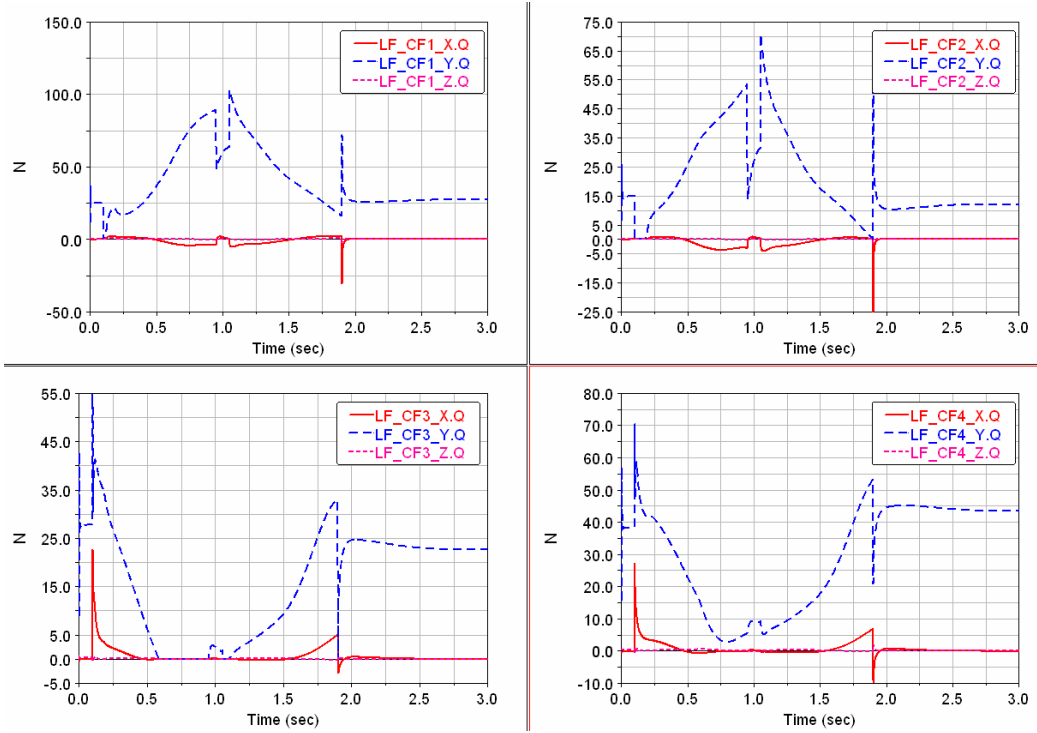
Şekil A.11 : 3. Çömelle-Kalkma Benzetimi Sağ Bacak Eklem Momentleri



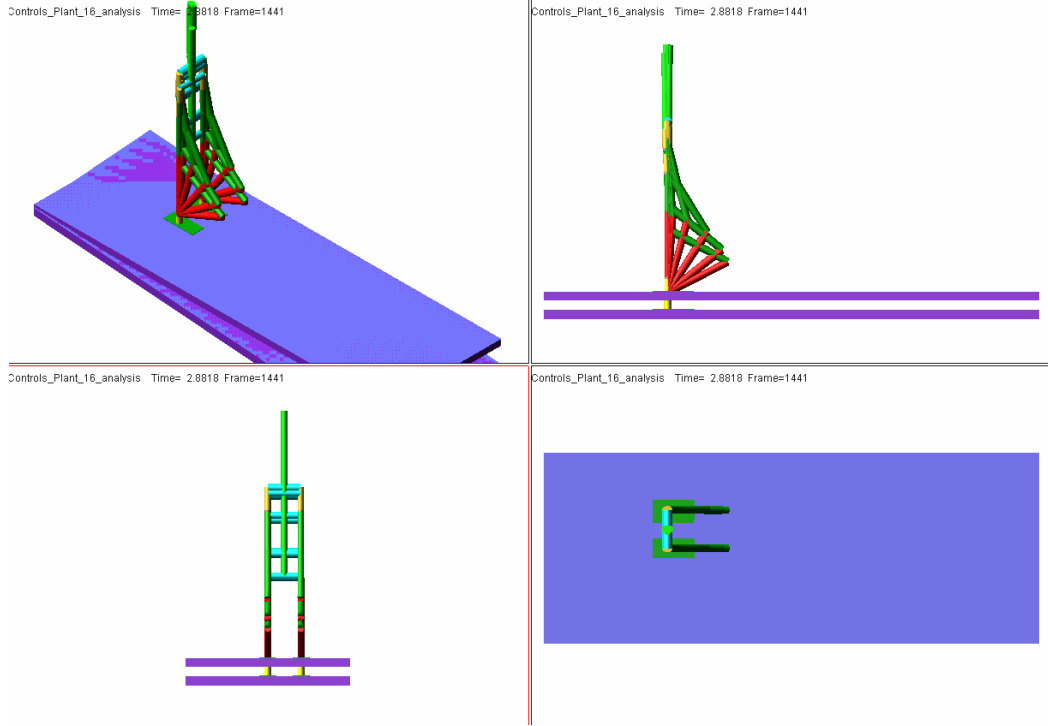
Şekil A.12 : 3. Çömelle-Kalkma Benzetimi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil A.13 : 3. Çömélme-Kalkma Benzetimi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

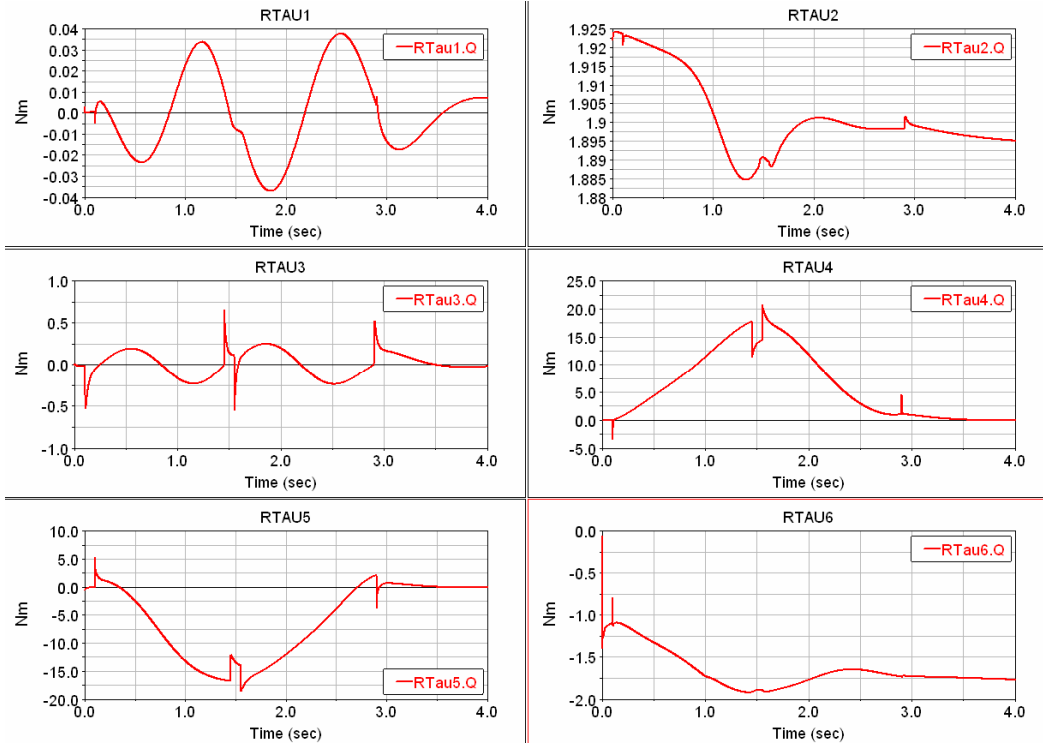


Şekil A.14 : 3. Çömélme-Kalkma Benzetimi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

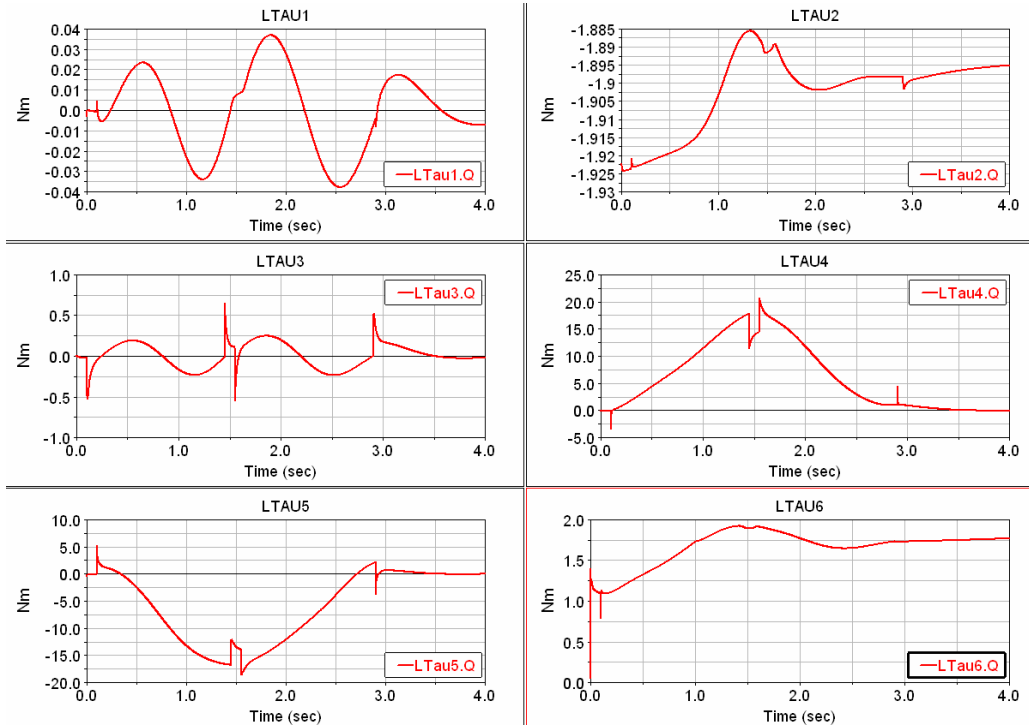


Şekil A.15 : 3. Çömelme-Kalkma Benzetimi Süperpoze Görüntüsü

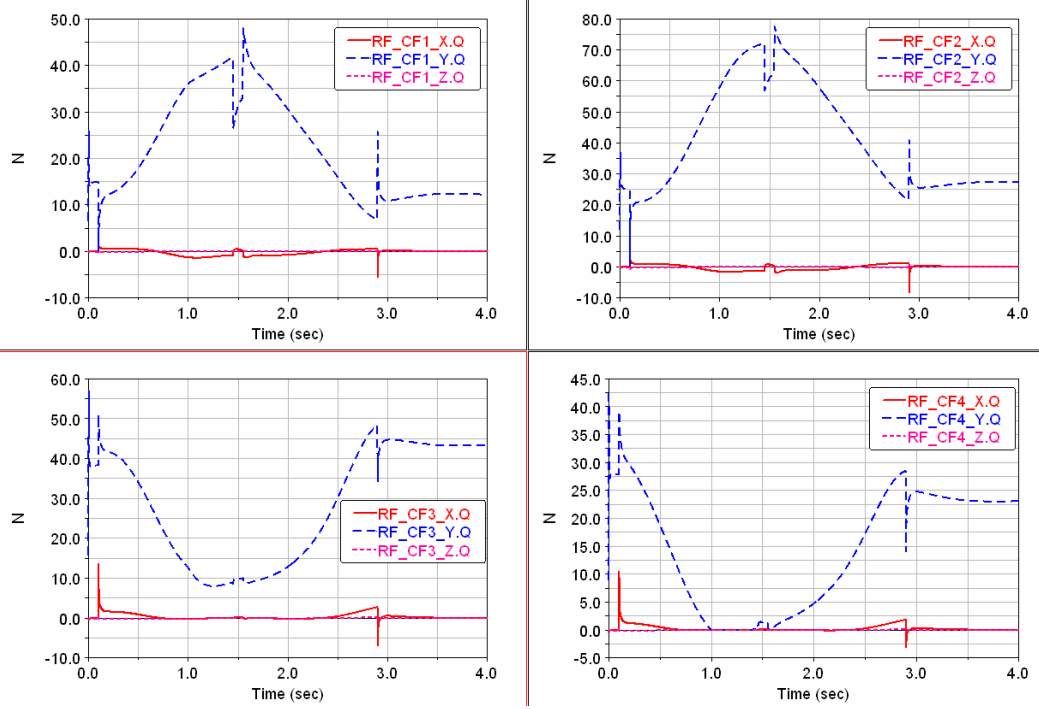
4. Çömelle-Kalkma Benzetimi



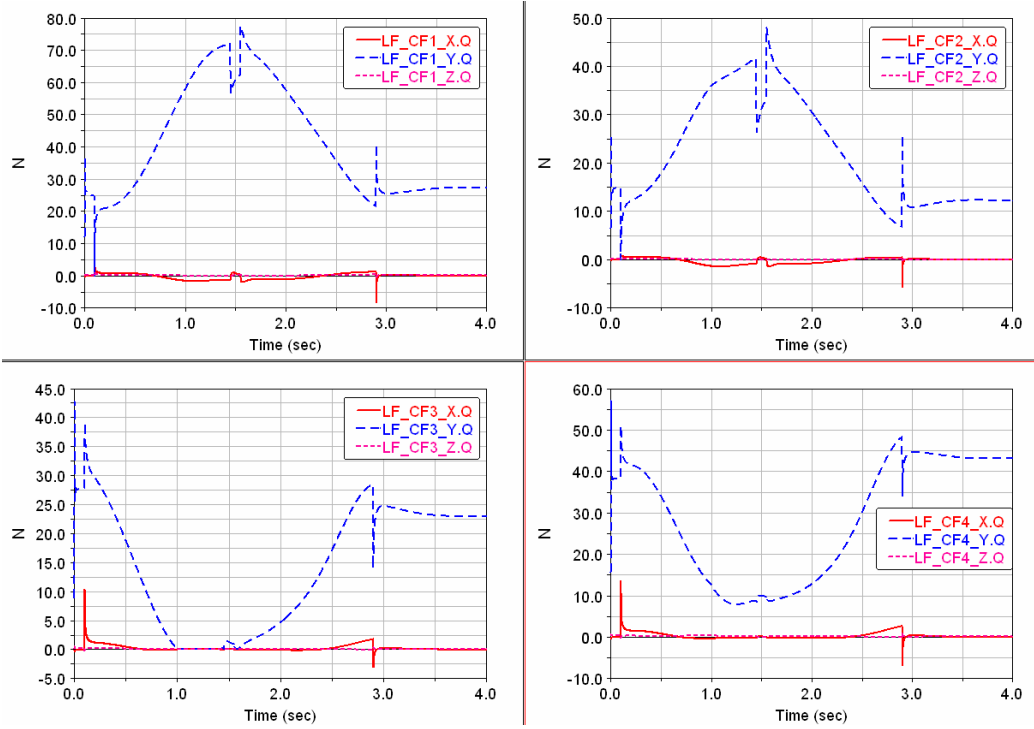
Şekil A.16 : 4. Çömelle-Kalkma Benzetimi Sağ Bacak Eklem Momentleri



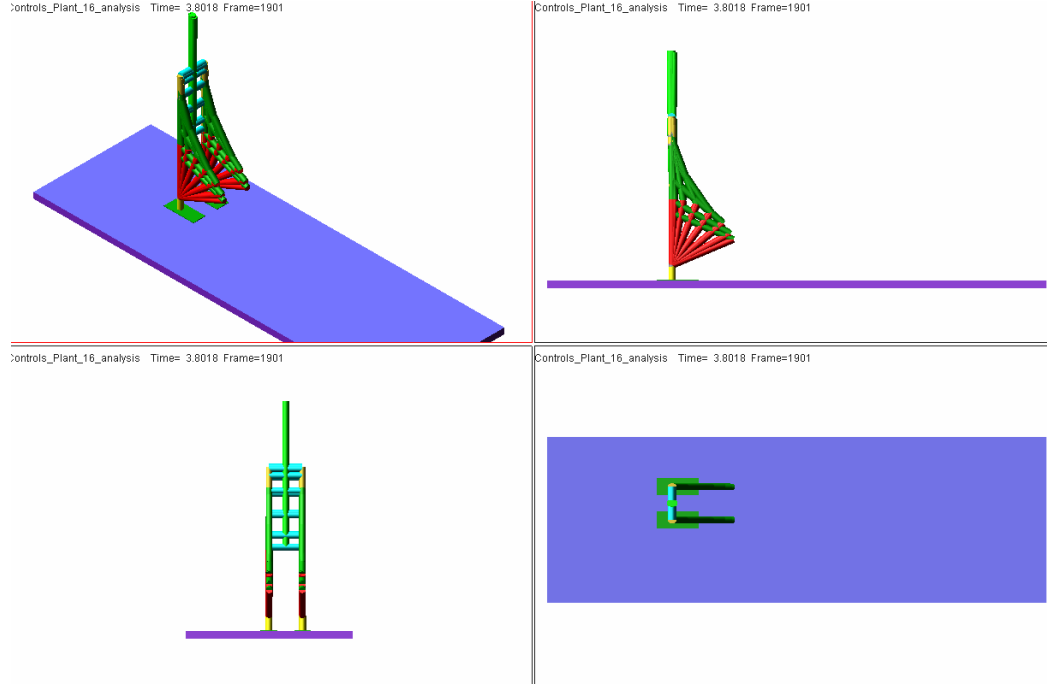
Şekil A.17 : 4. Çömelle-Kalkma Benzetimi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil A.18 : 4. Çömelleme-Kalkma Benzetimi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri



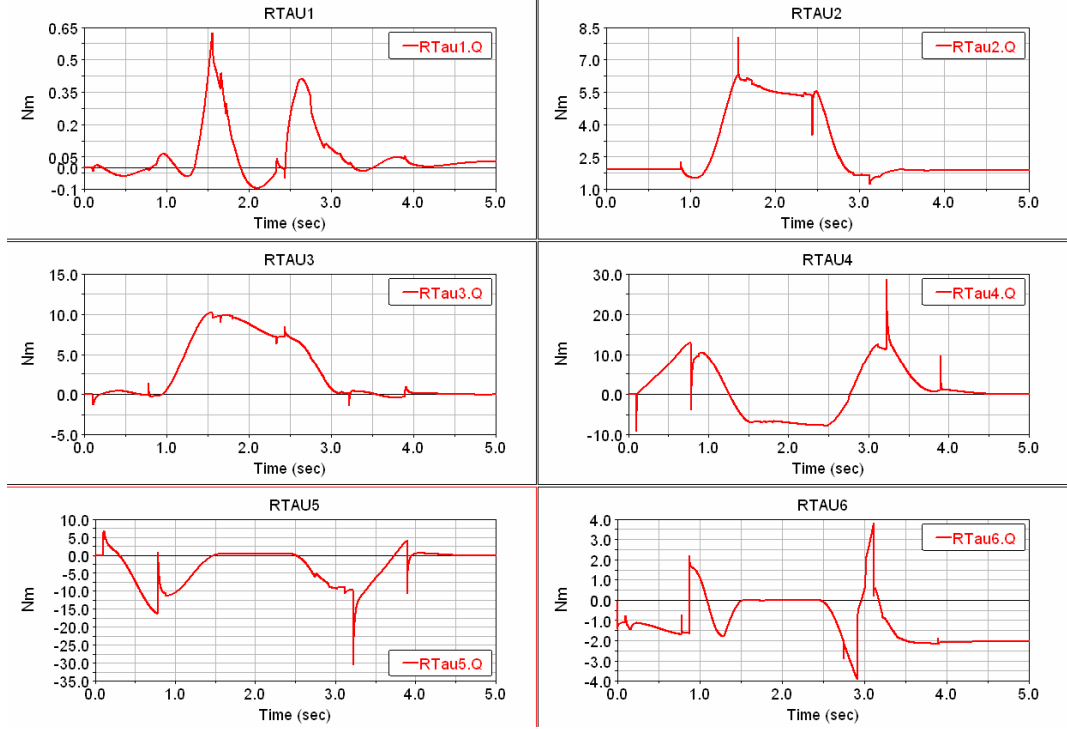
Şekil A.19 : 4. Çömelleme-Kalkma Benzetimi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri



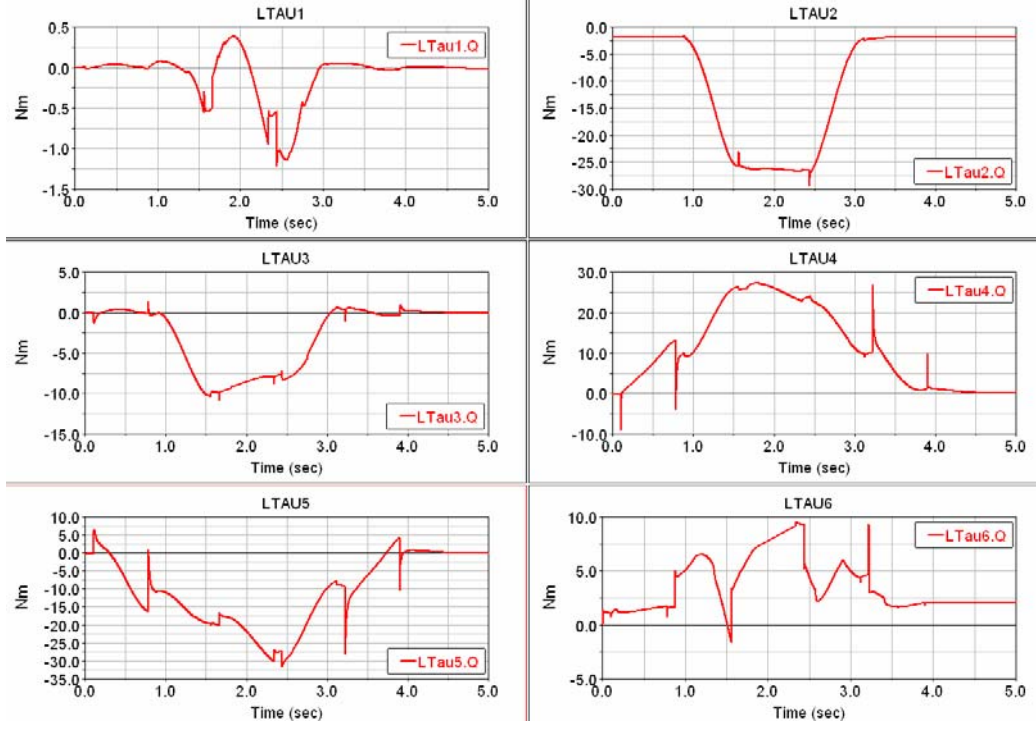
Şekil A.20 : 4. Çömelme-Kalkma Benzetimi Süperpoze Görüntüsü

EK B YANA ÇÖMELME HAREKETİ BENZETİMLERİ

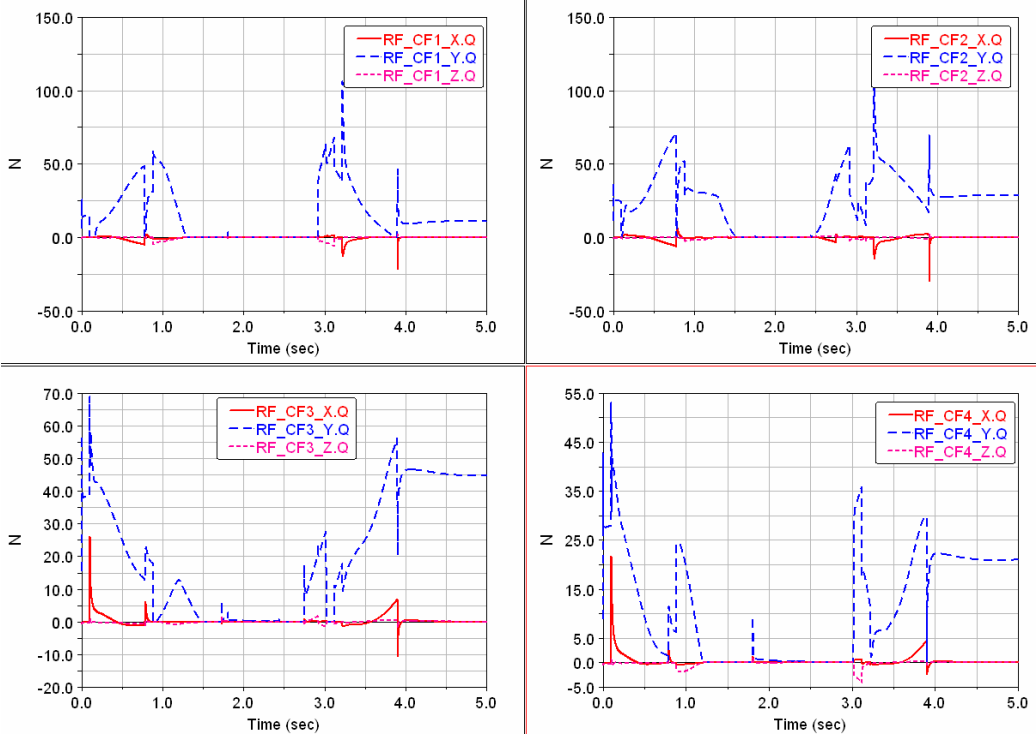
1. Yana Çömelme Hareketi Benzetimi:



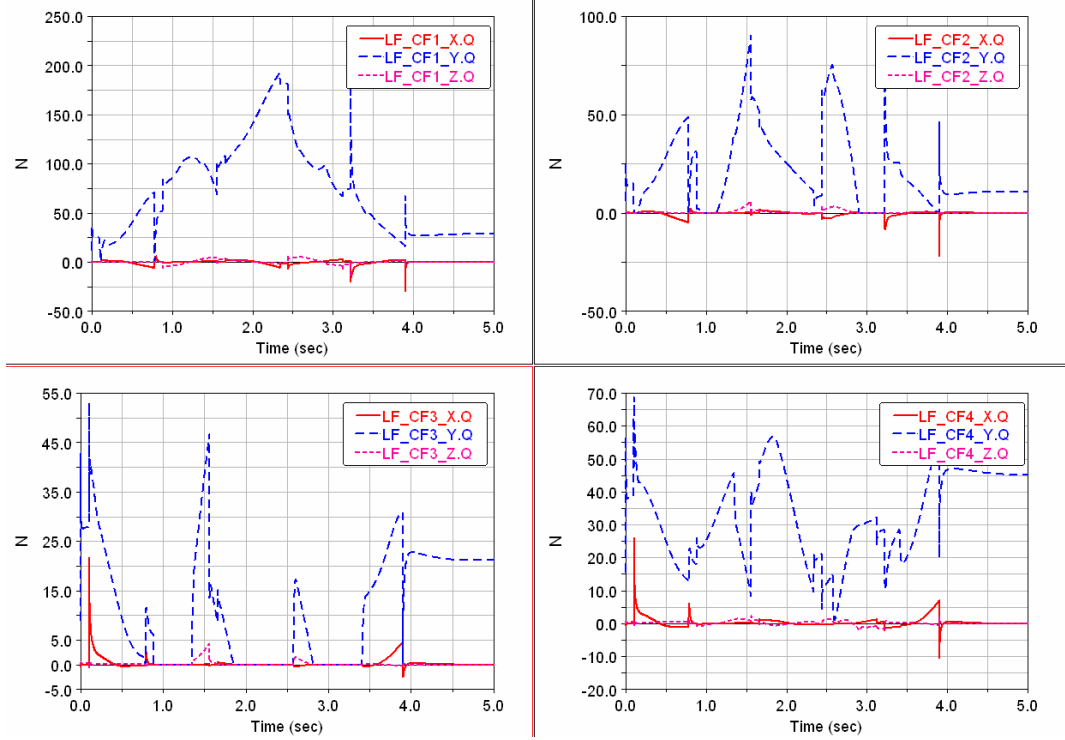
Şekil B.1 : 1. Yana Çömelme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri



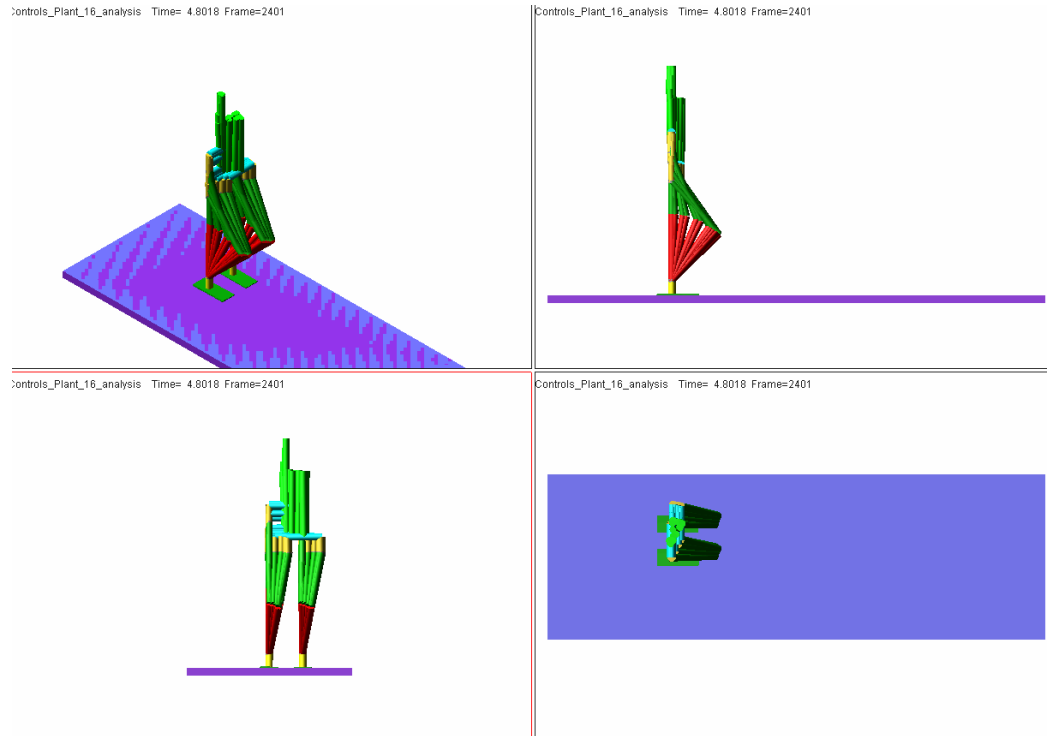
Şekil B.2 : 1. Yana Çömelleme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil B.3 : 1. Yana Çömelleme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

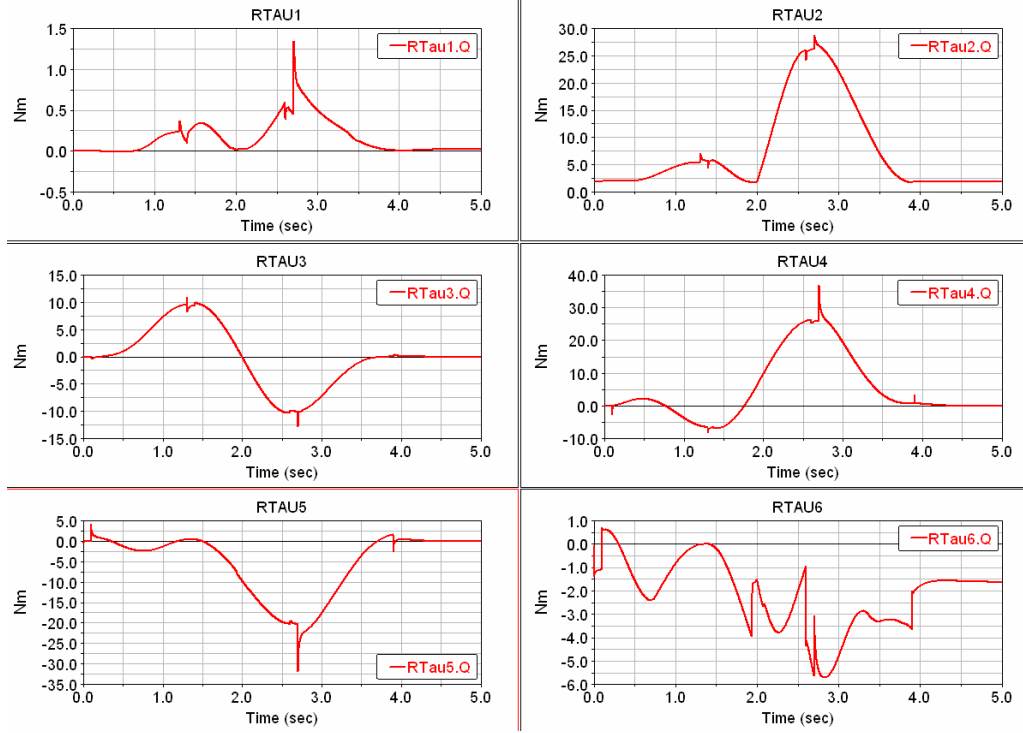


Şekil B.4 : 1. Yana Çömelle Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

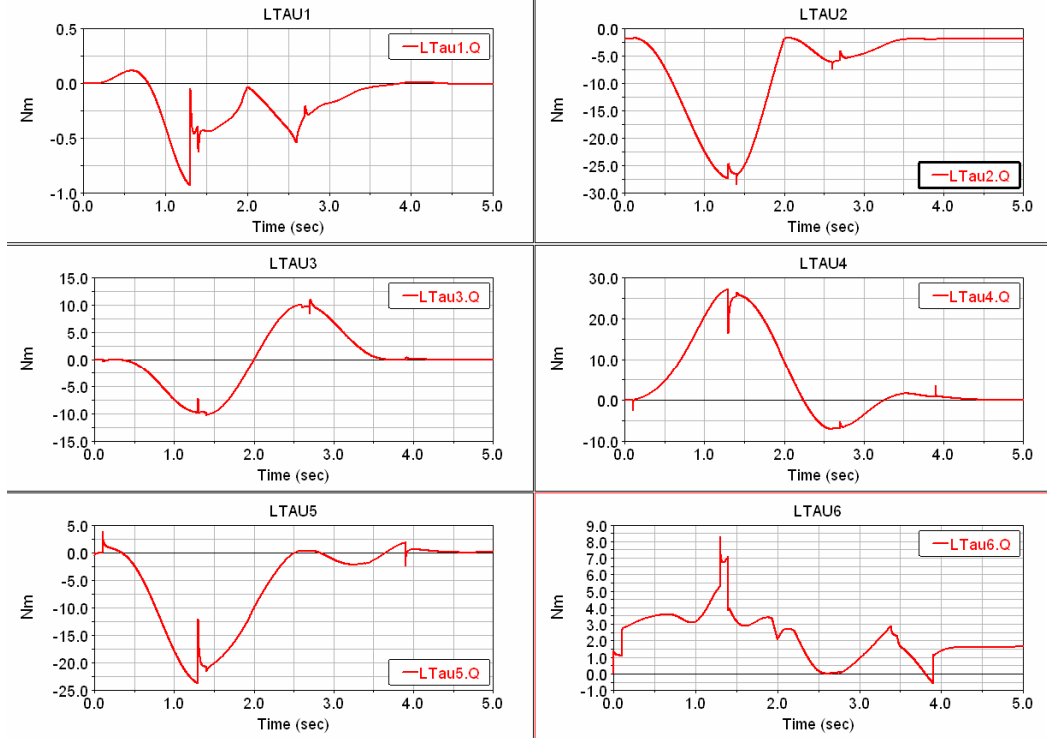


Şekil B.5 : 1. Yana Çömelle Hareketi Süperpoze Görüntüsü

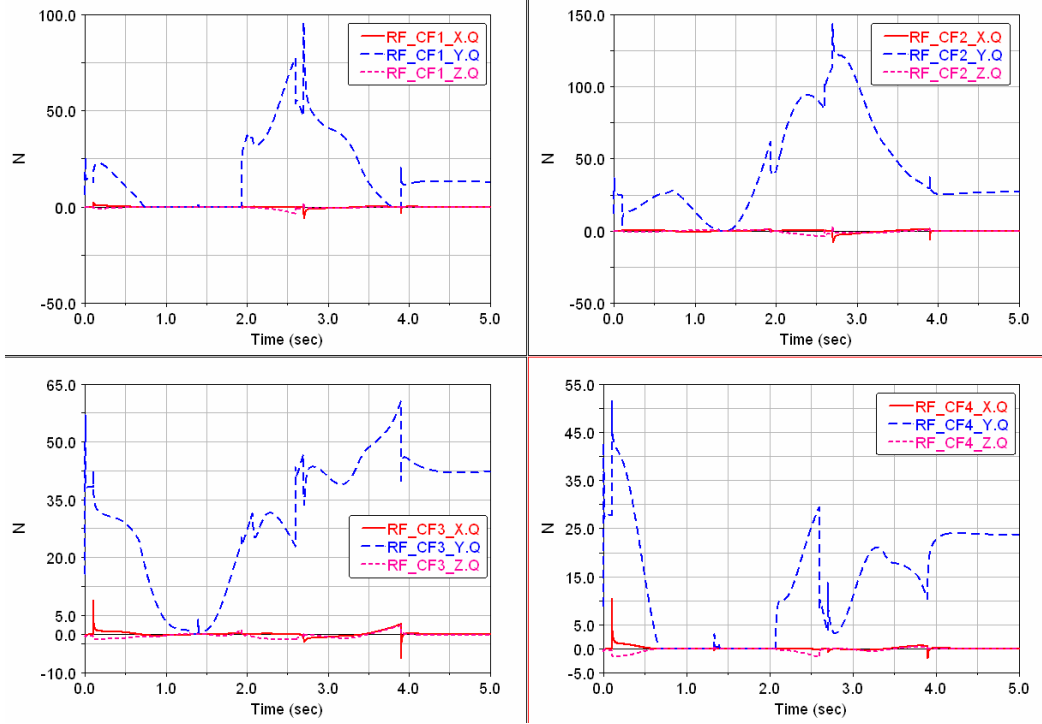
2. Yana Çömelme Hareketi Benzetimi



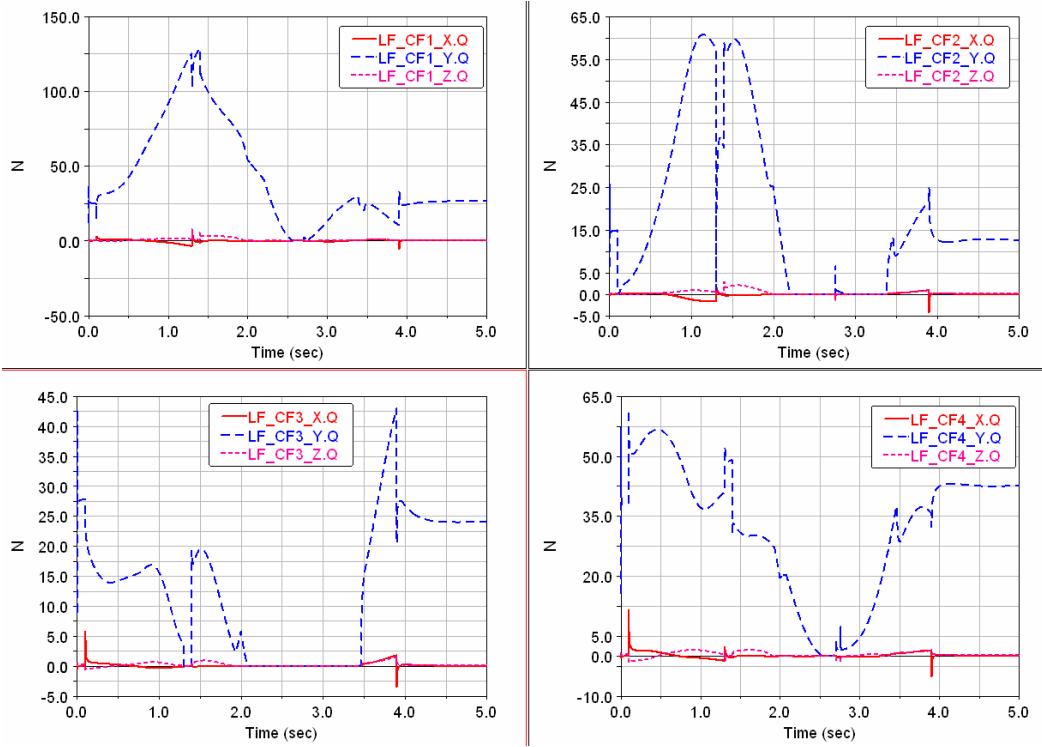
Şekil B.6 : 2. Yana Çömelme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri



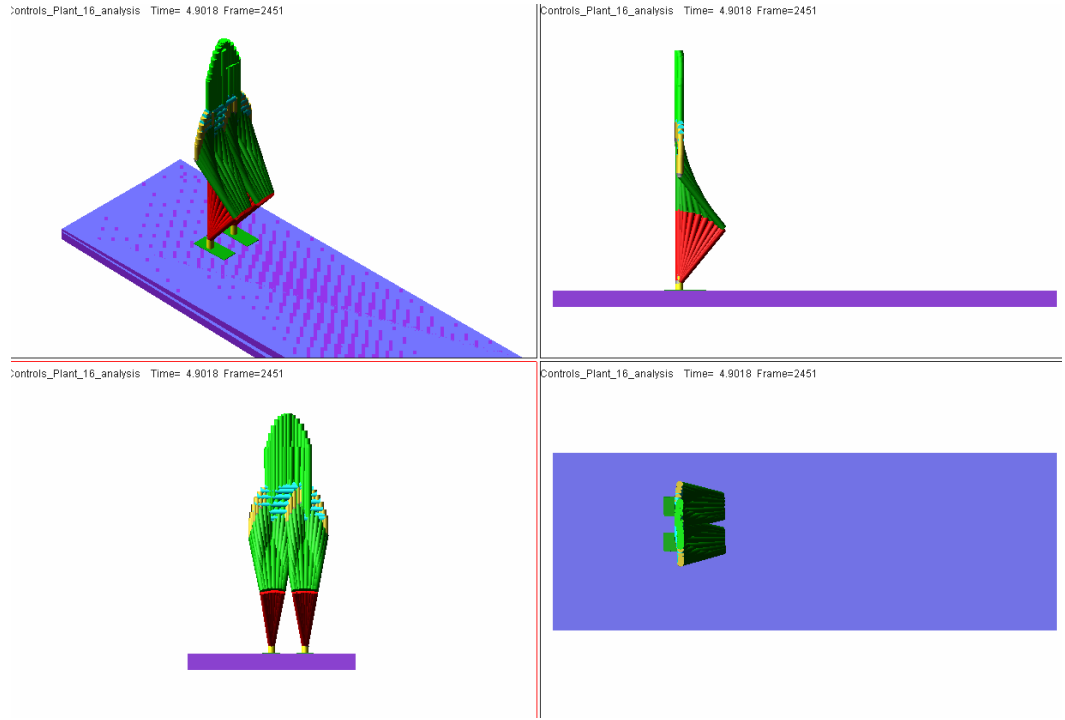
Şekil B.7 : 2. Yana Çömelme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil B.8 : 2. Yana Çömelve Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

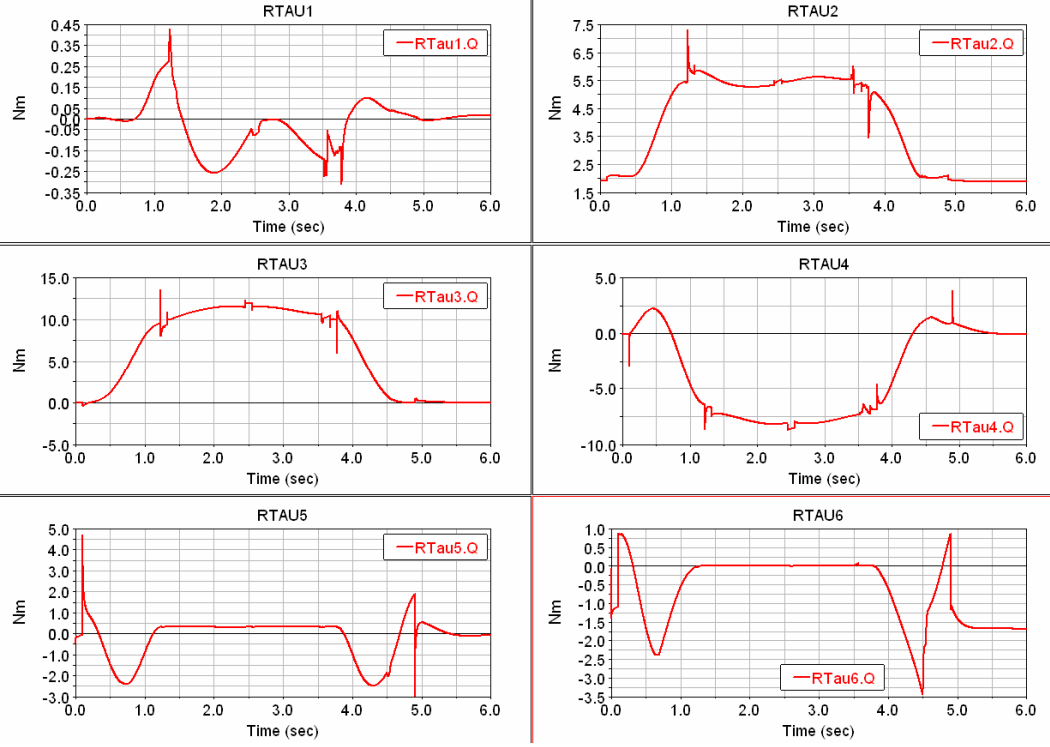


Şekil B.9 : 2. Yana Çömelve Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

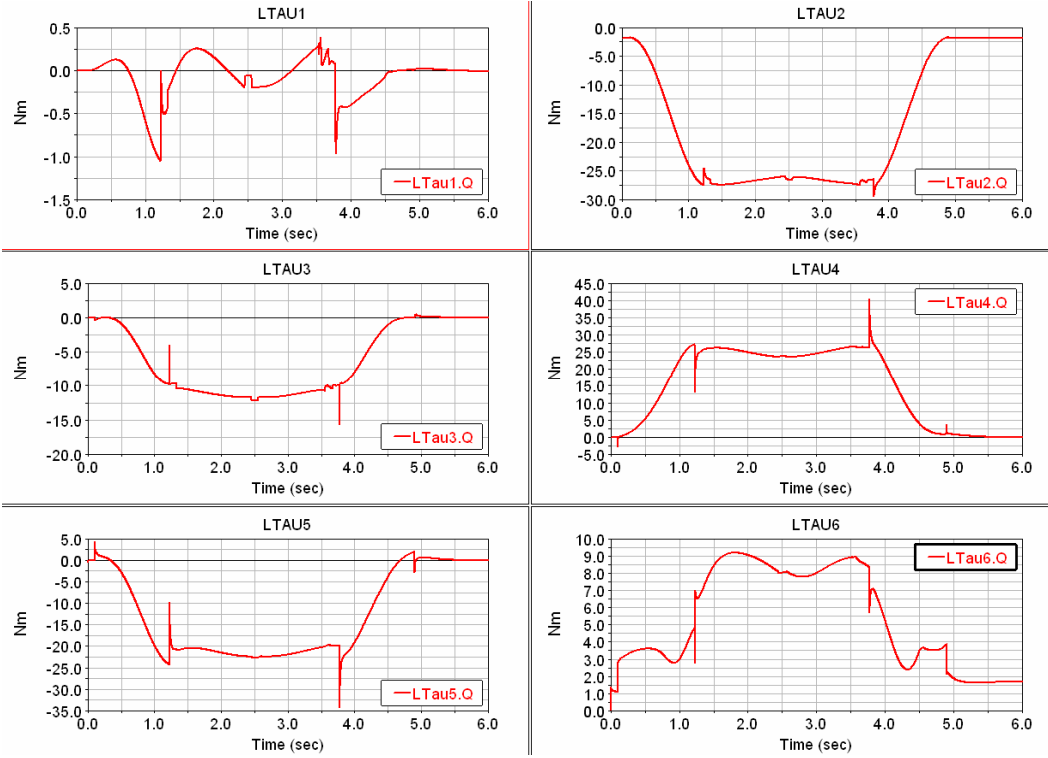


Şekil B.10 : 2. Yana Çömelme Hareketi Süperpoze Görüntüsü

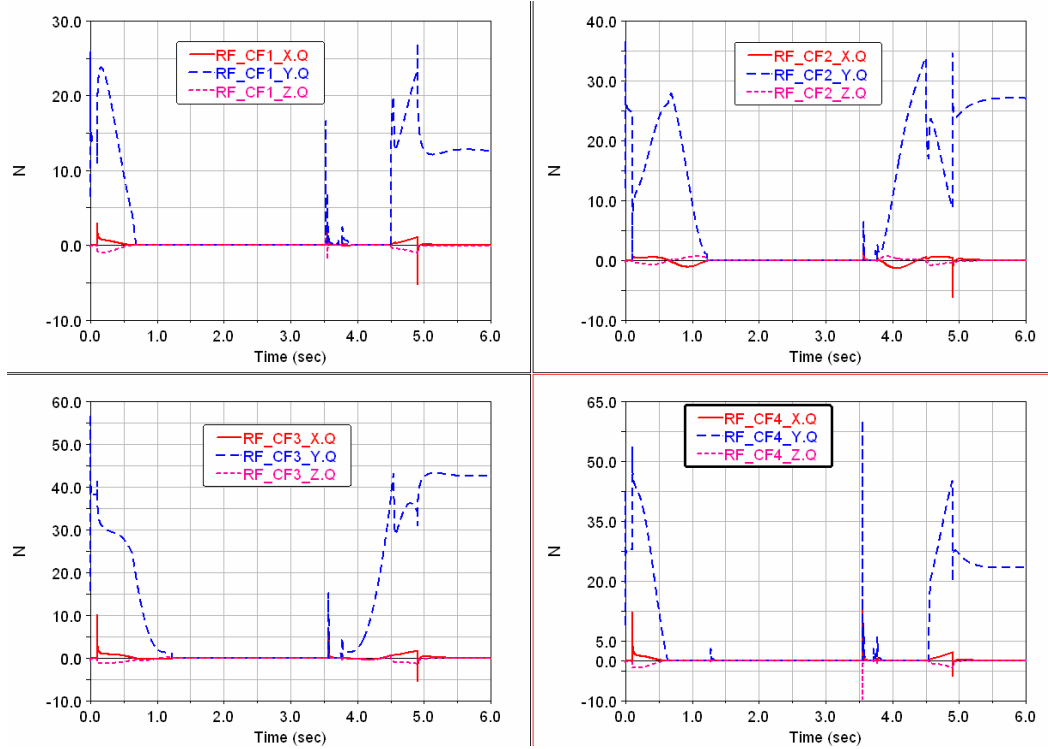
EK C - AYAK KALDIRMA HAREKETİ BENZETİMİ



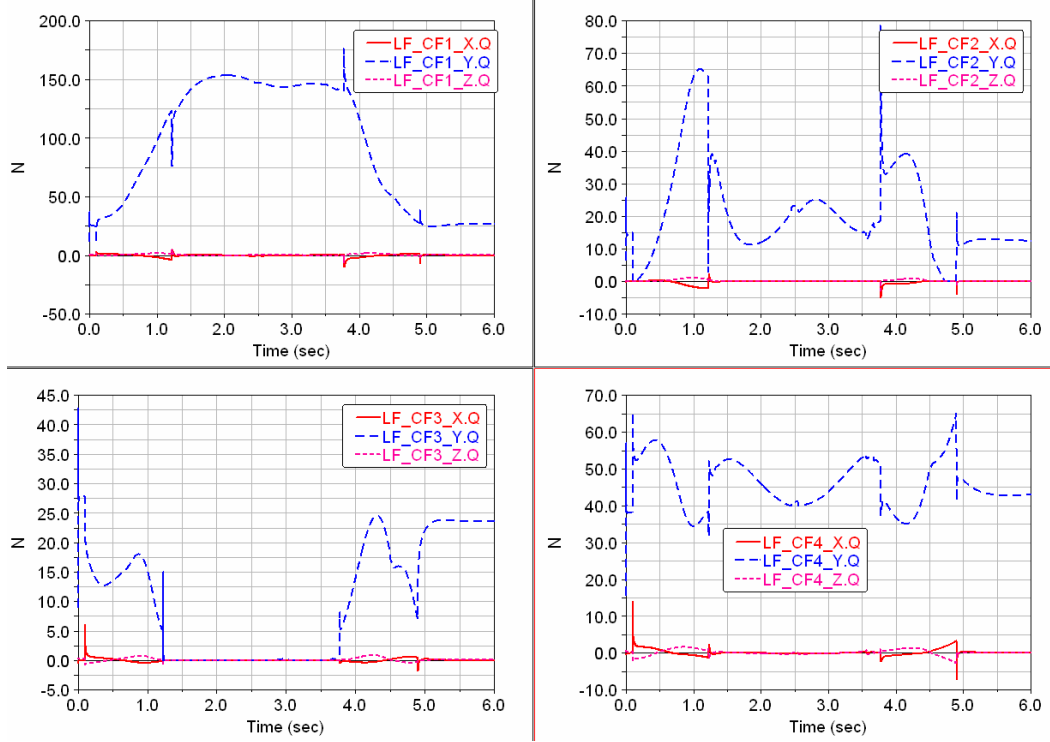
Şekil C.1 : Ayak Kaldırma Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri



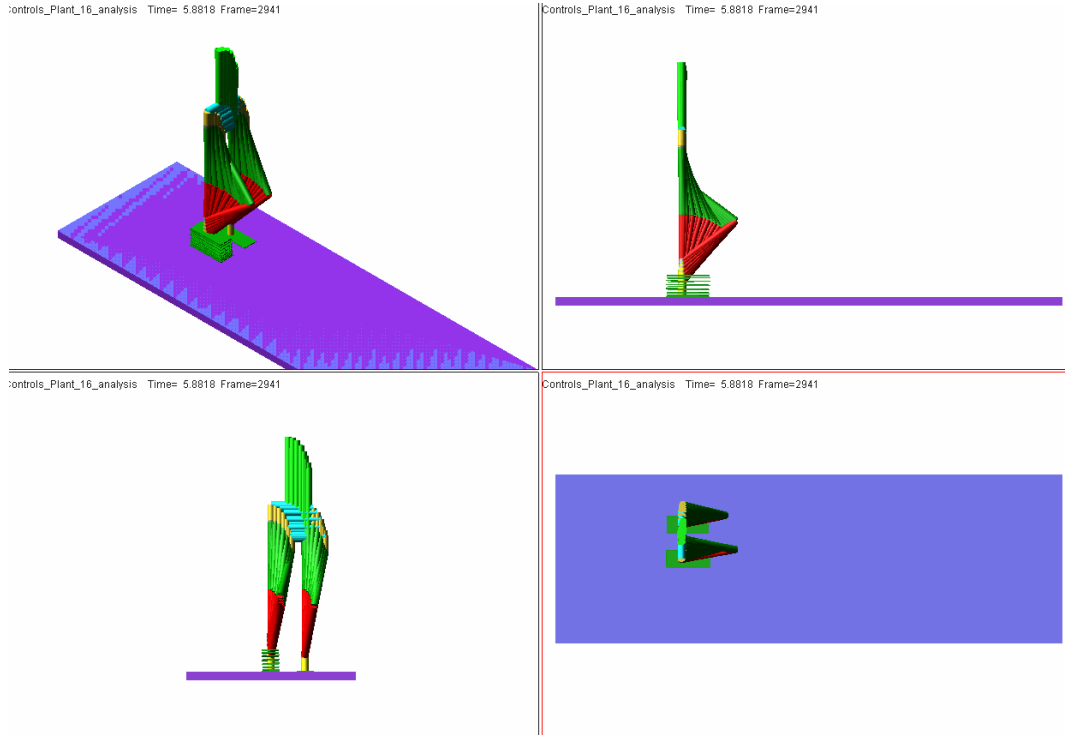
Şekil C.2 : Ayak Kaldırma Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil C.3 : Ayak Kaldırma Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri



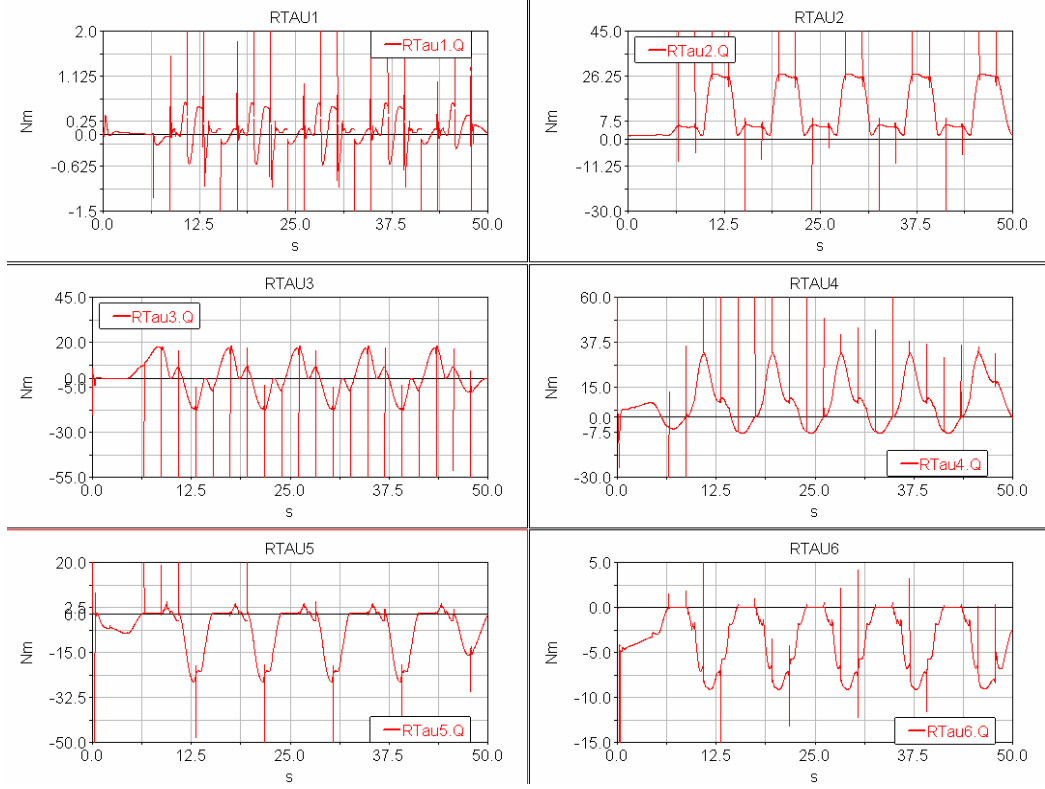
Şekil C.4 : Ayak Kaldırma Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri



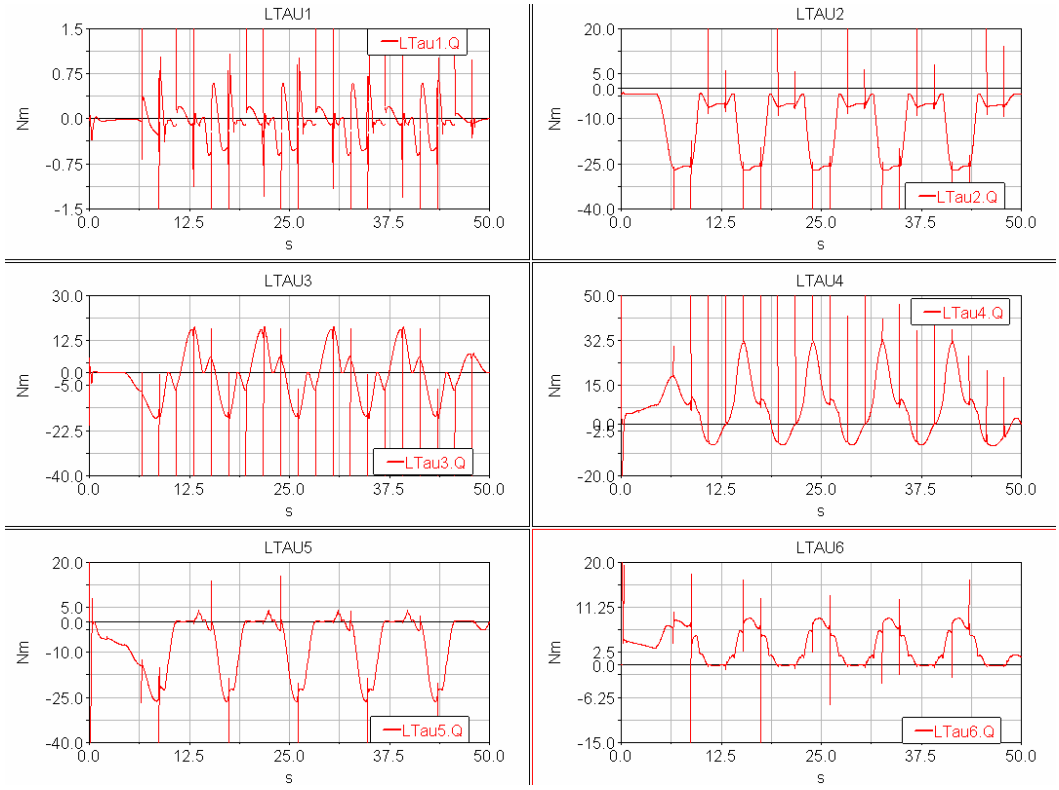
Şekil C.5 : Ayak Kaldırma Hareketi Süperpoze Görüntüsü

EK D - YÜRÜME HAREKETİ BENZETİMLERİ

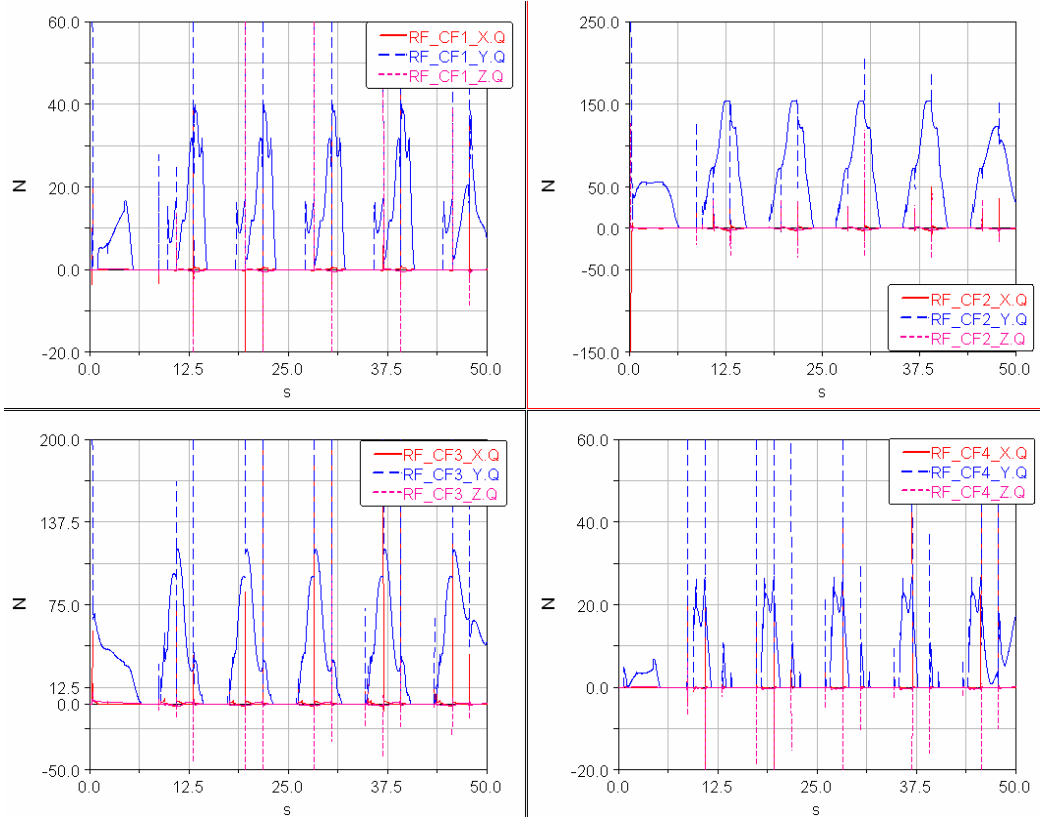
1. Yürüme Hareketi:



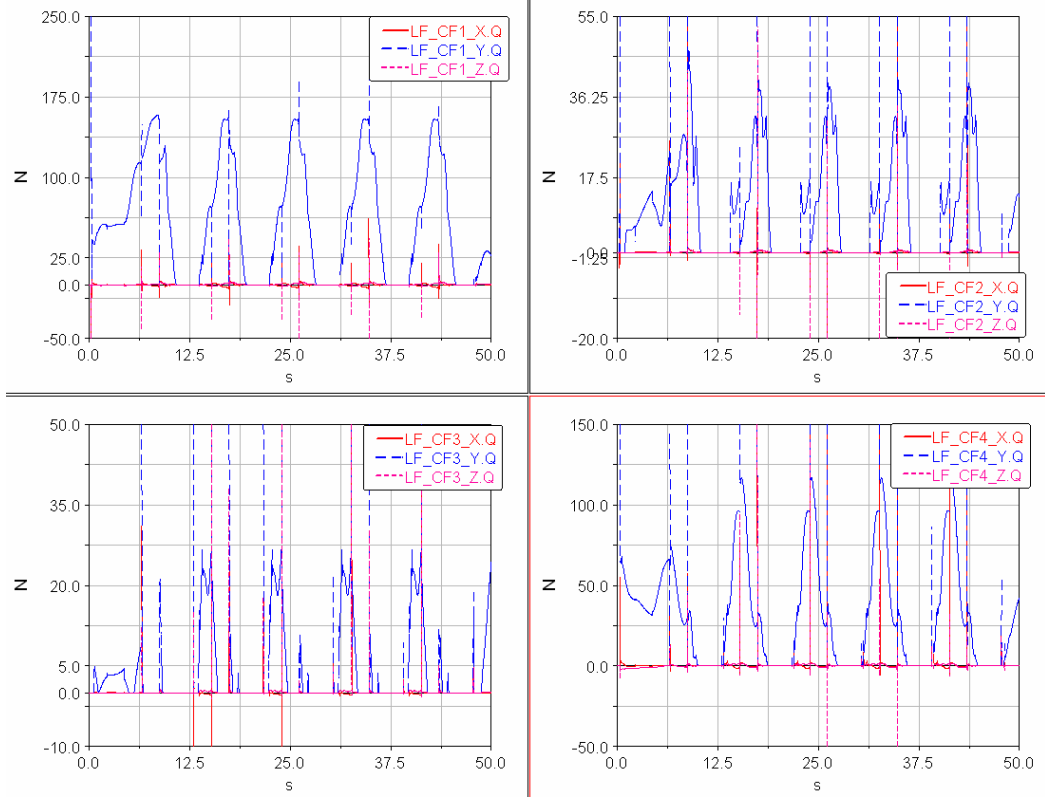
Şekil D.1 : 1. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri



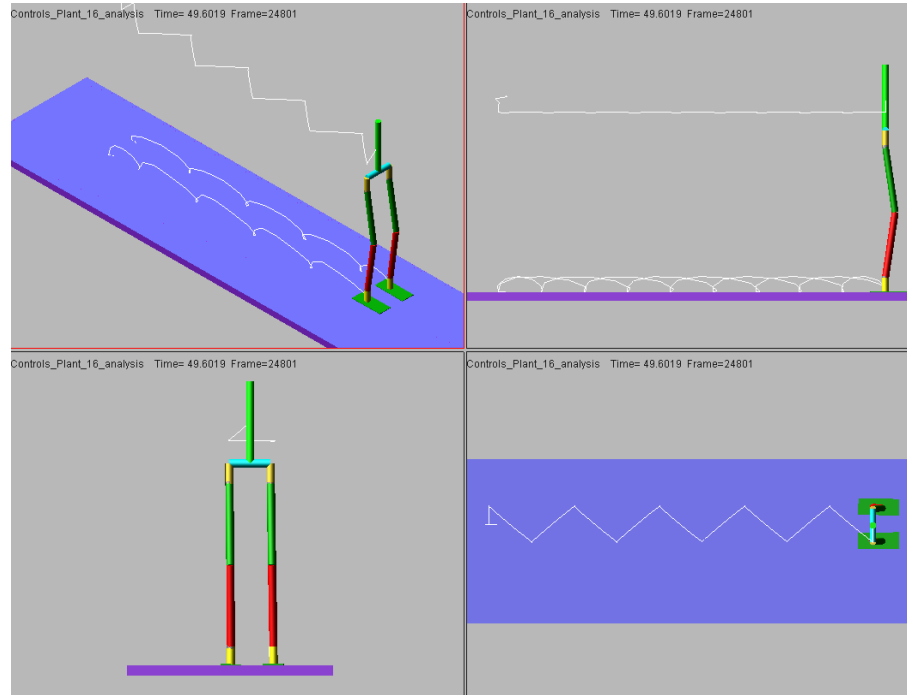
Şekil D.2 : 1. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil D.3 : 1. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

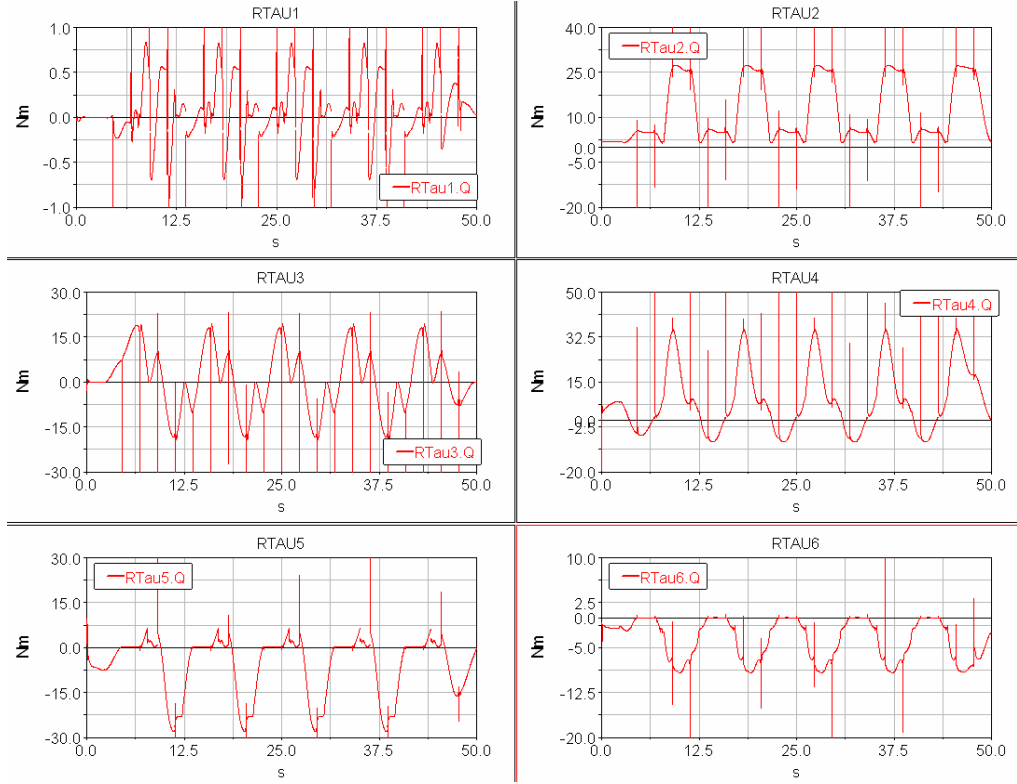


Şekil D.4 : 1. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

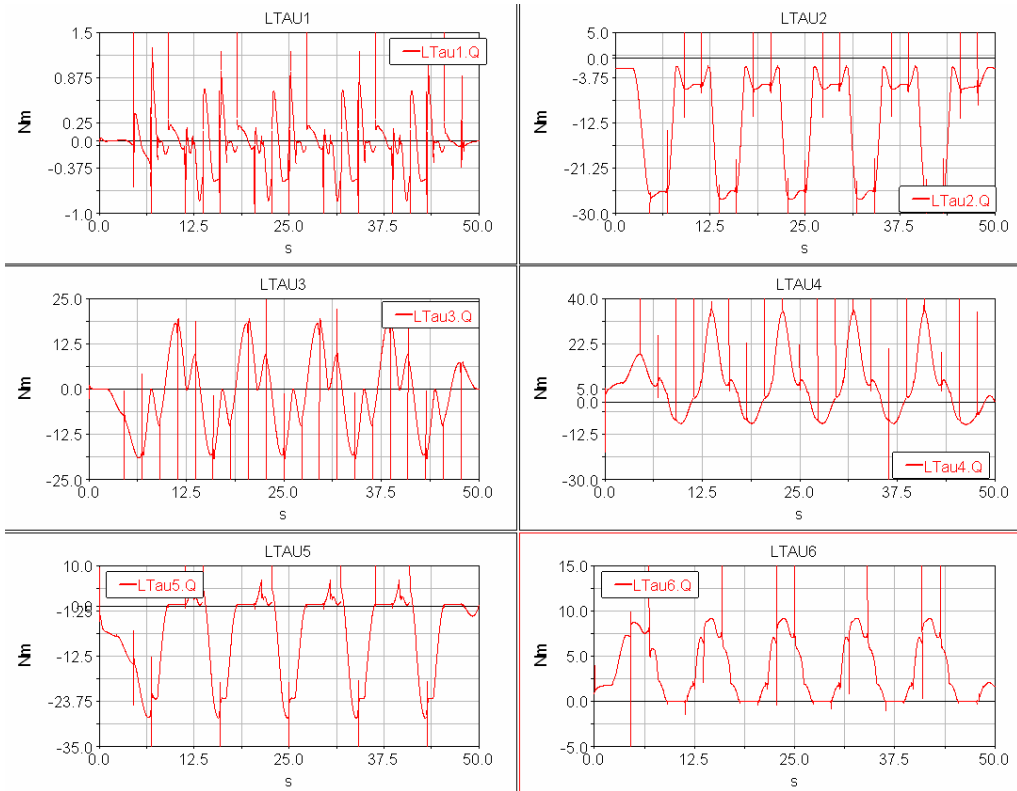


Şekil D.5 : 1. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri

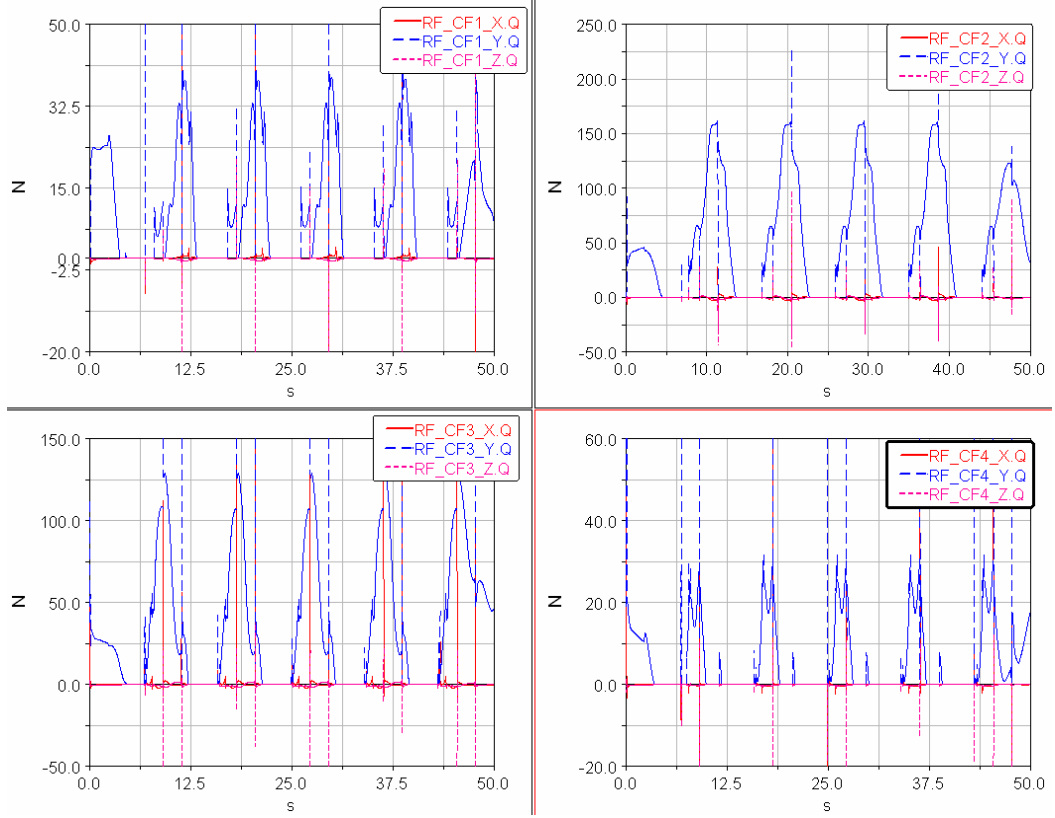
2. Yürüme Hareketi



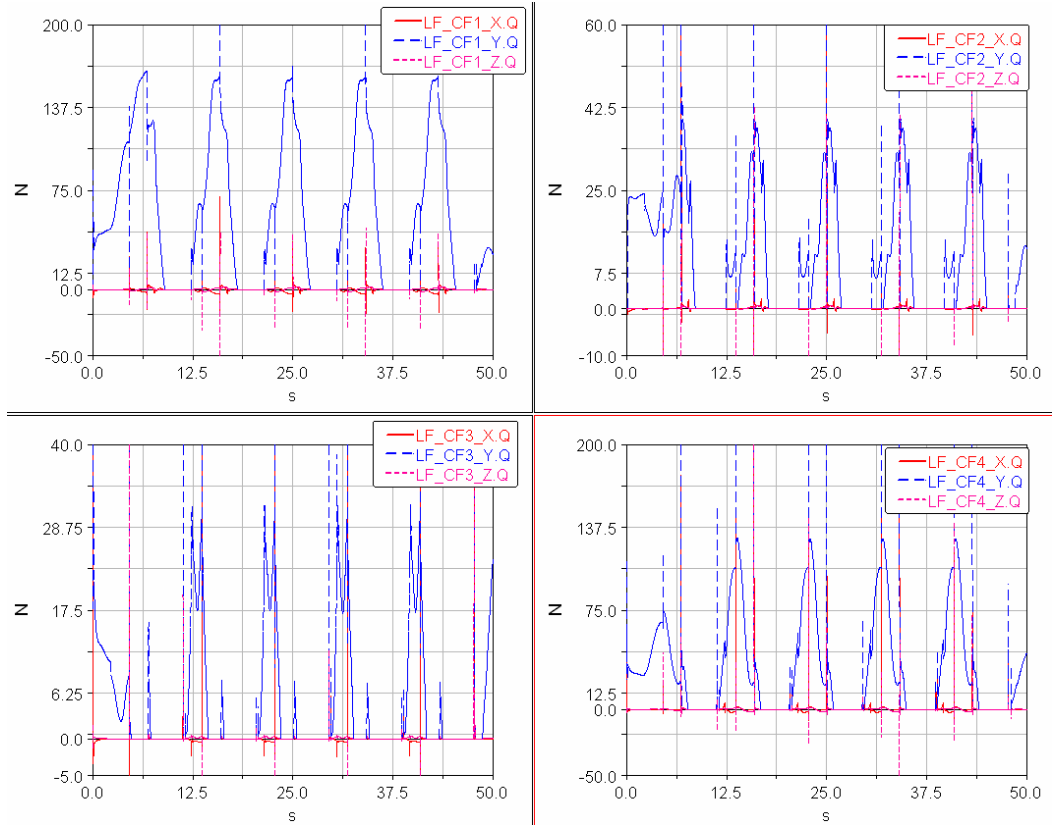
Şekil D.6 : 2. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri



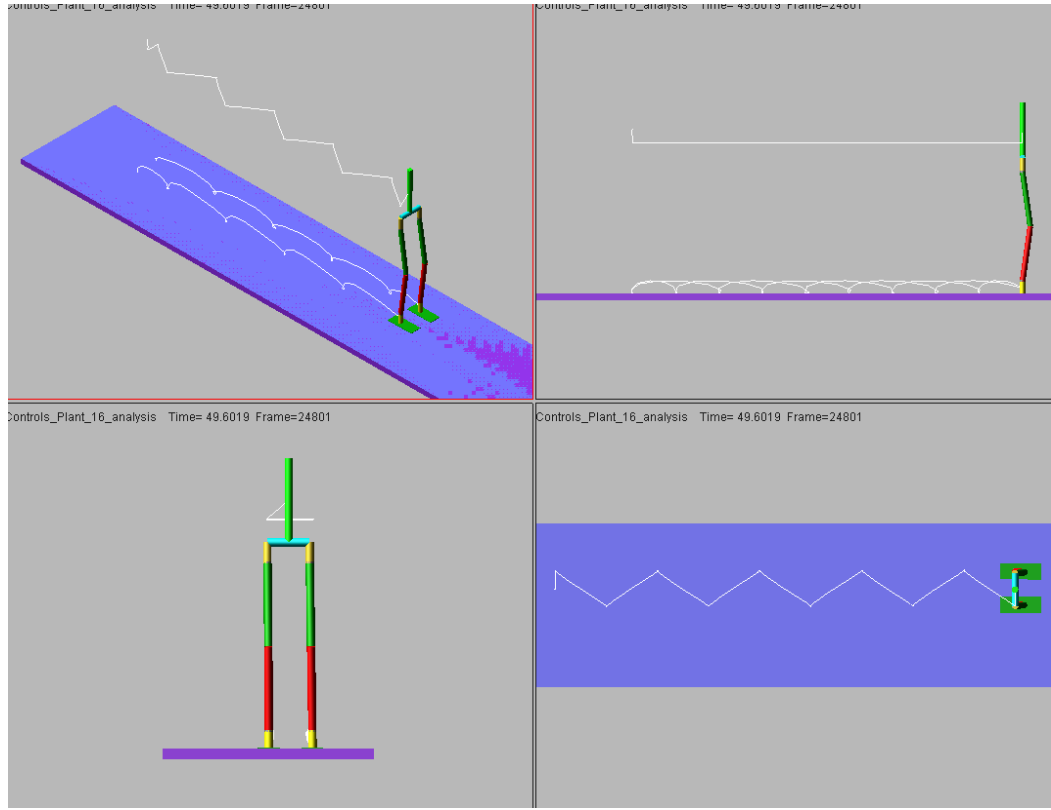
Şekil D.7 : 2. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil D.8 : 2. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

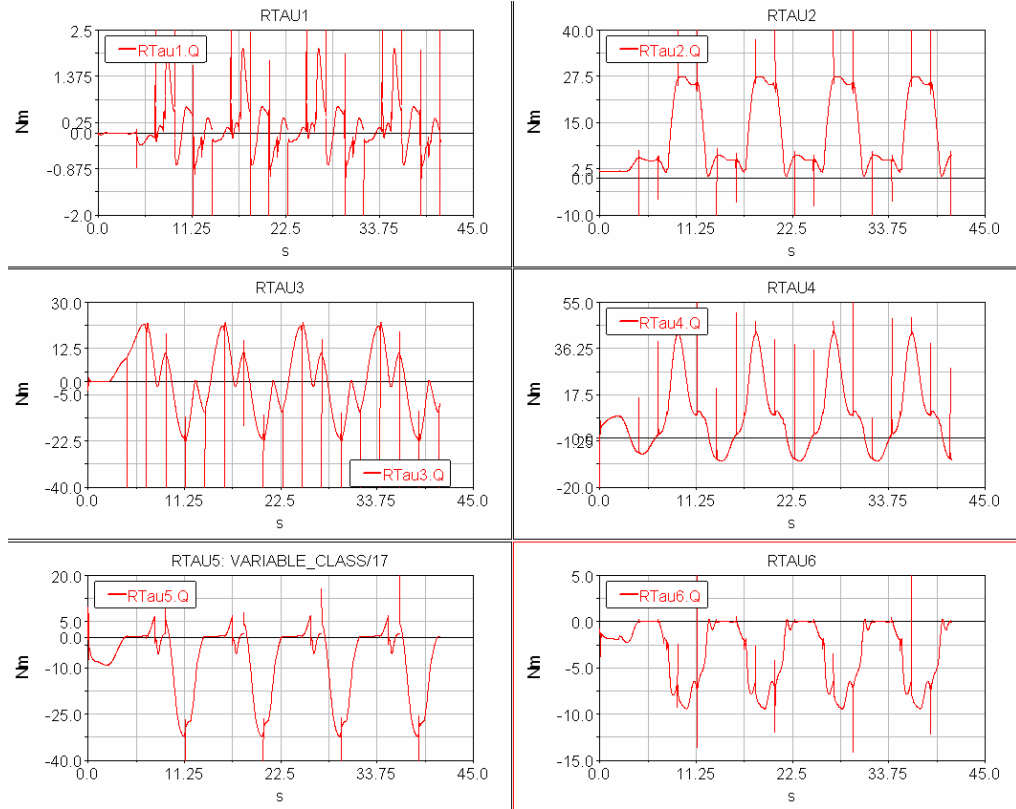


Şekil D.9 : 2. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

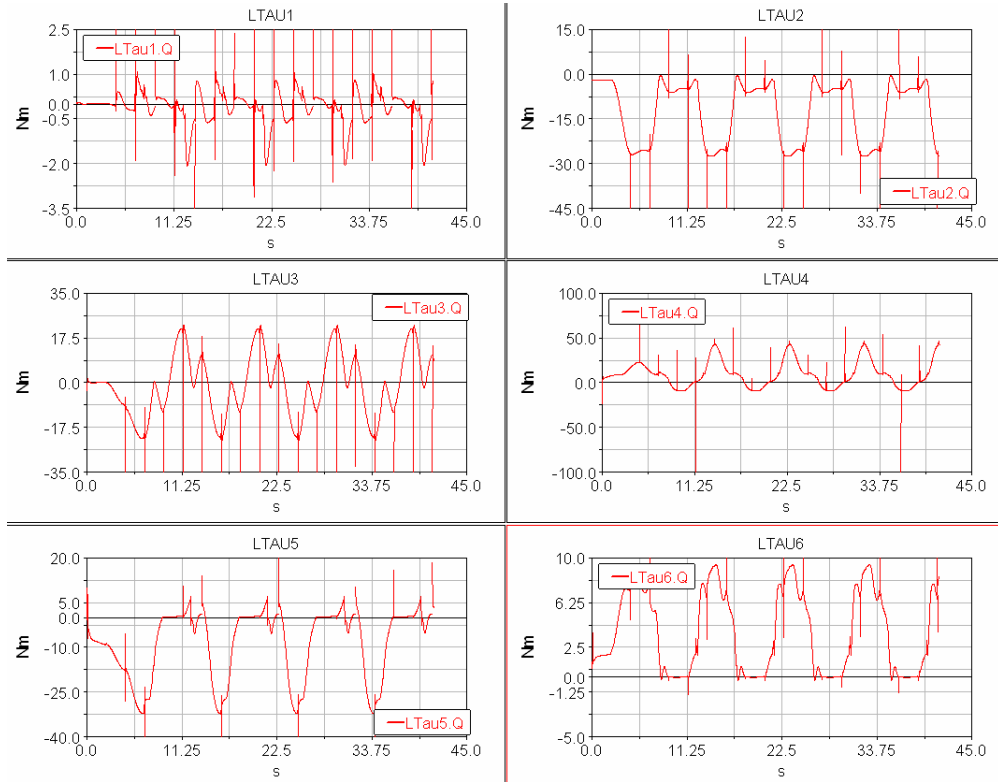


Şekil D.10 : 2. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri

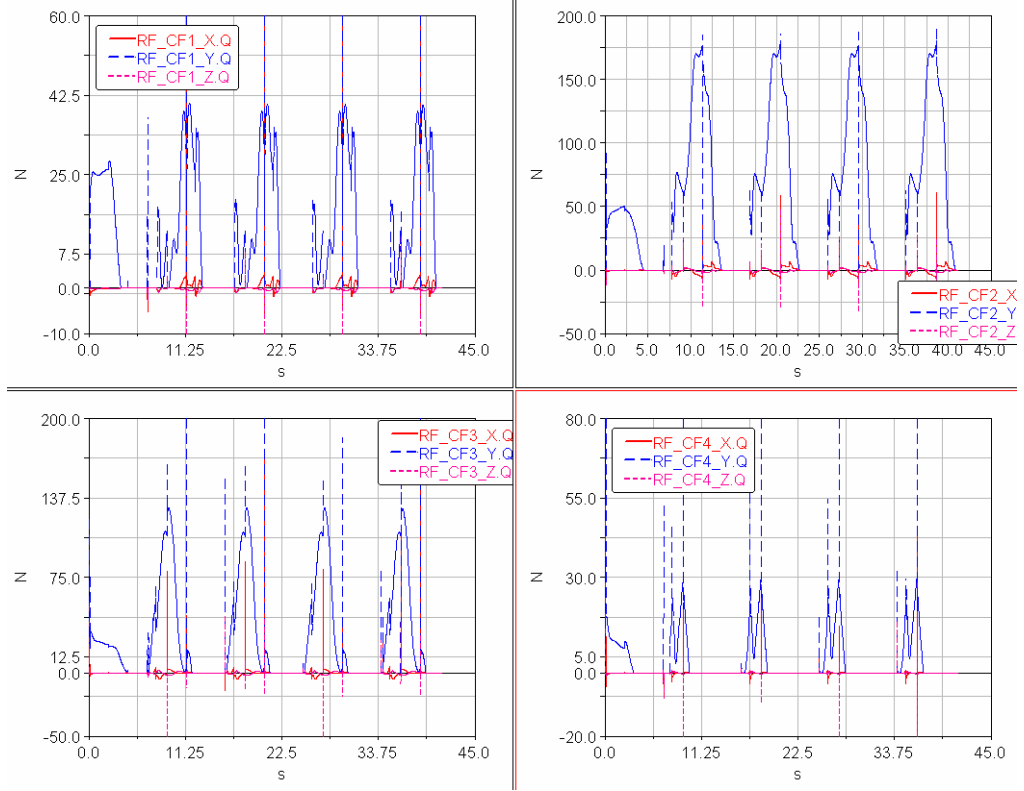
3. Yürüme Hareketi:



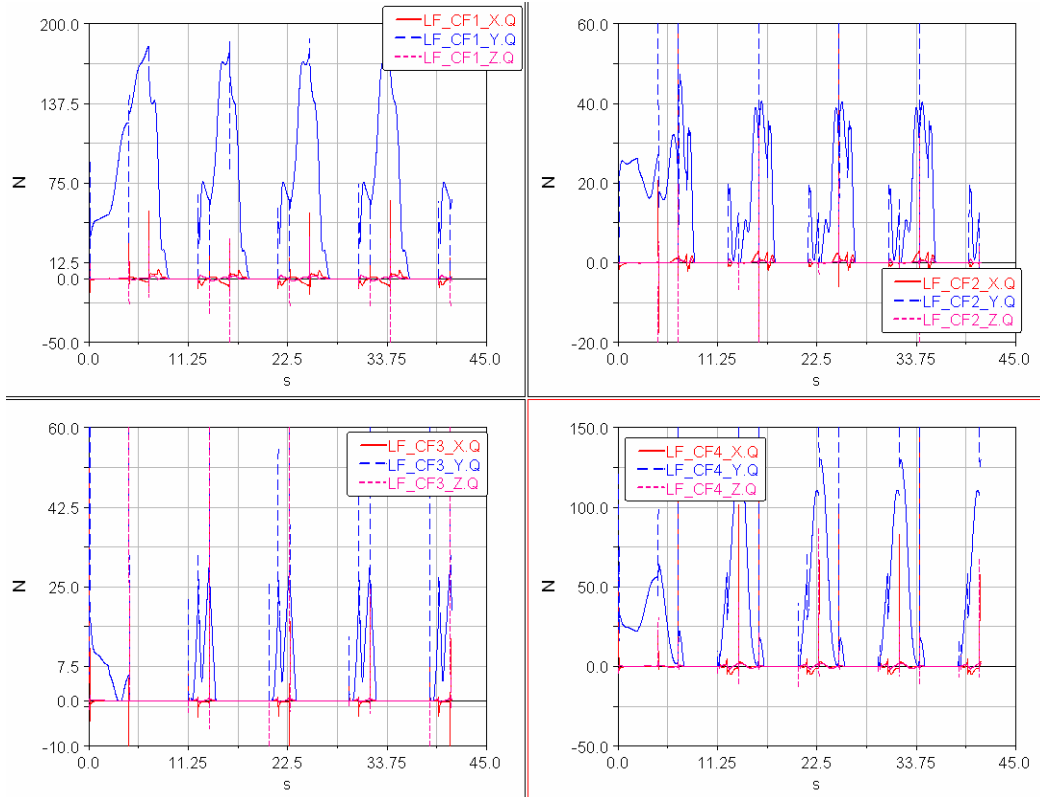
Şekil D.11 : 3. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri



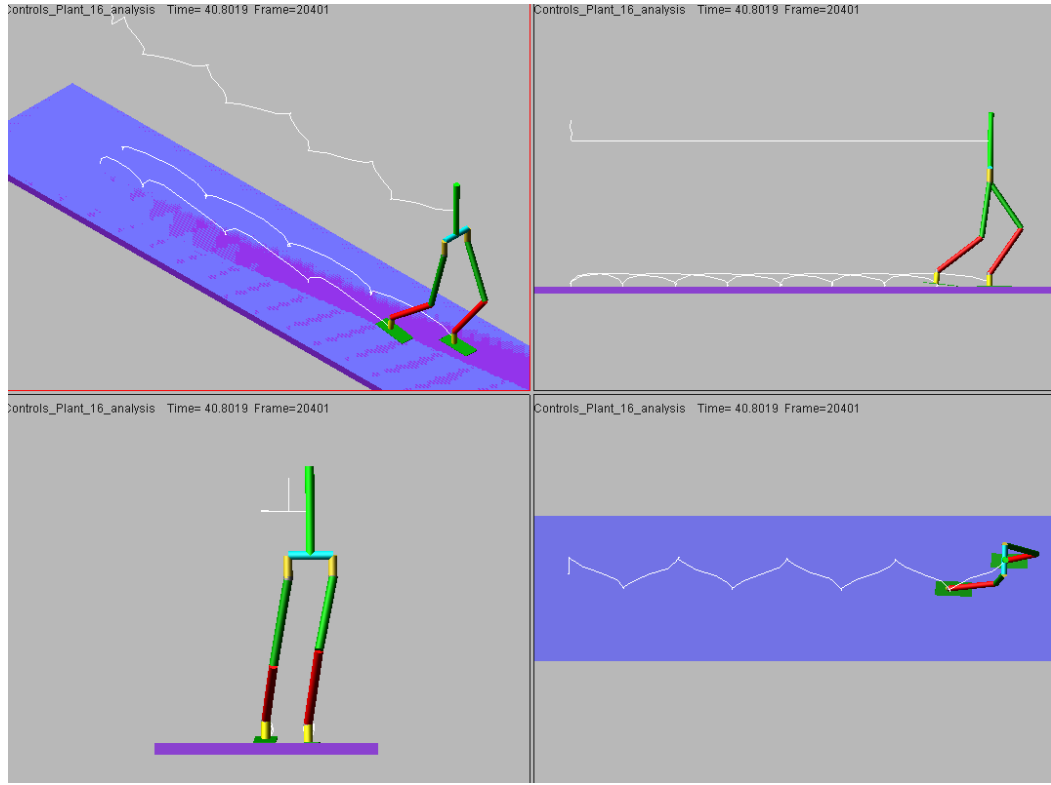
Şekil D.12 : 3. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil D.13 : 3. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

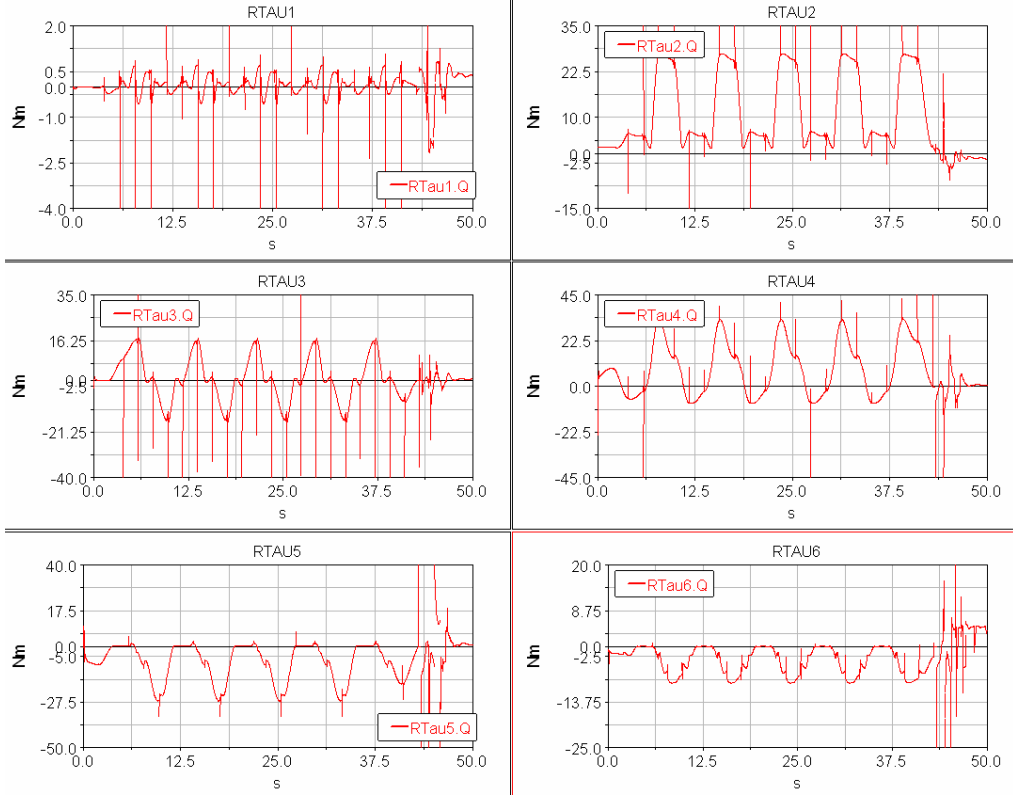


Şekil D.14 : 3. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

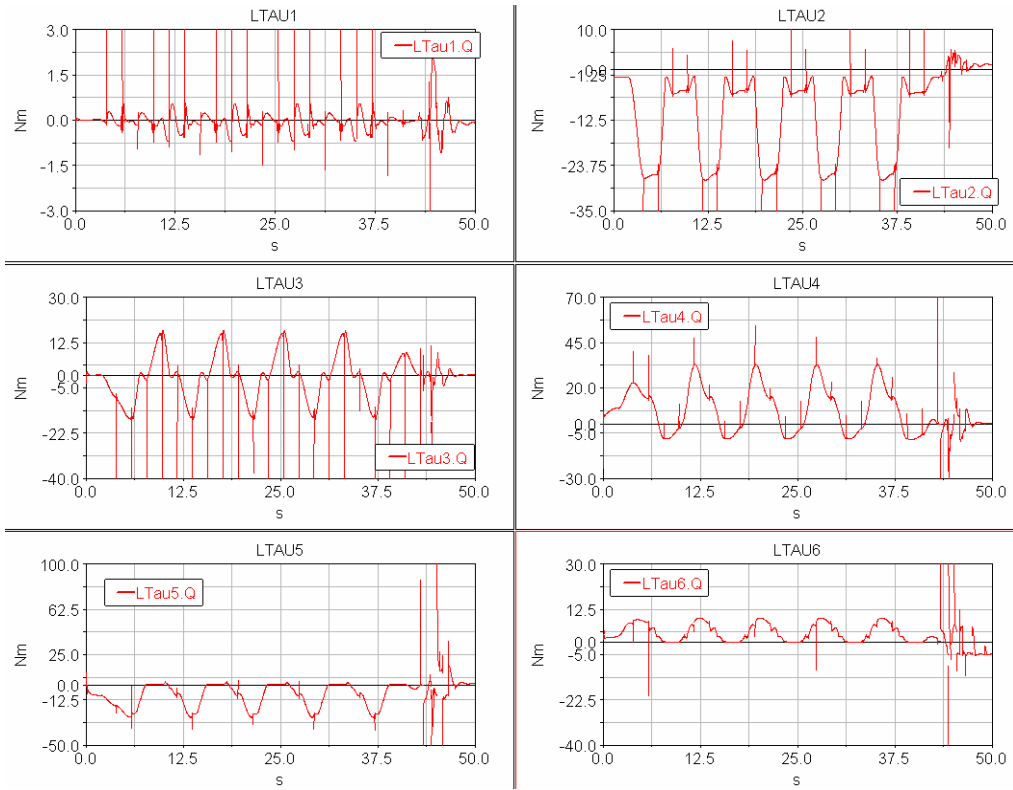


Şekil D.15 : 3. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri

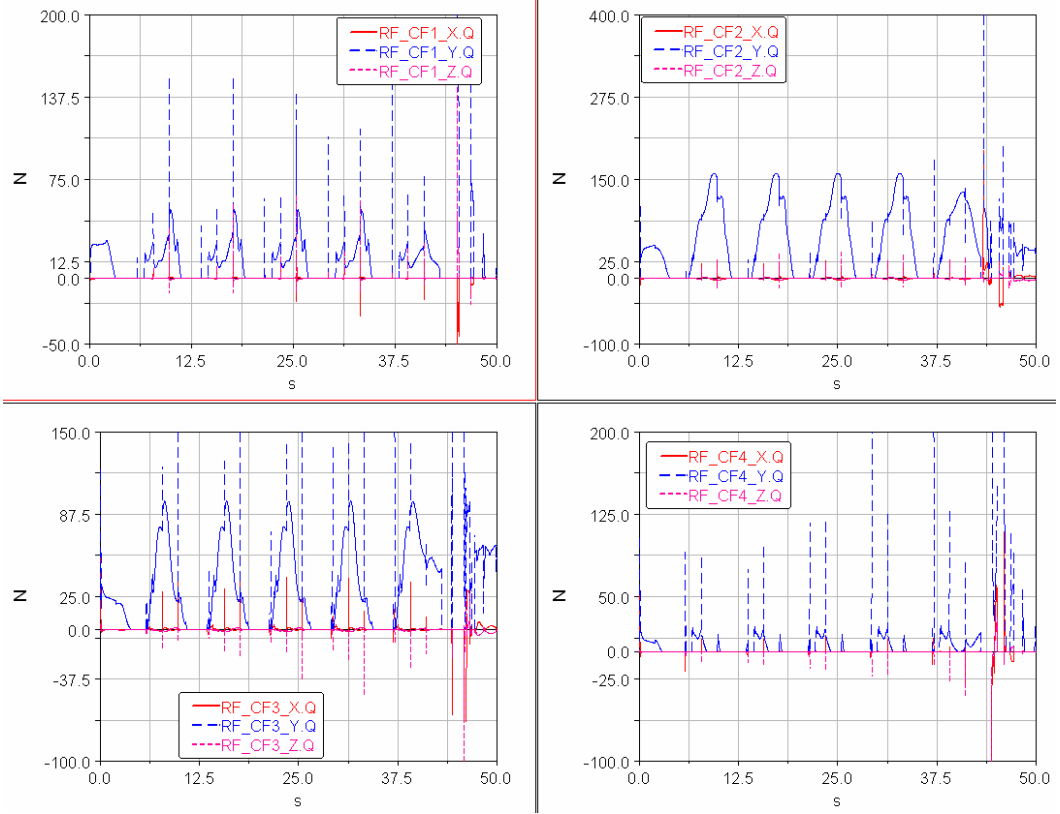
4. Yürüme Hareketi



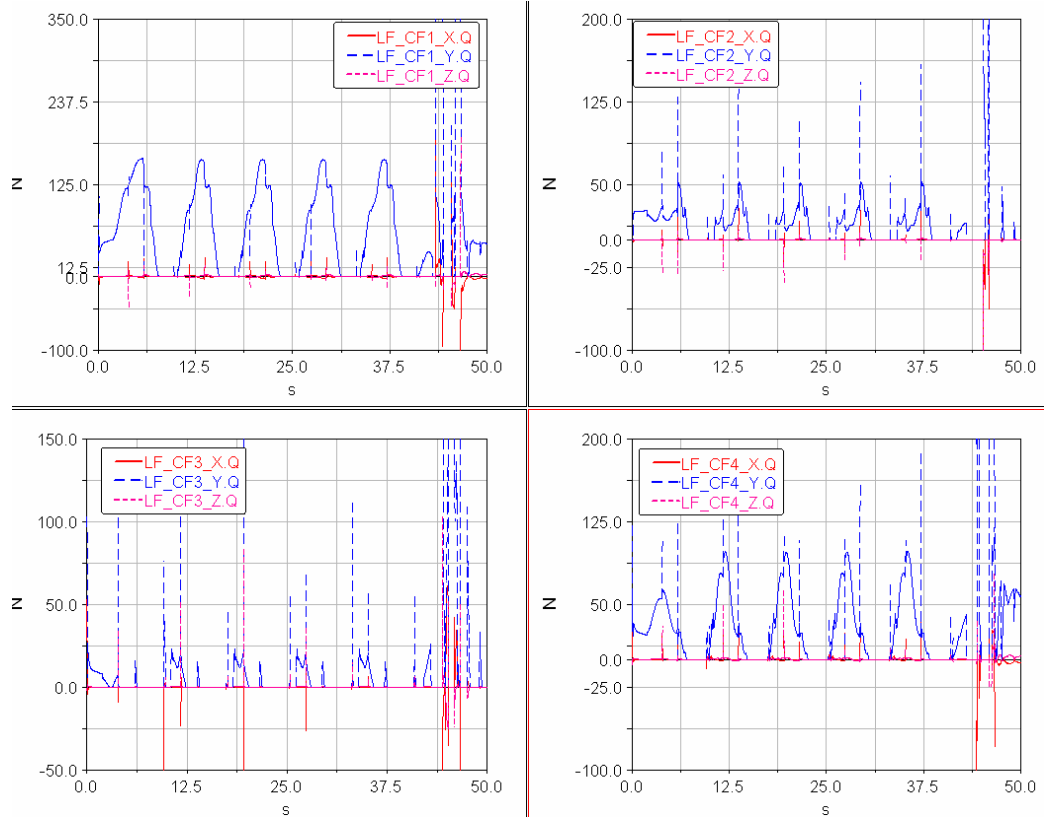
Şekil D.16 : 4. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri



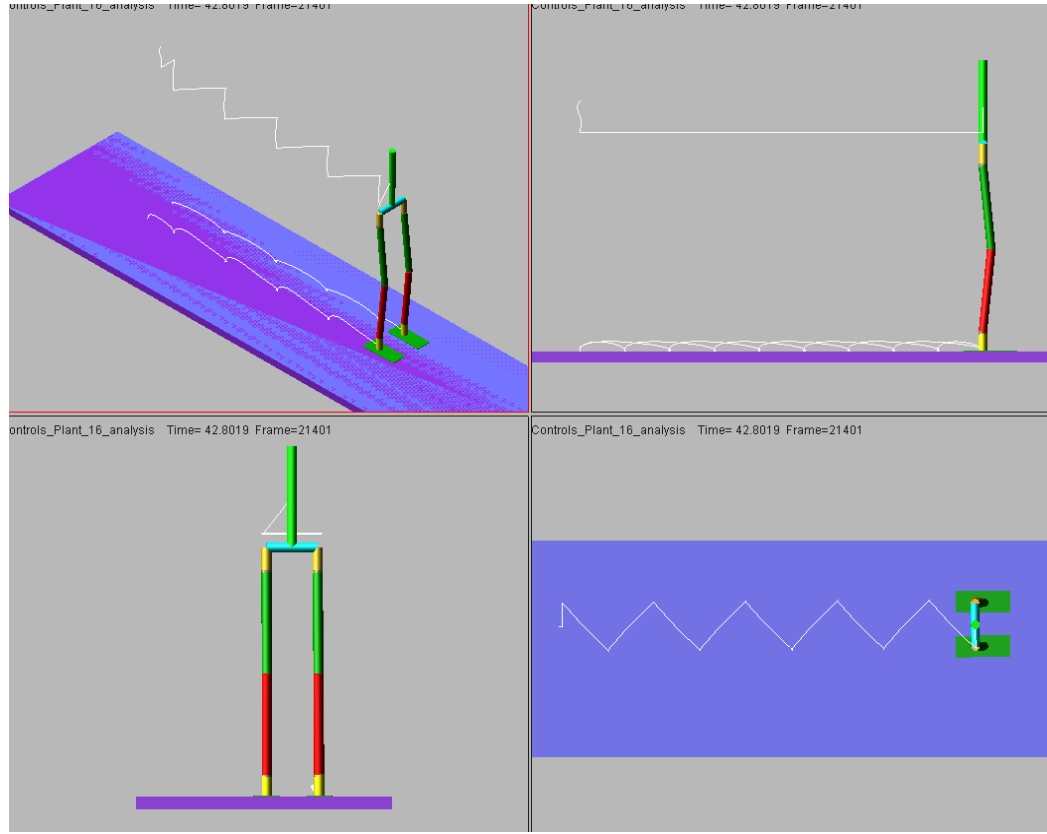
Şekil D.17 : 4. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil D.18 : 4. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

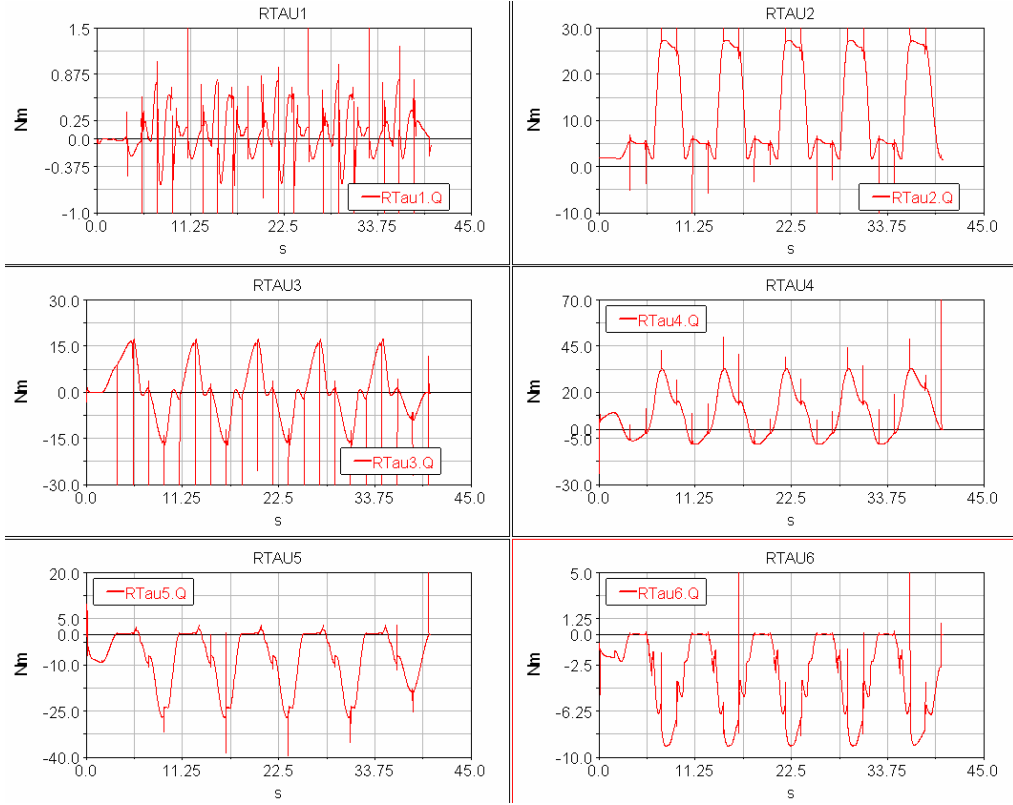


Şekil D.19 : 4. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

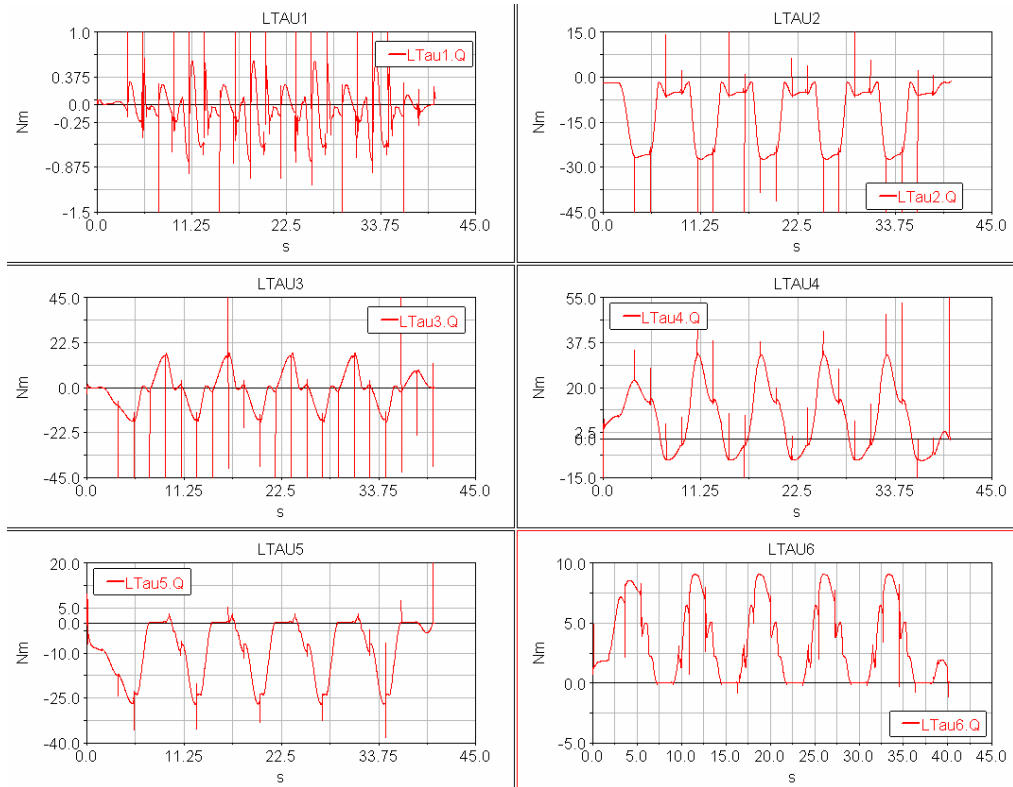


Şekil D.20 : 4. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri

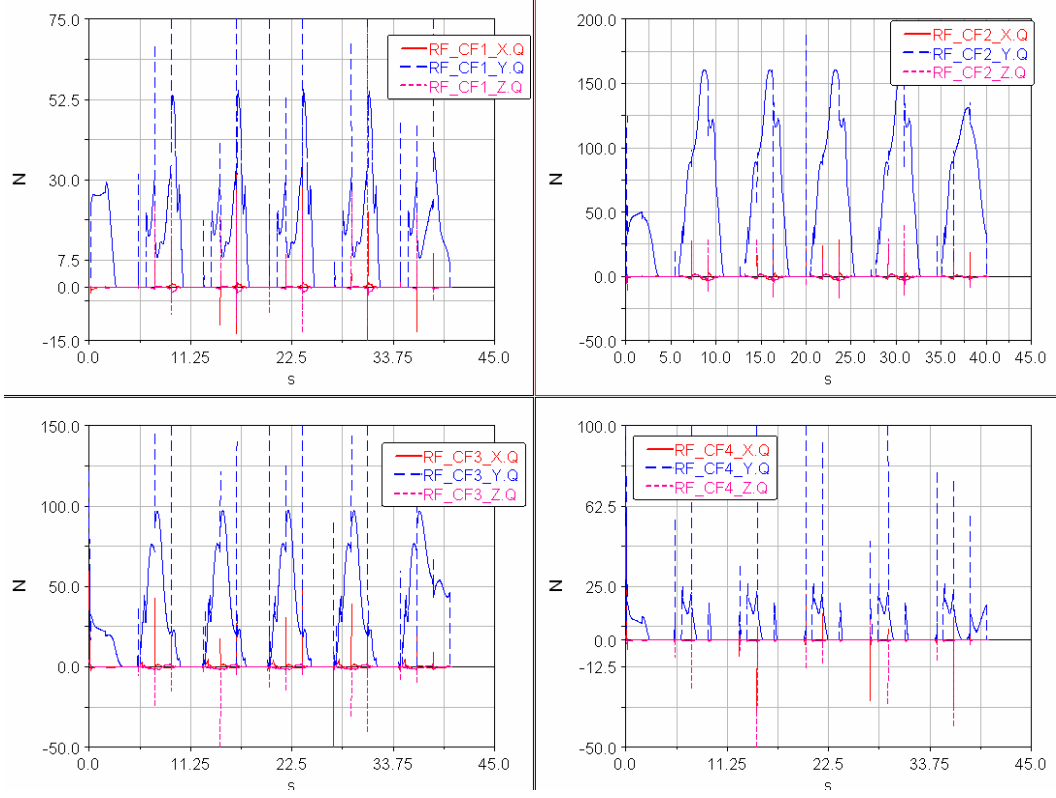
5. Yürüme Hareketi



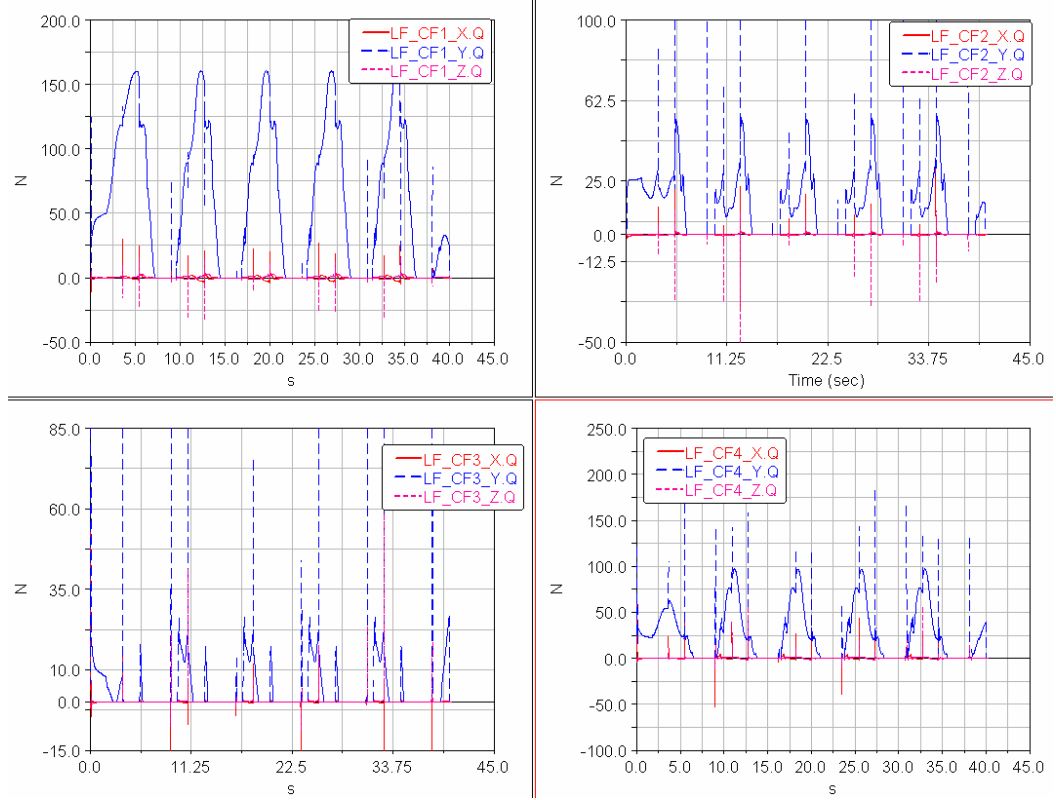
Şekil D.21 : 5. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri



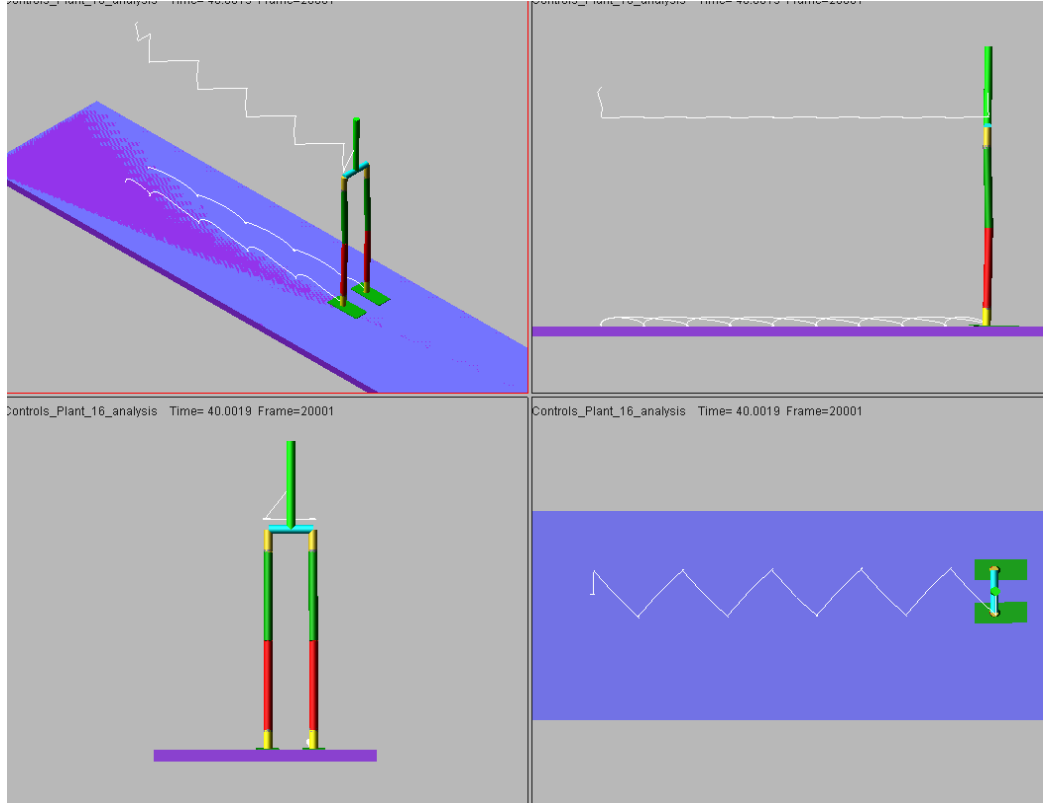
Şekil D.22 : 5. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil D.23 : 5. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

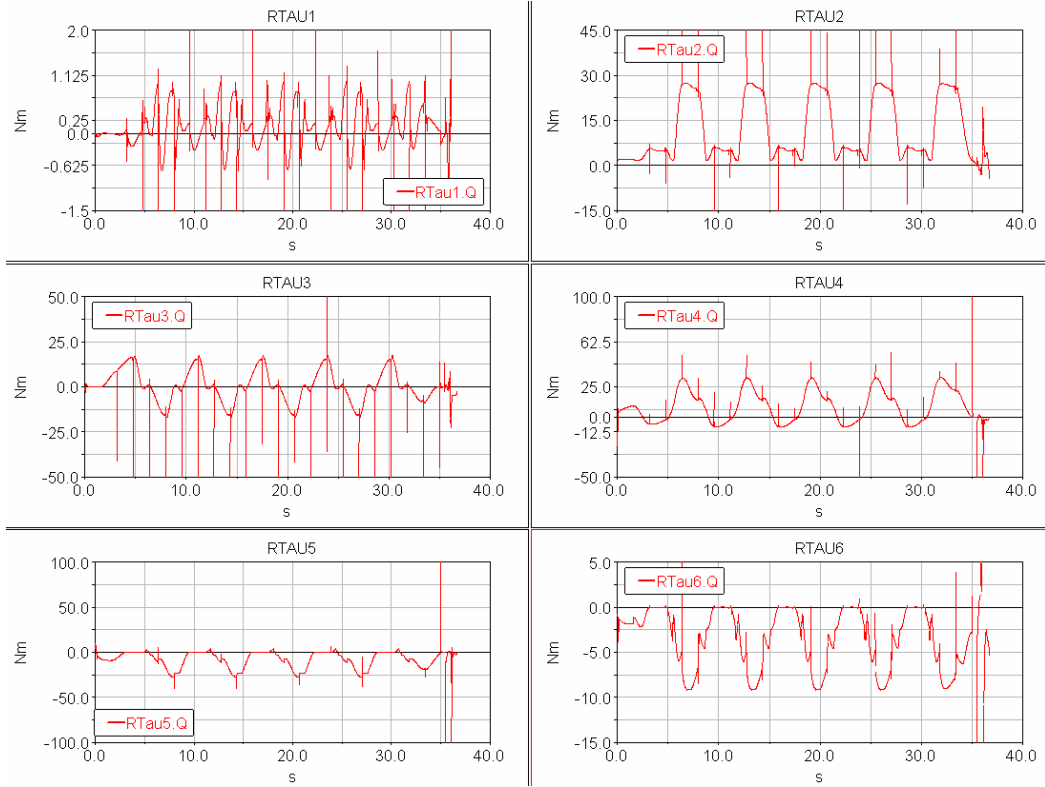


Şekil D.24 : 5. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

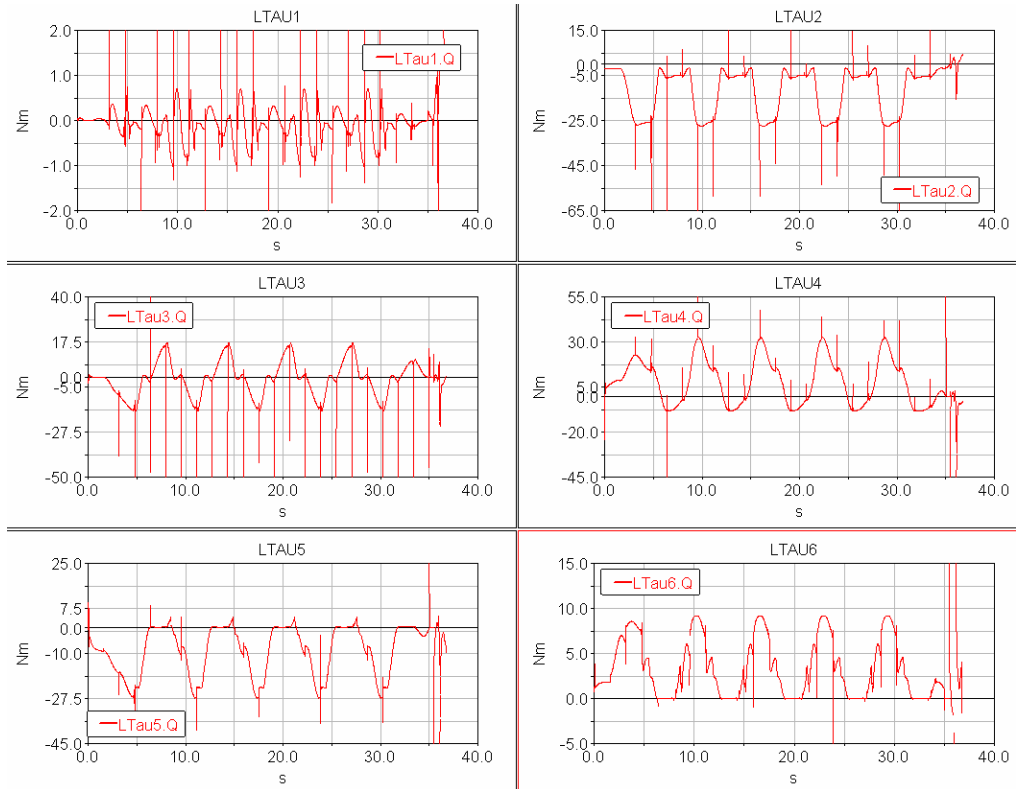


Şekil D.25 : 5. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri

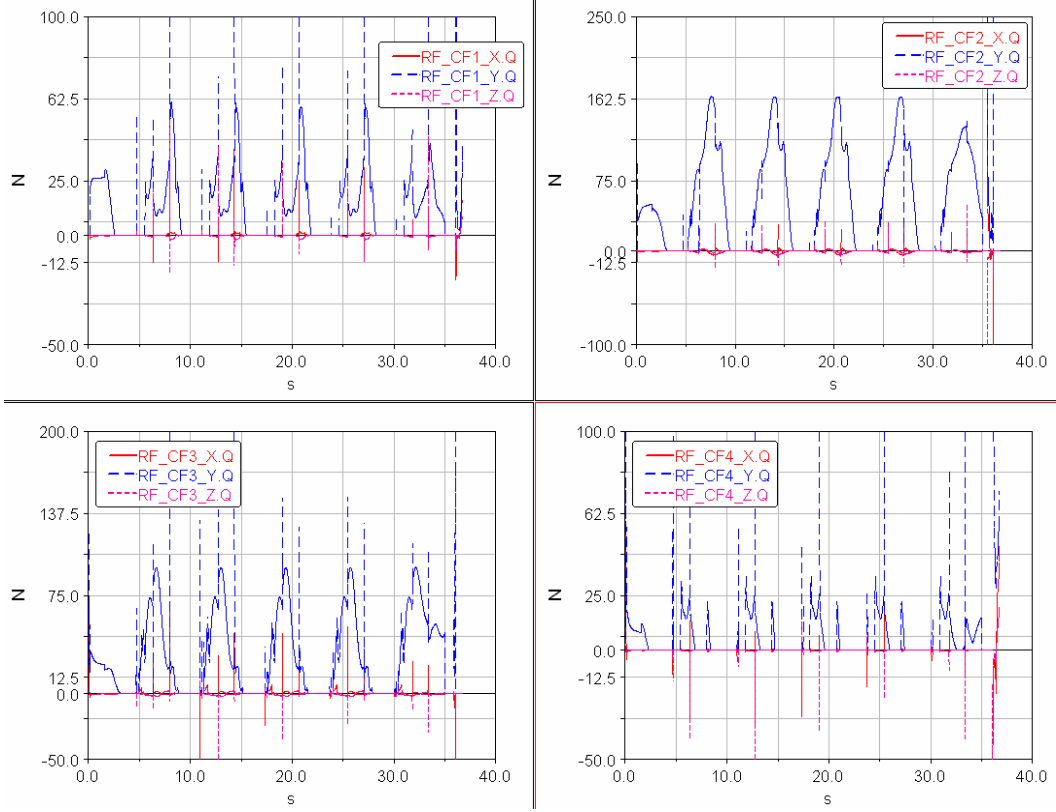
6. Yürüme Hareketi



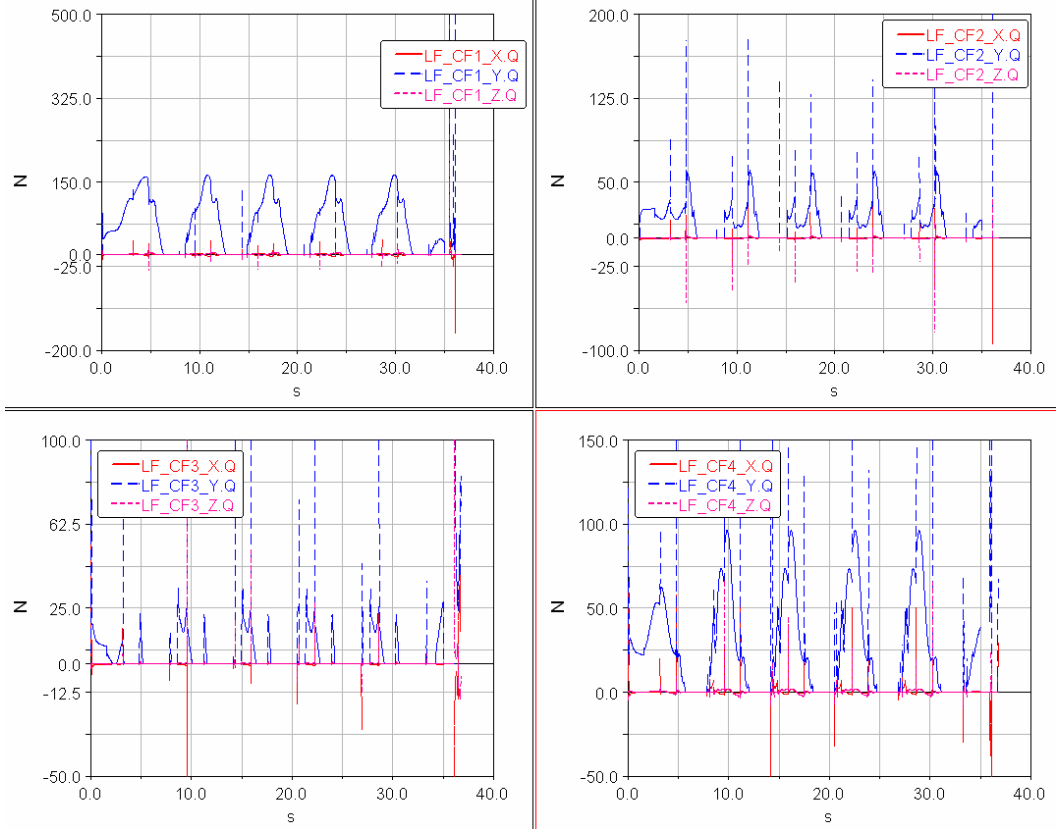
Şekil D.26 : 6. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri



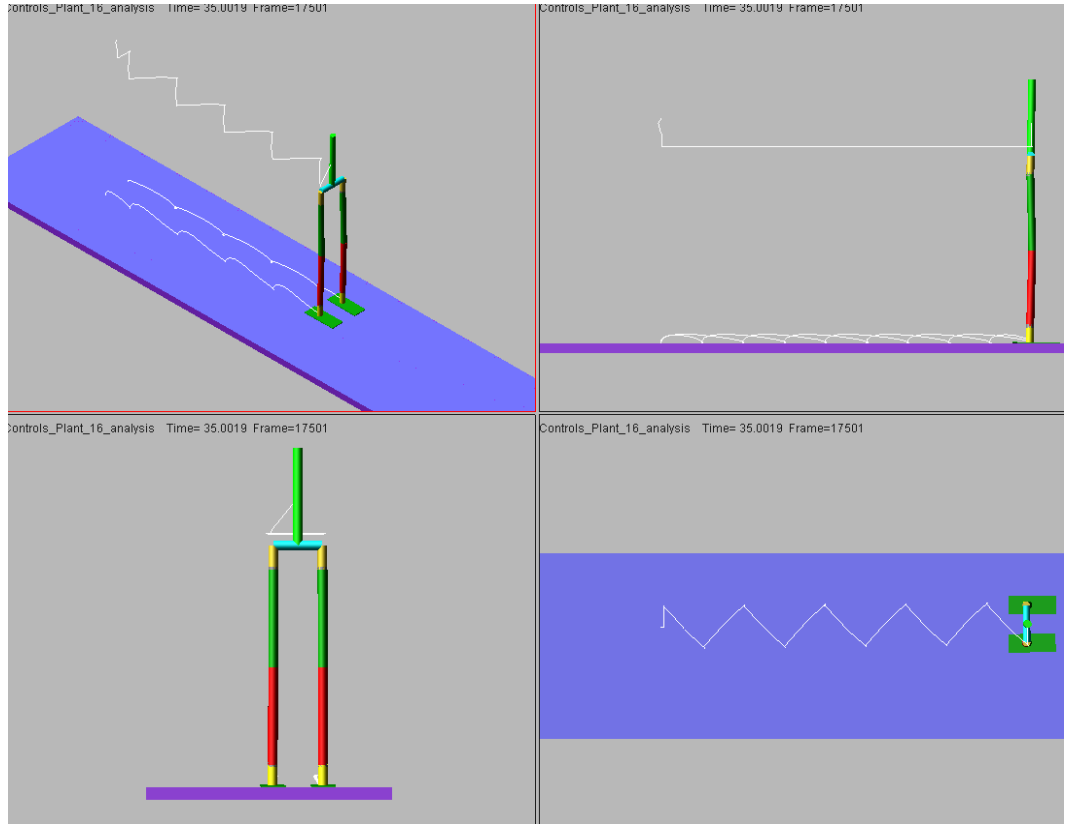
Şekil D.27 : 6. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil D.28 : 6. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

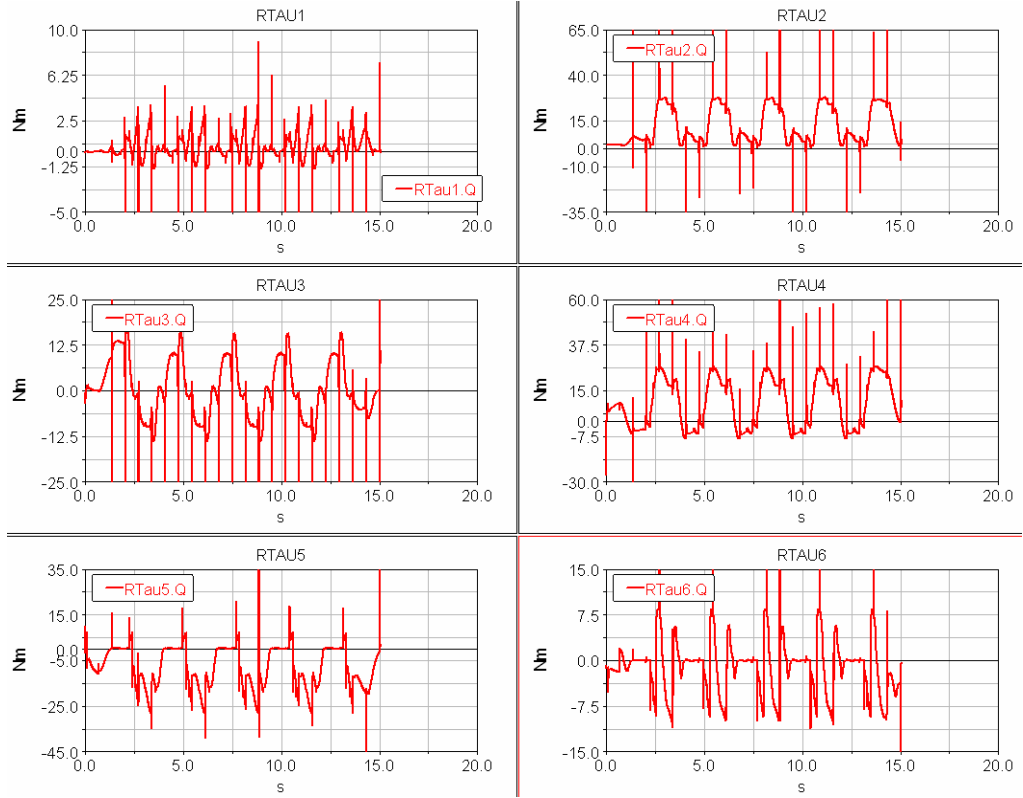


Şekil D.29 : 6. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

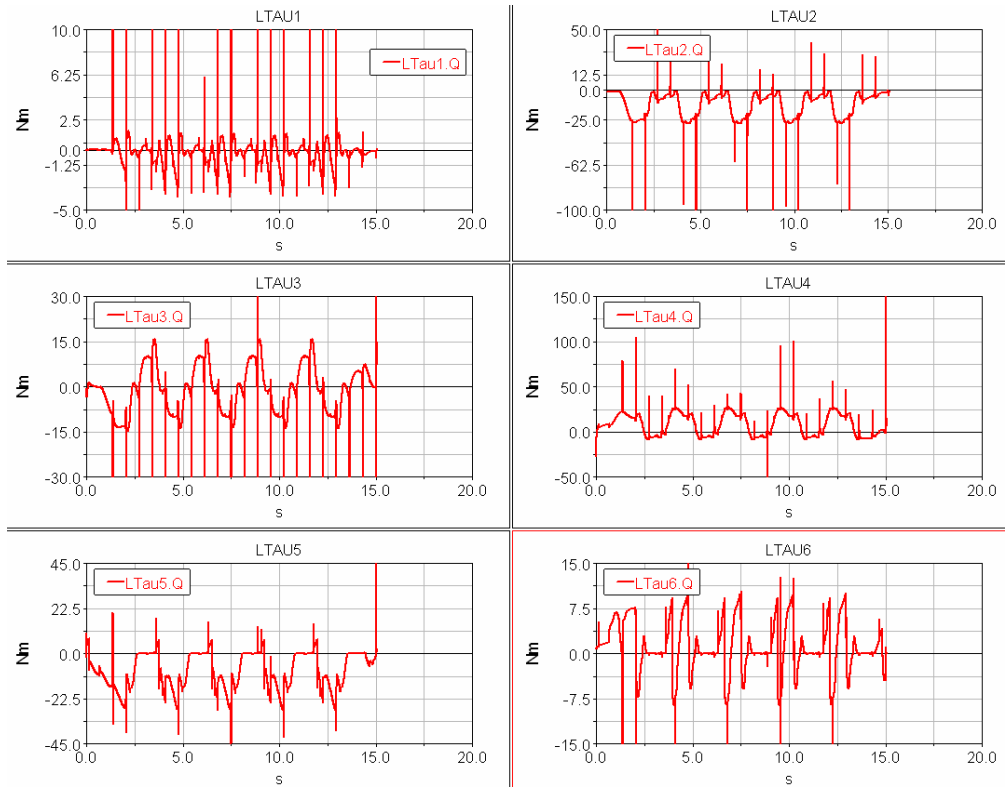


Şekil D.30 : 6. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri

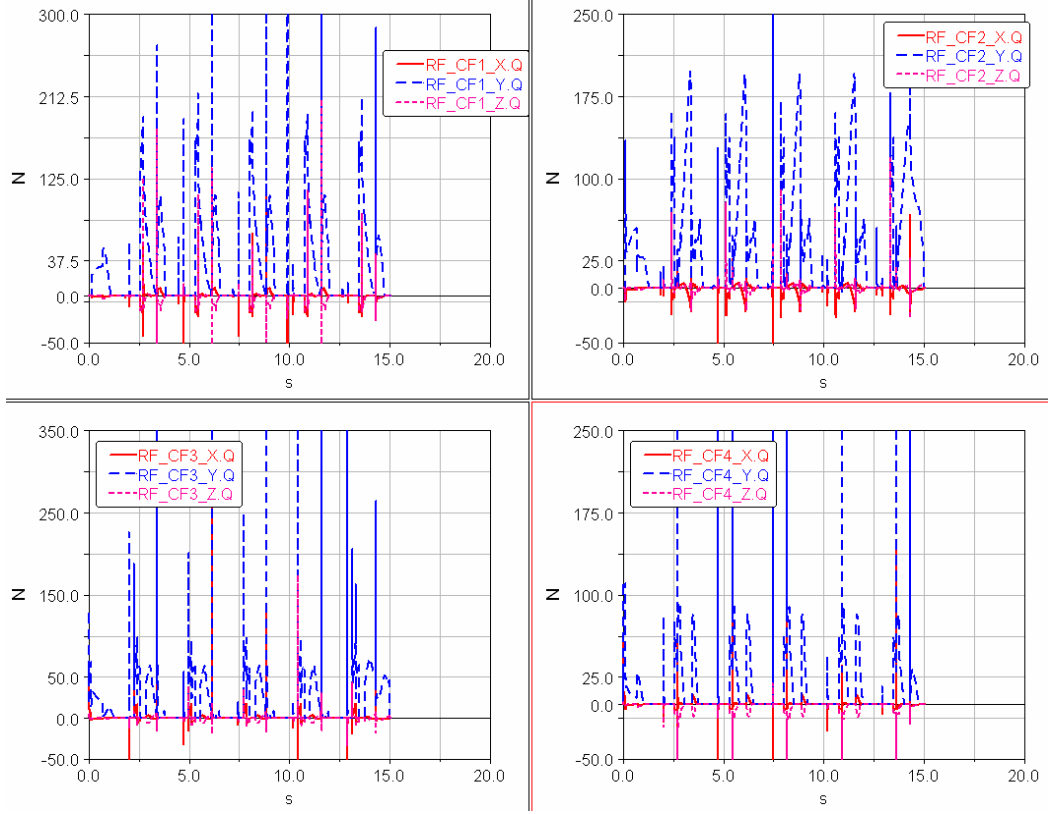
7. Yürüme Hareketi



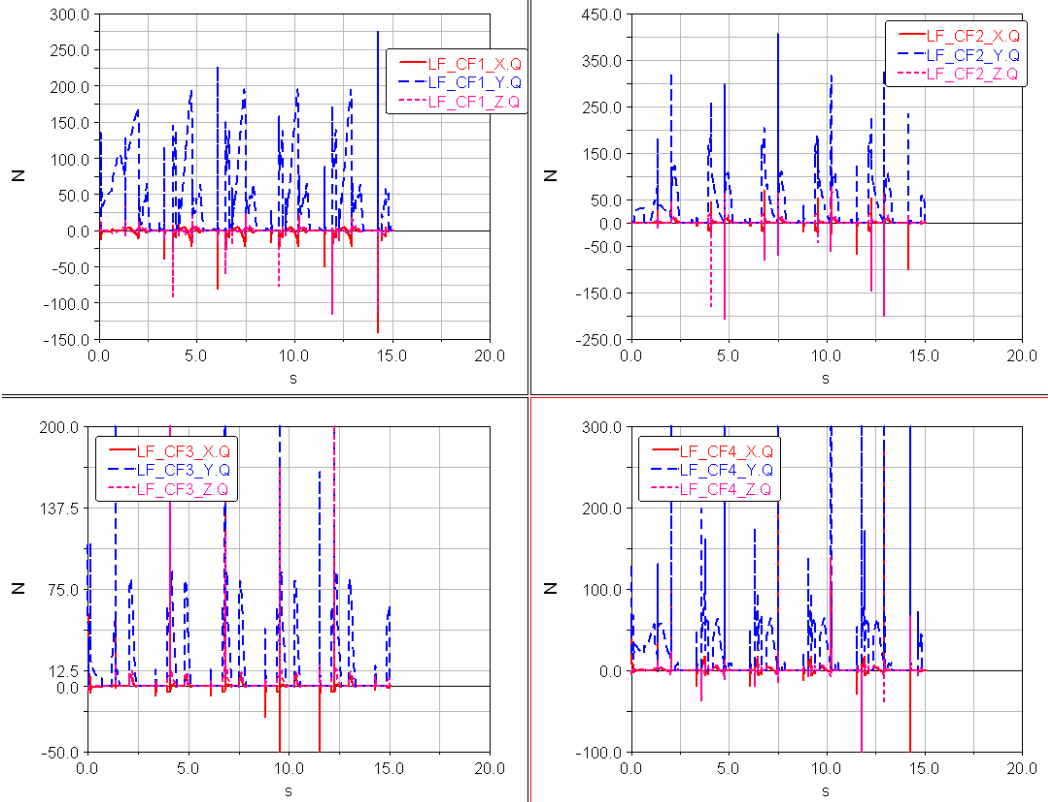
Şekil D.31 : 7. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri



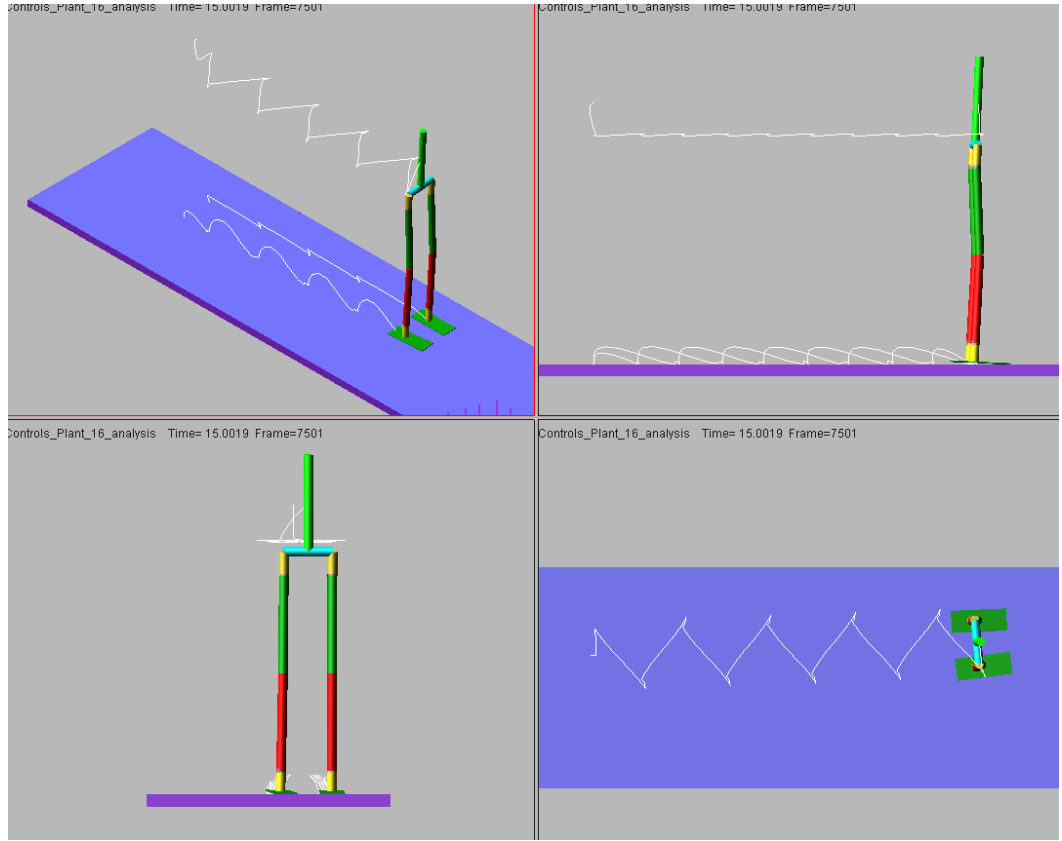
Şekil D.32 : 7. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil D.33 : 7. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

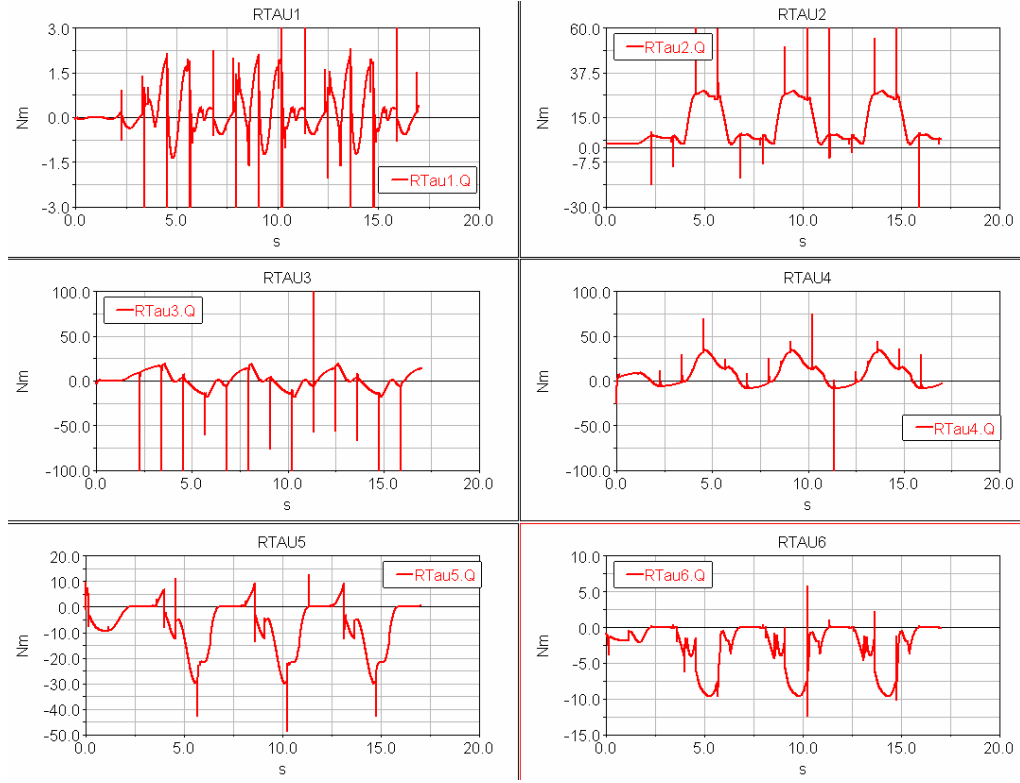


Şekil D.34 : 7. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

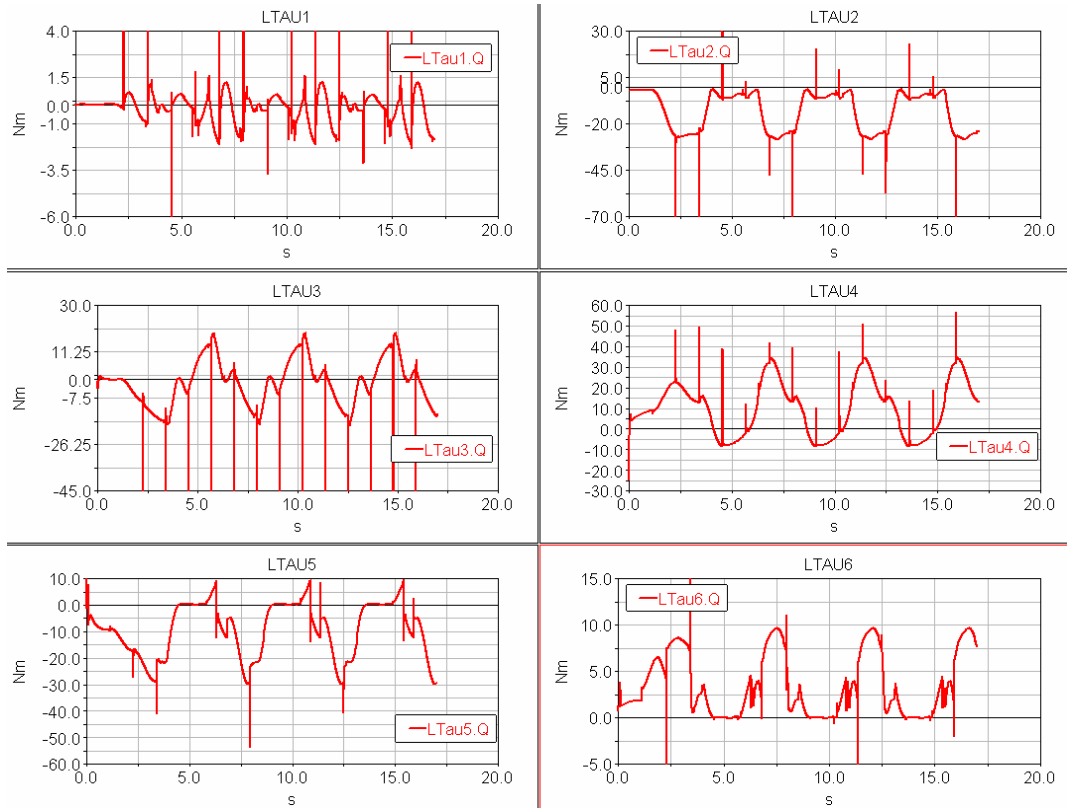


Şekil D.35 : 7. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri

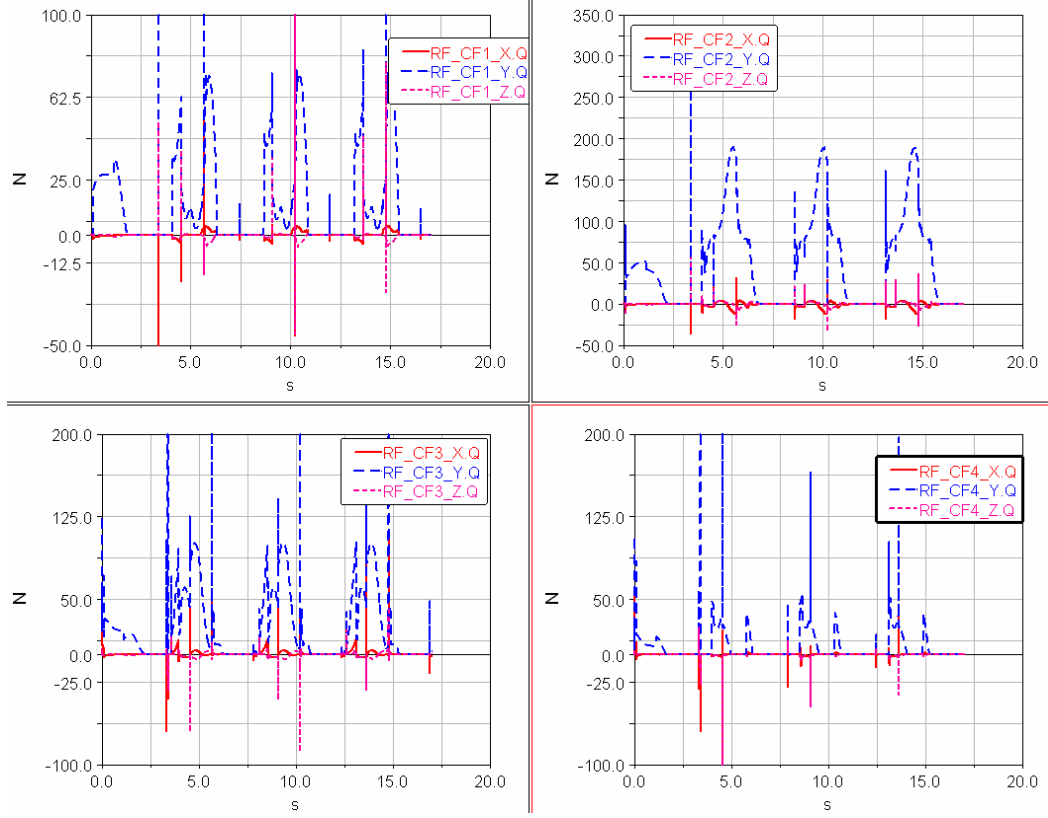
8. Yürüme Hareketi



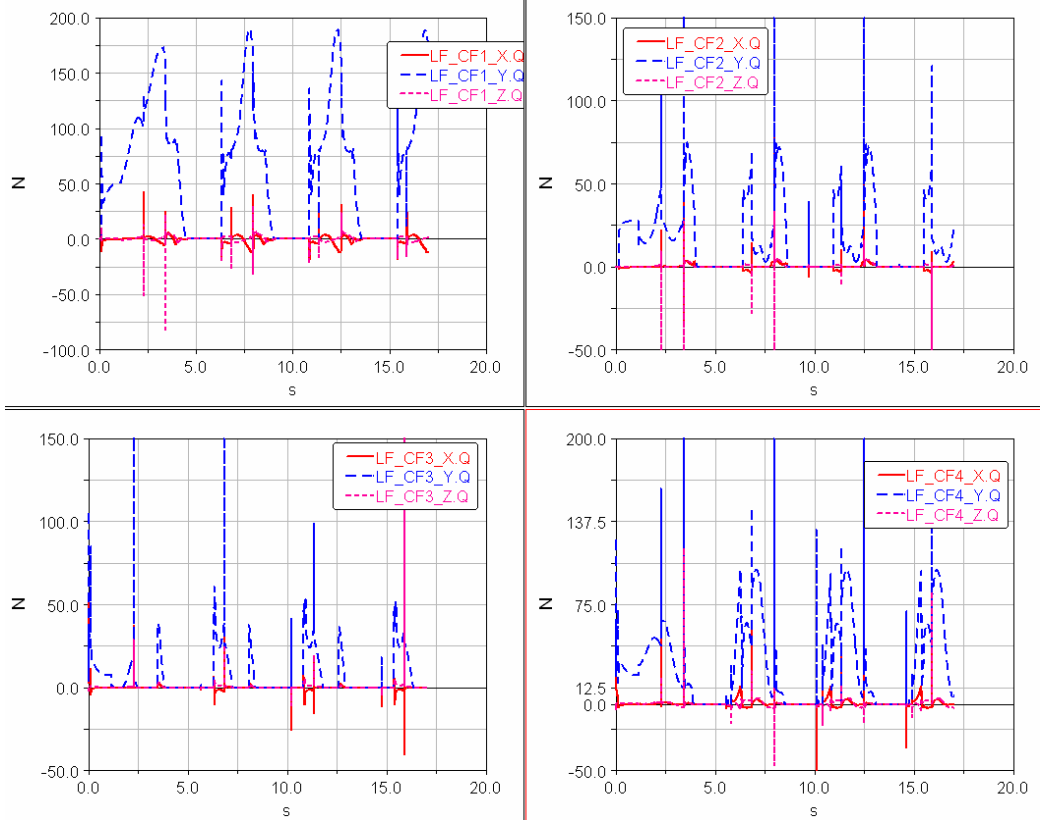
Şekil D.36 : 8. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri



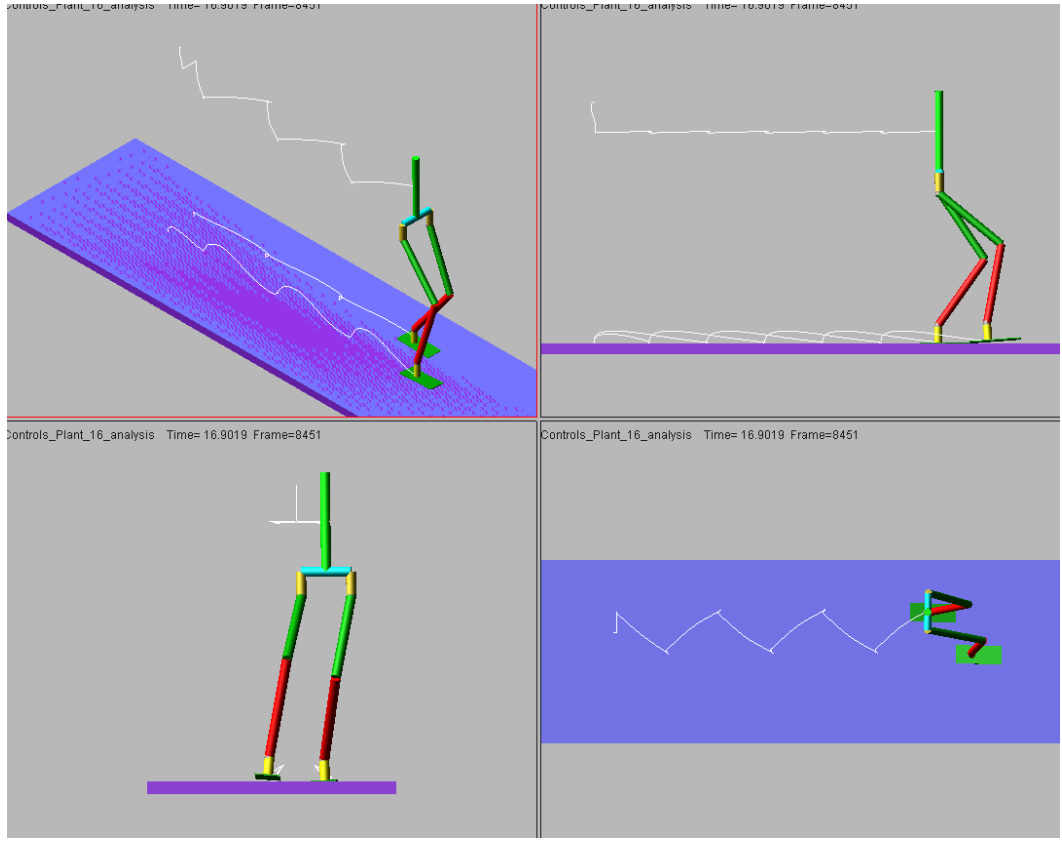
Şekil D.37 : 8. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil D.38 : 8. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

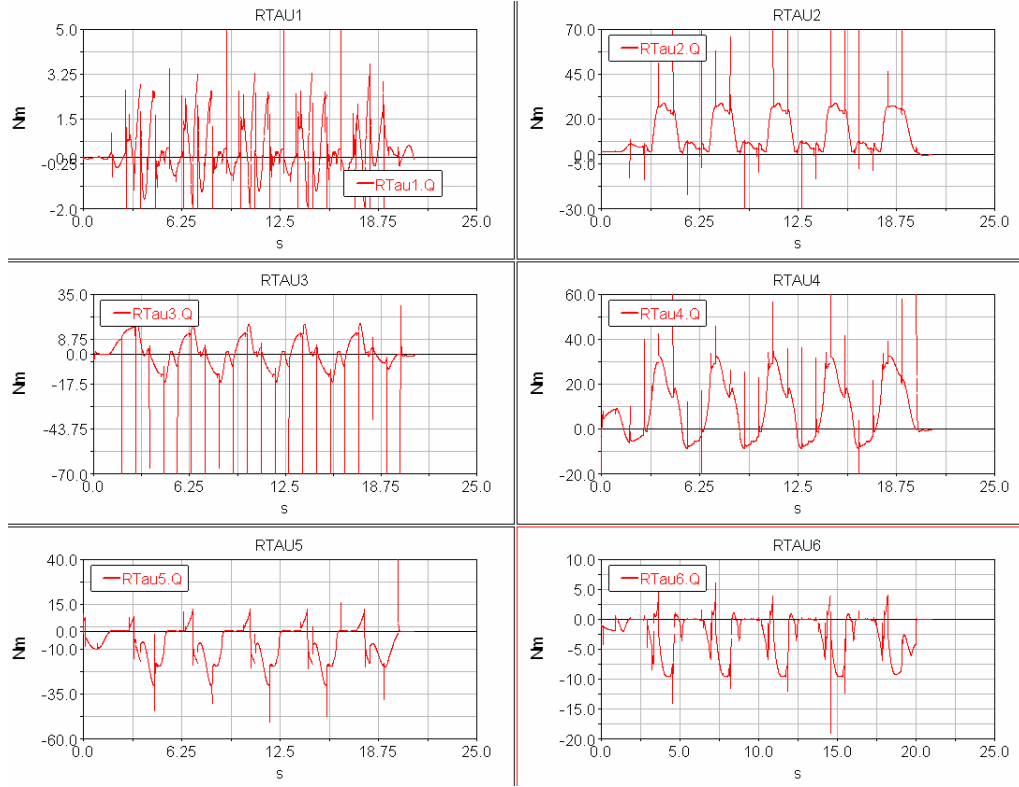


Şekil D.39 : 8. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

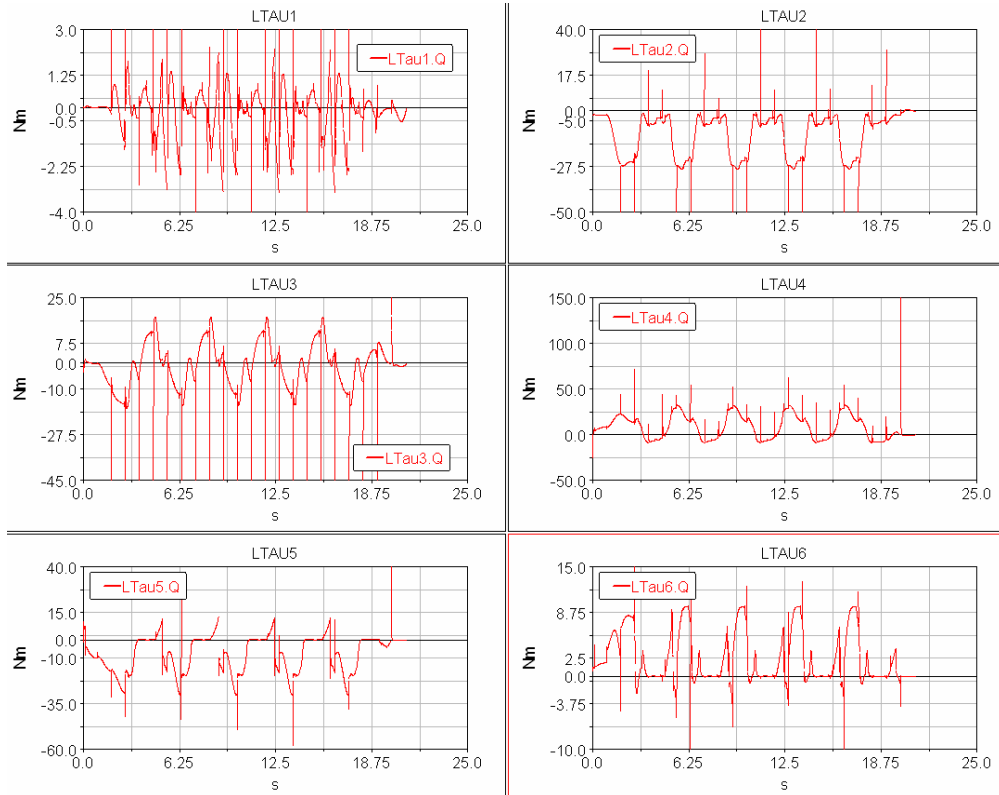


Şekil D.40 : 8. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri

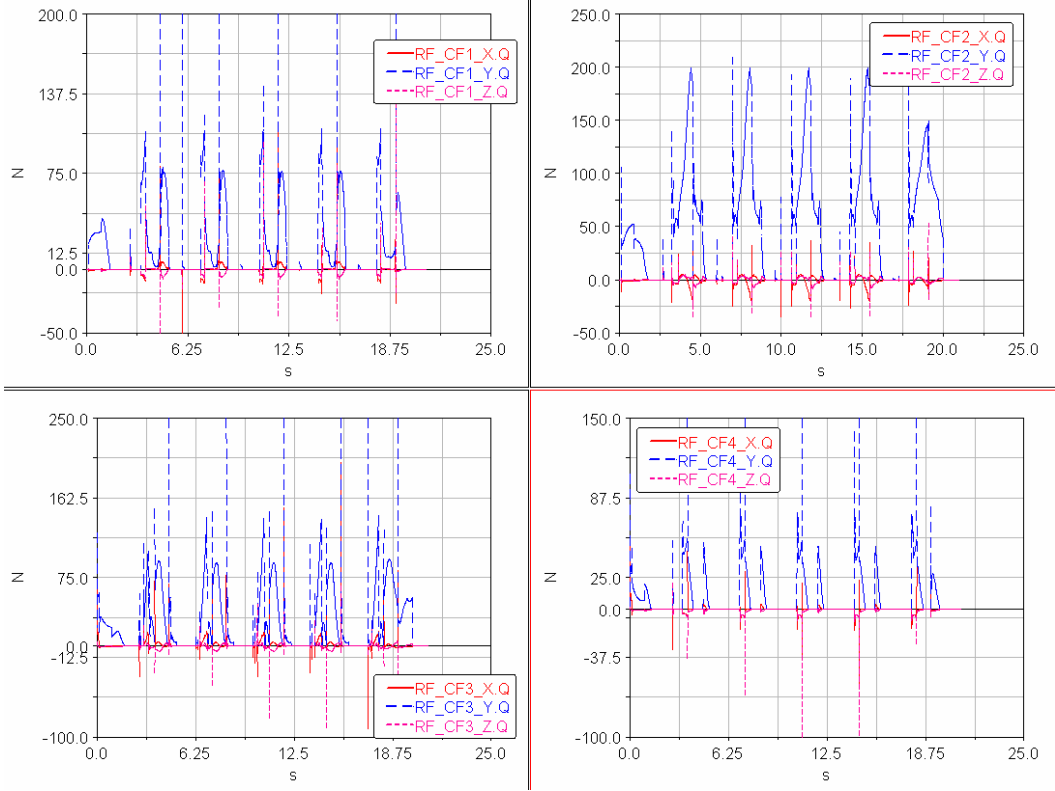
9. Yürüme Hareketi



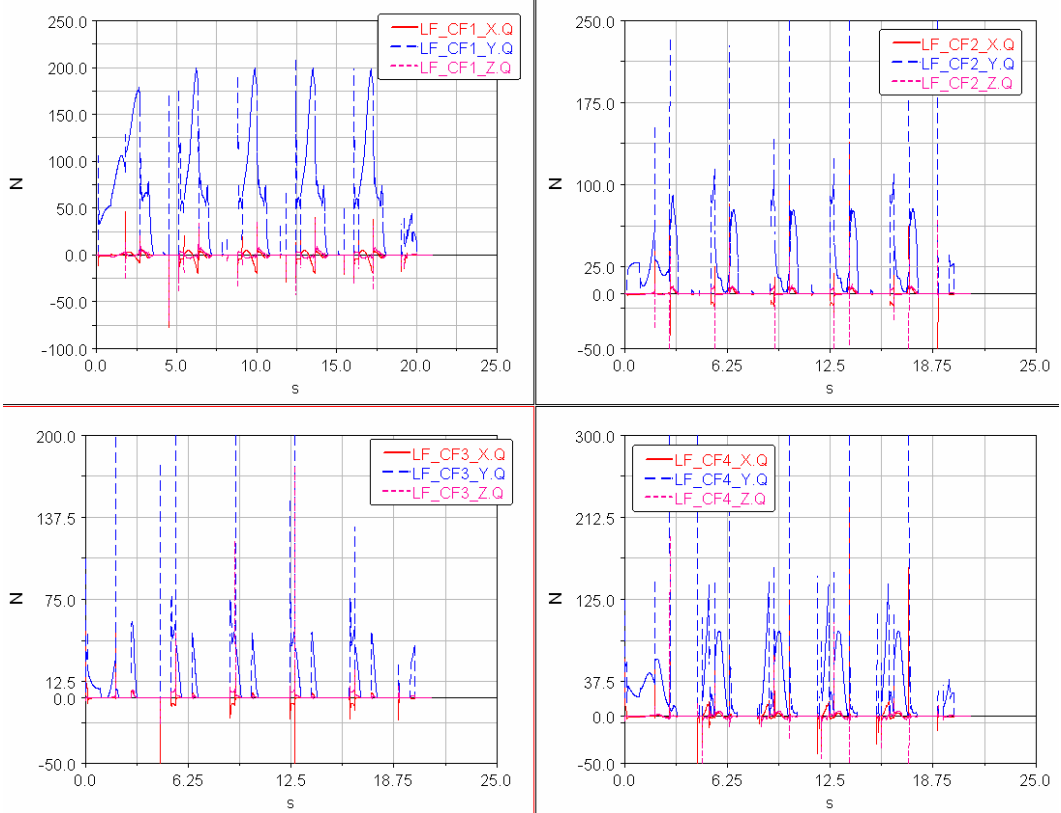
Şekil D.41 : 9. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri



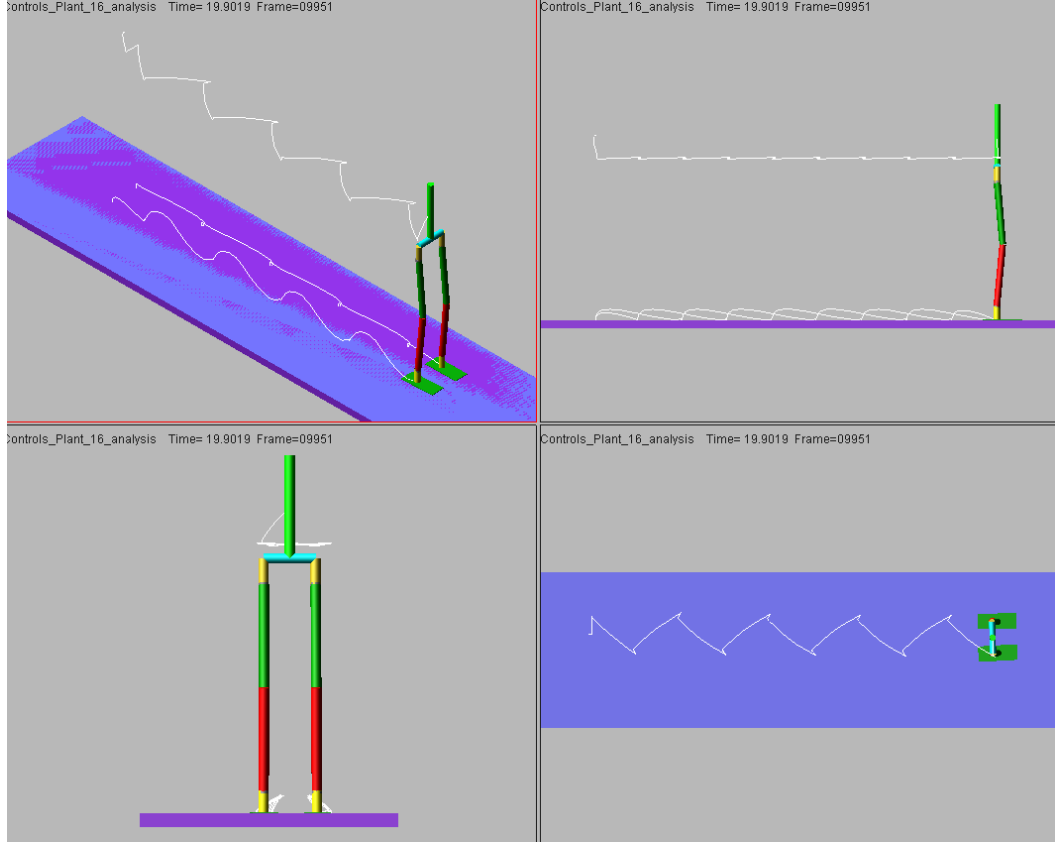
Şekil D.42 : 9. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil D.43 : 9. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

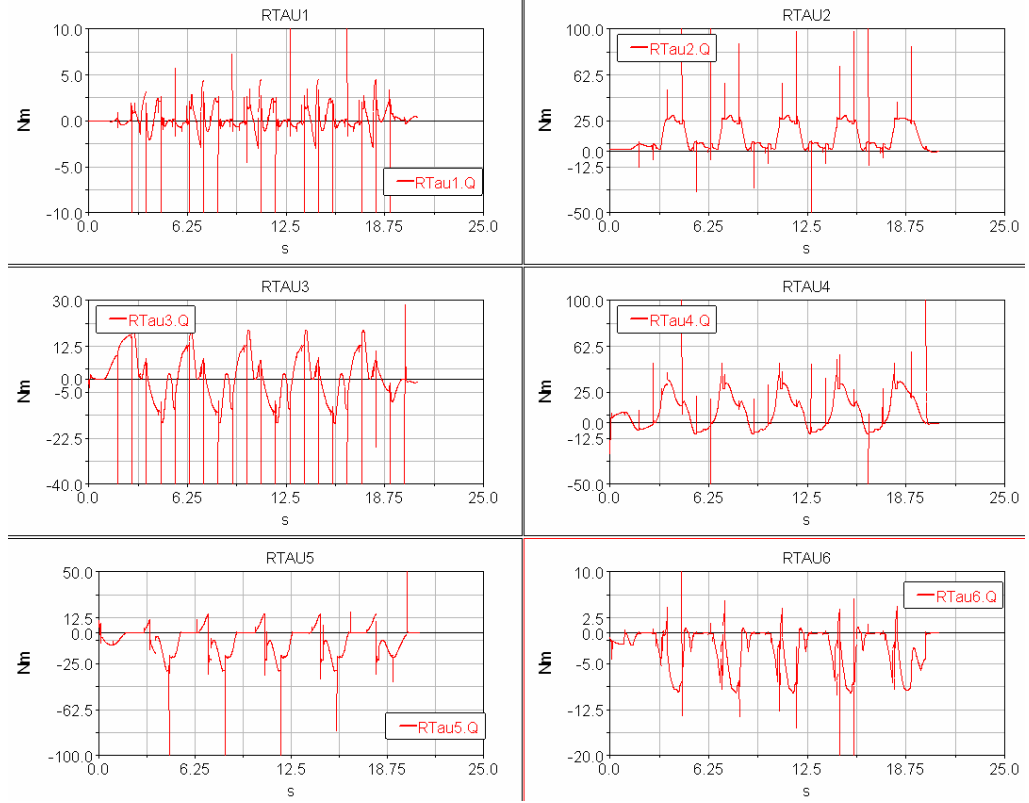


Şekil D.44 : 9. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

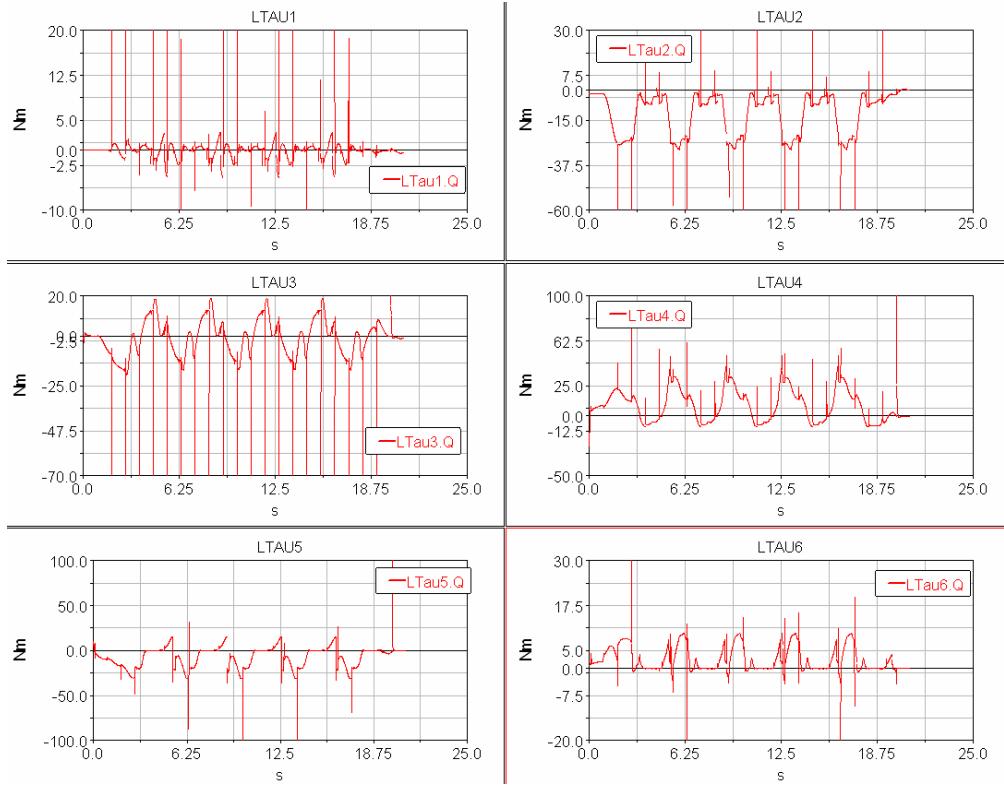


Şekil D.45 : 9. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri

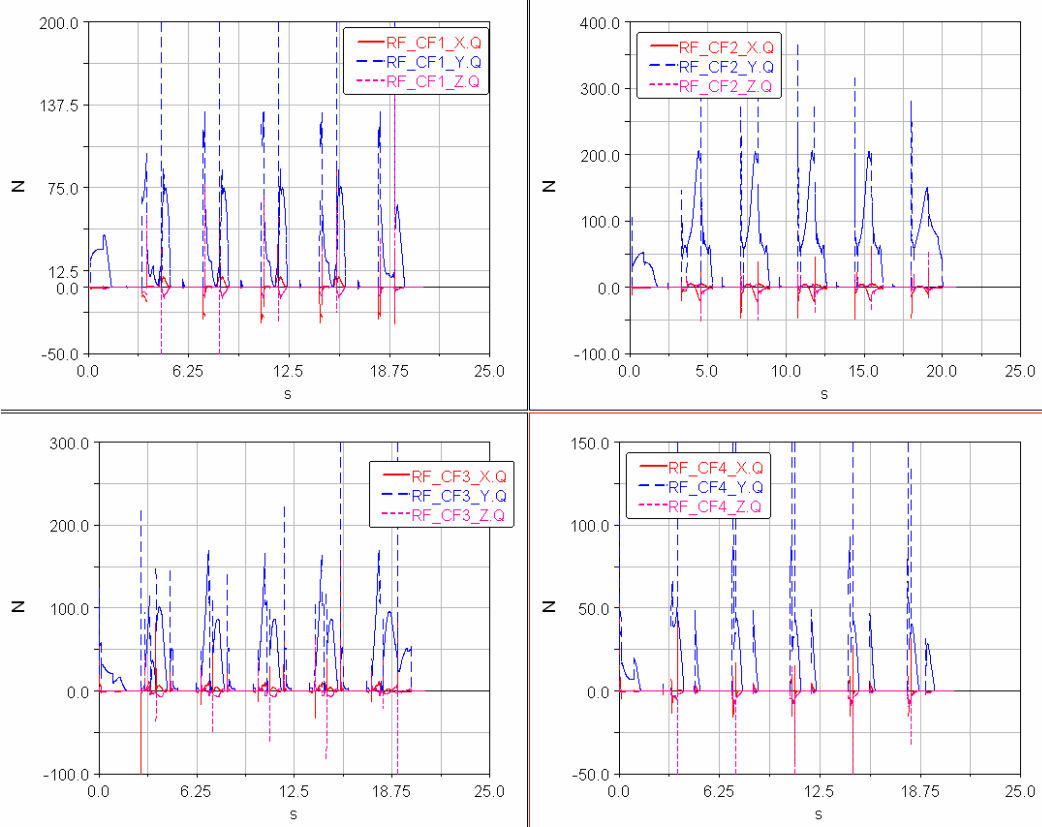
10. Yürüme Hareketi



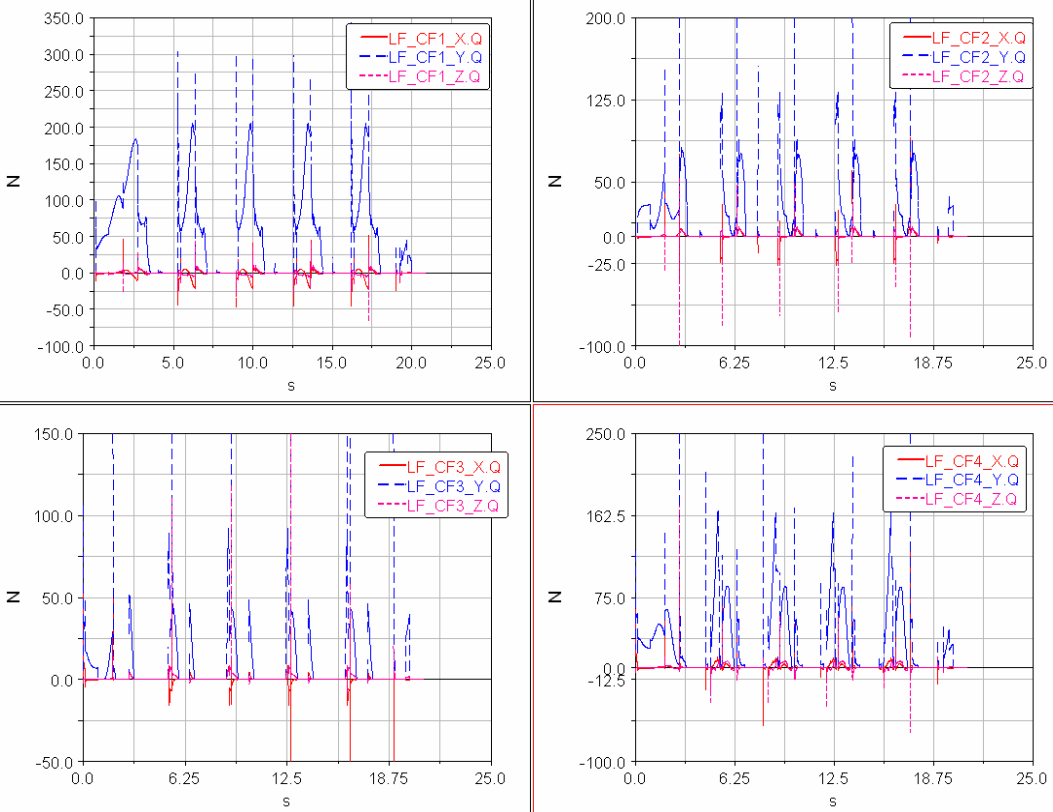
Şekil D.46 : 10. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri



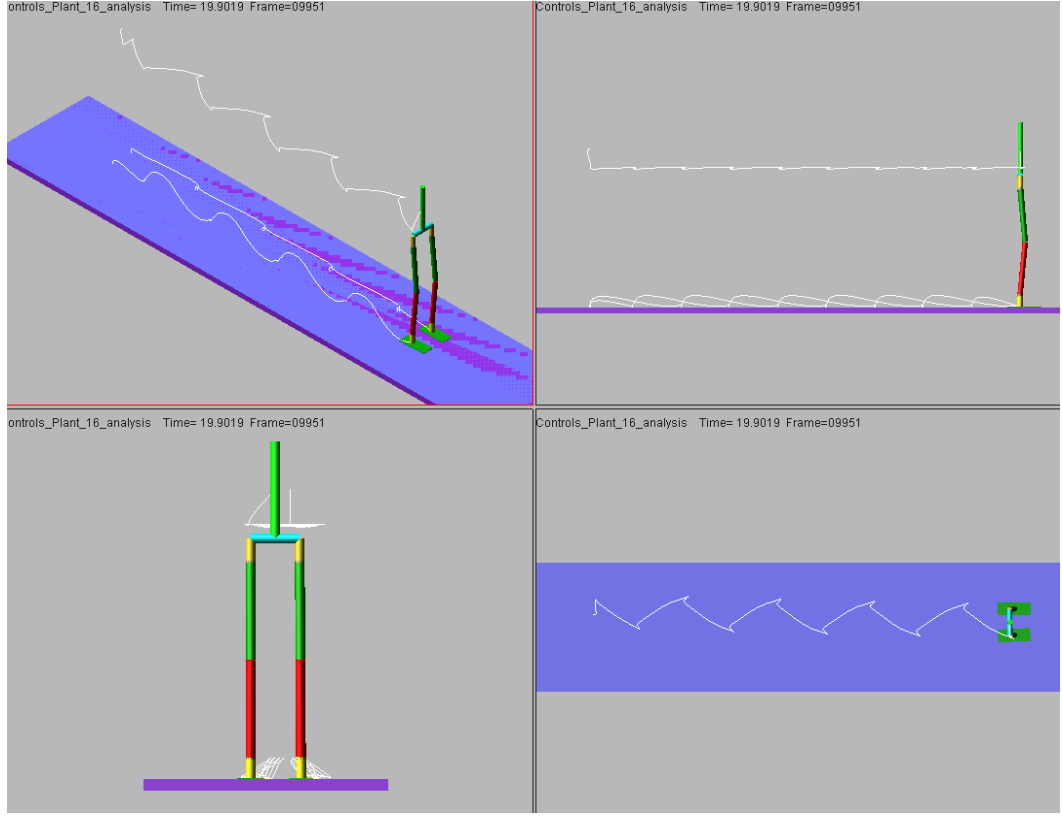
Şekil D.47 : 10. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil D.48 : 10. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

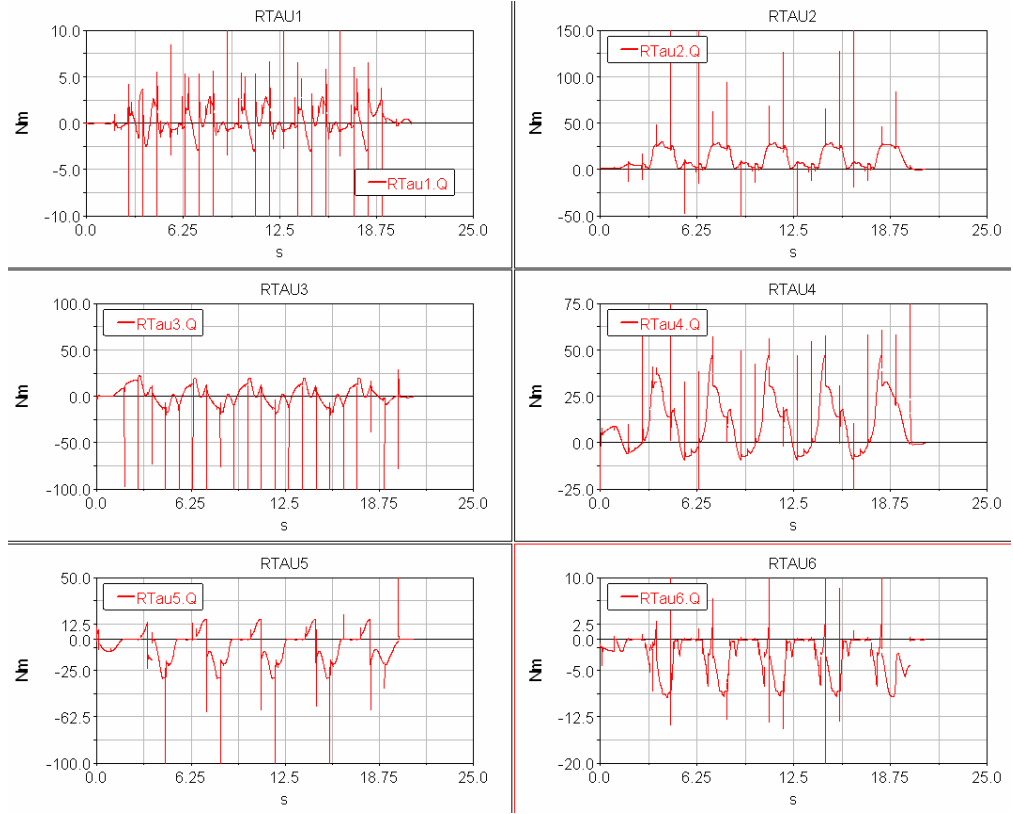


Şekil D.49 : 10. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

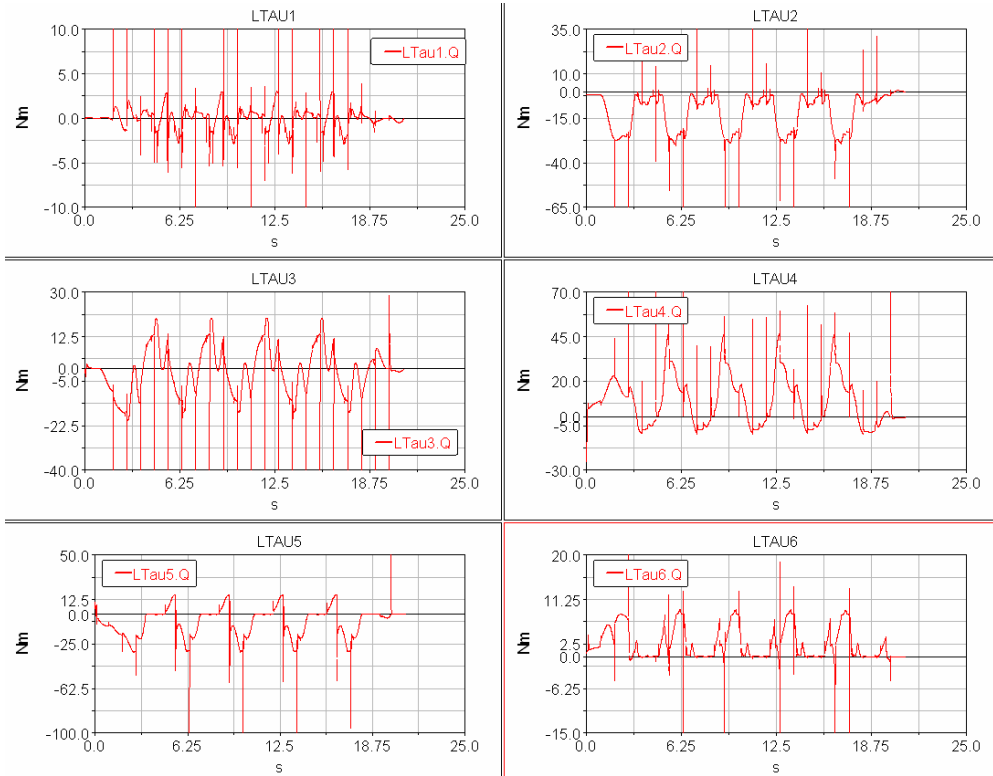


Şekil D.50 : 10. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri

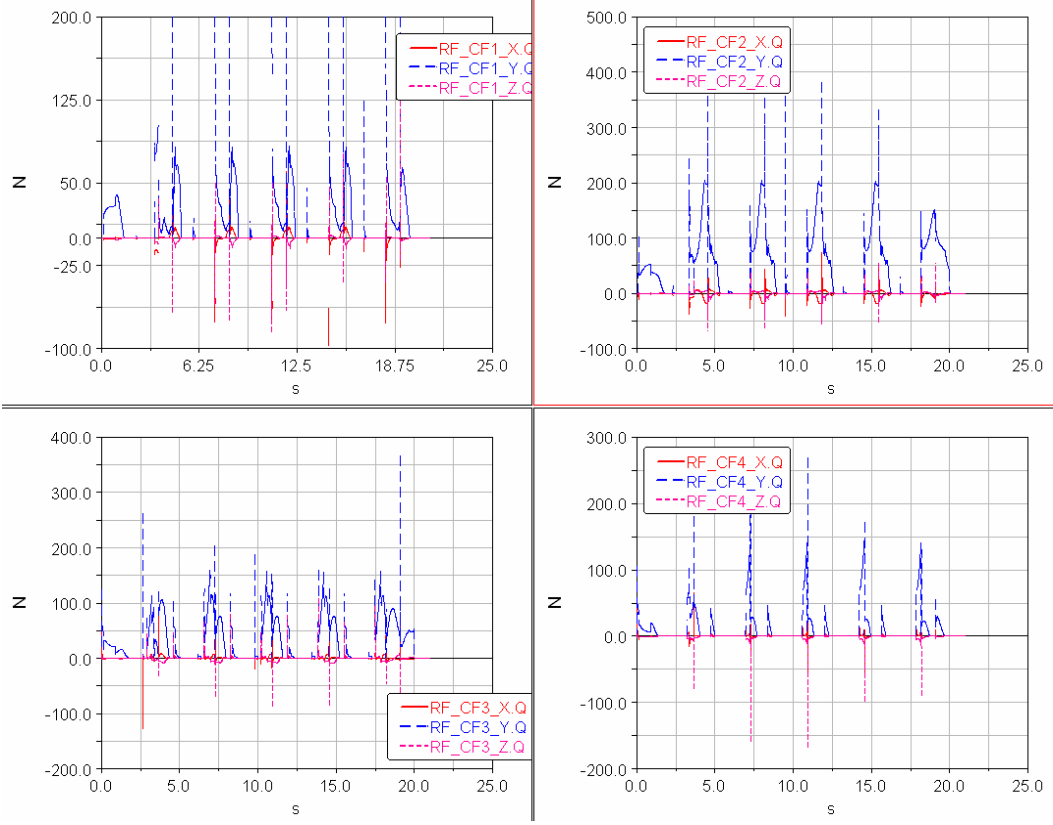
11.Yürüme Hareketi



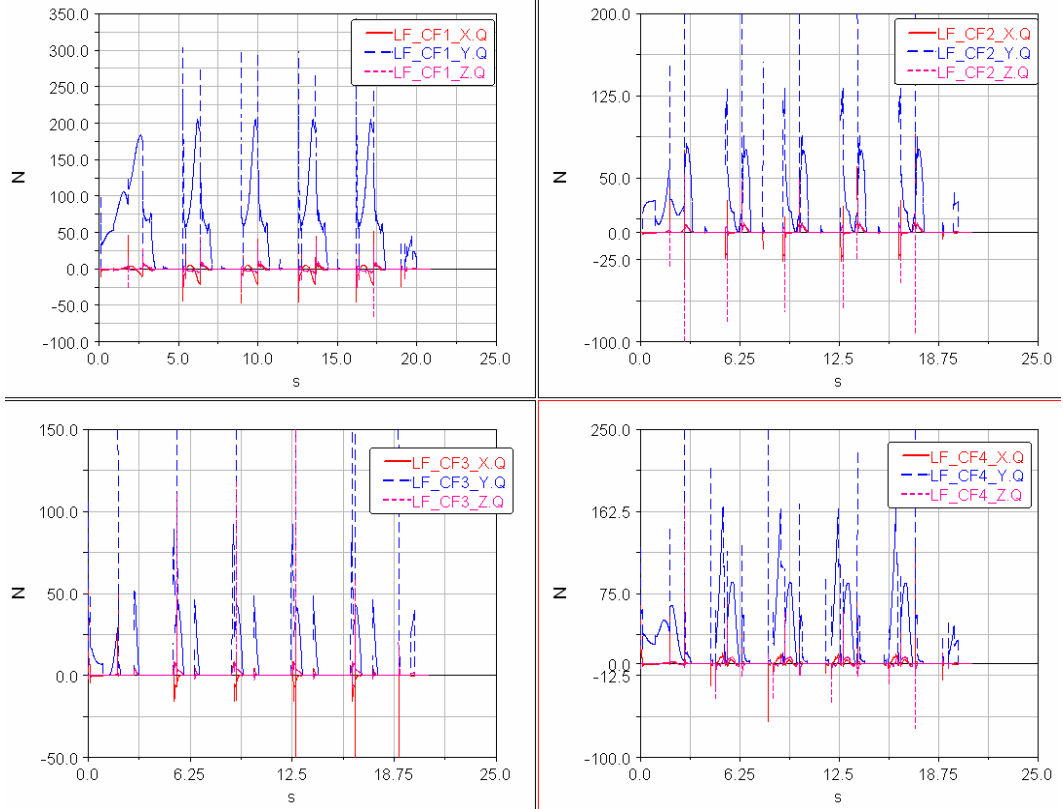
Şekil D.51 : 11. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri



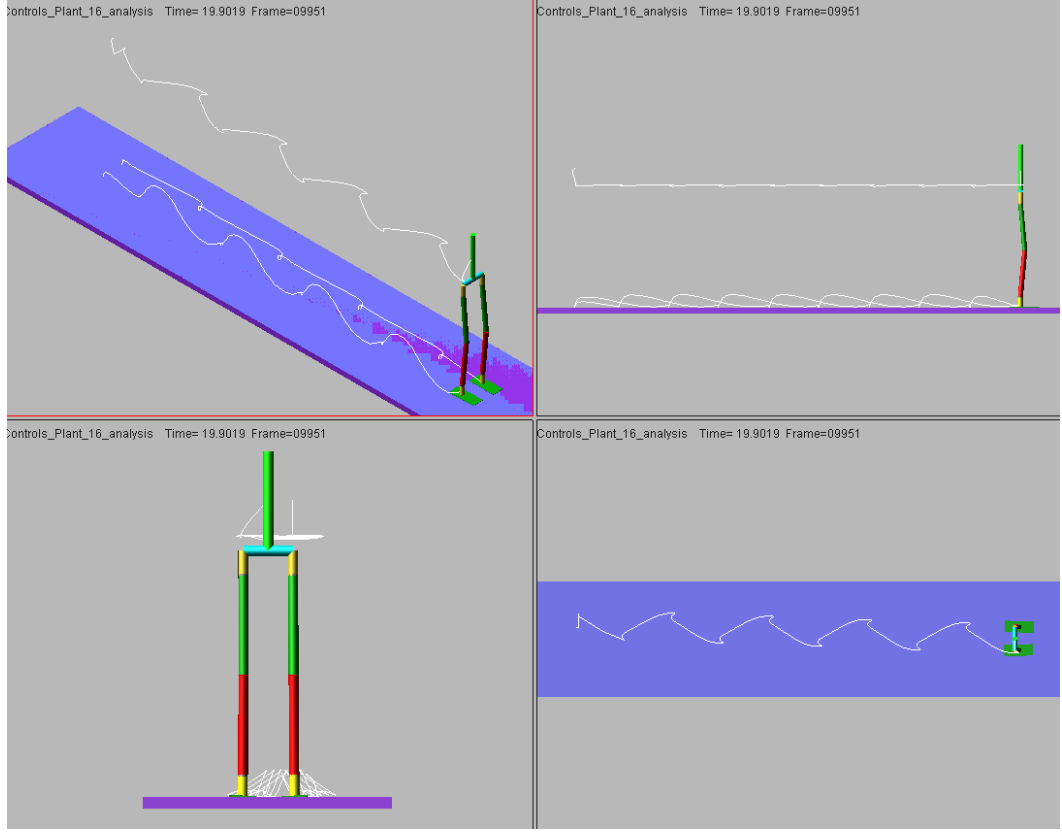
Şekil D.52 : 11. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil D.53 : 11. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

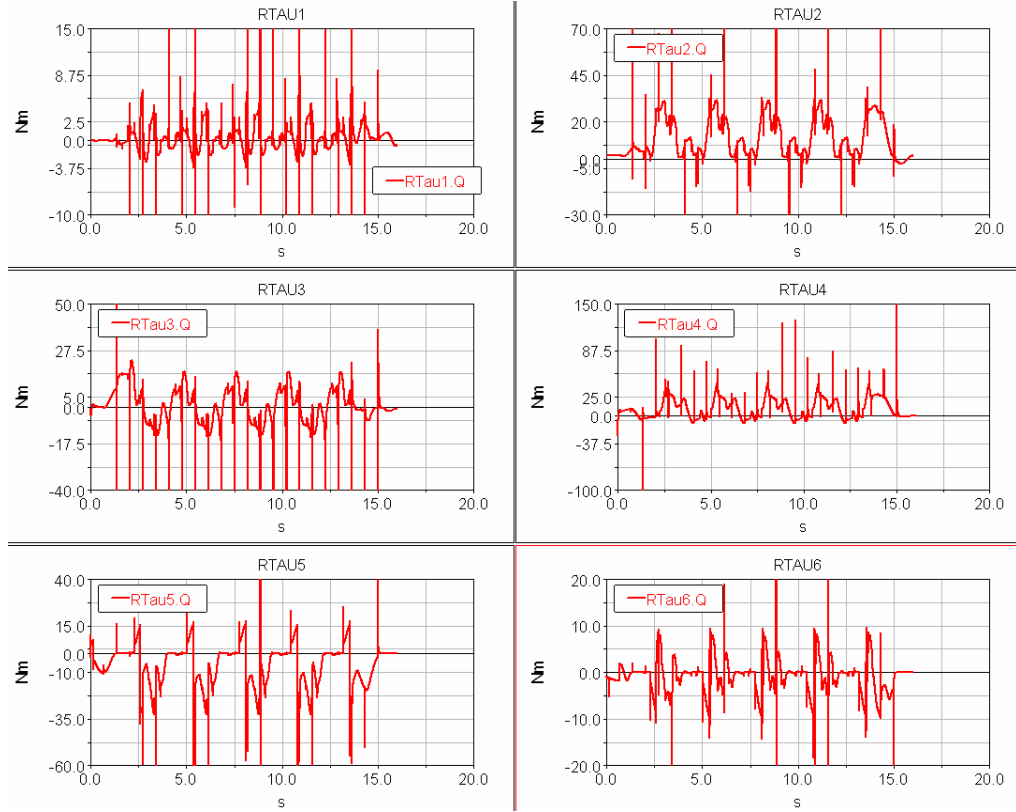


Şekil D.54 : 11. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri

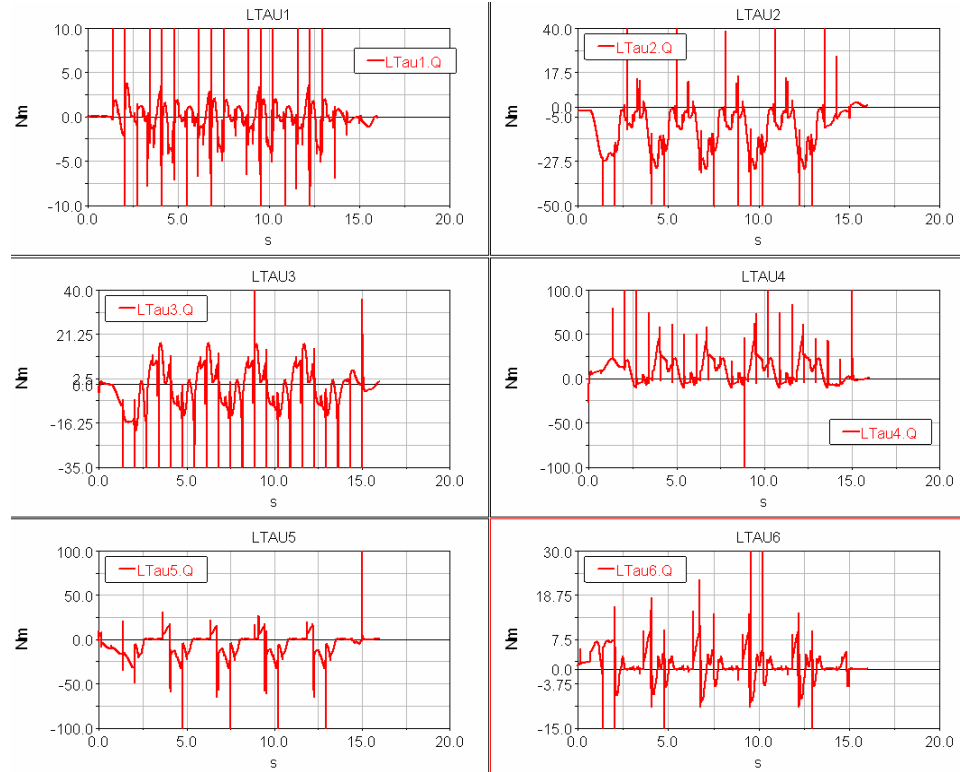


Şekil D.55 : 11. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri

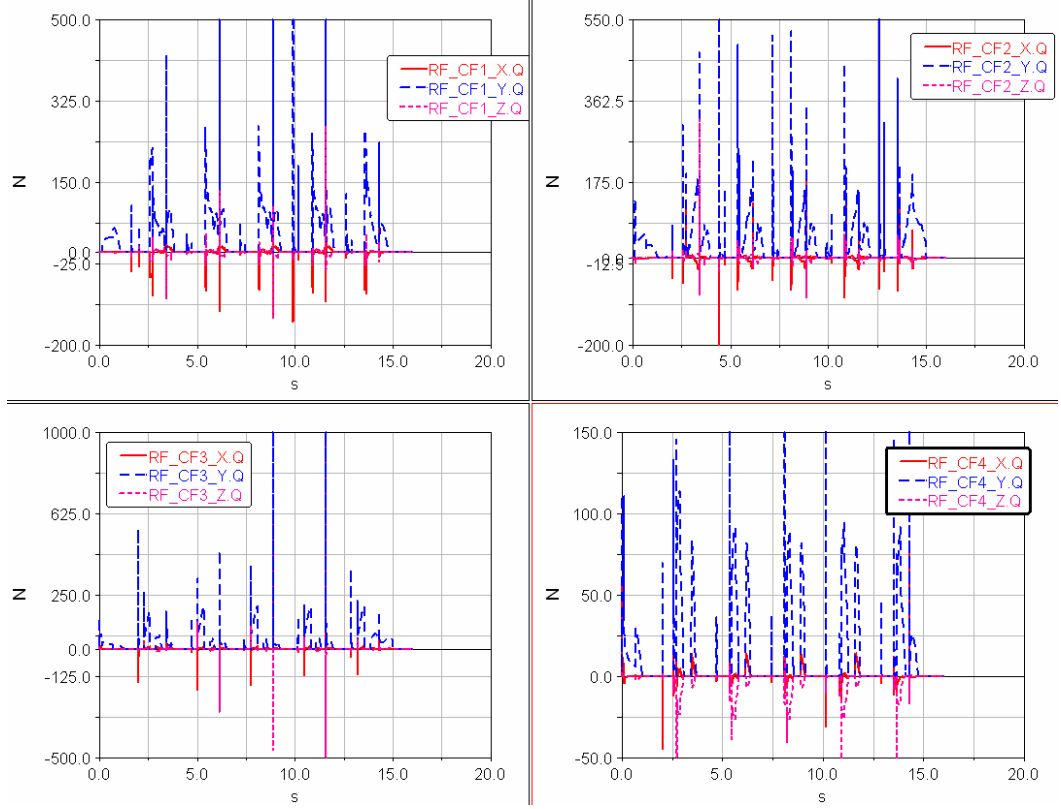
12. Yürüme Hareketi



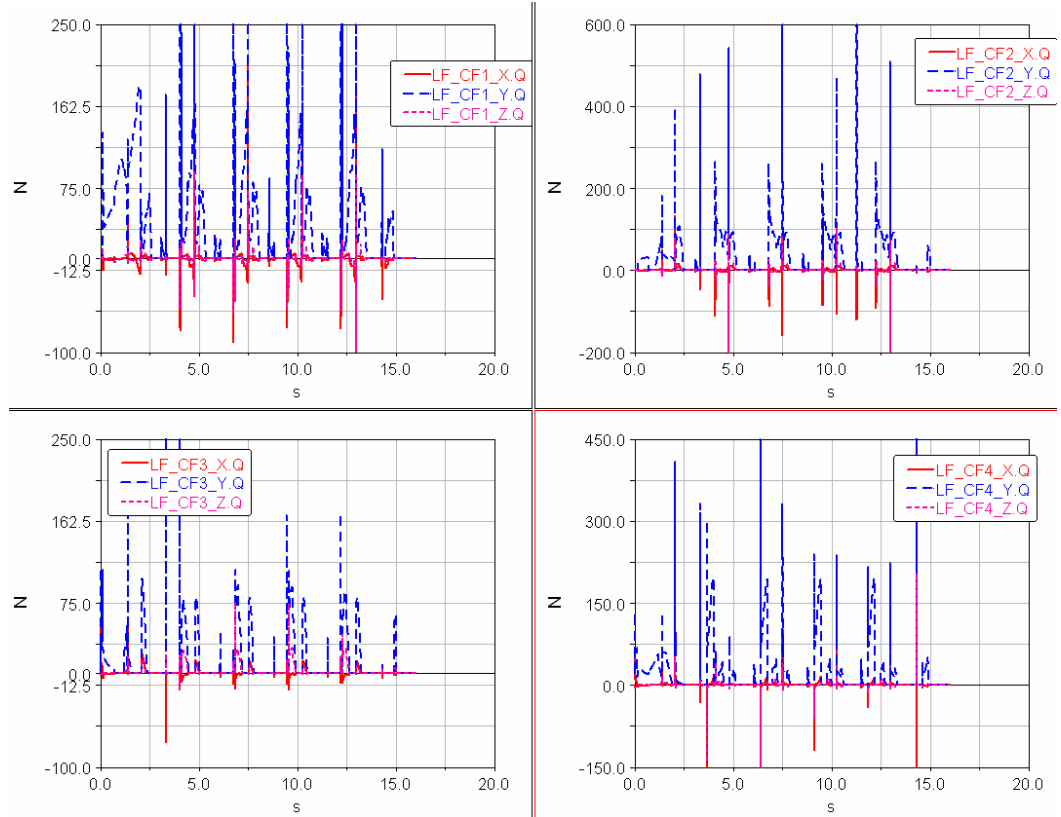
Şekil D.56 : 12. Yürüme Hareketi Sağ Bacak Eklem Momentleri



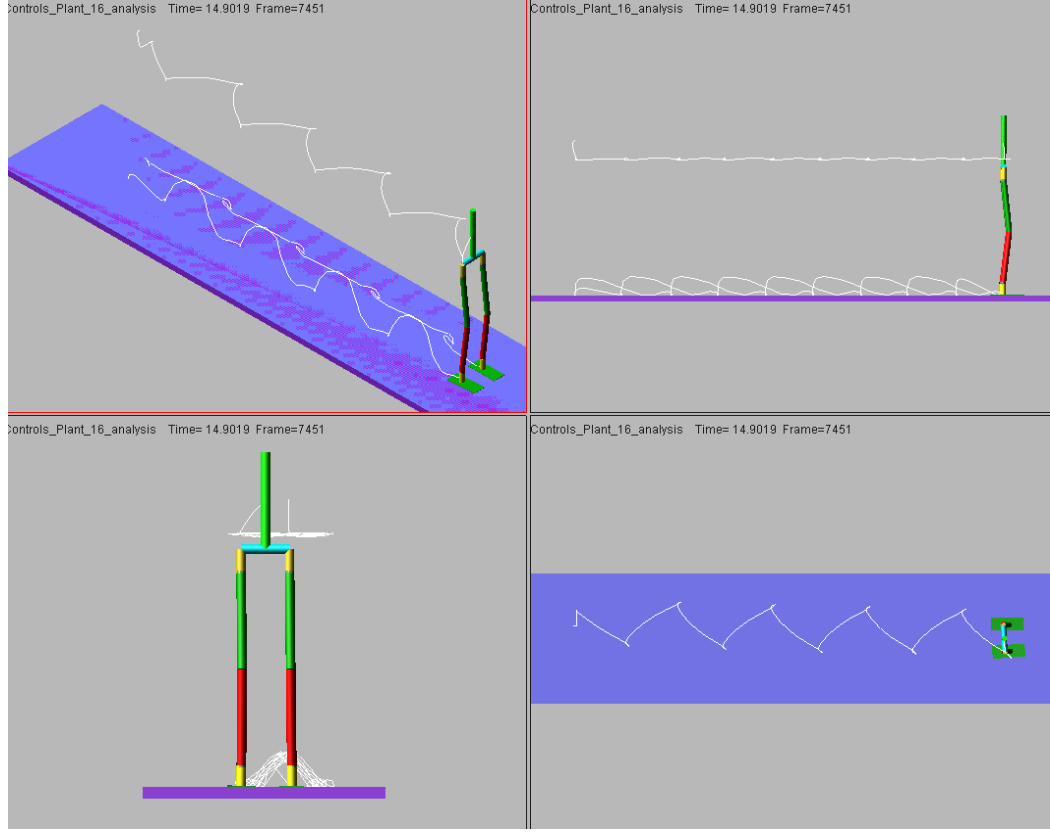
Şekil D.57 : 12. Yürüme Hareketi Sol Bacak Eklem Momentleri



Şekil D.58 : 12. Yürüme Hareketi Sağ Ayak Yer Tepki Kuvvetleri



Şekil D.59 : 12. Yürüme Hareketi Sol Ayak Yer Tepki Kuvvetleri



Şekil D.60 : 12. Yürüme Hareketi Gövde ve Ayak Yörüngeleri

ÖZGEÇMİŞ

Mesut ACAR 1980 yılında ANKARA’ da dünyaya geldi. Orta Öğrenimini Keçiören Fatih Sultan Mehmet Lisesi'nde tamamladı. 1998 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği bölümünden 2004 yılında mezun oldu ve aynı yıl Sistem Dinamiği ve Kontrol Programı’ nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2005 yılında İTÜ Merkez Laboratuvarı’ nda uzman olarak görev yapan Mesut ACAR 2006 yılı başında İTÜ Makina Fakültesi Makina Teorisi Sistem Dinamiği ve Kontrol Anabilim Dalı Otomatik Kontrol Laboratuvarı’ na araştırma görevlisi olarak atandı. Halen bu görevine devam etmektedir.