

# SURALP-L – İnsansı Robot Platformu Bacak Modülü

*Kemalettin Erbatır<sup>1</sup>, Utku Seven<sup>2</sup>, Evrim Taşkıran<sup>3</sup>, Özer Koca<sup>4</sup>,  
Güllü Kızıltaş<sup>5</sup>, Mustafa Ünel<sup>6</sup>, Asif Sabanovic<sup>7</sup> ve Ahmet Onat<sup>8</sup>*

Mekatronik Programı, Sabancı Üniversitesi  
Orhanlı-Tuzla, 34956 İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup>erbatır@sabanciuniv.edu, <sup>2</sup>utkuseven@su.sabanciuniv.edu, <sup>3</sup>evrimt@su.sabanciuniv.edu

<sup>4</sup>ozerk@su.sabanciuniv.edu, <sup>5</sup>gkiziltas@sabanciuniv.edu, <sup>6</sup>munel@sabanciuniv.edu

<sup>7</sup>asif@sabanciuniv.edu, <sup>8</sup>onats@sabanciuniv.edu

## Özetçe

SURALP, Sabancı Üniversitesi laboratuvarlarında tasarlanmış ve imal edilmekte olan yeni bir insansı robot platformudur. İmalatı tamamlandığında; bacaklarında, kollarında, boynunda ve gövdesinde toplamda 30 serbestlik derecesine sahip olması planlanmaktadır. Şu ana kadar bu robotun bacak modülü olan, 12 serbestlik derecesine sahip SURALP-L'nin üretimi tamamlanmıştır. Bu bildiri, bacak modülünün ve tüm robotun tasarım esaslarını anlatmaktadır. Mekanik tasarım, tahrik mekanizmaları, algılayıcılar, kontrol donanımı ve algoritmaları ele alınmıştır. Tahrik sistemleri, DC motorlara bağlanmış kayış kasnak mekanizmaları ve Harmonic Drive redüktör ünitelerini içermektedir. Algılama sistemi, eklem motor kodlayıcıları, kuvvet/moment algılayıcıları ve atalet algılayıcılarından oluşmaktadır. Kontrol sisteminin ana kısmını, dSpace sayısal sinyal işleme modülü oluşturmaktadır. Robotun kararlı yürüyüşünü sağlamak amacıyla yumuşak yürüyüş referansları kullanılmıştır. Zemin darbe telafisi, erken basma referans yürüme iyileştirme, ayak yönelim kontrolü ve bağımsız eklem konum kontrolü kullanılan ana kontrol algoritmalarıdır. Bacak modülüyle elde edilen deney sonuçları bildirinin son bölümünde sunulmuştur.

## 1. Giriş

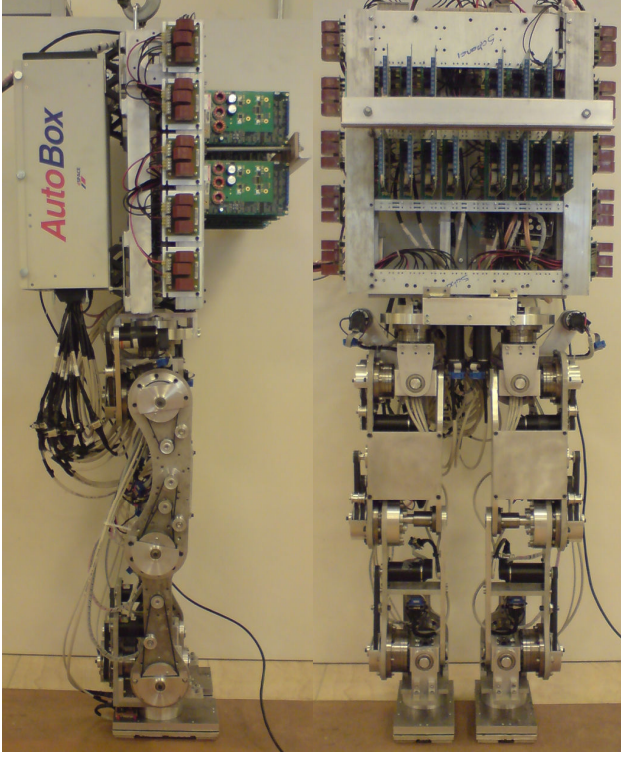
İki bacaklı insansı yapı, yaşadığımız ortama uyum sağlamak, belirlenmiş görevleri başarmak ve çeşitli sistemleri çalıştırmak için çok avantajlı bir modeldir. Bu sebeple iki bacaklı insansı yapı, son kırk yılda araştırmacılar ve sanayi tarafından oldukça rağbet gören bir model haline gelmiştir. Bu konuyla ilgili başarılı ve ses getiren projeler [1-10]'da sunulmuştur.

İnsansı robot alanındaki en önemli problemlerden biri kararlı yürüyüş elde edebilmektir. İnsansı yapının en büyük zorlukları, robotun doğrusal olmayan ve kararlaştırılması zor dinamiği ve eklemler arasındaki etkileşimdir [11, 12]. Bu zorluklar, düz olmayan yüzeyde yürüme sağlanmak istendiğinde katlanarak artmaktadır.

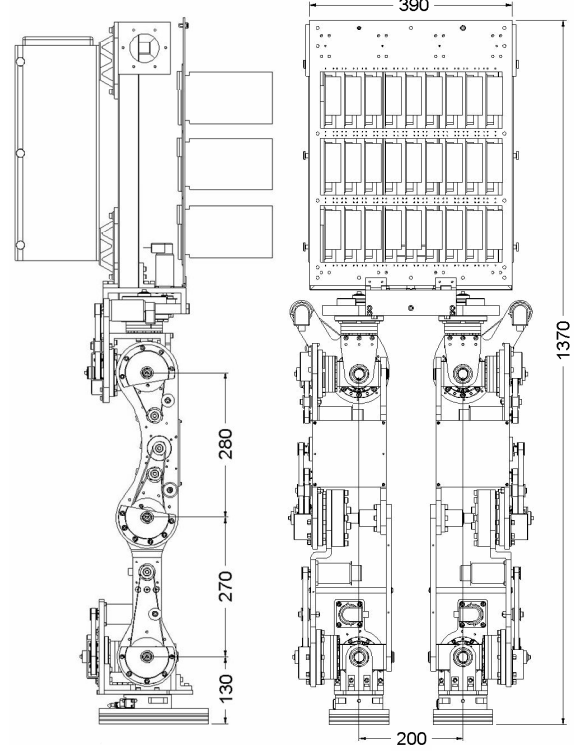
2006 yılında, Sabancı Üniversitesi'nde TÜBİTAK tarafından desteklenen bir proje kapsamında insansı robot araştırmaları başlamıştır. Araştırmanın ana hedefleri ise engebeli arazi üzerinde yürüyüş ve görsel destekli kuvvet kontrolü uygulayarak nesne hareketi sağlamaktır. Bu proje kapsamında insan boyutlarında bir test platformu olan SURALP (Sabancı Üniversitesi Robotik Araştırma Laboratuvarı Platformu) tasarlanmıştır. SURALP; kollarında, bacaklarında, boynunda ve gövdesinde olmak üzere toplamda 30 serbestlik derecesine sahiptir. Şu ana kadar bu tasarımın 12 serbestlik derecesine sahip bacak modülü olan SURALP-L imal edilmiş ve şu ana kadar gerçekleştirilen yürüyüş testlerinde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu bildiri, bacak modülünün mekanik tasarımı, algılayıcı geri besleme mekanizmaları ve kontrol sistemi özellikleri hakkında bilgi vermektedir.

Robotun tahrik sistemleri; DC motorlar, kayış kasnak mekanizmaları ve Harmonic Drive redüktörler kullanılarak oluşturulmuştur. Atalet ölçüm araçları, kuvvet/moment algılayıcıları ve artımlı motor kodlayıcılarından elde edilen veriler robotun algılayıcı geri beslemesinde kullanılmıştır. Veri elde edimi ve kontrol donanımı olarak dSpace sayısal sinyal işleme modülü seçilmiştir. Kontrol donanımı robotun sırtına monte edilmiştir. Güç kaynağı ve kullanıcı kontrol arayüzünü içeren bilgisayar ise robotun dışında bulunmaktadır. Kararlı yürüyüş elde etmek için yumuşak referans yörüngeleri elde edilmiş ve uygulanmıştır. Eklem referanslarını takip etmek amacıyla bağımsız PID kontrol algoritmalarından yararlanılmıştır. Planlanan ve gerçekleşen yürüyüş arasındaki beklenmeyen hataların telafisinde kuvvet/moment ve atalet algılayıcılarından elde edilen çıktıları kullanan kontrol algoritmaları devreye sokulmuştur. Bu kontrol algoritmaları zemin darbe telafisi, erken basma iyileştirme sistemi ve ayaklar için kullanılan yönelim kontrollerini içermektedir. Bu kontrol metodları uygulanarak elde edilen yürüme deneyi sonuçları ilgili bölümde sunulmuştur.

Bildirinin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2 robotun kinematik düzeni, hareket kabiliyeti ve mekanik sistem ölçüleri ile tahrik ve kuvvet aktarma mekanizmaları hakkında bilgi vermektedir. Bu bölümde ayrıca yapılan mekanik tasarım ve mukavemet analizleri de anlatılmaktadır. Algılayıcı sistemler



Şekil 1: SURALP-L, önden ve yandan görüşler



Şekil 2: SURALP-L boyutları

Bölüm 3'te detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bölüm 4, kontrol donanımı ve algoritmaları hakkında bilgi vermektedir. Bölüm 5, test platformunun bir parçası olan benzetim ve canlandırma ortamını açıklamaktadır. Elde edilen deney sonuçları Bölüm 6'da sunulmuştur. Bölüm 7'de yapılan çalışmadan çıkarılan ana sonuçlar ve geleceğe yönelik gerçekleştirilmesi planlanan işler anlatılmıştır.

## 2. Mekanik Tasarım

Kontrol donanımı sırtına monte edilmiş olan SURALP-L, insanı robot bacak modülünün imal edilmiş hali Şekil 1 ve 2'de gösterilmektedir. Modül insanla orantılı olarak tasarlanmış ve imal edilmiştir.

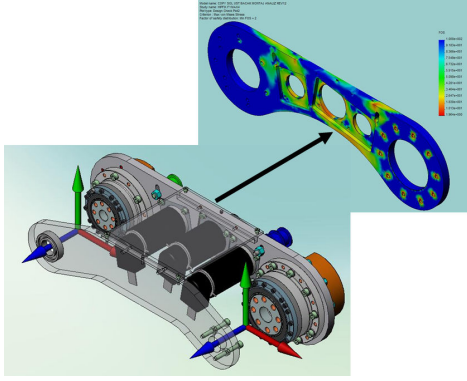
Bağ uzunlukları ve ağırlıkları Tablo 1'de verilmiştir. Kalça eklemi 3 ayrı ortogonal ve çakışık eksenli eklemden oluşmaktadır. Kinematik dizilime göre, diz eklemi kalça yunuslama ekleminin sonrasına yer almaktadır. Bilek eklemi ise 2 ayrı ortogonal çakışık eksenli eklemden oluşmaktadır. Bunlar, bilek yunuslama ve bilek yuvarlanma eklemleridir.

Uçak sanayinde kullanılan 7000 serisi alüminyum malzeme hafifliği ve yüksek mukavemeti sebebiyle ana üretim malzemesi olarak seçilmiştir. Ön tasarım tamamlandıktan sonra, Bölüm 5'te detaylı olarak anlatılan Newton-Euler yöntemine dayanan 3-B tam dinamik benzetim ve canlandırma çalışmaları yapılmıştır. Bu benzetimlerde [15]'teki referans yörünge oluşturma ve kontrol teknikleri uygulanmıştır. Bu benzetimlerin yardımıyla bağların iki ucundan maruz kaldıkları kuvvet ve moment vektörleri hesaplanmış ve kaydedilmiştir.

Tablo 1: Uzunluk ve Ağırlık Değişkenleri

Üst bacak uzunluğu	280mm
Alt bacak uzunluğu	270mm
Bilek-ayak altı uzaklığı	124mm
Ayak ölçüleri	210mm x 115mm
Robot ağırlığı	76 kg

Şekil 3'te bir taşıyıcı üst bacak plakasının iki ucuna koordinat eksen takımları yerleştirilmiş CAD modeli gösterilmektedir. Benzetim yardımıyla elde edilen kuvvet ve momentler bu koordinat eksen kuvvet ve momentleri girdi olarak kullanan bir katı modelleme ve analiz programı sayesinde parçaların sonlu elemanlar yöntemine dayalı mukavemet analizleri yapılmıştır. Bu sayede her taşıyıcı parçanın mukavemet bilgileri edinilmiş ve bu bilgiler ışığında bu parçaların kalınlık, bağ boyları gibi önemli geometrik özellikleri tayin edilmiştir. Şekil 3, ayrıca en çok deforme olması beklenen üst bacak ana taşıyıcı plakasının katı modelleme ve analiz programındaki halinden görünümünü sunmaktadır. Newton-Euler tabanlı dinamik benzetimler, eklemlerde kullanılan DC motor ve Harmonic Drive redüktör modüllerinin moment kapasiteleri ve dönüş hızları hakkında da tasarıma yönelik belirleyici bilgiler vermiştir. Motorlar ve Harmonic Drive redüktörler arasında hareket aktarımında kayış kasnak mekanizmaları kullanılmıştır. Böylece, çok küçük alanlarda çok yüksek çevrim oranları elde edilmiştir.



Şekil 3: Üst bacak ana plakası için sonlu eleman analiz penceresi

Tablo 2: Motor güçleri, çevrim oranları ve eklem limitleri

Eklem	Motor Gücü	Kasnak Oranı	HD Oranı	Eklem Limitleri (°)
Kalça-Sapma	90W	3	120	-50'den 90'a
Kalça-Yuvarlanma	150W	3	160	-31'den 23'e
Kalça-Yunuslama	150W	3	120	-128'den 43'e
Diz 1	150W	3	160	-97'den 135'e
Diz 2	150W			
Bilek-Yunuslama	150W	3	100	-115'den 23'e
Bilek-Yuvarlanma	150W	3	120	-19'dan 31'e

Tablo 3: SURALP-L'deki Algılayıcılar

Eklem	Algılayıcı	Kanal Sayısı	Erimi
Eklem	Artımlı optik kodlayıcılar	Eklem başına	500 darbe/devir
Bilek	F/T algılayıcısı	6 kanal	± 660 N (x, y-eksenleri) ± 1980 N (z-ekseni) ± 60 Nm (bütün eksenler)
Ayak	FSR	4 kanal	0-250 N
Gövde	İvmeölçer	3 kanal	± 2 G
	Eğimölçer	2 kanal	± 30 derece
	Hız ölçümlü jiroskop	3 kanal	± 150 derece/s

Diz eklemi dışındaki tüm eklemler birer DC motor, diz eklemi ise yüksek moment gereksinimi yüzünden çift DC motorla tahrik edilmektedir. Tablo 2, kullanılan motor güçlerini, kayış kasnak ve Harmonic Drive redüktörlerin çevrim oranlarını göstermektedir. Bu tabloda ayrıca eklem limitleri sunulmuştur.

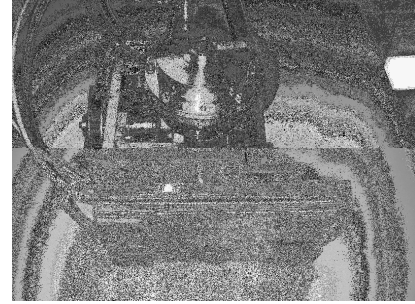
### 3. Algılayıcılar

SURALP-L'nin algılama sistemi, aşağıdaki gibi üç bölüme ayrılabilir: i) motor açılma konumlarını ölçen kodlayıcılar, ii) kuvvet/moment algılayıcıları, iii) atalet algılayıcıları. Bunlara ek

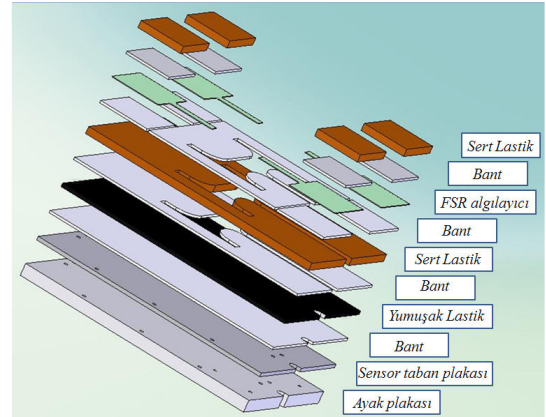
olarak, iki adet CCD kamera robotun tüm vücudu tamamlandığında sisteme eklenmiş olacaktır.

Motor konumları 500 ppr'ye sahip olan optik artımlı kodlayıcılar ile ölçülmektedir.

İki çeşit kuvvet/moment algılayıcısı kullanılmıştır. Bunlardan bir tanesi ayak bileğinde konumlandırılmış olan 6 eksen kuvvet/moment algılayıcısıdır. Diğer bir kuvvet/moment algılayıcısı ise FSR (Kuvvet Algılayıcı Direnç) kullanılarak elde edilmiştir. FSR, etkin yüzeyine artan bir kuvvet uygulandığında direnç değerinde düşüş görülen, polimerden imal edilmiş bir aygıttır [13]. Kullanılan algılayıcıların boyutları 40 mm x 40 mm x 0.43 mm olup ağırlığı ihmal edilebilir. Algılayıcının ince yapısı, monte edildiğinde ayak yüksekliğinde gözle görünür bir artışa neden olmamakta ve büyük temas alanı da geniş çapta kuvvet ölçümüne olanak vermektedir. Kuvvet direnç eğrisi doğrusal olmayan bir yapıdadır ve anlatılan tasarımda FSR'lerin son uçlarında ölçülen voltaj değerlerinden kuvvet değerlerini elde etmek için doğrusal bir yakınsama kullanılmıştır. Şekil 4, robot ayağının altına yerleştirilmiş dört FSR algılayıcısının yerlerini göstermektedir. FSR'lerle birlikte birçok malzemeden oluşan ayak tabanı katmanları Şekil 5'te gösterilmiştir. Dört ayak köşesinde kuvvet ölçümü yapılması bize dokunmayla ilgili zengin bir bilgi sunmaktadır. Bilek momentleri ve dikey yöndeki toplam zemin etki kuvveti bu algılayıcı sistemle ölçülebilir ve bazı durumlarda da 6 eksen kuvvet/moment algılayıcısı yerine kullanılabilir.



Şekil 4: FSR'a dayalı ayak algılayıcısı.

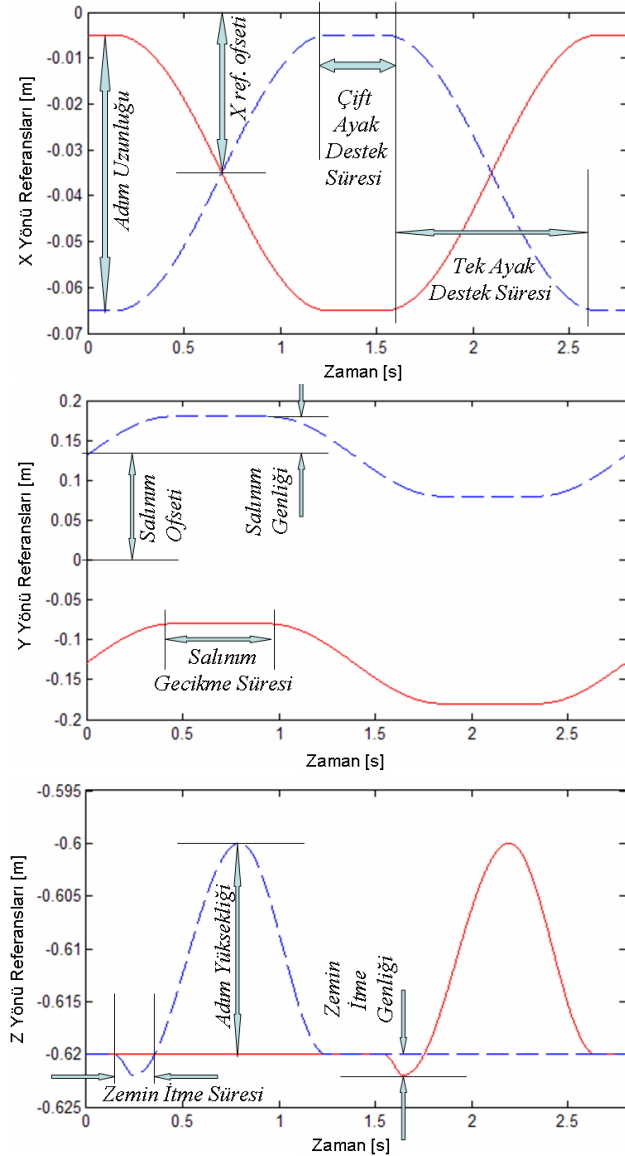


Şekil 5: FSR algılayıcılı ayak algılayıcısının katmanları.

Robot ayrıca gövdesine yerleştirilmiş bir hız ölçümlü jiroskop, bir eğimölçer ve bir doğrusal ivmeölçere de sahiptir. Bu algılayıcılar, konumları ve çalışma aralıkları ile birlikte Tablo 3'te listelenmiştir.

#### 4. Kontrolör Donanımı ve Algoritmaları

Eklem konum referansları, dünya koordinat sisteminde tanımlanmış Kartezyen ayak referanslarından ters kinematik kullanılarak oluşturulmaktadır. Ayakların konum referansları Şekil 6'da gösterilmektedir. Ters kinematik işlemde kullanılan ayak yönelim referansları sabitlenmiş ve ayakların robot gövdesine paralel olduğu düşünülerek hesaplanmıştır. Bağımsız eklem PID kontrolörleri kullanılmış ve kontrolör katsayıları deneme yanılma yoluyla elde edilmiştir. Kararlı bir yürüyüş için buna ek olarak aşağıdaki kontrol teknikleri uygulanmıştır.



Şekil 6 Robot gövdesine konumlandırılmış koordinat eksenine göre ifade edilen ayak Kartezyen referans yörüngeleri. (Kesiksiz eğriler sağ bacağı, kesikli çizgiler ise sol ayağı ifade etmektedir.)

#### 4.1. Ayak yönelim kontrolü

[6]'da, ayak bilek eklemleri için yönelim kontrolörleri sunulmuştur. Bu yaklaşım, ayak bileklerinde dik olarak kesişen eklem eksenlerine sahip iki eklem olduğunu varsaymaktadır. Bu yöntem, eklem açısı referansını ayağın yere temas ettiği anda zemine paralel kalmasını sağlayacak şekilde değiştirmektedir.

[6]'daki referans değiştirme yönteminde, ayak üzerindeki zemin temas momentlerine birinci derece bir süzgeç uygulanmaktadır. Bu yöntem, bizim kontrol sistemimiz için benimsemiştir. Ayak bileğinin yuvarlanma eksenini için aşağıdaki Laplace domeninde tanımlanmış referans değiştirme yöntemini kullanmaktayız.

$$\bar{\theta}_{pitch}(s) = \theta_{pitch}(s) + \frac{K_{pitch}}{s + \lambda_{pitch}} \left( T_{pitch}(s) - \frac{1}{s} T_{pitch\ offset} \right) \quad (1)$$

Bu eşitlikte  $s$  Laplace değişkenidir.  $\theta_{pitch}$ , RAM referans girdisi ile ters kinematikten hesaplanmış olan yunuslama eklem referans açısı,  $\bar{\theta}_{pitch}$  ise referans değiştirme yöntemi uygulandıktan sonraki referans açısıdır.  $T_{pitch}$ , ayağın zemine olan etkileşiminden kaynaklanan yunuslama eksenini etrafındaki momenttir.  $T_{pitch\ offset}$  ise robotun ayak uçlarının aynı hizaya getirilmesi sonucu, robot dik dururken okunan yunuslama eksenini moment değeridir.  $T_{pitch}$  ayak bileklerine yerleştirilmiş olan moment algılayıcıları veya ayak köşelerindeki kuvvet algılayıcıları ile ölçülmektedir.  $K_{pitch}$  ve  $\lambda_{pitch}$  deneme yanılma yoluyla belirlenmiş alçak geçiren süzgeç sabitleridir. Sayısal uygulamada, (1)'deki Laplace domeni transfer fonksiyonu bir fark denlemi ile yakınsanmıştır. Fark denlemi, Tustin yakınsama tekniği ile elde edilmektedir. Ayak bileği yuvarlanma eklem referansı değişikliği (1)'dekine benzerdir:

$$\bar{\theta}_{roll}(s) = \theta_{roll}(s) + \frac{K_{roll}}{s + \lambda_{roll}} T_{roll}(s) \quad (2)$$

Ayak sadece bir köşesi veya kenarından zemine temas halinde iken bir moment ortaya çıkar ve (1) ve (2)'nin uygulanmasıyla eklem açısı referansları, ayak yönelimini zemine paralel olacak şekilde ayarlamak için ayak bileğinin çevrilmesini sağlayacak şekilde değiştirilmektedir.

#### 4.2. Zemin darbe telafisi:

Kararlı bir yürüyüş elde etmedeki bir diğer önemli sorun da salınan ayağın inişi sırasında ortaya çıkan darbedir. Çözüm olarak, [8] şok emici kontrol yöntemini önermektedir. Bu yöntem, salınan ayağın planlanandan erken bir zamanda iniş yaptığında etkinleştirilmektedir ve kalça ve ayak bileği arasında sanal bir kütle-yay-sönümleyici sisteminin konumlandırıldığı düşünülmektedir. Bu fikirden esinlenerek, kalça ve ayak tabanı arasındaki uzaklığı değiştirmek için aşağıdaki ikinci derece denklem oluşturulmuştur:

$$\bar{l}(s) = l(s) - \frac{1}{m_l s^2 + b_l s + k_l} F_z(s) \quad (3)$$

(3)'te  $l$ , Kartezyen ayak referans yörüngelerinden elde edilmiş kalça ve ayak tabanı arasındaki uzaklığı simgelemektedir.  $\bar{l}$  ise bu uzaklığın şok emici aracılığı ile değiştirilmiş halidir.  $F_z$  ayağa etkileyen zemin etkileşim kuvvetinin  $z$  yönü bileşenidir. Bu kuvveti, ayak tabanına yerleştirilmiş kuvvet algılayıcıları

ölçmektedir.  $m_l$ ,  $b_l$  ve  $k_l$  sırasıyla, (3)'te tanımlanmış olan mekanik empedans denkleminin ağırlık, sönümleyici ve katılık değişkenleridir. Darbe telafi etme yöntemimiz, ayakların sadece erken basması durumunda değil, her basmada tetiklenmektedir. Kontrol tasarımcısı tarafından tanımlanan belirli bir zaman sonunda işlevini yitirmektedir. Çalışmalarımızda bu kontrol her adımda 0.7 saniyelik bir zaman süresince etkinleştirilmektedir. Ancak, bu süre sonunda kalça ve ayak tabanı arasındaki uzaklık asıl değerinden farklıdır. Bu uzaklığı, referans oluşturma aşamasında planlanmış olan değerine getirebilmek için, darbe telafi evresinin sonunda aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır:

$$\bar{l}(t) = l(t) - 0.5(l(t_0) - \bar{l}(t_0))(1 + \cos((t_0 - t)\omega_{return})). \quad (4)$$

$t_0$  darbe telafi evresinin sonundaki zaman parametresidir. (4) kullanılarak,  $\bar{l}$  değeri darbe telafi evresinin son  $\bar{l}$  değeri ile başlayarak, yumuşak bir geçişle asıl referans değeri olan  $l$ 'ye geri döner.  $\omega_{return}$ ,  $\bar{l}$ 'den  $l$ 'ye olan bu dönüşün hızını belirleyen değişkendir. (1) ve (2)'de olduğu gibi, (3) ve (4) için de sürekli eşitlikler için Tustin yakınsaması elde edilmiş ve kullanılmıştır.

Referans değişikliği kanunları (1), (2), (3) ve (4) robotun iki bacağına da bağımsız bir şekilde uygulanmaktadır.

#### 4.3. Erken basma referans iyileştirmesi:

Salınan ayağın yere erken basmasının yol açtığı en önemli sorunlardan biri; planlandığının aksine çift ayak destek safhasından önce basıldığına, ayağın ileriye olan hareketine devam etmesidir. Şekil 6'da gösterilen x yönü ayak referansları incelendiğinde, diğer ayağın (basması planlanan destek ayağı) aynı süre içerisinde gövde bazlı bir koordinat sisteminde geriye doğru hareket ettiği görülmektedir. Bu yüzden; zemindeki iki ayak, robot gövdesini iki farklı yönde itirmeye çalışmaktadır. Bu durumda ayaklar kayacak, robot dönecek ve büyük ihtimalle de dengesini kaybedecektir. Bu gibi bir sorunu önlemek için, Şekil 6'daki x yönü referansları, erken basma durumu için yenilenmiştir. Spesifik olarak, bu düzeltme ayakların x yönü referanslarını erken basma anındaki değerlerinde sabitlemektedir. Bu referanslar, bir sonraki yürüme evresine kadar sabit tutulmakta ve planlanan x yönü referansları o değere ulaştığında, o sabit değerden tekrar başlamaktadır.

Şekil. 7'de kontrol yöntemleri ve kullanılan algılayıcılar öbek şeması şeklinde gösterilmiştir. Bu bölümde anlatılan kontrollerin uygulandığı deney sonuçları Bölüm 6'da sunulmuştur.

### 5. Benzetim ve Canlandırma Ortamı

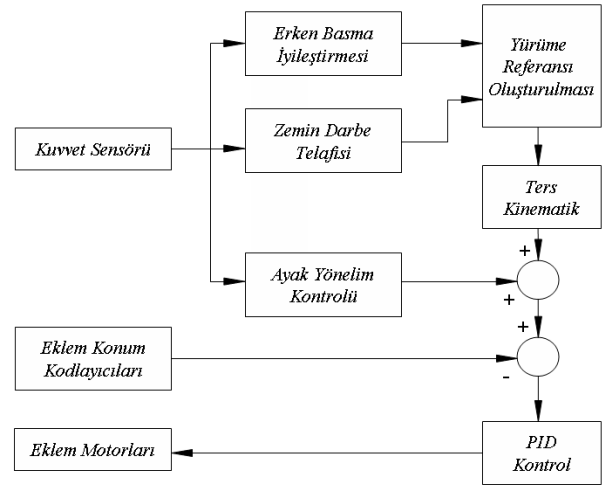
Araştırma platformunun bir parçası olarak bir benzetim ve canlandırma ortamı da kullanılmıştır. Robotun 3-B tam dinamik benzetim modeli [14]'de kullanılan modele benzemektedir. Zemin teması, uyumlu ve ceza tabanlı bir teknik yardımıyla modellenmiştir. Benzetim algoritması ve temas modelinin detayları [15]'te verilmiştir. Bu benzetim sistemi, Bölüm 2'de anlatılan mekanik tasarım prosedüründe kullanılmıştır. Bunun yanı sıra; bir önceki bölümde tanımlanan kontrol algoritmalarını geliştirme ve test etme aşamalarında da bu benzetim modelinden yoğun biçimde faydalanılmıştır. Canlandırma penceresinin bir görünümü de Şekil 8'de sunulmuştur.

### 6. Deney Sonuçları

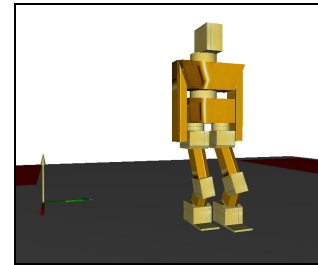
Bölüm 4'te anlatılan kontrol yöntemleri SURALP-L ile yürüme deneylerinde uygulanmıştır. Tablo 4'te, Şekil 6'daki ayak Kartezyen referansları için gereken yörünge oluşturma parametreleri verilmiştir. Şekil 9'da robot yürürken alınan görüntüler sunulmuştur. Bölüm 4'te açıklanan tüm kontrol algoritmaları teker teker aktive edilmiştir. Bağımsız eklem PID kontrolü, ayak yönelim kontrolü, erken basma referans iyileştirmesi ve zemin darbe telafisi kullanılarak kararlı bir yürüme elde edilebildiği gözlemlenmiştir. Sürekli ve kararlı yürüme bir çok deney yapılarak tekrarlanmıştır. 6 eksenli kuvvet/moment algılayıcısı ve FSR tabanlı ayak köşe kuvvet algılayıcıları dönüşümlü olarak kullanılmıştır. Bölüm 4'te bahsedilen kontrol yöntemlerinin katsayıları ve Tablo 4'teki referans oluşturma parametreleri elle ayarlanmıştır.

Tablo 4: Yörünge Oluşturma Parametreleri

Tek ayak destek süresi	1.1 s	Adım uzunluğu	0.06 m
Çift ayak destek süresi	0.3 s	Zemin itme genliği	0.002 m
Zemin itme süresi	0.2 s	Salınım genliği	0.05 m
Salınım gecikme süresi	0.5 s	Salınım ofseti	0.13 m
Adım süresi	2.8 s	Vücut yüksekliği	0.62 m
Adım yüksekliği	0.02m	X referans ofseti	-0.035 m



Şekil. 7: Kontrol yöntemi öbek şeması.



Şekil. 8: Canlandırma penceresinden bir görüntü.



Şekil. 9: SURALP-L'nin yürüyüşünden görüntüler.

## 7. Sonuçlar ve Planlanan Çalışmalar

Bu bildiriye bir tüm vücut insanı robotun 12 serbestlik dereceli bacak modülü tanıtılmıştır. Mekanik tasarım esasları ve bileşenler tanımlanmıştır. Algılayıcı sistemler ve geri besleme kontrollerindeki rolleri tartışılmıştır. Kontrolör donanımı ve algılayıcı geri beslemeleri aracılığıyla, yaratılan referans yörüngelerini yumuşak bir şekilde takip etmek için geliştirilmiş kontrol algoritmaları sunulmuştur. Yürüme deney sonuçları, kullanılan kontrolörlerin kararlı bir yürüme elde etmede başarılı olduğunu göstermiştir. Bunların yanısıra, robotun mekanik sisteminin, kontrol donanımının ve kullanılan algılayıcıların yürüme deneyleri için uygun olduğu da onaylanmıştır.

SURALP platformunun geriye kalan serbestlik derecelerinin kurulumu devam etmektedir. Bununla birlikte, çeşitli engebeli yüzeylerde yürüme deneyleri yapılacak ve bu deneylerde ihtiyaç duyulan ek kontrolörler geliştirilecektir. Aynı zamanda, yürümeyi hızlandırma üzerinde çalışılacaktır. Boyun ve kol eklemlerinin de eklenmesi ile, görsel bilgiyle desteklenen kuvvet kontrolü kullanılarak nesnelerin hareket ettirilmesi üzerinde çalışmalar da sürdürülecektir.

## 8. Teşekkür

Bu araştırma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu TÜBİTAK tarafından desteklenmektedir. (Araştırma proje numarası: 106E040).

## 9. Kaynakça

- [1] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, "The development of Honda humanoid robot", *Proceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, s: 1321-1326 Cilt: 2, Mayıs 1998
- [2] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, M. Shinichi, N. Higaki, and K. Fujimura, "The intelligent ASIMO: System overview and integration", *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Lausanne, Switzerland, Ekim 2002
- [3] T. Sawada, T. Takagi, and M. Fujita, "Behavior selection and motion modulation in emotionally grounded architecture for QRIO SDR-4X

- II", *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Cilt.3, s: 2514-2519, Sendai, Japan, Ekim 2004.
- [4] S. Lohmeier, K. Löffler, M. Gienger, H. Ulbrich, and F. Pfeiffer, "Computer system and control of biped "Johnnie"", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cilt.4, s: 4222-4227, New Orleans, LA, Nisan 2004.
- [5] K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Yokoyama, K. Akachi, T. Kawasaki, S. Ota, and T. Isozumi, "Design of prototype humanoid robotics platform for HRP", *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, s: 2431-2436, Cilt.3, Ekim 2002.
- [6] Kim, J-H. and Oh J-H., "Realization of Dynamic Walking for the Humanoid Robot Platform KHR-1," *Advanced Robotics*, Cilt. 18, No. 7, s: 749-768 (2004)
- [7] J. Y. Kim, I. W. Park, J. H. Oh, "Experimental Realization of dynamic walking of the biped humanoid robot KHR-2 using zero moment point feedback and inertial measurement", *Advanced Robotics*, Cilt. 20, No. 6, s: 707-736, 2006.
- [8] J. Y. Kim, I. W. Park, J. H. Oh, "Walking Control Algorithm of Biped Humanoid Robot on Uneven and Inclined Floor", *J Intell Robot Syst (2007)* 48 s: 457-484, Ocak 2007.
- [9] S. Hyon and G. Cheng, "Gravity Compensation and Full-Body Balancing for Humanoid Robots," *IEEE-RAS/RSJ International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2006)*, CD-ROM, s: 214-221, Aralık 2006.
- [10] Y. Ogura, H. Aikawa, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, H. Lim and A. Takanishi, "Development of A Humanoid Robot WABIAN-2," *Proc. 2006 IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, s: 76-81, 2006
- [11] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla and D. Stokic, *Biped Locomotion: Dynamics, Stability and Application*. Springer-Verlag, 1990.
- [12] M. Raibert, *Legged Robots that Balance*, MIT Press, Cambridge, MA, 1986.
- [13] Erbarur, K., A. Okazaki, K. Obiya, T. Takahashi and A. Kawamura, "A Study on the Zero Moment Point Measurement for Biped Walking Robots," *Proc. AMC 2002, 7th International Workshop on Advanced Motion Control*, Temmuz, 2002, Maribor, Slovenia
- [14] Y. Fujimoto and A. Kawamura, "Simulation of an autonomous biped walking robot including environmental force Interaction", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, s: 33-42, Haziran 1998.
- [15] K. Erbarur and A. Kawamura, "A new penalty based contact modeling and dynamics simulation method as applied to biped walking robots," *Proc. 2003 FIRA World Congress*, Ekim 1-3, 2003 Vienna, Austria