

# Bir Ameliyat Robotunun Denetimi için Basitleştirilmiş Dinamik Modeli

## Simplified Dynamic Model for the Control of a Surgical Robot

Orhan Ayit<sup>1</sup>, Abdullah Yaşır<sup>1</sup>, Eren Vardarlı<sup>2</sup>, Gökhan Kiper<sup>1</sup>, Mehmet İsmet Can Dede<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Makina Mühendisliği Bölümü

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir

{orhanayit, abduallahyasir, gokhankiper, candede}@iyte.edu.tr

<sup>2</sup>Fotonik Bölümü

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir

erenvardarli@iyte.edu.tr

### Özetçe

Bu çalışmanın temel konusu minimal invaziv tipi bir ameliyat olan endoskopik hipofiz tümörü ameliyatında kullanılan endoskopun hareket denetimi için geliştirilen robotik sistemdir. Geliştirilen sistemin bu bildiride ele alınan kısmı, ameliyat sırasında sadece ameliyat bölgesi içinde endoskopu cerrahın anlık isteklerine göre yönlendiren, aktif robot yapısıdır. Söz konusu robot uzak hareket merkezli, 3 serbestlik dereceli, paralel kinematik mimariye sahiptir. Bu çalışmada robotun denetimi için uygun görülen hesaplanmış tork yöntemi için gerekli robotun dinamik analizi sunulmaktadır. Denetim algoritmasının yüksek frekansta çalışabilmesi için dinamik denklemlerde yapılan basitleştirmeler ve bunun sonucunda elde edilen hesaplama zamanı sunulmaktadır.

### Abstract

The fundamental subject of this study is the robotic system developed for the motion control of the endoscope used in the pituitary tumor surgery, which is a type of minimally invasive surgery. The part of this developed system issued in this paper is the active robot that directs the endoscope according to the instantaneous demands of the surgeon only in the surgical area. The robot has a remote-center-of-motion, 3 degrees-of-freedom and parallel kinematic architecture. In this paper, dynamic analysis of the robot is presented. The dynamic analysis is required for the computed torque method. The paper is concluded by reporting the simplifications that are done in the dynamic equations in order to enable higher frequency of operation of the control algorithm and the resulting computation time.

### 1. Giriş

Robotik sistemlerin ameliyat uygulamalarında daha fazla yer bulması [1] ile beraber ülkemizde de bu tip robotik sistemlerin geliştirilmesi için girişimler ve çalışmalar teşvik edilmeye başlanmıştır. Bu bildiride yer alan çalışmanın temel konusu bir ameliyat robotu sistemi geliştirilmesidir. Söz konusu ameliyat, bir minimal invaziv (minimal girişimsel) ameliyat olan endoskopik hipofiz tümörü ameliyatıdır. Ameliyat burun deliklerinden endoskop ve cerrahi aletlerin iletilerek hipofiz

bezi tümörüne ulaşılmasını gerektirmektedir. Endoskop, ameliyat sırasında cerraha ameliyat bölgesinin görüntü bilgisini sağlayan kamera sistemidir. Ameliyat boyunca bu kamera sisteminin ameliyat bölgesi olan burun içinde durması gereklidir. Genellikle ameliyatlarda cerrah sol eli ile endoskopu tutup ameliyat bölgesinin görmek istediği yerine doğru yönlendirmekte ve bu durum özellikle 2-3 saat süren ameliyatlarda cerrahın yorulmasına neden olmaktadır. Bir diğer yöntem ise asistanın cerrahın komutlarına göre endoskopu yönlendirmesidir. Ancak bu yöntemde iletişim ve koordinasyon sorunları oluşmaktadır.

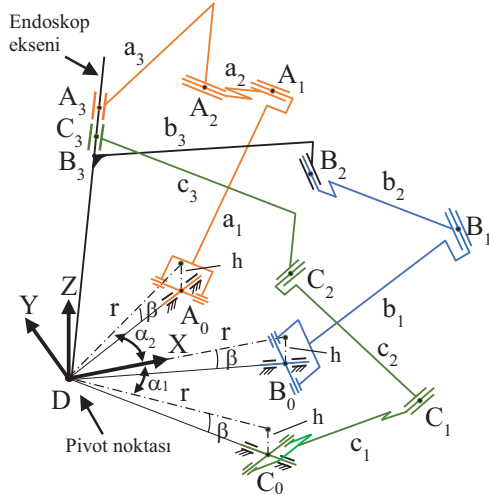
Minimal invaziv ameliyat tiplerinden endoskop kullanılan ameliyatlarda özellikle robot kullanımı açısından oldukça uygundur ve bu konuda 1994-2009 yılları arasında geliştirilmiş 27 adet robot sistemi rapor edilmiştir [2]. Yukarıda bahsi geçen sorunu çözmek için bu bildiride sunulan çalışma dâhilinde bir robot sistemi geliştirilmektedir. Geliştirilmekte olan sistemin mimarisi alt bileşenleri ile beraber [3]'te anlatılmıştır. Bu mimarinin robot kolu tarafı iki ayrı alt-sistemden oluşmaktadır. Birinci alt-sistem pasif kol adı verilen üzerinde eyleyici bulunmayan pasif olarak dengelenmiş 5 serbestlik dereceli bir seri mekanizmadır. Pasif kol cerrah tarafından istenildiğinde üzerindeki frenler serbest bırakılarak istenilen yere geri sürülebilmektedir. Pasif kolun ucuna takılı olan aktif robot kol ise ikinci alt-sistemdir. Bu alt-sistem 3 serbestlik dereceli, uzak hareket merkezli, paralel kinematik yapıya sahip bir robottur. Bu bildirinin ana odağında bu aktif robot kolun hesaplanmış tork yöntemi [4, 5] kullanılarak sürülebilmesi için gerekli dinamik analizi yer almaktadır.

Hesaplanmış tork yöntemi özellikle yüksek örnekleme frekansında çalışan denetleyicilerde hesap yükünün fazla olması nedeni ile tercih edilmemektedir. Bu kısıtı aşmak için bu bildiride kinematik yapısı oldukça karışık bir paralel robotun dinamik denklemlerinin basitleştirilmesi ele alınmıştır. Bildirinin Giriş kısmının devamında robotun kinematik yapısı tanımlanarak dinamik analizi için gerekli kinematik denklemler verilmiştir. Bu kısmı takiben robotun dinamik parametreleri paylaşılmış ve dinamik modelin basitleştirilme işlemi anlatılmıştır. Benzetim ortamında Matlab Simulink Simscape Multi-body blokları kullanılarak kurulan model ile karşılaştırmalı olarak basitleştirilmiş dinamik

modelin doğruluğu sınanmıştır. Son olarak robotun kumanda edilmesi için kullanılan mikroişlemci yapısı ve kabiliyetleri tanıtılarak basitleştirilmiş dinamik modelin hesaplanma zamanı paylaşılmış ve elde edilen veriler tartışılmıştır.

## 2. Robotun Kinematik Modeli

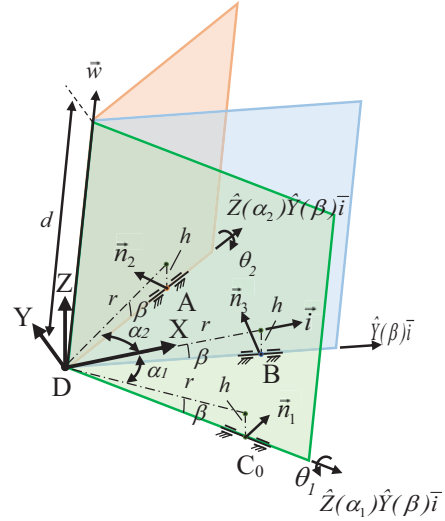
Robotun kinematik yapısı 2URRR-URR (U: üniversal mafsalsal, R: döner mafsalsal) şeklinde olup kinematik şeması Şekil 1’de verilmiştir. Şekilde görüleceği üzere bacaklar, Z eksenini etrafında bir dairesel simetriye değil de tek tarafa toplanacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu yerleşim dengeleme açısından pek tercih edilmezse de cerraha ameliyat esnasında çalışma alanı açmak için gereklidir. Mekanizmada orta bacak olarak URR yapısı seçilmiştir ve ilk mafsalsal eksen X ekseninden Y eksenini etrafında  $\beta$  açısı kadar döndürülerek oturtulmuştur. Yan bacaklar ise URRR yapısında seçilmiştir ve ilk mafsalsal eksenleri X ekseninden iki yana doğru Z eksenini etrafında  $\alpha_1$  ve  $\alpha_2$  açıları kadar döndürüldükten sonra Y eksenini etrafında  $\beta$  açısı kadar döndürülerek yerleştirilmiştir. U mafsalsallarının merkezlerinin pivot noktasına (uzak hareket merkezine) olan uzaklıkları  $r$ , XY düzlemine olan uzaklıkları ise  $h$  ile gösterilmiştir.



Şekil 1: Sistemin kinematik şeması.

URRR bacaklarının endoskop eksenini üzerinde bulunan son döner mafsalsalları ve her bacağın ilk mafsalsalları haricinde tüm bacaklar üç adet paralel döner mafsalsal içermekte olup bu paralel eksenler  $A_0A_1A_2$ ,  $B_0B_1B_2$  ve  $C_0C_1C_2$  düzlemlerini tanımlamaktadırlar. Yani her bir bacak bir düzlem üzerinde hareket etmektedir ve bu düzlemler sabit birer döner mafsalsal etrafında dönebilmektedirler. O halde mevcut kinematik şema endoskop eksenini üzerinde keşişen ve açıları değiştirilebilen üç düzlem ile gösterilebilir. Şekil 2’de basitleştirilmiş kinematik şema görülebilir. Bu şemada üç düzlem de endoskop eksenindeki  $\vec{w}$  birim vektörü üzerinde keşişmektedir. Yan düzlemler endoskop eksenini etrafında dönebilmekteyken orta düzlem bu eksene rijit olarak bağlıdır. Yan düzlemlerin açıları  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  ile gösterilmiştir. Tüm düzlemlerin  $\vec{w}$  üzerinde keşişmek zorunda olmasından dolayı,  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  açıları belirlendiğinde orta bacağın düzleminin açısı da otomatik

olarak belirlenmiş olmaktadır. Bu düzlemlerin normal vektörleri de sırasıyla  $\vec{n}_1$ ,  $\vec{n}_2$  ve  $\vec{n}_3$  ile gösterilmiştir.



Şekil 2: Basitleştirilmiş kinematik şema.

Kuvvet iletim karakteristikleri göz önünde bulundurularak kinematik tasarım neticesinde  $\beta = 0^\circ$ ,  $\alpha_1 = 45^\circ$  ve  $\alpha_2 = -45^\circ$  seçilmiştir. Görev uzayı değişkenleri olarak  $\psi$  açısı,  $\vec{w}$ ’nün XZ-düzlemiyle yaptığı,  $\phi$  açısı da,  $\vec{w}$ ’nün YZ-düzlemiyle yaptığı açı değerleri olarak belirlendiğinde  $\vec{n}_1$ ,  $\vec{n}_2$  ve  $\vec{w}$  aşağıdaki gibi bulunabilir.

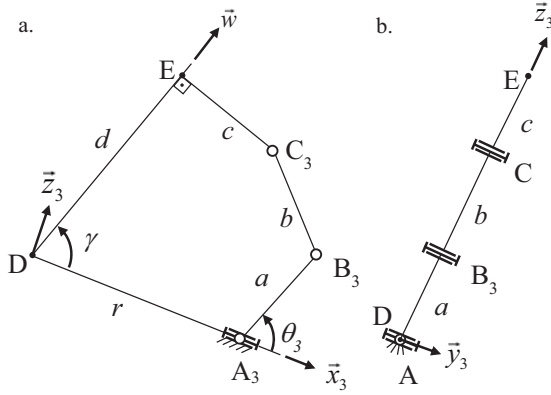
$$\vec{n}_1 = \begin{bmatrix} -c\theta_1/\sqrt{2} \\ c\theta_1/\sqrt{2} \\ s\theta_1 \end{bmatrix}, \vec{n}_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2/\sqrt{2} \\ c\theta_2/\sqrt{2} \\ s\theta_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\vec{w} = \frac{\vec{n}_1 \times \vec{n}_2}{|\vec{n}_1 \times \vec{n}_2|} \quad \text{ve} \quad \vec{w} = \begin{bmatrix} s\psi \\ -s\phi \\ \sqrt{1-s^2\phi^2-s^2\psi^2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada  $c$  ve  $s$  sırası ile kosinüs ve sinüs işlevlerinin kısaltmalarıdır.

Şekil 3’te eksen takımının bir parçası olan  $DA_3$ , orta bacak  $A_3B_3C_3$  ve endoskop eksenini ED bir düzlem tanımlamaktadır. DE yönünde olan birim vektör  $\vec{w}$ , orta bacak için belirlenmiş olduğu için önceden bilinmektedir. Şekil 3’teki yerel koordinatlardaki  $x_3$ -eksenini Şekil 1’deki X-eksenini ile çakışıkır.  $A_3DE$  açısı  $\gamma = \pi/2 - \psi$  dir.  $d$  uzunluğu görev uzayı değişkenlerinden biridir. Şekil 3’ten şu bağıntı görülebilir:

$$|\vec{r}_{C_3} - \vec{r}_{B_3}| = |(d - ic_3)e^{i\gamma} - r - a_3e^{i\theta_3}| = b_3 \quad (3)$$



Şekil 3: a. x3z3-düzlemi b. y3z3-düzlemi

(1)-(3) denklemleri kullanılarak düz kinematik işlemleri yapıldığında görev uzayı değişkenleri aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$\psi = \sin^{-1} \frac{s(\theta_2 - \theta_1)}{\sqrt{2} |\vec{n}_1 \times \vec{n}_2|} \quad (4)$$

$$\phi = \sin^{-1} \frac{s(\theta_1 + \theta_2)}{\sqrt{2} |\vec{n}_1 \times \vec{n}_2|} \quad (5)$$

$$d = rc\gamma + ac(\theta_3 - \gamma) + \sqrt{b^2 - [c - rs\gamma + as(\theta_3 - \gamma)]^2} \quad (6)$$

Ayrıca, (2) eşitliği kullanılarak aşağıdaki fonksiyonlar elde edilebilir.

$$f_1(\theta_1, \theta_2, \phi, \psi) = \sqrt{1 - s^2\phi - s^2\psi} s(\theta_2 - \theta_1) - \sqrt{2} s\psi c\theta_1 c\theta_2 = 0 \quad (7)$$

$$f_2(\theta_1, \theta_2, \phi, \psi) = \sqrt{1 - s^2\phi - s^2\psi} s(\theta_1 + \theta_2) - \sqrt{2} s\phi c\theta_1 c\theta_2 = 0 \quad (8)$$

$$f_3(d, \psi, \phi, \theta_3) = d^2 - 2d[rc\gamma + ac(\theta_3 - \gamma)] + [rc\gamma + ac(\theta_3 - \gamma)]^2 + [c - rs\gamma + as(\theta_3 - \gamma)]^2 - b^2 = 0 \quad (9)$$

Sonuç olarak (13), (14) ve (15) fonksiyonlarının, mafsal uzayı değişkenlerine ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ) ve görev uzayı değişkenlerine ( $\psi, \phi, d$ ) göre kısmi türevleri alındığında (10) numaralı matris eşitliği bulunur ve (11)'de gösterildiği gibi Jakobi matrisi,  $\hat{J}$  elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} & 0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial f_1}{\partial \phi} & -\frac{\partial f_1}{\partial \psi} & 0 \\ -\frac{\partial f_2}{\partial \phi} & -\frac{\partial f_2}{\partial \psi} & 0 \\ -\frac{\partial f_3}{\partial \phi} & -\frac{\partial f_3}{\partial \psi} & -\frac{\partial f_3}{\partial d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \\ \dot{d} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \\ \dot{d} \end{bmatrix} = \hat{J} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

### 3. Robotun Basitleştirilmiş Dinamik Modeli

Bir robotun hareket denklemleri şu şekilde gösterilebilir;

$$\bar{T} = \hat{M}\ddot{\bar{q}} + \hat{C}(\dot{\bar{q}}, \dot{\bar{q}})\dot{\bar{q}} + \bar{G}(\bar{q}) \quad (12)$$

$\hat{M}$  : Genelleştirilmiş kütle matrisini,

$\hat{C}$  : Coriolis ve merkezkaç matrisini,

$\bar{G}$  : Yerçekimi kuvveti matrisini,

$\bar{q}$  : Genelleştirilmiş koordinatı,

$\bar{T}$  : Genelleştirilmiş kuvvetleri tanımlamaktadır.

Robotun hareket denklemleri hesaplamak için gereken dinamik denklemler parametreleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1: Basitleştirilmiş dinamik model parametreleri

	Sağ Bacak	Sol Bacak	Orta Bacak
$a$	135 mm	135 mm	135 mm
$b$	190 mm	190 mm	190 mm
$c$	200 mm	200 mm	200 mm
$r$	200 mm	200 mm	200 mm
$L_{end}$	[0 0 $d$ ] m		
$m_{end}$	0.5 kg		
$\hat{I}_{end}$	$\begin{bmatrix} 8.47658e-4 & -2.07533e-4 & 8.69884e-7 \\ -2.07533e-4 & 4.64205e-4 & 6.85777e-6 \\ 8.69884e-7 & 6.85777e-6 & 0.00105908 \end{bmatrix}$ kg·m <sup>2</sup>		
$L_{eyl}$	[0.1548 0.1182 0.0434] m		
$\hat{I}_{eyl}^*$	diag[0.004 0 0] kg·m <sup>2</sup>		

Uzuv boyutları  $a, b$  ve  $c$  olarak gösterilmiştir. Alt simge olan end ve eyl sırasıyla endoskop takımını ve orta eyleyiciyi belirtmektedir.  $L, m$  ve  $I$  ise sırasıyla ağırlık merkezini, kütle ve ataleti belirtmektedir.

Tablo 1'deki  $\hat{I}_{eyl}^*$  parametresi, orta bacağı takılı olan eyleyicinin pivot noktası etrafında atalet matrisidir ve bu eyleyici sadece x-ekseni etrafında dönüş yapmaktadır. Bu yüzden matrisin ilk elemanı hariç diğer elemanları sıfır olarak kabul edilmiştir. Diğer eyleyiciler yere sabittir. Ayrıca,  $L_{end}$  ve  $\hat{I}_{end}$  terimleri endoskop takımının bulunduğu eksen takımına göre tanımlanmıştır. Endoskopun yönelimini robotun zemininde bulunan eksen takımına göre tanımlamak için  $\hat{R}(\phi, \psi)$  rotasyon matrisi kullanılmaktadır.

Robotun dinamik modeli aşağıdaki varsayımlara dayanarak basitleştirilmiştir:

- I. Robot uzuvlarının ağırlıkları sıfır,
- II. Robot uzuvlarının ataletleri sıfır matrisi,
- III. Coriolis ve merkezkaç kuvvetler sıfır olarak kabul edilecektir.

Bahsedilen varsayımlar, uzuvların ağırlığının ve ataletlerinin; endoskop takımına ve eyleyicilerine göre çok daha düşük olduğu bilinmesine dayanmaktadır. Ayrıca çalışma alanında, robotun uç noktasının hızının düşük olmasından dolayı üçüncü varsayım gerçekleştirilmiştir.

Varsayımlar neticesinde robotun yeni hareket denklemleri şu şekilde elde edilir:

$$\bar{T} = \hat{M}\ddot{\bar{q}} + \bar{G}(\bar{q}). \quad (13)$$

Yukarıdaki denklemde geliştirilmiş koordinatlar ( $\bar{q}$ ), eyleyicilerin bağlı olduğu eklemlerin pozisyonu  $[\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$  olarak seçilmiştir ve varsayımlara dayanarak kütle ve yerçekimi kuvvet matrisi hesaplanmıştır. Sistemdeki sürtünme ile ilgili terimler deneysel olarak ölçülerek hareket denkleminde eklenecektir.

### 3.1. Kütle Matrisi Hesaplanması

Euler – Langrange denklemlerinden kinetik enerji ( $K$ ) ile geliştirilmiş kütle matrisi arasındaki aşağıda gösterilen bağlantı kullanılarak kütle matrisi hesaplanmıştır.

$$K = \frac{1}{2} \dot{\bar{q}}^T \hat{M} \dot{\bar{q}} \quad (14)$$

Varsayımlara dayanarak sistemin kinetik enerjisi endoskop takımının lineer ve açısal hızlarına bağlı kinetik enerjisi ile orta eyleyicinin açısal hızına bağlı kinetik enerjisinden oluşmaktadır ve aşağıda gösterilmiştir;

$$K = \frac{1}{2} \bar{V}_{end}^T m_{end} \bar{V}_{end} + \frac{1}{2} \bar{W}_{end}^T \hat{R} \hat{I}_{end} \bar{R}^T \bar{W}_{end} + \frac{1}{2} \bar{W}_{eyl}^T \hat{I}_{eyl}^* \bar{W}_{eyl}$$

$\bar{V}_{end}$ : Endoskop takımının ağırlık merkezindeki lineer hızı,

$\bar{W}_{end}$ : Endoskop takımının açısal hızı,

$\bar{W}_{eyl}$ : Eyleyicinin açısal hızını belirtmektedir.

Endoskop takımının doğrusal hızı şu şekilde hesaplanır:

$$\bar{V}_{end} = \frac{d}{dt} (\hat{R} \bar{L}_{end}) \rightarrow \bar{V}_{end} = \hat{V}_{end}^* \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \\ \dot{d} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$\hat{V}_{end}^*$  görev uzayı parametrelerinden, hız kolon matrisinin hesaplanmasını sağlayan matristir. Endoskop takımının ve eyleyicinin açısal hızı denklem (16)'da verilmiştir.

Hesaplanan hızlar görev uzayı parametrelerine bağlı elde edilmiştir. Elde edilen terimleri geliştirilmiş koordinatlara bağlı olarak elde etmek için Jakobi matrisi ( $\hat{J}$ ) ile boyutu düşürülmüş Jakobi ( $\hat{J}_w$ ) matrisi kullanılmıştır.

$$\bar{W}_{end} = \bar{W}_{eyl} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Genleştirilmiş koordinatlar ile görev uzayı parametreleri arasındaki bağlantı aşağıdaki gibidir:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \\ \dot{d} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_w \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Kinetik enerji denklemi, geliştirilmiş koordinatlara bağlı olarak şu şekilde yazılabilir:

$$K = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix}^T ( \hat{J}^T (\hat{V}_{end}^*)^T m_{end} \hat{V}_{end}^* \hat{J} + \hat{J}_w^T (\hat{R} \hat{I}_{end} \hat{R}^T + \hat{I}_{eyl}^*) \hat{J}_w ) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix}$$

Denklem (14)' e göre kütle matrisi aşağıdaki gibi elde edilmektedir;

$$M = (\hat{J}^T (\hat{V}_{end}^*)^T m_{end} \hat{V}_{end}^* \hat{J} + \hat{J}_w^T (\hat{R} \hat{I}_{end} \hat{R}^T + \hat{I}_{eyl}^*) \hat{J}_w) \quad (18)$$

### 3.2. Yerçekimi Kuvvet Matrisi Hesaplanması

Yapılan varsayımlara göre sadece endoskop takımının ağırlığının etkisi yerçekimi kuvvet matrisi hesaplarına etki etmektedir. Endoskopun ağırlığının geliştirilmiş koordinatlarda etkisini elde etmek için sanal iş prensibi kullanılmıştır. Bu prensibe göre;

$$\bar{T}^T \begin{bmatrix} \delta\theta_1 \\ \delta\theta_2 \\ \delta\theta_3 \end{bmatrix} + \bar{F}^T \begin{bmatrix} \delta\phi \\ \delta\psi \\ \delta d \end{bmatrix} = 0 \rightarrow \bar{T}^T \begin{bmatrix} \delta\theta_1 \\ \delta\theta_2 \\ \delta\theta_3 \end{bmatrix} = -\bar{F}^T \hat{J} \begin{bmatrix} \delta\theta_1 \\ \delta\theta_2 \\ \delta\theta_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$\bar{F}$  ve  $\bar{T}$  sırasıyla endoskop takımının ağırlığından oluşan kuvvet ve momentleri içeren dikey matrisi ile geliştirilmiş tork dikey matrisini belirtmektedir. Dinamik denklemde yer alan yerçekimi kuvvet dikey matrisi (19) kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\bar{G}(\bar{q}) = -\hat{J}^T \bar{F} \quad (20)$$

## 4. Robotun Basitleştirilmiş Dinamik Modelinin Doğrulanması

Önceki bölümde elde edilen basitleştirilmiş dinamik modelin doğrulanması üç farklı senaryo içeren benzetim çalışması ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmalarda basitleştirilmiş dinamik denklemlerin hesaplama hatası için kullanılacak dinamik model Matlab Simulink programında Simscape Multibody (çoklu cisimler) kütüphanesi kullanılarak oluşturulmuştur. İlk benzetim çalışması, varsayımlara uygun bir şekilde hazırlanan çoklu cisimler modeli ile yapılan çalışmadır. Bu benzetim çalışmasında dinamik hesaplamaların doğruluğu değerlendirilmektedir. İkinci benzetim çalışmasında, hazırlanan çoklu cisimler modeline uzuvların ve eyleyicilerin gerçek atalet matrisleri girilmiştir ve hesaplanan dinamik modelin oluşturduğu hata incelenmiştir. Son benzetim çalışmasında, ikinci benzetim çalışmasına ek olarak uzuvların ve eyleyicilerin gerçek ağırlıkları da girilmiştir. Son benzetim çalışmasında varsayımlara göre hazırlanan dinamik model ile robotun dinamik davranışı kıyaslanmaktadır.

Benzetim çalışmalarında, hareket referans girdisi olarak yapılan ön çalışmalardan elde edilmiş [3] görev uzay hareketleri seçilmiş ve Tablo 2'de gösterilmiştir.

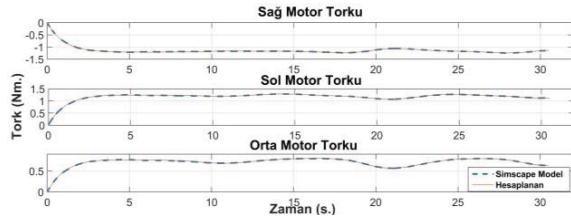
Tablo 2: Referans Girdiler

$\phi$ (rad)	$\psi$ (rad)	$d$ (mm)
$\pm 0.1205$	$\pm 0.2043$	240 -250 or 150-160
Maks. $\dot{\phi}$ (rad/s)	Maks. $\dot{\psi}$ (rad/s)	Maks. $\dot{d}$ (mm/s)
0.0685	0.1336	0.0548

Ayrıca, benzerim hesaplama sıklığı, adi diferansiyel denklem çözücü ve kısıtlama çözücü sırasıyla 1 kHz, ODE1(Euler) ve 'Machine Precision' seçilmiştir.

#### 4.1. Basitleştirilmiş Çoklu Cisimler Modeli (Uzuv Kütleleri: 0 || Uzuv Ataletleri: 0)

Bu benzetim çalışmasında çoklu cisimler modelin uzuv ağırlıkları ve atalet matrisleri sıfıra çekilmiştir. Bu değişiklikler dinamik modeldeki varsayımlarla uyumluluk göstermektedir; böylece dinamik model ile çoklu cisimler modeli arasında tutarlılık gözlemlenmesi beklenmektedir. Hesaplanan ve çoklu cisimler modelinden elde edilen torklar Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4: 1. benzetim çalışması için Multibody modelinden ve basitleştirilmiş dinamik modelden elde edilen tork değerleri

Tablo 3: İlk testler için RMS hataları

	Sağ Motor	Sol Motor	Orta Motor
RMS Hata (Nm)	0.0054	0.0054	0.0054

Çoklu cisimler modelinde uzuv eylemsizliklerini sıfır matrisi kabul edildiğinde çözücünden dolayı modelde elde edilen torklar gürültü içermektedir. Bunu çözmek için alınan veriler filtreden geçirilmiştir. Filtreden dolayı oluşan gecikmelerin kıyaslamayı etkilememesi için hesaplanan torklar da aynı filtreden geçirilmiştir. Beklendiği gibi varsayımlara uygun şekilde hazırlanan çoklu cisimler modeli ile basitleştirilmiş dinamik model benzer sonuçlar vermiş ve böylece basitleştirilmiş model doğrulanmıştır. Elde edilen torklar arasındaki hataların RMS değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

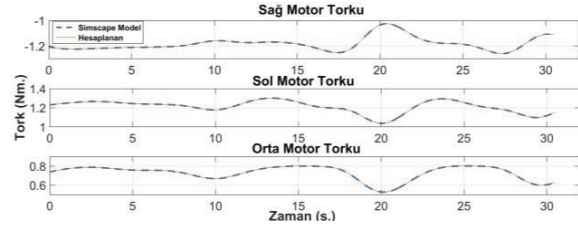
#### 4.2. Basitleştirilmiş Çoklu Cisimler Modeli (Uzuv Kütleleri: 0)

Yapılan ikinci benzetim çalışmasında çoklu cisimler modeline gerçek atalet değerleri girilmiştir fakat uzuvların ağırlıkları yine sıfır olarak girilmiştir. Bu benzetim çalışmasında bir önceki deneye göre hataların artması fakat atalet değerlerin etkisinin düşük olmasından dolayı bu hataların birinci deneyde elde edilen hatalara yakın olması beklenmektedir.

Şekil 5'te verilen sonuçlar modellerin benzer davranış sergilediği ve neredeyse aynı sonucu verdiğidir. Tablo 3 ve 4 kıyaslandığında ise 2. deneyin daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni 1. deneyde gözlemlenen gürültünün sebep olduğu hatadır.

Tablo 4: İkinci testler için RMS hataları

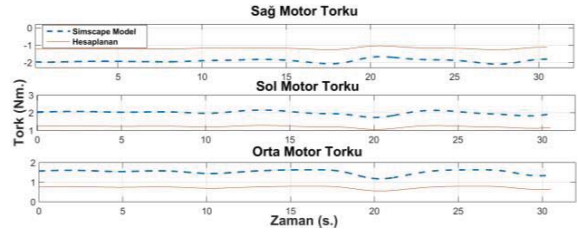
	Sağ Motor	Sol Motor	Orta Motor
RMS Hata (Nm)	0.00022	0.00036	0.00022



Şekil 5: 2. benzetim çalışması için çoklu cisimler modelinden ve basitleştirilmiş dinamik modelden elde edilen tork değerleri

#### 4.3. Gerçek Değerlerle Çoklu Cisimler Modeli

Bu benzetim çalışmasında diğerlerinden farklı olarak basitleştirilmiş dinamik model ile uzuvların gerçek atalet ve kütle bilgilerin girilmesi ile tasarlanan çoklu cisimler modelinin kıyaslanması yapılmıştır. Elde edilen tork grafiği Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6: 3. benzetim çalışması için çoklu cisimler modelinden ve basitleştirilmiş dinamik modelden elde edilen tork değerleri

Sonuçlar irdelendiğinde çoklu cisimler modelinden elde edilen ve basitleştirilmiş dinamik modelden hesaplanan torkların davranışının benzer olduğu ancak iki değer arasında bir ölçeklendirme hatasına benzer hata bulunduğu değerlendirilmiştir. Bunun nedeni uzuvların ağırlıklarının oluşturduğu torklardır. Hatalar Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5: Üçüncü testler için RMS hataları

	Sağ Motor	Sol Motor	Orta Motor
RMS Hata (Nm)	0.7236	0.7908	0.7236

#### 4.4. Düzeltme Katsayılarla Basitleştirilmiş Dinamik Model

Yukarıda yapılan testler temel alındığında basitleştirilmiş dinamik model ile robotun gerçek modeline benzetilen çoklu cisimler modeli arasında görülen hataların büyük olduğu görülmektedir. Basitleştirilmiş dinamik modelin kullanılması için bu hataların en az seviyeye çekilmesi gerekmektedir. Bunun için düzeltme katsayıları  $K_f$  hesaplanmıştır.

$$K_i = \text{avg}\left(\frac{T_i^*}{T_i}\right) \quad (21)$$

$i$ : Sağ, sol ve orta motoru,

$T^*$ : Robotun simscape modelinden elde edilen torkları,

$T$ : Basitleştirilmiş dinamik modelden elde edilen torkları,

$\text{avg}(\cdot)$ : ortalama alma fonksiyonudur.

Tablo 2’de verilen çalışma alanı sınırları ile elde edilen referans girdilere göre düzeltme katsayılar hesaplanmıştır ve Tablo 6’da bu değerler verilmiştir.

Tablo 6: Testlerin referans girdileri ile düzeltme katsayıları

Referans (Sinüzoidal)			Katsayılar		
$\phi$ (rad.)	$\psi$ (rad)	$d$ (mm.)	$K_{\text{sağ}}$	$K_{\text{sol}}$	$K_{\text{orta}}$
$\pm 0.1205$	$\pm 0.2043$	240-250	1.58	1.65	1.99
$\pm 0.1205$	$\pm 0.2043$	150-160	1.58	1.65	2
0	$\pm 0.2043$	150-160	1.61	1.64	2.08
$\pm 0.1205$	0	150-160	1.61	1.64	2.07
$\pm 0.1205$	$\pm 0.2043$	200	1.62	1.64	2.03
0	0	150-160	1.62	1.64	2.07
0	0	240-250	1.61	1.63	2.01
$\pm 0.1205$	0	200	1.62	1.64	2.03
0	$\pm 0.2043$	200	1.62	1.64	2.03

Tablo 6 incelendiğinde, düzeltme katsayıların birbirine çok benzer olduğu görülmektedir. Elde edilen katsayıların ortalaması ile basitleştirilmiş dinamik modelden hesaplanan torklar çarpılarak düzeltilmiş torklar elde edilerek çoklu cisimler modeli torkları ile kıyaslanmıştır ve Tablo 7 oluşturulmuştur.

Tablo 7: Seçilen katsayılar ve RMS hataları

	Sağ Motor	Sol Motor	Orta Motor
Katsayılar	1.6078	1.6411	2.0343
RMS Hata (Nm)	0.0223	0.0251	0.0223

Tablo 7 ile Tablo 4’deki hatalar kıyaslandığında düzeltme katsayılarla birlikte tasarlanan basitleştirilmiş dinamik modelin doğruluğunun arttığı gözlemlenmektedir. Tablo 7’de hesaplanan hata seviyesi çalışmamız için yeterli görülmüştür.

## 5. Robotun İşlemci Altyapısı ve Hesaplama Süresi

Bu çalışma için işlemci tipi olarak 168 MHz hıza kadar çıkabilen Arm Cortex M4 seçilmiştir. Bu işlemci tipinin seçilme nedeni düşük enerji tüketimiyle birlikte yüksek performans sergilemesidir. Sistemin diğer elektromekanik bileşenleri ile çalışması öncesinde bu bildiriye anlatılan basitleştirilmiş dinamik hesapların koşutulmasının işlemcinin ne kadar zamanını aldığı analiz edilmiştir. Tasarlanan basitleştirilmiş dinamik model kodu Keil MDK-Arm platformu kullanılarak geliştirilmiştir. Bahsedilen işlemci tarafından basitleştirilmiş dinamik modelin hesaplanma süresi 2.7 ms olarak hesaplandı.

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada uzak hareket merkezli 3 serbestlik dereceli paralel kinematik yapıya sahip bir ameliyat robotu tanıtılmıştır. Robotun hesaplanmış tork yöntemi ile denetlenmesi için gerekli dinamik modelinin basitleştirilmesi konusu ele alınmış ve basitleştirilmiş modelin doğrulaması yapılmıştır. Model denetim döngüsünde kullanıldığında işlemcinin hesap yükü test edilerek döngünün 370 Hz mertebelerinde olabileceği tespit edilmiştir. İleriki çalışmalarda bu hesaplar kullanılarak geliştirilen denetleyicinin deneysel testleri yapılacaktır.

## Teşekkür

Bu çalışmada sunulan araştırmaya destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu’na (TÜBİTAK) teşekkür ederiz (Proje Numarası: 115E726).

## Kaynakça

- [1] K. C. Kim, (Ed.), *Robotics in General Surgery*, New York: Springer, 2014
- [2] K. Taniguchi, vd., “Classification, design and evaluation of endoscope robots,” *Robot Surgery*. Editör: Baik, S. H. Rijeka: InTech, 2010.
- [3] M. İ. C. Dede, G. Kiper, T. Ayav, E. Tatlıcıoğlu, B. Özdemirel, O. Maarof, G. Ateş, M. Berker, İ. Işıkay, Ş. Hanalioğlu "Cerrahin Anlık Yönlendirilebildiği Robot Yardımlı Endoskop Kontrol Sistemi Mimarisi - NeuRoboScope," 2018 Türkiye Robotbilim Konferansı (TORK 2018), İstanbul, Nisan 12-14, 2018.
- [4] B. R. Markiewicz, “Analysis of the computed torque drive method and comparison with conventional position servo for a computer-controlled manipulator,” *Tech. Memo 33-601*, Jet Lab, Pasadena, California, 15 Mart 1973.
- [5] J.J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, Addison- Wesley, Reading, Mass., 1986.