

## Admitans Yapısında Kinematik Olarak Artıksıl Haptik Ana Sistem Tasarımı

M. Kanık<sup>\*</sup>, G. Berker<sup>†</sup>, O. W. Maaroo<sup>‡</sup>, O. E. Uzunoğlu<sup>¶</sup>, M. İ. C. Dede<sup>Ω</sup>  
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü  
İzmir

**Özet**—Haptik cihaz tasarımlarında sıklıkla kullanılan empedans yapısı yerine büyük çalışma hacmine sahip haptik uygulamalarda admitans yapısındaki cihazlar tercih edilmektedir. Bu çalışmada haptik cihazın çalışma hacmi içinde insanın bulunması gerektiği için her koşulda cihazın uzuvlarının insandan kaçınabilecek şekilde olması için cihaz kinematik artıksıl olarak tasarlanmıştır. Bildiride cihazın tasarımı ve üretilmiş haptik ana sistem sunulmuştur. Ayrıca, cihazın kinematik ve dinamik denklemleri verilmiştir. Üretilen cihazın deneysel çalışma için oluşturulan donanımı tanıtılarak cihazın sıfırlama çalışmaları hakkındaki bilgiler de bu bildiride sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** admitans yapısı, haptik cihaz, sıfırlama

**Abstract**—For the haptic applications with larger workspace, haptic devices with admittance structure is preferred rather than the impedance structure which is frequently used as a haptic device design. In this work, since the human operator needs to be located inside the workspace of the haptic device, the device is designed to be kinematically redundant to avoid the collision of the device's links with the human in any condition. In this paper, the design of the device and the manufactured device are presented. Additionally, kinematics and dynamic equations of the device are given. Also, via introducing the hardware for experimental work with the manufactured device, information on the work for initiation of the device is presented in this paper.

**Keywords:** admittance structure, haptic device, initiation

### I Giriş<sup>1</sup>

Haptik cihazlar genellikle uzakta gerçekleşen görev yerinde bulunma veya sanal dünyada bulunma hissiyatını kuvvet geribildirim yolu ile arttırmak için kullanılmaktadırlar. Bazı durumlarda ise soyut bir bilgiyi; örneğin telefonun sesi kısıkken titreşerek telefonun kaldığı bilgisini, iletmek için kullanılırlar. Ana ve bağımlı sistemlerden oluşan uzaktan-işlem veya diğer adıyla teleoperasyon çalışmalarında, kullanıcı ana sistemi kullanarak bir yandan bağımlı sisteme hareket isteği bilgileri iletirken diğer yandan ana sistemin bir haptik cihaz olması neticesinde bağımlı sistem tarafından ölçülen kuvvet kullanıcıya iletilmektedir.

Haptik ana sistemler genellikle empedans yapısında tasarlanmaktadır [1,2]. Empedans yapısındaki bir haptik cihazda kullanıcı cihazı pasif olarak yani cihazın eyleyicileri kullanılmayarak geriye sürebilmekte ve cihazın çalışma hacmi içinde istediği hareketi gerçekleştirebilmektedir. Cihazın genellikle mafsallarında bulunan konum algılayıcıları ile kullanıcının hareketleri toplanmaktadır. Kullanıcıya kuvvet geribildirim yapılması gerektiğinde ise eyleyicilere enerji verilmesi suretiyle gerekli kuvvet cihazın mekanizması tarafından kullanıcıya iletilmektedir. Empedans yapısındaki bir haptik cihazları tasarlarlarken temel kaygı cihazın uzuvlarının yeterince düşük ataletle sahip olmasıdır. Bu durumda kullanıcı cihazı pasif olarak geri sürerken hissettiği uzuv ataleti en az seviyeye çekilmiş olacaktır.

Büyük çalışma alanlı haptik uygulamalarda ise uzuv ataletleri ister istemez artmakta ve bu durumda pasif geriye sürüşte hissedilen atalet etkileri artmaktadır. Bu durum cihazın minimum empedans değerini de kötü bir şekilde etkilemektedir [3]. Admitans yapısındaki haptik cihazlarda ise kuvvet/moment algılayıcısı kullanılarak kullanıcının cihaza uyguladığı anlık kuvvetler ölçülmektedir. Kullanıcının cihazı geriye sürmesi ise cihazın eyleyicileri kullanılarak iletilen kuvveti sıfırlayacak yönde geri sürülmesi ile gerçekleşmektedir. Bu durumda yüksek uzuv ataleti ve/veya yüksek reduksiyon oranları nedeniyle pasif olarak geriye sürülemeyen cihazlar bile aktif olarak veya eyleyiciler kullanılarak geriye sürülebilecektir. Böylece büyük çalışma hacmi gerektiren haptik uygulamalarda yüksek uzuv atalet değerleri olsa bile admitans yapısındaki bir haptik cihaz ideale yakın geriye sürüşü sağlayabilecektir.

Geriye sürüş için kullanılan denetim algoritmasına admitans denetimi adı verilmektedir. Kullanıcı ile cihaz arasında bir admitans değeri veya başka bir deyişle sanal bir kütle-yay-sönümleyici tanımlanarak makine-insan etkileşimi tanımlanmaktadır. Admitans yapısındaki haptik cihazlarda kullanıcı kuvvet bilgisi iletirken cihaz bu kuvvete karşılık gelen hareketini bağımlı sistem tarafından iletilmek istenen kuvvete göre düzenleyerek çalışmaktadır.

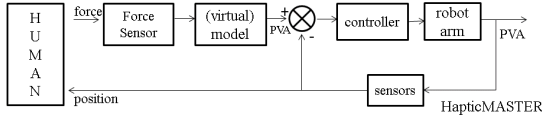
<sup>\*</sup> mertkanik@iyte.edu.tr

<sup>†</sup> gokhanberker@iyte.edu.tr

<sup>‡</sup> omarmaarooof@iyte.edu.tr

<sup>¶</sup> emreuzunoglu@iyte.edu.tr

<sup>Ω</sup> candede@iyte.edu.tr



Şekil 1. Admitans Denetim Bilgi Alışverişi [4]

Şekil 1’de HapticMaster adındaki admitans yapısındaki [4] bir haptik sistemlerde bilgi alışverişi temsil edilmiştir. Bu şemada yer alan “(virtual) mode” admitans terimini veya sanal kütle-yay-damper sistemini temsil etmektedir. Bu sayede kuvvet bilgisi hareket bilgisine dönüştürülmektedir ve şemada “PVA” olarak konum, hız ve ivme bilgisi olarak yer almaktadır. Kuvvet algılayıcısından alınan bilgi ile sürülen robot kolu pasif olarak geri sürüş senaryosunu temsil etmektedir. HapticMaster [4] geniş bir çalışma alanına ve büyük haptik çözünürlüğe sahiptir.

$$\text{Haptik Çözünürlük} = \frac{\text{çalışma alanı}}{\text{konum çözünürlüğü}^3} \quad (1)$$

Haptik çözünürlük ilgili yayında (1)’deki gibi hesaplandığında, cihazın çalışma alanında işleyebileceği birim hacmin yaklaşık değerini verir. HapticMaster için bu değer  $1,25 \cdot 10^{15}$ ’tir. Bu çözünürlük değeri bir başka sıklıkla kullanılan empedans tipi haptik cihaz olan Phantom Desktop modelinin 3000 katıdır.

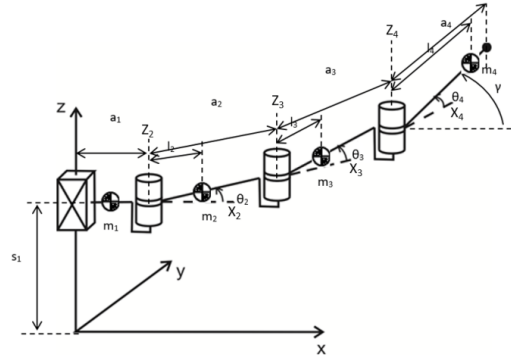
Robot kolu tasarımında boşluklar en az seviyeye indirilmiştir ancak bu durum mafsallarda fazladan sürtünmeye sebep olmaktadır. Ancak denetim döngüsüyle, sürtünmenin geri sürüşe etkisi telafi edilmektedir. Robot ilki lineer, ikincisi döner ve üçüncüsü lineer eksen olmak üzere toplam üç serbestlik derecesine sahiptir. Ayrıca HapticMaster değiştirilebilir uç tasarımına sahiptir.

Bir diğer admitans tipi haptik cihaz ViSHARD7 [5] ise yedi serbestlik derecesine sahiptir. Cihazın tasarımında insan kolunun ulaşabileceği çalışma alanı temel alınmıştır. Döner mafsallar için DC motorlar ve harmonik dişli kutuları kullanılmıştır. Lineer eksen için ise fırçasız DC motor kullanılmıştır. Ayrıca iki adet ViSHARD kolu kullanılarak ve gezici platforma bağlanarak yeni bir haptik arayüzlü cihaz tasarımı da yapılmıştır.

Bu bildiriye sunulan çalışmada ise, otururken veya ayakta iken insan kolunun çalışma hacmi içinde bütün hareketlerini izleyip toplayabilecek ve gerekli kuvvet geribildirimini kullanıcıya iletebilecek haptik ana sistemi için admitans yapısı seçilmiştir. Bir sonraki bölümde cihazın tasarımı ve üretimi hakkında bilgiler sunulmuştur. Bunu takip eden bölümde cihazın kinematik ve dinamik denklemleri özetlenmiştir. Son olarak deneysel çalışmaları gerçekleştirmek için gereken cihazın donanımı tanıtılmış ve cihazın sınırlama algoritması sunulmuştur.

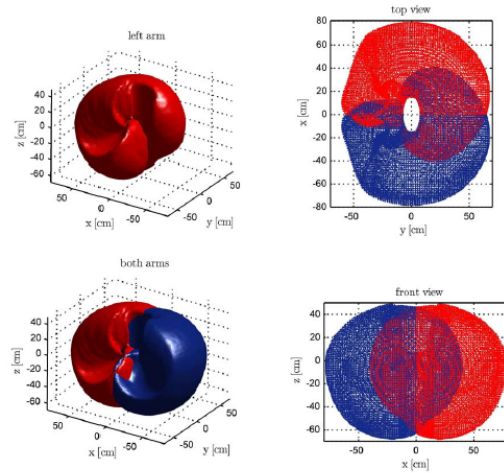
## II. Cihaz Tasarımı ve Üretimi

Bu çalışmada tasarlanan cihaz dört serbestlik dereceli bir cihazdır. Cihaz, bir kayar mafsal ve döner eksenleri paralel olan üç döner mafsaldan oluşmaktadır. Cihazda bulunan kayar mafsal döner mafsalların çalıştığı düzlemin yukarı-aşağı yönünde hareketini sağlamaya yöneliktir. Cihazın düzlemdeki hareketi ise döner mafsallar ile sağlanmaktadır. Her ne kadar düzlemdeki konumlandırma için gerekli hareket iki adet döner mafsal ile sağlanabiliyor olsa da, cihazın düzlemdeki hareketi sırasında önüne çıkabilecek engellerden kaçınabilmesi için cihaz üç döner mafsal kullanılarak kinematik olarak artıksıl olarak tasarlanmıştır. Cihazın kinematik yapısı Şekil 2’te verilmiştir.



Şekil 2. Cihazın kinematik yapısı

Cihaz tasarımı sırasında temel alınan ana etken insan kolunun hareket alanıdır. İnsan kolunun çalışma alanı ise daha önce yapılmış bir çalışmada [6] Şekil 3’te verildiği şekilde belirlenmiştir.



Şekil 3. İnsan Kolu çalışma alanı [6]

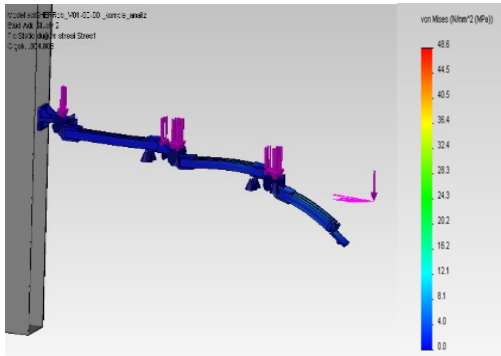
Cihazın uzuv uzunlukları bu etkene göre seçilmiştir ve Tablo 1’de verilmiştir.

Uzuv	Uzuv Uzunlukları (mm)
$s_1$ (toplam kursu)	2000
$a_2$	800
$a_3$	700
$a_4$	500

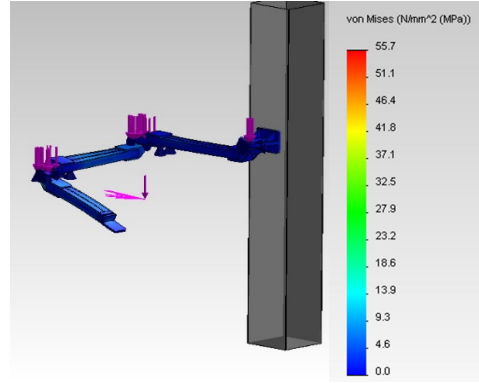
Tablo. 1. Cihaz Uzuv Uzunlukları

Cihazın kollarında ileride yapılacak çalışmalarda cihaza eklenebilecek algılayıcılar gibi farklı donanımların kolay adapte edilmesi nedeni ile modüler yapıda oldukları için alüminyum sigma profiller (90x45mm ve 90x90mm) kullanılmıştır. Dikey ekseninde hareket için ise 20mm çapında ve 20mm hatveye sahip vidalı mil kullanılmıştır. Cihaz konstrüksiyon tasarımı Solidworks programı kullanılarak yapılmış yine Solidworks Simulation eklentisi yardımı ile cihazın yapısal analizi gerçekleştirilmiştir.

Yapısal analizde cihazın uç noktasına yüklenen ağırlık olarak ortalama bir insanın kolu ile uygulayabileceği azami kuvvet düşünülerek 196N (20kg) olarak belirlenmiştir. Bu kuvvet için yapısal analiz cihazın kolları açık ve kapalı olması durumlarına göre yapılmıştır. Açık konum cihazın eksenlerinin  $\theta_2=0$ ,  $\theta_3=0$ ,  $\theta_4=0$  derecelerde olduğunu, kapalı pozisyon ise  $\theta_2=-90$ ,  $\theta_3=90$ ,  $\theta_4=90$  derecelerde olduğu pozisyonudur. Yapısal analiz sonuçlarına göre uygun uzuv boyutları belirlenmiştir. Belirlenen uzuv boyutları için yapısal analiz sonuçları sırasıyla kollar açık ve kollar kapalı olacak biçimde Şekil 4 ve Şekil 5’te görülebilmektedir. Analizler sonucu istenen kinematik parametreler iterasyonlar sonucunda bulunmuş olup sonucunda konstrüksiyon tasarımı netleştirilmiştir.

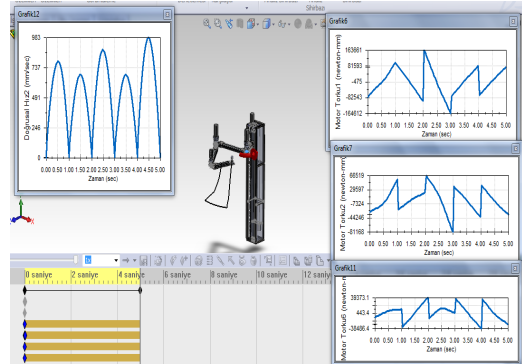


Şekil 4. Kollar Açık durumda yapısal analiz



Şekil 5. Kollar kapalı durumda yapısal analiz

Cihazın konstrüksiyonuna uygun olan eyleyici ve redüktörleri belirlemek için dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizler Solidworks Simulation / Motion Analysis yardımı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 6). İstek olarak verilen kuvvet ve hız profillerine karşılık konstrüksiyonun mekanik özelliklerini dahil edilerek yapılan simülasyonda eklemlere uygulanması gereken tork değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan tork ve hız değerlerini karşılayacak eyleyici ve redüktör seçimi yapılmıştır.



Şekil 6. Dinamik Analiz Ekranı

Cihaz üzerinde kullanılan eyleyicilerin, eyleyicilerle birlikte kullanılan enkoderlerin ve redüktörlerin özellikleri Tablo 2 de listelenmiştir. Kullanılan motorlar, sürücüler ve enkoderler LS Mecapion markadır. Döner eksenlerde kullanılan redüktörler (3 adet) 1:70 oranındadır. Cihazın kayar eksenindeki hareketi doğrusal kızaklar ve vidalı mil ile sağlanmaktadır. Ayrıca z ekseninde cihazın kütesini dengelemek için karşıt kütle (50kg) kullanılmıştır. Bu kütle cihazın arka gövdesinde bulunmaktadır, makaralar ve halatlar yardımıyla z eksenindeki hareketi sağlayan kayar kızağa bağlanmıştır. Cihazın döner mafsallarında rulmanlı yataklar kullanılmış bu sayede motor milleri üzerlerine radyal ve eksenel yük gelmemesi sağlanmıştır.

Motor No.	Motor Kodu	Motor Gücü (W)	Enkoder Türü	Redüktör Oranı
1	APM-SC08	800	Artımlı	1
2	APM-SC08	800	Artımlı	1:70
3	APM-SC08	800	Artımlı	1:70
4	APM-SC04	400	Artımlı	1:70

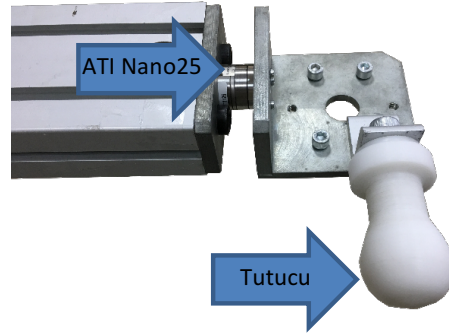
Tablo. 2. Eyleyiciler, eyleyici güçleri, enkoder türleri, redüktör oranları

Yapılan eyleyici ve uzuv boyutları seçimleri sonrasında montajı yapılan haptik sistem Şekil 7'da verilmiştir.



Şekil 7. Üretilen haptik ana sistem

Cihaz admitans yapısında bir cihaz olarak tasarlandığından, kullanıcıdan uyguladığı kuvvet, tutacak konstrüksiyonuna eklenen ATI Industrial Automation firmasına ait Nano25 model kuvvet-moment algılayıcısı ile ölçülmektedir. Kuvvet-moment algılayıcısı robotun en son uzvu ile tutucuyu taşıyacak olan parçanın arasına yerleştirilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Kuvvet/ tork algılayıcısı ve tutucu

### III. Cihazın Kinematik ve Dinamik Modeli

Tasarlanan cihazın kinematik yapısı Şekil 2'de verilmiştir. Cihazın uzuvların efektif uzunlukları  $a_i$  ( $i = 1,2,3,4$ ) ile, mafsal değişkenleri  $s_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  ile, uzuvların kütleleri  $m_i$  ile, kütle merkezinde z-ekseninde hesaplanan atalet momentleri  $I_i$  ile kütle merkezlerinin mafsallara olan mesafeleri  $l_i$  ile gösterilmiştir.

Cihazın uç noktasının seçilen görev uzayı koordinat sistemine göre ileri kinematik denklemleri aşağıda verilmiştir;

$$x = a_1 + a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos \theta_{23} + a_4 \cos \theta_{234} \quad (2)$$

$$y = a_2 \sin \theta_2 + a_3 \sin \theta_{23} + a_4 \sin \theta_{234} \quad (3)$$

$$z = s_1 \quad (4)$$

$$\gamma = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \quad (5)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $\theta_{23} = \theta_2 + \theta_3$  ve  $\theta_{234} = \theta_{23} + \theta_4$  olarak kullanılmıştır. İleri kinematik denklemlerinin zamana göre türevlerinin alınması ile elde edilen hız denklemleri ile Jakobi matrisi aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \hat{J} \begin{bmatrix} \dot{s}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\hat{J} = \begin{bmatrix} 0 & -a_2 \sin \theta_2 & -a_3 \sin \theta_{23} & -a_4 \sin \theta_{234} & -a_3 \sin \theta_{23} & -a_4 \sin \theta_{234} & -a_4 \sin \theta_{234} \\ 0 & a_2 \cos \theta_2 & a_3 \cos \theta_{23} & a_4 \cos \theta_{234} & a_3 \cos \theta_{23} & a_4 \cos \theta_{234} & a_4 \cos \theta_{234} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Buna göre, mafsal konumları ters kinematik ile bulunabilir. İlk mafsal olan kayar mafsalın konumu z eksenine doğrultusunda, çalışma uzayında robotun uç noktasının konumuna eşittir;

$$s_1 = z \quad (8)$$

Uç noktasının konumu ve yönelimi ters kinematik çözümde bilindiğinden, 2 ve 3 numaralı denklemlerde, bilinen değerler denklemin sol tarafında toplanıp;

$$\begin{aligned} x^* &= x - a_1 - a_4 \cos \gamma = a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos \theta_{23} \\ y^* &= y - a_4 \sin \gamma = a_2 \sin \theta_2 + a_3 \sin \theta_{23} \end{aligned} \quad (9)$$

kareleri alınıp taraf tarafa toplandığında aşağıdaki denklem elde edilir;

$$x^{*2} + y^{*2} = a_2^2 + a_3^2 + 2a_2a_3 \cos \theta_3$$

(10) vasıtasıyla üçüncü mafsalsın konumu olan  $\theta_3$  bulunabilir;

$$\begin{aligned} \cos \theta_3 &= \frac{x^{*2} + y^{*2} - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3} \\ \sin \theta_3 &= \sigma_3 \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3} \quad \sigma_3 = \pm 1 \\ \theta_3 &= \text{atan}_2(\sigma_3 \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3}, \cos \theta_3) \end{aligned} \quad (10)$$

(9) trigonometrik eşitlikler ile tekrar düzenlendiğinde aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\begin{aligned} x^* &= a_2 \cos \theta_2 + a_3 (\cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_2 \sin \theta_3) = (a_2 + a_3 \cos \theta_3) \cos \theta_2 - a_3 \sin \theta_3 \sin \theta_2 \\ y^* &= a_2 \sin \theta_2 + a_3 (\cos \theta_2 \sin \theta_3 + \sin \theta_2 \cos \theta_3) = (a_3 \sin \theta_3) \cos \theta_2 + (a_2 + a_3 \cos \theta_3) \sin \theta_2 \end{aligned}$$

Buradan, daha önce bulunan üçüncü mafsal konumu da kullanılarak ikinci mafsal konumu olan  $\theta_2$  aşağıda verildiği şekilde bulunur.

$$\begin{aligned} \sin \theta_2 &= \frac{y^* (a_2 + a_3 \cos \theta_3) - x^* (a_3 \sin \theta_3)}{a_2^2 + a_3^2 + 2a_2a_3 \cos \theta_3} \\ \cos \theta_2 &= \frac{x^* (a_2 + a_3 \cos \theta_3) + y^* (a_3 \sin \theta_3)}{a_2^2 + a_3^2 + 2a_2a_3 \cos \theta_3} \\ \theta_2 &= \text{atan}_2(\sin \theta_2, \cos \theta_2) \end{aligned} \quad (11)$$

Son olarak ise dördüncü mafsal değişkeni olan  $\theta_4$  ise (5) kullanılarak bulunur.

$$\theta_4 = \gamma - (\theta_2 + \theta_3) \quad (12)$$

Bu noktaya kadar, ters kinematik çalışma uzayının 4 serbestlik derecesinde olduğu durum için yapıldı. Ancak, tasarlanan cihaz sadece üç-boyutlu uzayda uç noktası konumlandırılması için kullanılacaktır ve bu durumda gereğinden fazla eksene sahiptir, yani kinematik olarak artıksıldır.

Bu durumda, ters kinematik çözümde 4 bilinmeyen mafsal hareketi için bilinen üç adet uç noktası hareketi bulunmaktadır. Bu durumda artıksıl sistemin ters kinematik analizi sonsuz sayıda çözüme sahiptir ve bize belirleyeceğimiz başarımla kıstaslarına göre eniyileme fırsatı getirmektedir. Artıksıl kinematik yapı için yeniden oluşturulmuş Jakobi matrisi şu şekilde gösterilebilir;

$$\hat{J}_r = \begin{bmatrix} 0 & -a_2 \sin \theta_2 - a_3 \sin \theta_{23} - a_4 \sin \theta_{234} & -a_3 \sin \theta_{23} - a_4 \sin \theta_{234} & -a_4 \sin \theta_{234} \\ 0 & a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos \theta_{23} + a_4 \cos \theta_{234} & a_3 \cos \theta_{23} + a_4 \cos \theta_{234} & a_4 \cos \theta_{234} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Sonuç olarak, asgari mafsal hareketi kıstasına göre Jakobi matrisinin sözde tersi (14)'deki gibi elde edilir.

$$\hat{J}^t = \hat{J}_r^t (\hat{J}_r \hat{J}_r^t)^{-1} \quad (14)$$

Haptik sistemlerde, cihazın uç noktasında yaratılan kuvvetler önemlidir. (15)'te cihazın uç noktasında istenen kuvvet  $\bar{F}$  için mafsallarda eyleyiciler tarafından oluşturulması gereken kuvvet/moment değerlerini  $\bar{\tau}_q$  bulmak için gerekli denklemler verilmiştir.

$$\bar{\tau}_q = -\hat{J}_r^T \cdot \bar{F} \quad (13)$$

$$\bar{\tau}_q = \begin{bmatrix} \tau_{q1} \\ \tau_{q2} \\ \tau_{q3} \\ \tau_{q4} \end{bmatrix}, \quad \bar{F} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}$$

Cihazın dinamik denklemleri enerji temelli Lagrange yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Eklem uzayında elde edilen k eklemi için elde edilen dinamik denklem aşağıda verilmektedir.

$$\sum_{j=1}^4 m_{kj} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^4 B_{kj} \dot{q}_j^2 + \sum_{j=1}^3 \sum_{i=j+1}^4 \gamma_{kji} \dot{q}_j \dot{q}_i + G_k = Q_k \quad (14)$$

Cihazda kullanılan karşıt kütle ile yer çekimi etkileri giderilmektedir. (14)'te  $Q_k$  k mafsalına kendisine bağlı eyleyici tarafından uygulanan kuvveti/momenti,  $q_k$  k mafsal değişkenini,  $\dot{q}_k$  ise k mafsalının hızını göstermektedir.  $B_{kij}$  merkezkaç kuvveti katsayısını ve  $\gamma_{kji}$  Koriolis kuvveti katsayısını ifade etmektedir.  $m_{kij}$  ise genelleştirilmiş kütle matrisi elemanlarını göstermektedir. Bahsi geçen katsayıların hesapları aşağıda verilmiştir.

$$m_{11} = 2(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)$$

$$\begin{aligned} m_{22} &= m_2 l_2^2 + m_3 (a_2^2 + l_3^2 + 2a_2 l_3 \cos \theta_3) \\ &\quad + m_4 (a_2^2 + a_3^2 + l_4^2 + 2a_2 a_3 \cos \theta_3 \\ &\quad + 2a_2 l_4 \cos \theta_{34} + 2a_3 l_4 \cos \theta_4) + I_2 \\ &\quad + I_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{23} &= [m_3 (a_2 l_3 \cos \theta_3 + l_3^2) + m_4 (a_2 a_3 \cos \theta_3 \\ &\quad + a_2 l_4 \cos \theta_{34} + a_3^2 + 2a_3 l_4 \cos \theta_4 \\ &\quad + l_4^2) + I_3 + I_4 \end{aligned}$$

$$m_{24} = [m_4 (a_2 l_4 \cos \theta_{34} + a_3 l_4 \cos \theta_4 + l_4^2) + I_4$$

$$m_{33} = [m_3 l_3^2 + m_4 (a_3^2 + l_4^2 + 2a_3 l_4 \cos \theta_4)] + I_3 + I_4$$

$$m_{34} = m_4 (a_3 l_4 \cos \theta_4 + l_4^2) + I_4$$

$$m_{44} = m_4 l_4^2 + I_4$$

$$\begin{aligned}
 B_{11} &= B_{12} = B_{13}=B_{14} = B_{21} = B_{22} = 0 \\
 B_{23} &= -m_3 a_2 l_3 \sin \theta_3 - \frac{1}{2} m_4 (a_2 a_3 \sin \theta_3 + a_2 l_4 \sin \theta_{34}) \\
 B_{24} &= -m_4 (a_2 l_4 \sin \theta_{34} + a_3 l_4 \sin \theta_4) \\
 B_{41} &= B_{44} = 0 \\
 B_{42} &= m_4 (a_3 l_4 \sin \theta_4 + a_2 l_4 \sin \theta_{34}) \\
 B_{43} &= m_4 a_3 l_4 \sin \theta_4 \\
 B_{31} &= B_{33} = 0 \\
 B_{32} &= m_3 a_2 l_3 \sin \theta_3 + m_4 (a_2 a_3 \sin \theta_3 + a_2 l_4 \sin \theta_{34}) \\
 B_{34} &= -m_4 a_3 l_4 \sin \theta_4 \\
 \gamma_{212} &= \gamma_{213} = \gamma_{214} = 0 \\
 \gamma_{223} &= -2m_3 a_2 l_3 \sin \theta_3 - 2m_4 a_2 a_3 \sin \theta_3 \\
 &\quad - 2m_4 a_2 l_4 \sin \theta_{34} \\
 \gamma_{224} &= -2m_4 a_3 l_4 \sin \theta_4 - 2m_4 a_2 l_4 \sin \theta_{34} \\
 \gamma_{234} &= -m_4 a_2 l_4 \sin \theta_{34} - 2m_4 a_3 l_4 \sin \theta_4 \\
 &\quad - m_4 a_2 l_4 \sin \theta_{34} \\
 \gamma_{312} &= \gamma_{313} = \gamma_{314} = \gamma_{323} = 0 \\
 \gamma_{324} &= -2m_4 a_3 l_4 \sin \theta_{34} \\
 \gamma_{334} &= -2m_4 a_3 l_4 \sin \theta_4 \\
 \gamma_{412} &= \gamma_{413} = \gamma_{414} = \gamma_{424} = \gamma_{434} = 0 \\
 \gamma_{423} &= 2m_4 a_3 l_4 \sin \theta_4
 \end{aligned}$$

Hesaplanan katsayılar kullanılarak her mafsall için oluşturulan dinamik denklem aşağıda verilmiştir.

$$F_1 = (m_1 + m_2 + m_3 + m_4) \ddot{s}_1 \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 \tau_2 &= m_{22} \ddot{\theta}_2 + m_{23} \ddot{\theta}_3 + m_{24} \ddot{\theta}_4 + [B_{23} \dot{\theta}_3^2 + B_{24} \dot{\theta}_4^2 + \\
 &\quad \gamma_{223} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \gamma_{224} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 + \gamma_{234} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4] \quad (16)
 \end{aligned}$$

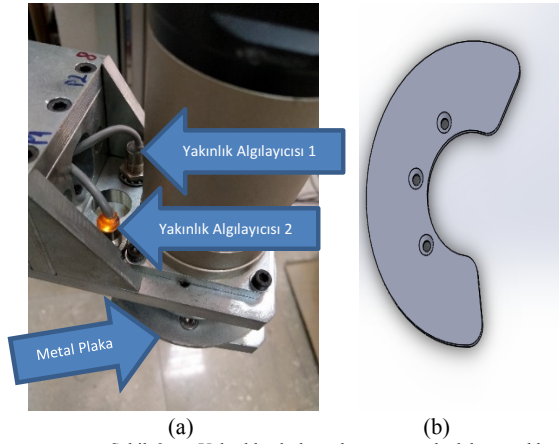
$$\begin{aligned}
 \tau_3 &= m_{23} \ddot{\theta}_2 + m_{33} \ddot{\theta}_3 + m_{34} \ddot{\theta}_4 + B_{32} \dot{\theta}_2^2 + B_{34} \dot{\theta}_4^2 + \\
 &\quad \gamma_{324} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 + \gamma_{334} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4 \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_4 &= m_{24} \ddot{\theta}_2 + m_{34} \ddot{\theta}_3 + m_{44} \ddot{\theta}_4 + B_{42} \dot{\theta}_2^2 + \gamma_{423} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \\
 &\quad (18)
 \end{aligned}$$

#### IV. Deneysel Donanım ve Sıfırlama Çalışmaları

Geliştirilen cihazda artımlı enkoderler kullanıldığı için her çalışma öncesinden sıfır konumuna getirilmesi gereklidir. Cihazın sıfır konumuna getirilmesi ise her bir eksenin sıfır konumuna getirilmesi ile olmaktadır.

Sıfırlama işleminin gerçekleştirilebilmesi için cihazın her mafsallında 2 adet yakınlık algılayıcısı (Şekil 9 a) kullanılmıştır. Buna göre 4 mafsall için toplam 8 adet yakınlık algılayıcısı bulunmaktadır. Ayrıca cihazın kollarındaki mafsallarda bulunan metal plakalar sayesinde yakınlık algılayıcıları aktif ve pasif duruma geçmektedir. Yakınlık algılayıcıları metal plakanın üzerine geldiğinde aktif, çıktığında ise pasiftir. Metal plakalar mafsall limitlerini ayarlamak için 210 derecelik dairesel plaka olarak tasarlanmıştır (Şekil 9 b).



Şekil 9. a. Yakınlık algılayıcıları ve metal plakanın eklem üzerinde gösterimi b. Metal plakanın çizimi.

Robot çalıştırıldığında her mafsall için yakınlık algılayıcılarından dijital olarak 0 veya 1 değeri alınmaktadır. 0 durumu, algılayıcının pasif olduğunu, 1 durumu ise algılayıcının aktif olduğunu gösterir. Bu durumda sıfırlama işlemi başladığında her döner mafsalla bağlı uzvun bulunduğu konuma göre algılayıcı çiftleri, her bir döner mafsall için 0-0, 0-1, 1-0, veya 1-1 durumlarından biri olabilir. Ancak kayar mafsall eksenleri için ise 3 durum mevcuttur. Bunlar ise 1-0, 0-1 ve 0-0 durumlarıdır.

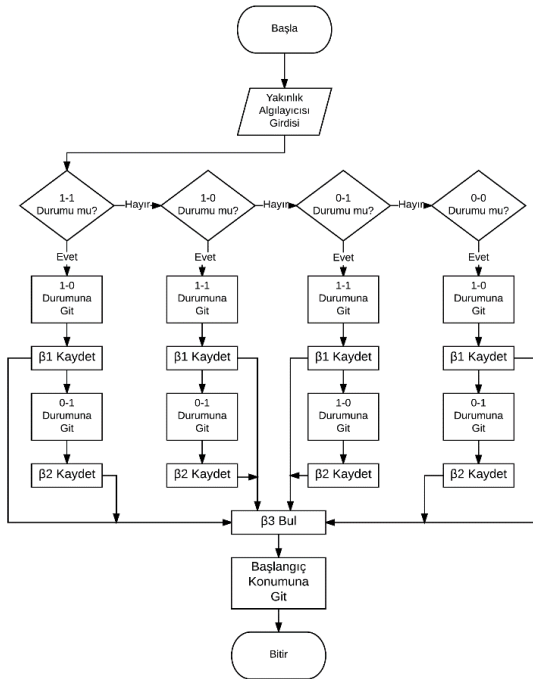
Sıfırlama işlemi cihazın uzuvları büyük olduğu ve bu nedenle yüksek eylemsizlikten etkilenmemesi için her mafsall için teker teker gerçekleştirilmektedir. İşlem ilk mafsall ile başlayıp, son mafsall ile bitmektedir.

Sıfırlama işlemi başladığında ilk olarak yakınlık algılayıcılarının durumu tespit edilmektedir. İlk eksen olan kayar mafsall eksenleri için, eğer yakınlık algılayıcıları 0-0 durumunda ise motor pozitif yönde 1-0 durumuna ulaşana kadar kayar mafsall yukarı yönde hareket eder ve bu noktada robotun bu eksenindeki konumu 2 m olarak ayarlanır. Daha sonra ise yukarıdan aşağıya istenen çalışma mesafesine inmesi sağlanır. Algılayıcılar ilk açılıştta 1-0 veya 0-1 durumunda ise, robot 1-0 durumunda 2 m'de 0-1 durumunda ise 0 konumunda olduğu bilindiğinden bu konumlar doğrudan robot için ayarlanır.

Sonra, kullanıcının kolunun yerden yüksekliğine göre belirlenen yüksekliğe getirilir.

Robotun döner mafsallarında bulunan yakınlık algılayıcılarının 4 farklı durumu için ise sıfırlama algoritması Şekil 10'da verilmiştir. Geliştirilen algoritma şu şekilde işlemektedir:

(1) Algılayıcılar başlangıç anında 1-1 durumunda ise: Motor negatif yönde harekete başlar ve algılayıcılar 1-0 duruma gelene kadar hareketine devam eder. Bu konumda enkoderden değer okunur ( $\beta_1$ ) ve kaydedilir. Daha sonra motor ters yönde harekete başlar ve 0-1 durumu oluşana kadar bu hareket devam eder. 0-1 durumu olduğu anda ise enkoderden yine ölçüm alınır ( $\beta_2$ ) ve kaydedilir. Kaydedilen bu iki açı değeri toplanır. Bu toplam değerden  $\beta_2$ 'nin yarısı çıkartılarak  $\beta_3$  değeri elde edilir. Böylece robot kolunun ilk çalıştığı anda sıfır konumuna göre mesafesi bulunmuş olunur. Daha sonra ise  $\beta_3$  değerine istenilen başlangıç konumu eklenerek uzuv istenilen başlangıç konumuna getirilir.

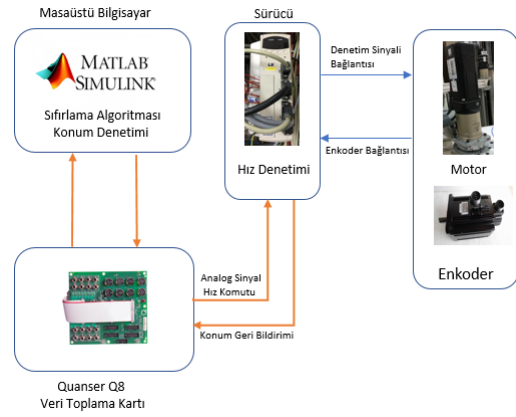


Şekil 10. Sıfırlama akış diyagramı

(2) Algılayıcılar 1-0 durumunda iken: Motor hareketine başlayıp 1-1 duruma gelene kadar pozitif yönde sürülmektedir. 1-1 durumuna geldikten sonra enkoderden ölçüm alınır ve kaydedilir. İlgili uzuv ise 0-1 durumu olana kadar sürülmeye devam edilir ve bu duruma geldiğinde de ölçüm alınır ve kaydedilir. Bu iki ölçülen değerlerin ortalaması alınarak mafsalin sıfır konumu belirlenir. Daha sonra mafsal istenilen başlangıç konumuna getirilir.

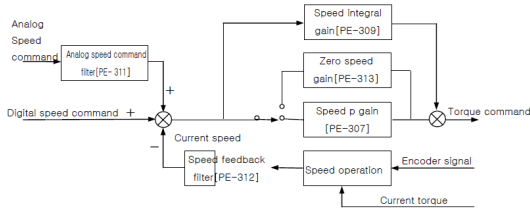
(3) Algılayıcılar 0-1 durumunda iken: Motor hareketine başlayıp 1-1 duruma gelene kadar negatif yönde sürülmektedir. 1-1 durumuna geldikten sonra enkoderden ölçüm alınır ve kaydedilir. Robot ise 1-0 durumu olana kadar sürülmeye devam edilir ve bu duruma geldiğinde de ölçüm alınır ve kaydedilir. Bu iki ölçülen değerlerin ortalaması alınarak mafsalin sıfır konumu belirlenir. Daha sonra mafsal istenilen başlangıç konumuna getirilir.

(4) Algılayıcılar 0-0 konumunda iken: Motor pozitif yönde sürülmeye başlanır. Algılayıcılar 1-0 durumuna geldiğinde kat edilen mesafe kaydedilir. Robot 0-1 durumuna geldiğinde ise tekrar ölçüm alınarak robotun sıfır noktası bulunur. Daha sonra mafsal istenilen başlangıç konumuna getirilir.



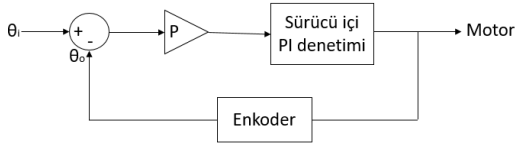
Şekil 11. Sıfırlama Algoritması için gerekli sinyal akış şeması

Sıfırlama algoritması dahil olmak üzere sistemin denetimi Matlab Simulink ve Real-Time Windows Target kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen denetim sistematüğünü kullanmak için gerekli donanım ve bilgi alışverişi Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 11'de gösterildiği gibi Quanser Q8 Veri Toplama kartı Matlab ile veri alışverişi için kullanılmıştır ve LS Mecapion sürücü, motor ve enkoder ile gerekli işlemler gerçekleştirilmiştir. Algoritma yardımı ve veri toplama kartı vasıtasıyla sürücülere analog voltaj sinyali yollanmaktadır ve sürücülerden ise motorlara gelen sinyale göre sürmektedir. Motor sürücüsüne veri toplama kartı üzerinden yollanan analog sinyaller hız komutu olarak gönderilmektedir. Enkoderden sürücüye gelen konum bilgisi ise sürücülerden veri toplama kartına denetim algoritmasında kullanılmak üzere iletilir. Sürücüdeki gömülü denetimci [7], gelen hız komutlarını ve enkoder geribildirimini kullanarak oransaltımlevsel (PI) denetim (Şekil 12) ile mafsal motorlarını denetlemektedir.



Şekil 12. Sürücü içi PI denetimi [7]

Masaüstü bilgisayar içerisinde ise hız komutları pozisyon kontrol döngüsü ile üst seviyede yaratılmaktadır. Robot kollarının sıfırlama işlemi sırasında sistemde var olan gürültüden dolayı robot kolları kendi sırası gelene kadar negatif yönde dönmektedir. Bu engellenmezse robot kolu sıfırlama işlemini yapana kadar diğer kola çarparak kazaya neden olabilmektedir. Bu istemsiz dönmeyi engellemek ve robotu istenen konuma götürme amacıyla üst denetleyicide oransal denetim (P-denetimi) Şekil 13'te verildiği gibi uygulanmaktadır. Denetim sonucu oluşturulan sinyal sürücü içindeki PI denetleyicisine gönderilen hız isteğidir.



Şekil 13. Sıfırlama algoritmasında kullanılan oransal denetleyici

## V. Sonuçlar

Bu çalışmada, kinematik olarak artıksıl yapıli admitans tipi cihazın tasarımı, kinematik denklemleri, dinamik denklemleri, sıfırlama çalışmaları hakkında bilgiler sunulmuştur. Tasarlanan cihaz dört serbestlik derecesine sahip olup, kinematik artıksıllık döner mafsalların çalıştığı düzlemde uzuvların kullanıcıdan kaçınması için kullanılmaktadır. Uzuv uzunlukları, insan kolunun çalışma alanına göre belirlenmiştir. Eyleyici ve redüktör seçimleri ise yapılan dinamik analizler sonucu belirlenmiştir. İleriki çalışmalarda admitans denetleyici tasarımı ve kullanıcıdan uzuvların kaçınması için denetim çalışmaları gerçekleştirilecektir.

## Teşekkür

Bu çalışma 115E726 nolu TÜBİTAK 1003 projesi kapsamında desteklenmektedir.

## VI. Kaynakça

[1] Jamwal P.-K., Hussain S., Ghayesh M.-H. ve Rogozina S.-V Impedance Control of an Intrinsically Compliant Parallel Ankle Rehabilitation Robot. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 63, No. 6, June 2016.

[2] Salisbury K., Conti F. Ve Barbagli F. Haptic Rendering Introductory Concepts. IEEE Computer Graphics and Applications Volume: 24, Issue: 2, March-April 2004

[3] Colgate E.-J ve Brown M.-J. Factors Affecting the Z-Width of a Haptic Display Robotics and Automation, IEEE International Conference 8-13 May 1994.e

[4] Van Der Linde R.-Q., Lammertse P., Frederiksen E ve Ruiters B. The HapticMaster, a new high-performance haptic interface. Proceedings of EuroHaptics 2002.

[5] Peer A. ve Buss M. A New Admittance-Type Haptic Interface for Bimanual Manipulations. IEEE/ASME Transactions On Mechatronics, Vol. 13, No. 4, August 2008.

[6] Peer A. Design and Control of Admittance-Type Telem Manipulation Systems, July 2008.

[7] LS Mecapion User Manual (APD -VS Standart Series) Ver 3.9