

MINİMAL İNVAZİV AMELİYAT SİMÜLATÖRLERİ İÇİN SANAL UZAK HAREKET MERKEZİ OLUŞTURULMASI

ÇAĞATAY ÖZTÜRK^{1, a)}, GÖKHAN KİPER^{1, b)} ve MEHMET İSMET CAN DEDE^{1, c)}

¹İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü 35430, Urla, İZMİR

^{a)}caगतayozturk@iyte.edu.tr, ^{b)}gokhankiper@iyte.edu.tr, ^{c)}candede@iyte.edu.tr

Hipofiz bezi tümörü minimal invaziv ameliyatında cerraha endoskop aletini tutarak ve yönlendirerek yardımcı olması için bir yardımcı robot sistemi geliştirilmektedir. Bu sistemde cerrahın istekleri derin öğrenme destekli görüntü işleme algoritması ile tespit edilmekte ve robot bu isteklere uygun şekilde endoskopi yönlendirmektedir. Gerçek robot ile çalışmadan önce cerrah isteklerinin tespit edilmesi algoritmasını sınamak için bir simülasyon geliştirilmiştir. Simülasyonda cerrahi aletler bir haptik cihaz vasıtasıyla simüle edilmektedir. Ancak kullanılan haptik cihazlar uzak hareket merkezi etrafında hareket etme kabiliyetine sahip değildir. Ameliyat sırasında burun deliği uzak hareket merkezi olarak kullanılmaktadır. Cerrahların gerçekçi bir simülasyon ile çalışmalarını gerçekleştirebilmesi için bu çalışmada haptik cihazların uzak hareket merkezi etrafında çalışabilmesini sağlayan yöntem geliştirilmiştir. Bildiride sunulan çalışmanın yayına katkısı uzak hareket merkezli hareket kabiliyetine sahip olmayan haptik cihazların motorları kullanılarak uzak hareket merkezi kısıtının oluşturulması için bir yöntem önerilmesidir. Geliştirilen yöntem denklemler ile açıklanmış ve başlangıç testine ait sonuçlar paylaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ameliyat simülasyonu, uzak hareket merkezi, haptik cihaz

IMPLEMENTATION OF A VIRTUAL REMOTE CENTER OF MOTION FOR MINIMALLY INVASIVE SURGERY SIMULATORS

ABSTRACT

An assistive robot system is being developed to assist the surgeon by holding and guiding the endoscope during minimally invasive surgery for pituitary tumors. In this system, the surgeon's requests are detected by a deep learning-supported image processing algorithm, and the robot guides the endoscope in accordance with these requests. A simulator was developed to test the algorithm for determining surgeon requests before working with the real robot. In the simulator, surgical instruments are simulated by a haptic device. However, the haptic devices used cannot move around the remote center of motion. The nostril is used as the remote center of motion during the actual surgery. In this study, a method that allows haptic devices to work around the remote center of motion is developed so that surgeons can work with a realistic simulator. The contribution of the study presented in the paper is to propose a method for creating the remote motion center constraint using the motors of haptic devices that do not have remote motion center movement capability. The developed method is explained via equations in this paper, and the results of the initial test are shared.

Keywords: Surgical robots, remote center of motion, haptic device

1. GİRİŞ

Son yıllarda, minimal invazif cerrahi yöntemler, açık cerrahiye kıyasla vücut dokularının daha az zarar görmesi, hastaların ameliyat sonrası daha az ağrı hissetmesi, hastanede kalış süresinin daha kısa olması ve

komplikasyon riskinin daha düşük olması gibi nedenlerle cerrahlar tarafından giderek daha fazla tercih edilmektedir.

Minimal invazif cerrahi, beyin cerrahi, kalp cerrahi, böbrek nakli vb. uygulamalarında

kullanılabilir [1]. Minimal invazif ameliyatlarda manuel aletler kullanılabilir gibi çeşitli robotlar da kullanılmaktadır. Bu tür cerrahi robotlar ilgili ameliyat yerinin yakınında bulunan hassas dokulara zarar gelmemesi amacıyla uzak hareket merkezi (UHM) kısıtı altında çalışmaktadır [2,3,4]. UHM kısıtı ile robotlar sabit bir nokta etrafında dört tip hareket yapabilmektedir: 1 doğrultuda (girişim yönünde) öteleme ve 3 eksen etrafındaki dönüş hareketi. UHM kısıtı, mekanik yollarla veya yazılım aracılığıyla, belirlenen sanal bir UHM noktası üzerinden kinematik olarak uygulanabilmektedir.

Ameliyat simülasyonları cerrah eğitiminde simülasyon ortamının risk içermemesi ve tekrarlanabilir pratik yapma olanağı sağladığı için önem arz etmektedir. Da Vinci ameliyat robotu için hazırlanmış olan RoSS isimli ameliyat simülasyonunda yapılan çalışma sonucunda katılımcıların %94'ü simülasyonun eğitim için kullanışlı olduğunu belirtmiştir [5].

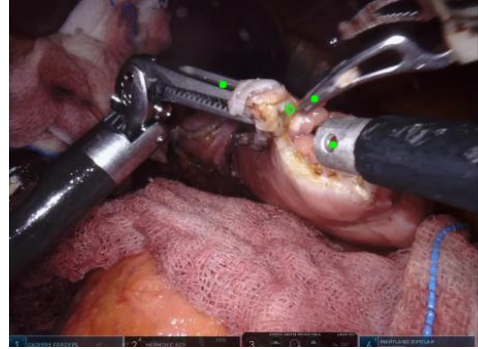
Literatürde çeşitli cerrahi operasyonlar için oluşturulmuş ameliyat simülasyonlarında genelde haptik cihazlar ameliyat aletini temsil ederken, kamera görüntüsü kullanıcıya bilgisayar ekranından gösterilmektedir. Haptik geri-bildirim sayesinde doktor, farklı sertlikteki dokuları hissedip, farklı dokuları ayırt edebilmektedir. Bir laparoskopik cerrahi simülasyonunda ameliyat aletlerinin hareketlerinin benzetim yazılımına aktarılması ve kuvvet geri-bildirimi için Geomagic haptik cihazlar kullanılmıştır [6]. Şakak kemiği diseksiyonu ameliyatı için hazırlanmış olan bir ameliyat simülasyonunda ise ameliyat aletlerinin hareketlerinin benzetim yazılımına aktarılması ve temas edilen sanal dokular sayesinde oluşturulan kuvvet geri-bildirimini kullanıcıya iletilmesi için Geomagic Premium 1.5 haptik cihazı kullanılmıştır [7].

Literatürde çeşitli amaçlar için tasarlanmış UHM kısıtlı robotlar yer almaktadır. Örneğin, KUKA LWR4+ robotu ile minimal invazif cerrahi uygulamalarında kullanmak için kinematik seviyede yazılım ile UHM kısıtı oluşturulmuştur. Bu yazılım ile robot UHM noktasından uzaklaşmamaktadır [8]. Bu bildiri de hipofiz bezi tümörü ameliyatı için hazırlanmış olan bir simülasyonda ameliyat aletlerinin hareketlerinin benzetim yazılımına aktarılması için kullanılan Geomagic Touch

haptik cihazlar ile sanal UHM noktası oluşturulması anlatılmıştır. Yapılan çalışmanın yayına katkısı uzak hareket merkezli hareket kabiliyetine sahip olmayan haptik cihazların motorları kullanılarak uzak hareket merkezi kısıtının oluşturulması için bir yöntem önerilmesidir. İkinci ve üçüncü bölümlerde geliştirilen ameliyat simülasyonu ve Geomagic Touch haptik cihazı tanıtılmaktadır. Sanal UHM oluşturulması algoritması dördüncü bölümde verilmiştir. Son olarak deney sonuçları sunulmuştur.

2. AMELİYAT SİMÜLATÖRÜ

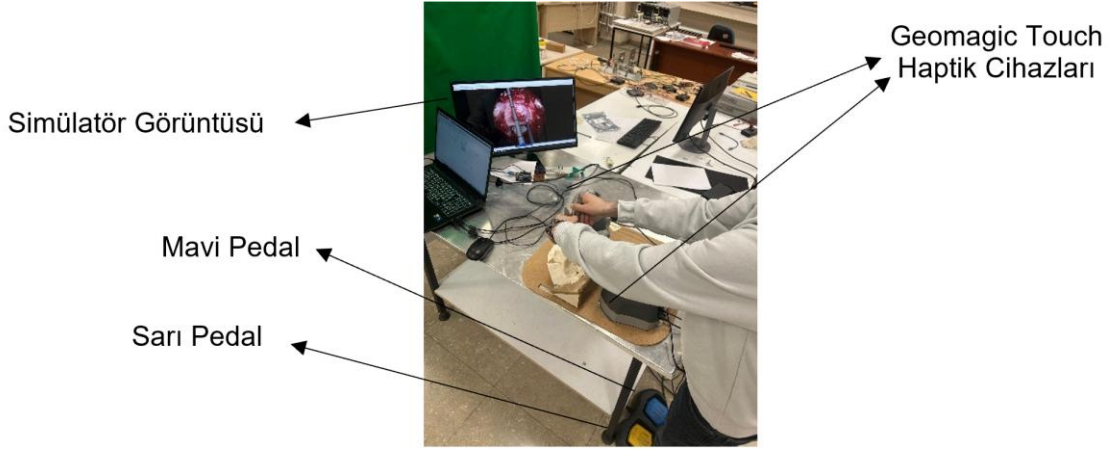
Hipofiz bezi tümörü ameliyatı simülasyonu 123M353 numaralı TÜBİTAK destekli proje kapsamında geliştirilmiştir. Projenin ana konusu hipofiz bezi tümörü ameliyatında cerrah tarafından kullanılan endoskopun bir yardımcı robot tarafından UHM etrafında cerrah isteklerine göre yönlendirilmesidir.



Şekil 1. Endoskoptan alınan ameliyat bölgesindeki cerrahi aletlerin görünümü

Endoskop görüntüsünde yer alan cerrahi aletlerin konumları derin öğrenme teknikleri ile desteklenmiş görüntü işleme algoritmaları kullanılarak elde edilmektedir (Şekil 1). Tespit edilen alet konumlarına göre UHM etrafında iki eksenle döndürerek ve teleskop ekseninde ilerleterek robotun endoskopu uygun görüntü alacak şekilde konumlandırması hedeflenmiştir.

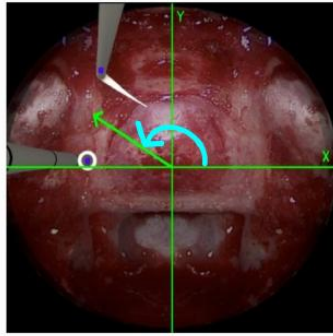
Geliştirilen derin öğrenme destekli cerrah isteklerini algılama algoritmasının ilk testleri için geliştirilen simülasyon ve ekipmanları Şekil 2'de gösterilmektedir. Geomagic Touch haptik cihazları ameliyat sırasında kullanılan cerrahi aletleri temsil etmektedir.



Şekil 2. Hipofiz bezi tümörü ameliyatı simülörü

Simülörde Şekil 1'dekinin aksine Şekil 2'deki gibi ekranda sanal olarak oluşturulmuş cerrahi aletler görünmektedir. Cerrahi aletlerin görüntüsünün endoskop görüntüsünü temsil eden simülör görüntüsünde yer alabilmesi için haptik cihazlardan konum ve yönelim bilgileri toplanmakta ve simülör modelindeki sanal cerrahi aletler yönlendirilmektedir.

Simülör görüntüsündeki cerrahi aletlerin geliştirilen derin öğrenme destekli cerrah isteği algılama algoritması ile işlenmesi sonucunda endoskopun yönelimi Şekil 3'te gösterildiği şekilde belirlenmekte ve sanal endoskop yönlendirme robotu isteklere göre hareket edip simülör görüntüsü değişmektedir.



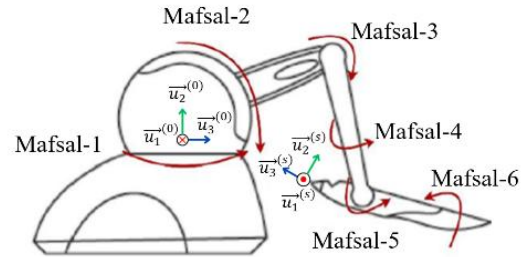
Şekil 3. Sanal endoskop yönlendirici robot için derin öğrenme destekli cerrah isteği algılama sisteminin oluşturduğu yönelim (mavi ok) ve ilerleme (yeşil ok) isteği görünümü

Gerçek ameliyat sırasında cerrahi aletler burun deliklerinin birinden ya da her ikisinden giriş yapmaktadır. Cerrahi aletlerin hareketleri burun deliği çeperindeki bir nokta etrafında gerçekleşmektedir. Ancak cerrahi aletleri simüle etmesi için simülörde kullanılan Geomagic Touch haptik cihazları genel

kullanıma yönelik altı serbestlik dereceli robotlar olup bu cihazların mekanik olarak UHM hareket kabiliyeti mevcut değildir. Üçüncü bölümde haptik cihazın özellikleri ve kinematik yapısı anlatılmaktadır.

3. HAPTİK CİHAZLARIN TANITIMI

Geomagic Touch haptik cihazlarında yer alan tutamaç altı serbestlik derecesinde hareket edebilmektedir, ancak sadece üç serbestlik derecesinde kuvvet geri-bildirimi oluşturabilmektedir.



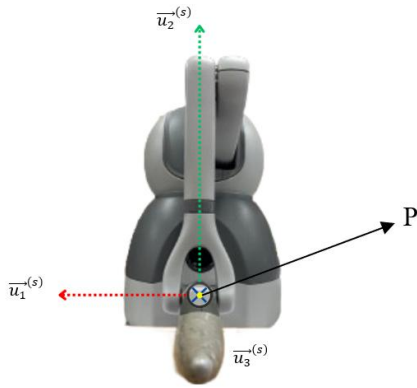
Şekil 4. Geomagic Touch haptik cihazının kinematik gösterimi

Şekil 4'te görüldüğü üzere birinci, ikinci ve üçüncü mafsal döner mafsal olmakla birlikte tutamacın (İng.: Stylus) olduğu kısım küresel mafsal olarak modellenilebilir. İlk üç mafsalda haptik geri-bildirim için motor yer almaktayken küresel mafsalda motor bulunmamaktadır.

Simülöre entegre edilmesi için kullanılan Python dilinde yazılmış arayüz yazılımında tutamacın mutlak yönelimi 2-1-3 (Y-X-Z) Euler açıları dizisi cinsinden oluşturulmakta ve Matlab programı kullanılarak simülöre iletilmektedir. Ayrıca küresel bilek merkezinin mutlak konumu aynı arayüz tarafından simülöre her simülasyon adımıyla iletilmektedir.

Cihazının ilk üç mafsalında yer alan motorlara tork girdisi yine aynı arayüz yazılımı kullanılarak iletelebilmekte ve motorlar sürülebilmektedir. Bir diğer yöntem ise görev uzayında oluşturulması istenen kuvvet bilgilerinin iletilmesidir. Bu durumda arayüz motorlara girilecek tork miktarlarını hesaplayıp haptik cihazın motorlarını sürmektedir.

Bilek noktasının mutlak konum bilgisi ve tutamacın 2-1-3 Euler açıları dizisi cinsinden hesaplanan mutlak yönelim bilgisi, haptik cihazın Python kütüphanesi kullanılarak elde edildikten sonra Matlab Engine kullanılarak Matlab Simulink ortamına aktarılmaktadır. Matlab Simulink ortamına aktarılan bilgiler kullanılarak dördüncü kısımda hesaplama yöntemi anlatılan tutamacı UHM noktasına çekmek için gerekli kuvvetler yine Matlab Engine ve haptik cihazın Python kütüphanesini kullanılarak Geomagic Touch haptik cihazına gönderilmektedir.

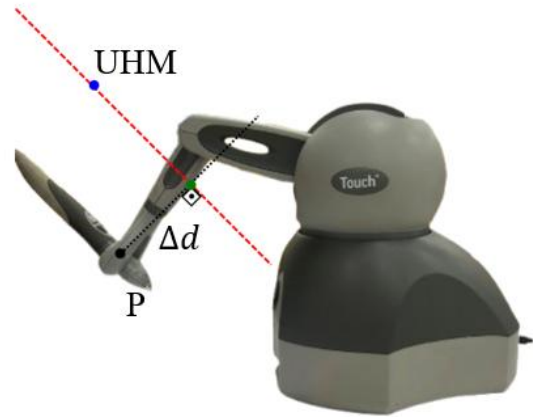


Şekil 5. Geomagic Touch haptik cihazının tutamacına yerleştirilmiş eksen takımı ($\vec{u}_1^{(s)}, \vec{u}_2^{(s)}, \vec{u}_3^{(s)}$) ve bilek noktası P gösterimi

Şekil 5'te Geomagic Touch haptik cihazı üzerinde yerleştirilmiş eksen takımı ve bilek noktası işaretlenmiştir. Tutamaç eksen takımının Şekil 4'te gösterilen yere bağlı eksen takımına ($\vec{u}_1^{(0)}, \vec{u}_2^{(0)}, \vec{u}_3^{(0)}$) göre yönelimi ve bilek noktasının (P) yine yere bağlı eksen takımına göre mutlak konumu bilgileri kullanılarak sanal UHM kısıtları oluşturulmuştur. Sanal UHM kısıtlarının oluşturulması dördüncü bölümde verilmektedir.

4. SANAL UHM KISITLARININ OLUŞTURULMASI

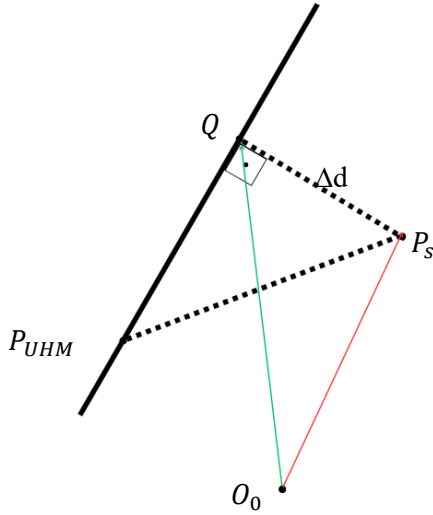
Simulatörde sanal UHM noktasının mutlak konumu, yani burun giriş noktası, önceden belirlenmiştir. Kullanılan Geomagic Touch haptik cihazının yere bağlı eksen takımına göre sanal UHM konumu oluşturulmuştur. Geomagic Touch haptik cihazının $\vec{u}_3^{(s)}$ eksen boyunca olan doğru, sanal UHM noktasından uzaklaştıkça tutamaç boyunca olan doğrunun sanal UHM noktasına çekilmesi için kuvvetlerin oluşturulması hedeflenmiştir. Haptik cihazda sadece ilk üç eksen motor bulmakta ve dolayısıyla noktasal temas kuvveti oluşturabilmektedir. UHM kısıt oluşturulabilmesi için Geomagic Touch haptik cihazının tutamacına yerleştirilmiş eksen takımındaki 1. ve 2. Eksenlere direkt kuvvet iletebilecek iki adet motor yeterlidir. Ancak haptik sistemdeki motorlar ilk üç ekseninde olduğu için ve tutamacın yönelimi değiştiği için iki eksenindeki kuvvet gereksinimi ancak üç eksenindeki motorun beraber çalışmasıyla gerçekleştirilebilmektedir. Konu ile ilgili detaylı formüller sonraki adımlarda verilmiştir.



Şekil 6. $\vec{u}_3^{(s)}$ vektörüne paralel UHM noktasından geçen doğru (kırmızı kesik çizgi) ve tutamaç ile doğru arasındaki en kısa mesafe olan Δd gösterimi

Şekil 6'da görülebileceği üzere, tutamacın hareketini UHM etrafına çekebilmek için, tutamacın bilek noktası konumu P ile sanal UHM'den geçen $\vec{u}_3^{(s)}$ yönündeki doğru arasındaki en kısa mesafe, yani Δd olarak gösterilen dik mesafe hesaplanmalıdır. Şekil

7’de sanal UHM’den geçen doğru boyunca olan $\overline{P_{UHM}Q}$ vektörünü \vec{r} vektörü ile ifade edelim. P_{UHM} sanal UHM’nin konumunu, P_S ise cihazın bilek noktasını, O_0 noktası ise Geomagic Touch haptik cihazının yere bağlı eksen takımının merkezini temsil etmektedir. Q noktası sanal UHM’den geçen \vec{r} vektörü üzerinde yer alan ve tutamaca en kısa mesafeyi ifade eden noktadır.



Şekil 7. UHM'den geçen $\vec{u}_3^{(s)}$ yönündeki doğru ile tutamacın konumu arasındaki en kısa mesafenin gösterimi

Denklem 1 ile tutamacın mutlak yönelimi Euler 2-1-3 açıları dizisi kullanılarak hesaplanmış ve $\hat{C}^{(0,s)}$ mutlak yönelim matrisi olarak hesaplanmıştır. Söz konusu hesabı yapabilmek için Geomagic Touch haptik cihazının arayüz yazılımında her simülasyon adımında gönderilen α , β ve γ açıları kullanılmıştır.

$$\hat{C}^{(0,s)} = e^{\tilde{u}_2 \alpha} e^{\tilde{u}_1 \beta} e^{\tilde{u}_3 \gamma} \quad (1)$$

$$e^{\tilde{u}_2 \alpha} = \begin{bmatrix} c\alpha & 0 & s\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\alpha & 0 & c\alpha \end{bmatrix}, \quad e^{\tilde{u}_1 \beta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\beta & -s\beta \\ 0 & s\beta & c\beta \end{bmatrix} \text{ ve}$$

$$e^{\tilde{u}_3 \gamma} = \begin{bmatrix} c\gamma & -s\gamma & 0 \\ s\gamma & c\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ dir. } \hat{C}^{(0,s)} \text{ matrisinin tersi } \hat{C}^{(s,0)}$$

ile gösterilmektedir.

Önceden belirlenmiş burun giriş (UHM) noktasının yere bağlı (0) eksen takımına göre tanımlanmış koordinatları Denklem 2’de verilmiştir.

$$\overline{P}_{UHM}^{(0)} = \begin{bmatrix} UHM_1^{(0)} \\ UHM_2^{(0)} \\ UHM_3^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Yere bağlı eksen takımında tanımlanan sanal UHM noktası, tutamaç eksen takımındaki koordinatları Denklem 3 kullanılarak hesaplanır.

$$\overline{P}_{UHM}^{(s)} = \hat{C}^{(s,0)} \overline{P}_{UHM}^{(0)} = \begin{bmatrix} UHM_1^{(s)} \\ UHM_2^{(s)} \\ UHM_3^{(s)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Arayüz yazılımında her simülasyon adımında iletilen yere bağlı eksen takımına göre hesaplanmış Geomagic Touch haptik cihazın tutamacının bilek noktası konum bilgisi Denklem 4’te belirtilmiştir.

$$\overline{P}^{(0)} = \begin{bmatrix} P_1^{(0)} \\ P_2^{(0)} \\ P_3^{(0)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Geomagic Touch haptik cihazının yere bağlı eksen takımına göre elde edilen konum bilgisi Denklem 5 kullanılarak tutamaç eksen takımına aktarılmıştır.

$$\overline{P}^{(s)} = \hat{C}^{(s,0)} \overline{P}^{(0)} = \begin{bmatrix} P_1^{(s)} \\ P_2^{(s)} \\ P_3^{(s)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Tutamacın bilek noktasının konumu ile sanal UHM arasındaki konum Denklem 6 kullanılarak tutamaç eksen takımında hesaplanır.

$$\overline{P_S P_{UHM}}^{(s)} = \overline{P}^{(s)} - \overline{P}_{UHM}^{(s)} \quad (6)$$

$\overline{P_S P_{UHM}}^{(s)}$ vektörünün $\vec{u}_3^{(s)}$ birim vektörü üzerindeki izdüşümü hesaplanarak anlık bilgilerle (yani her simülasyon adımında) \vec{r} vektörü Denklem 7’de verildiği şekilde oluşturulur.

$$\vec{r}^{(s)} = \overline{P_S P_{UHM}}^{(s)T} \vec{u}_3^{(s)} \quad (7)$$

Şekil 7’de yer alan Q noktasının koordinatları Denklem 8 ile hesaplanır.

$$\overline{Q}^{(s)} = \vec{r}^{(s)} + \overline{P}_{UHM}^{(s)} \quad (8)$$

Tutamaç eksen takımındaki $\vec{u}_3^{(s)}$ vektörünün UHM noktasına uzaklığını temsil eden $\Delta\vec{d}^{(s)}$ vektörü Denklem 9 ile hesaplanır.

$$\Delta\vec{d}^{(s)} = \vec{Q}^{(s)} - \vec{P}_{\text{UHM}}^{(s)} \quad (9)$$

Tutamaç doğrusunun UHM noktasından kaçıklık mesafesi hesaplandıktan sonra aradaki hatanın giderilmesi için bir yay analojisi benimsenmiştir. Kaçıklık miktarını sadece $\vec{u}_1^{(s)}$ ve $\vec{u}_2^{(s)}$ yönlerinde kuvvet oluşturarak gidermek için \hat{K} köşegen yay matrisi Denklem 10'da tanımlanmıştır. Cerrahi aletin UHM üzerinden ilerleme yönü olan $\vec{u}_3^{(s)}$ yönünde kuvvet oluşmaması ve bu yöndeki hareketin serbestçe gerçekleştirilebilmesi için \hat{K} matrisinin üçüncü köşegen elemanı sıfır seçilmiştir. Diğer iki diyagonal eleman birbirine eşit veya farklı yönlerde farklı kuvvetler oluşması için farklı seçilebilir.

$$\hat{K} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Tutamaç eksen takımında kullanıcıya iletilmesi gereken kuvvet Denklem 11 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\vec{F}^{(s)} = \hat{K}\Delta\vec{d}^{(s)} \quad (11)$$

Geomagic Touch haptik cihazına kuvvet bilgisi arayüz yazılımı ile görev uzayında yere bağlı eksen takımına göre gönderilebilmektedir. Dolayısı ile tutamaç eksen takımında hesaplanan kuvvet Denklem 12 kullanılarak yere bağlı eksen takımında ifade edilmelidir.

$$\vec{F}^{(0)} = \hat{C}^{(0,s)}\vec{F}^{(s)} \quad (12)$$

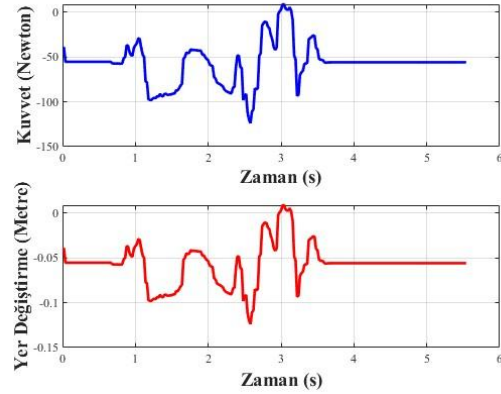
Özellikle UHM noktasına yakın yerlerde daha az kuvvet oluşması ve mesafe arttıkça uzaklaşmanın engellenmesi amacıyla doğrusal olmayan yay modelleri de kullanılabilir.

5. DENEY SONUÇLARI

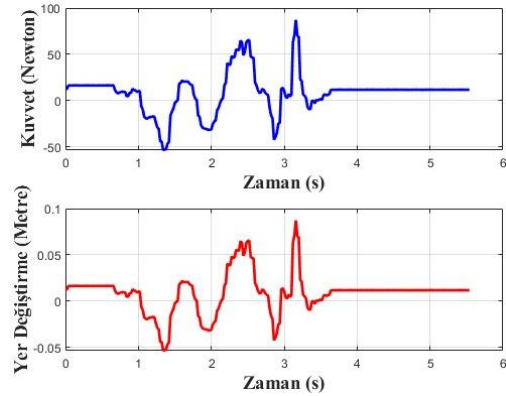
Dördüncü kısımda formüle edilen tutamacın UHM noktasına çekilmesine yönelik deney sonuçları bu kısımda ele alınmıştır. Deneyler sırasında bir kullanıcı Geomagic Touch haptik cihazını kullanmış ve rastgele hareketler gerçekleştirmiştir. Deneylerde doğrusal yay modeli kullanılmıştır.

Deneyler sırasında $\vec{u}_3^{(s)}$ yönünde kuvvet oluşmadığı tespit edilmiştir. Bu sayede kullanıcı $\vec{u}_3^{(s)}$ yönünde hiçbir kısıt kuvvetine maruz kalmadan serbest bir şekilde girişim hareketini yapabilmektedir.

Şekil 8'de $\vec{u}_1^{(s)}$ yönünde ve Şekil 9'da $\vec{u}_2^{(s)}$ yönünde ölçülen hareket ve karşılığında doğrusal yay modeli ile hesaplanan kuvvet bilgileri grafiklerle ifade edilmiştir.



Şekil 8. Tutamaç koordinat eksenindeki $\vec{u}_1^{(s)}$ doğrultusunda hesaplanan Kuvvet-Zaman ve Yer Değiştirme-Zaman grafikleri



Şekil 9. Tutamaç eksen takımındaki $\vec{u}_2^{(s)}$ doğrultusunda hesaplanan Kuvvet-Zaman ve Yer Değiştirme-Zaman grafikleri

6. TARTIŞMALAR VE SONUÇLAR

Bu bildiri de hipofiz bezi tümörü ameliyatında kullanılmak üzere geliştirilmekte olan yardımcı robot sisteminin simülatörü konusundaki çalışmaya yer verilmiştir. Ameliyat sırasında kullanılan cerrahi aletlerin benzetimi için kullanılan Geomagic Touch haptik cihazları UHM etrafında hareket etme kabiliyetine sahip değildir. Bu çalışmada haptik cihazların UHM etrafında hareket edebilmeleri için gerekli formülasyon sunulmuştur.

Henüz sadece bir kullanıcı ile testler gerçekleştirilmiştir. İlerleyen çalışmalarda sistem cerrahlar tarafından sınanacaktır. Cerrahlara doğrusal olmayan yay modelini kullanma seçeneği de verilecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 1001 programı kapsamında desteklenen 123M353 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] <https://www.mayoclinic.org/tests-procedures/minimally-invasive-surgery/about/pac-20384771>, Erişim: 7 Temmuz 2024
- [2] Fontúrbel, C., Ciscal, A., Fraile-Marinero, J. C., Pérez-Turiel, J. (2023). Force-based control strategy for a collaborative robotic camera holder in laparoscopic surgery using pivoting motion, *Frontiers in Robotics and AI*, 10. DOI 10.3389/frobt.2023.1145265.
- [3] Kastritsi, T., Doulgeri, Z. (2022). A passive admittance controller to enforce remote center of motion and tool spatial constraints with application in hands-on surgical procedures, *Robotics and Autonomous Systems*, 152, 104073. DOI 10.1016/j.robot.2022.104073.
- [4] Wang, C., Ko, S. Y. (2024). A 6-DOF double-layer programmable remote center of

motion robot for vitreoretinal surgery, 2024 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, ADNEC Centre, Abu Dhabi. DOI 10.1109/iros58592.2024.10802216.

[5] Seixas-Mikelus, S. A. v. d. (2010). Content validation of a novel robotic surgical simulator, *BJU International*, 107(7), 1130-1135. DOI 10.1111/j.1464-410x.2010.09694.x.

[6] Başdoğan, Ç., De Rensselaer, S., Kim, N. J., Muniyandi, M., Kim, N. H., Srinivasan, M. A. (2004). Haptic rendering - beyond visual computing - haptics in minimally invasive surgical simulation and training. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24(2), 56-64. DOI 10.1109/mcg.2004.1274062.

[7] Wiet, G. J., Stredney, D., Sessanna, D., Bryan, J. A., Welling, D. B., Schmalbrock, P. (2002). Virtual temporal bone dissection: an interactive surgical simulator, *Otolaryngology*, 127(1), 79-83. DOI 10.1067/mhn.2002.126588.

[8] Kastritsi, T., Doulgeri, Z. (2021). A controller to impose a RCM for hands-on robotic-assisted minimally invasive surgery, *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 3(2), 392-401. DOI 10.1109/tmrb.2021.3077319.