

Uzaktan Lazer Cerrahi İçin Kısıtlı Sistem Tabanlı Efendi Köle Denetleyicisi

Eray A. Baran^{1,2}, Zhenishbek Zhakypov¹, Erdal Kayacan², Asif Sabanovic¹

¹Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Sabancı Üniversitesi, 34956, İstanbul/TÜRKİYE
{eraybaran, zhakypov, asif}@sabanciuniv.edu

²Makine, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Fakültesi,
Nanyang Teknoloji Üniversitesi, 639798, SİNGAPUR
erdal@ntu.edu.sg

Özetçe

Bu bildiri, uzaktan lazer ameliyatlarında kullanılmak üzere kısıtlı sistem tabanlı efendi-köle denetleyicisi tasarımını ve gerçek bir sisteme uyarlanışını sunmaktadır. Önerilen denetleyici şeması, sisteme beslenen bir resimden elde edilen gezinge üzerinde zamandan bağımsız bir kısıtlama yaratıp efendi robotun hareketini bu gezingeyle sınırlayan bir algoritmanın türetimini içermektedir. Efendi robot üzerine uyarlanan bu kısıtlama, cerrahın hareketini gezinge tanjantı doğrultusunda serbest bırakıp diğer doğrultularda engellemek üzere kuvvet yaratmaktadır. İlâveten ikinci bir denetleyici, gezinge doğrultusunda cerrahın yaptığı hareketi uzaktaki bir köle sistemine transfer ederek hareket senkronizasyonunu sağlamaktadır. Bu sayede, efendi sistemi kullanan cerrahın, uzakta duran köle sistemin altındaki bir dokuyu istediği derinlikte ve gezinge dışına çıkmadan lazerle kesmesini mümkün kılan bir sistem ortaya çıkarılmıştır. Önerilen yöntem, her biri üç serbestlik derecesine sahip olan efendi ve köle robotlar içeren bir deney düzeneğinde test edilmiştir. Deneylerden elde edilen başarılı sonuçlar, önerilen yöntemin robotik cerrahide kullanılabilirliğini kanıtlamakta ve lazer ameliyatlarının geleceğine dair yeni bir kapı açmaktadır.

1. Giriş

Temassız işleme konusundaki yeni gelişmeler, MEMS ürünlerinin imalatından cerrahi uygulamalara kadar birçok alana yenilikler getirmiştir. Temassız imalat teknikleri arasında lazer kesim yöntemi, kullanılan dalga boyuna göre birçok farklı materyali oyma yoluyla talaşsız işlemeyi mümkün kılmakta [1], [2] ve bu sayede su jeti benzeri diğer temassız imalat tekniklerine göre avantaj sağlamaktadır.

Birçok araştırmacı lazer işleme sürecinin modellenmesi, simulasyonu ve farklı materyaller üzerine uyarlanması konusunda araştırmalar yürütmektedir [3]. Öte yandan, lazer entegre robotik sistemlerin tasarımına ve hareket denetimine yönelik konular gittikçe yaygın bir şekilde araştırılmaya başlanmıştır. Hareket denetleme sisteminden beklenen gereksinimler en genel haliyle; yüksek hassasiyetli konumlandırma yeteneğini, denetimin yinelenebilirliğini ve sürecin dayanıklılığını içermektedir. Bu genel gereksinimlerin dışında, uygulamaya mahsus tasarım, son zamanlarda robotik lazer işleme sistemleri için arzu edilen bir özellik olmaya başlamıştır [4].

Lazer işleme sürecinin robotik bir sistemle entegrasyonu, birçok otomatize ve manuel uygulamanın kapısını açmıştır. Uygulama alanları açısından, otomatize edilmiş işleme yöntemleri endüstriyel süreçlerde geniş yer bulurken [5], yarı-otomatize ya da manuel işleme yöntemleri çoğunlukla medikal süreçlerde kullanılmaktadır [6]. Robotik temassız işlemenin tıbbi uygulamaları arasında, araştırmacılar robot-destekli lazer ameliyat sistemleri konusuna özellikle eğilmektedirler [7]. Literatürde, ortopedik cerrahi [8], lazer traşlama [9] ve kemik kesimi [10] konusunda başarılı uyarlamalar mevcuttur.

Lazer entegreli robotik cerrahi kapsamında hareket denetim sisteminden talep edilen özellik, operatör hareketinin önceden belirlenmiş bir gezinge üzerinde kısıtlanmasıdır. Uygulama esnasında belirlenen çevritin dışına taşılması ameliyatın başarısının azalması ihtimalini doğurmaktadır. Bu nedenle, cerraha yardımcı olması açısından, hareket denetim sistemi tarafından birtakım sanal kısıtlamaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, uzak mesafeden lazer ameliyatına imkan sunacak destekleyici bir robotik sistem ve bağlantılı denetleyici tasarımı sunulmuştur. Bahsi geçen yapı, sisteme dışarıdan beslenen bir resim vasıtasıyla elde edilen kısıtlayıcı bir gezinge üzerinde yapılan hareketin takibini efendi-köle yapısındaki bir denetim sistemiyle mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda, resimden elde edilen gezinge verisi kısıtlı denetim yoluyla efendi sistemin hareketini sınırlandırmaktayken gezinge üzerinde cerrahın yaptığı serbest hareket köle sistem tarafından ikinci bir denetleyiciyle takip edilmektedir. Çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir; 2. Bölüm'de beslenen bir resimden gezinge çıkarımı açıklanmıştır. 3. Bölüm, bu gezinge verisini kullanarak hareket kısıtlama verisinin oluşturulmasını işlemektedir. 4. Bölüm'de ivme denetimi tabanlı dayanıklı denetleyici tasarımı özetlenmiş ve çok serbestlik dereceli sistemler için görev kısıtlamalı denetime ait temeller sunulmuştur. 5. Bölüm, efendi sistem hareketini kısıtlayan ve köle sistemin efendi sistem hareketini takip etmesini mümkün kılan denetleyicilerin türetimine ayrılmıştır. 7. Bölüm'de deney cevapları gösterilmiş ve 8. Bölüm'de sonuçlar sunulmuştur.

2. Görsel Tabanlı Çevrit Çıkarımı

Takip edilecek çevrit, sisteme dışarıdan beslenen bir görüntü yardımıyla elde edilmiştir. Gezinti referansının, görüntü işleme algoritmaları yardımıyla bir resimden elde

edilmesi bir yöntem olarak önceki çalışmalarda önerilmiştir [11]. Bu bağlamda, referans görüntü üzerinde aşağıdaki işlemler yapılmıştır;

- Görüntü iyileştirilmesi ve ayırıt sezimi
- Veri noktalarının elde edilmesi
- Görev uzayına ölçeklendirme

Aşağıda, görüntü işleme algoritmasına ait bu adımlar detaylıca açıklanmıştır.

2.1. Görüntü İyileştirilmesi ve Ayırıt Sezimi

Bir çevrite ait şekil bilgisi bu çevritin ayrıtları üzerinden belirlenebilir. Ayırıt sezimi öncesinde, alınan görüntü bir Gauss maskesi ile filtrelenip düzeltilmiştir. Bu işlemi takiben elde edilen görüntünün ayırıt verisi Canny [12] operatörü ile elde edilmiştir. Çıkarılan ayırıt verisinin kesikli yapıda olmaması için ayırıt çıkarımından sonra aşılma ve genişleme işlemleri yapılmıştır. Bu işlemlerin ardından elde edilen ayırıt içeriği algoritmanın bir sonraki kısmı için ikili formata çevrilmiştir. Düzeltilmiş görüntü ve ilişkili ayırıt içeriği sırasıyla Şekil 1-(A) ve Şekil 1-(B)'de gösterilmiştir.

2.2. Veri Noktalarının Elde Edilmesi

Algoritmanın ikinci kısmı görüntü üzerinde sol üst köşeden başlayıp erilerek büyüyen bir kare kullanarak ayırıt üzerindeki ilk noktayı belirlemektedir. Bu ilk noktanın belirlenmesinden sonra bir kaydırma penceresi oluşturulmuş ve optik akış yöntemi kullanılarak hareket ettirilen bu pencereyle gezinme verisi elde edilmiştir. Ayırıt üzerinden veri noktalarının çıkarımı aşaması Şekil 1-(C) ve Şekil 1-(D)'de gösterilmiştir.

2.3. Görev Uzayına Ölçeklendirme

Elde edilen veri noktalarını görev uzayı referansına dönüştürmek için bu noktaların piksel koordinatlarından metrik koordinatlara çevrilmesi gereklidir. Bu çevrim, aşağıdaki afin dönüşümle elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{O_W}{I_W} & 0 \\ 0 & \frac{O_H}{I_H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_I \\ y_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

burada $[x_0 \ y_0]^T$ ve $[x_I \ y_I]^T$ sırasıyla metrik birimlerde görev uzayı koordinatlarını ve pixel tabanında görüntü uzayı koordinatlarını temsil etmektedir. Bu denklemdeki O_W , O_H , I_W ve I_H sırasıyla iki boyutlu görev uzayı genişliğini, görev uzayı yüksekliğini (y -ekseni), görüntü uzayı genişliğini ve görüntü uzayı yüksekliğini temsil etmektedir. Denklem (1)'deki β_x ve β_y terimleri sırasıyla x ve y eksenlerindeki sapmaları temsil etmektedir ve içerikleri aşağıdaki gibidir;

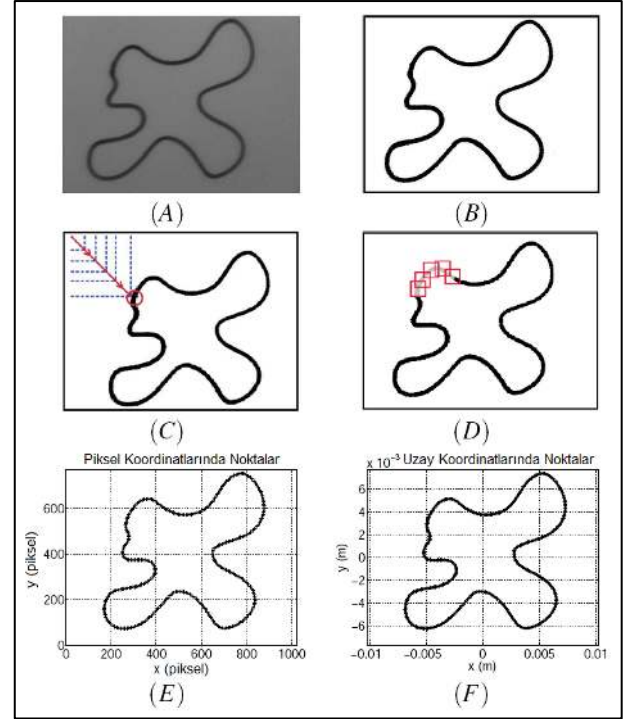
$$\beta_x = x_F + \frac{O_W}{I_W} + \frac{O_W}{2} \quad (2)$$

$$\beta_y = y_F + \frac{O_H}{I_H} + \frac{O_H}{2} \quad (3)$$

Bu denklemlerdeki x_F ve y_F gezinme üzerinde saptanan ilk noktanın koordinatlarını temsil etmektedir. Görev uzayına ölçeklendirme aşaması Şekil 1-(E) ve Şekil 1-(F)'de resimlerde gösterilmiştir.

3. Hareket Kısıtlarının Oluşturulması

Yukarıda belirtilen görüntü işleme algoritması sisteme uyarlanmış ve takip edilecek çevrite ait gezinme, veri noktaları şeklinde belirlenmiştir. Bu bölümde, kısıtlı sistem denetimi için gerekli verinin oluşturulması anlatılmıştır.



Şekil 1: Görsel tabanlı çevrit çıkarımı örneği. Düzeltilmiş görüntü (A), Belirlenen ayrıtlar (B), İlk gezinme noktasının belirlenmesi (C), Kaydırma penceresi ile veri noktalarının belirlenmesi (D), Görüntü uzayındaki gezinme (E), Görev uzayındaki gezinme (F)

3.1. Kısıt Oluşturan Veri Setinin Seçimi

Burada anlatılan algoritmanın temeli efendi robot pozisyonuna en yakın noktalar üzerinden geçen dairesel kısıtların yinelenmeli olarak yaratılmasına dayanmaktadır. Algoritmanın her yinemesinde efendi robotun uc elemanının koordinatlarına minimum uzaklıktaki gezinme noktası belirlenip bu noktanın etrafındaki noktalarla birlikte üzerinden geçen bir çember oluşturulmuştur. Oluşturulan bu çember, gerçek zamanlı döngünün o anki yinemesi için efendi robot hareketinin kısıtını oluşturmaktadır.

Uzaklığı minimize eden veri noktasını $P_i = [x_i \ y_i]^T$ ve efendi robotun uç elemanının bulunduğu noktayı $P_m = [x_m \ y_m]^T$ şeklinde tanımlayabiliriz. P_i noktasından geçen bir çember oluşturmak için bu nokta etrafında en az iki noktaya daha ihtiyaç vardır. Ancak oluşturulan vektör üzerinde alınan böylesi üç noktanın aynı doğru üzerinde olma ihtimali olabilir ve bu durumda çemberin oluşturulması kötü konumlanmış bir probleme dönüşebilir. Bunu engellemek için P_i noktasının her iki tarafından k adet ($k > 1$) nokta seçilip geçen çember bu noktalar üzerinde oluşturulabilir. Böyle bir durumda aşağıdaki gibi ifade edilen bir $D \in \mathbb{R}^{(2k+1) \times 2k}$ veri seti yararlanıp dairesel kısıtların oluşturulması etabına geçilebilir.

$$D = [P_{i-k}, \dots, P_i, \dots, P_{i+k}]^T \quad (4)$$

3.2. Dairesel Kısıtların Oluşturulması

Yukarıda gösterilen şekilde bir veri seti elde edildikten sonra bu noktalar üzerinden geçecek çemberin oluşturulması

en küçük kareler tabanlı bir yaklaşım ile elde edilebilir. En genel haliyle, düzlem üzerinde $[c_x \ c_y]^T$ merkez noktasına sahip ve $[x_i \ y_i]^T$ noktasından geçen r yarıçaplı bir çember aşağıdaki denklemle temsil edilebilir;

$$(x_i - c_x)^2 + (y_i - c_y)^2 = r^2 \quad (5)$$

Eşitlik (5) genişletildiğinde, aynı çemberin aşağıdaki gibi bir ifadeyle temsil edilebildiği görülür;

$$\eta_1 x_i + \eta_2 y_i + \eta_3 = -(x_i^2 + y_i^2) \quad (6)$$

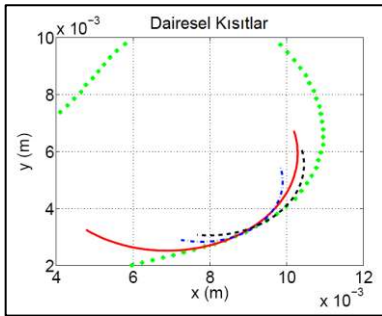
Burada, $\eta_1 = -2c_x$, $\eta_2 = -2c_y$ ve $\eta_3 = c_x^2 + c_y^2 - r^2$ içeriklerine sahiptir. Toplam $2k + 1$ veri noktası için denklem (6) aşağıdaki gösterildiği gibi bir doğrusal regresyon problemi haline çevrilebilir;

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{2k+1} & y_{2k+1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(x_1^2 + y_1^2) \\ \vdots \\ -(x_{2k+1}^2 + y_{2k+1}^2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

(7)'de verilen eşitlik $\boldsymbol{\varphi}\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\mu}$ yapısında, parametreler cinsinden doğrusal ve artık belirtilmiş bir sistemi temsil etmektedir. Bu denklemin çözümü, en küçük kareler tabanlı bir yaklaşımla bulunup aşağıdaki gibi verilebilir;

$$\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\varphi}^\# \boldsymbol{\mu} \quad (8)$$

Burada, $\boldsymbol{\varphi}^\# \in \mathbb{R}^{3 \times (2k+1)}$ terimi $\boldsymbol{\varphi}$ matrisinin sağa ağırlıklı yalancı tersini temsil etmektedir. Oluşturulan bu çember efendi sisteme bir kısıt olarak empoze edilmiş ve efendi sistemin o anki yineleme boyunca bu kısıt üzerinde kalmasını sağlayacak şekilde bir denetleyici tasarlanmıştır. Bu kısıtın gerçekleşmesine dair detaylar 6. Bölüm'de sunulmuştur. Verilen gezege üzerinde yaratılan bu dairesel kısıtları gösteren bir resim aşağıda Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2: Dairesel Kısıtlama Yönteminin Temsili.

4. Dayanıklı İvme Denetimi ve Görev Kısıtlı Sistemlere Genel Bir Bakış

4.1. Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerin Dinamiği

Tam kumandalı n serbestlik dereceli bir hareket denetim sistemi için konfigürasyon uzayı dinamiği aşağıdaki denklemle verilebilir;

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{T}^{\text{ref}} - \mathbf{T}^{\text{ext}} \quad (9)$$

Burada, $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $\mathbf{A}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $\mathbf{T} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ terimleri sırasıyla genellenmiş koordinatları, kinetik enerji (eylemsizlik) matrisini, akıcı sürtünme ve Coriolis kuvvetleri vektörünü, yerçekimi kuvvet vektörünü ve doğrudan konfigürasyon uzayına etkiyen kuvvet vektörünü temsil etmektedir. Ayrıca, \ast^{ref} ve \ast^{ext} şeklinde verilen üst simgeler de sırasıyla alakalı değişkenin referansını ve sistem dışından gelen etkileri temsil etmektedir.

Dayanıklı hareket denetiminin mümkün kılınabilmesi için (9)'da verilen bağlaışık ve doğrusal olmayan sistem nominal bir çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılıp ayrıştırılmalıdır. Bu bağlamda, yeni dinamik aşağıdaki şekilde belirtilebilir;

$$\mathbf{A}_n \ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{K}_n \mathbf{i}^{\text{ref}} - \mathbf{T}^{\text{dis}} \quad (10)$$

$$\mathbf{T}^{\text{dis}} = \{\Delta \mathbf{K} \mathbf{i}^{\text{ref}} + \Delta \mathbf{A}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{T}^{\text{ext}}\} \quad (11)$$

Burada, $\mathbf{A}_n \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{K}_n \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ve $\mathbf{i}^{\text{ref}} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ sırasıyla köşegenel ve sabit katsayılı nominal eylemsizlik ve tork sabiti matrislerini ve akım girdileri vektörünü temsil etmektedir. Denklem (10)'daki $\mathbf{T}^{\text{dis}} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ terimi sistemde mevcut ve verilen referansın dışında harekete neden olabilecek bütün torkları (bozan etmenleri) kapsamaktadır. Bu torkların içeriği denklem (11)'de verilmiştir. Burada, $\Delta \mathbf{K} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ve $\Delta \mathbf{A}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ matrisleri sırasıyla nominal tork sabitindeki ve nominal eylemsizlikteki dalgalanmaları kapsamaktadır. Son olarak, (11)'deki $\mathbf{T}^{\text{ext}} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ terimi modellenmemiş ve sisteme dışarıdan etkiyen bütün diğer torkların toplamını temsil etmektedir.

Yukarıda (10)'da verilen sistemde mevcut bozan etmenlerin kestirimi ve telafisi yine sisteme ait nominal değerler ve bir alçak geçirgen filtre yardımıyla yapılabilir [13]. Matematiksel olarak, bu kestirim aşağıdaki verildiği gibi modellenilebilir;

$$\hat{\mathbf{T}}^{\text{dis}} = (\mathbf{K}_n \mathbf{i}^{\text{ref}} - \mathbf{A}_n \ddot{\mathbf{q}}) \mathbf{H} \quad (12)$$

Burada, $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ bileşenleri $h_{ii} = g_i / (s + g_i)$; $i = 1, \dots, n$ şeklinde verilen alçak geçirgen filtrelerden oluşan köşegenel matrisi temsil etmektedir.

Konfigürasyon uzayında dayanıklı hareket denetimini uygulayabilmek için (12)'de verilen bozan etmen kestirimi (10)'daki ifadeye geri beslenmelidir. Bu durumda sistemin yeni dinamiği aşağıdaki gibi belirtilebilir;

$$\mathbf{K}_n \mathbf{i}^{\text{ref}} = \mathbf{A}_n \ddot{\mathbf{q}} + \delta \mathbf{T}^{\text{dis}} \quad (13)$$

Burada, $\delta \mathbf{T}^{\text{dis}} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ terimi kestirim sonrası kalan ve sisteme etkiyen bozan etmenleri temsil etmektedir. $\|\delta \mathbf{T}^{\text{dis}}\|$ büyüklüğü [13]'te gösterildiği gibi seçilen kestirim filtresinin kazancı g_i ile doğrudan ilişkilidir. Filtre kazancı için olası en büyük değerlerin seçimi $\|\delta \mathbf{T}^{\text{dis}}\| \approx \mathbf{0}$ eşitliğini mümkün kılarak sistemin verilen ivme referansını takip eden dayanıklı bir form kazanmasını sağlamaktadır.

4.2. Görev Uzayı ve Konfigürasyon Uzayı Arasındaki Dönüşüm

Yukarıda (13) eşitliğinde verilen sistem için görev uzayı koordinatları $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, ilişkili robotik yapının kinematiği kullanılarak elde edilebilir. Matematiksel olarak bu dönüşüm aşağıdaki ifadelerle temsil edilebilir;

$$\mathbf{x} = \mathcal{F}(\mathbf{q}) \quad (14)$$

$$\mathbf{q} = \mathcal{J}(\mathbf{x}) \quad (15)$$

Burada, $\mathcal{F}(\cdot)$ ve $\mathcal{J}(\cdot)$ robotik sisteme ait ileri ve ters kinematik operatörlerini temsil etmektedir. Görev ve konfigürasyon uzayları arasındaki hız ve ivmelerin dönüşümünü elde etmek için (14)'te verilen ifadenin türevi alınabilir;

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}_x \dot{\mathbf{q}} \quad (16)$$

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}_x \ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}_x \dot{\mathbf{q}} \quad (17)$$

Burada, $\mathbf{J}_x = \mathbf{J}_x(\mathbf{q}) = (\partial \mathcal{F}(\mathbf{q}) / \partial \mathbf{q})$ terimi robotik sisteme ait kinematik Jakobi matrisini temsil etmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan robotik sistemlerin geometrileri gereği $\mathbf{J}_x \in \mathbb{R}^{n \times n}$ terimlerinin ful satır kertesine sahip tekil olmayan matrisleri temsil ettiği belirtilmelidir.

4.3. Görev Uzayındaki Kısıtlar

Bu çalışmanın çekirdeğinde, efendi sistemin görev uzayındaki hareketinin kısıtlanması yatmaktadır. Bu bağlamda, görev uzayında tanımlı kısıtları vektör değerli sürekli bir fonksiyonla aşağıdaki gibi tanımlayabiliriz;

$$\Phi(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (18)$$

Burada, $\Phi \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ vektörünün boyutu sistemin serbestlik derecesinden küçüktür ($m < n$). Tanımlanan bu fonksiyonel eşitliğin türevi alınarak kısıtların zamana bağlı değişimleri aşağıdaki gibi elde edilebilir;

$$\dot{\Phi} = \mathbf{J}_\Phi \dot{\mathbf{x}} \quad (19)$$

$$\ddot{\Phi} = \mathbf{J}_\Phi \ddot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{J}}_\Phi \dot{\mathbf{x}} \quad (20)$$

Burada, $\mathbf{J}_\Phi = \mathbf{J}_\Phi(\mathbf{x}) = (\partial\Phi(\mathbf{x})/\partial\mathbf{x})$ terimi kısıtlarla ilişkili Jakobi'yi temsil etmektedir. Kısıtlama jakobisi $\mathbf{J}_\Phi \in \mathbb{R}^{m \times n}$ de kinematik jakobi gibi ful satır kertesine sahiptir ancak kare matris değildir.

5. Denetleyiciler

Görev uzayında yukarıda verildiği şekliyle tanımlanan kısıtlamaların sağlanması konfigürasyon uzayındaki eyleyicilere eklenen denetleyiciler sayesinde mümkün kılınabilir. Konfigürasyon uzayındaki eyleyicilerin iç döngüde bozan etmen gözlemcisine sahip olduğu varsayıldığında denetleyici tasarımı için temel özellik konfigürasyon uzayı için referans ivmeleri yaratıyor olmasıdır.

5.1. Kısıtlı Sistem Denetleyicisi Türetimi

Denetleyici tasarımı için ilk iş kısıtlı sistem koordinatlarında bir hata tanımlamaktır. Bu hatayı pozisyon ve hızın bir doğrusal bileşimi olarak alabilir ve aşağıdaki gibi formüle edebiliriz;

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{C}_2 \dot{\Phi} + \mathbf{C}_1 \Phi \quad (21)$$

Burada, $\boldsymbol{\varepsilon} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$, $\mathbf{C}_1 \in \mathbb{R}^{m \times 1}$, $\mathbf{C}_2 \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ sırasıyla kısıtlı sistem takip hata vektörünü, hata üzerindeki pozisyonun ağırlığını ve hata üzerindeki hız ağırlığını içeren kesin artı matrisleri temsil etmektedir. Hatanın tanımlanmasından sonra bu hatanın üstel yokolunu için aşağıdaki hata dinamiği sisteme uyarlanabilir;

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{0} \quad (22)$$

Burada, $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{m \times m}$, elemanları $i = 1, \dots, m$ için i 'nci hatanın yakınsama hızını belirleyen kesin artı, köşegenel bir matristir. (21)'deki eşitliği (22)'de yerine koyarsak aşağıdaki kısıtlı sistem dinamiğini elde edebiliriz;

$$\dot{\Phi} + \{\mathbf{C}_2^{-1}\mathbf{C}_1 + \mathbf{C}_2^{-1}\mathbf{K}\mathbf{C}_2\}\dot{\Phi} + \{\mathbf{C}_2^{-1}\mathbf{K}\mathbf{C}_1\}\Phi = \mathbf{0} \quad (23)$$

Yukarıda (23)'te verilen dinamik, \mathbf{K} matrisinin uygun bir şekilde seçilmesiyle takip hatasını üstel olarak yok ederek sistemin uygulanan kısıtlara yakınsamasını sağlayacaktır. Ancak, uygulama aşaması düşünüldüğünde, eyleyicilerin konfigürasyon uzayında olduğunu hatırlatılmalı ve (23)'te verilen denklemin kısıtlama uzayından önce görev uzayına, oradan da konfigürasyon uzayına çevrilmesi gerekmektedir.

Önce dinamiği görev uzayına dönüştürmeyi ele alalım. (23)'teki ifadede yakınsama katsayılarını içeren matrisin köşegenel olduğu düşünüldüğünde $\mathbf{C}_2^{-1}\mathbf{K}\mathbf{C}_2 = \mathbf{K}$ eşitliği gözlemlenebilir. Görev uzayına dönüşüm için (19) ve (20)'de verilen ifadeler (23)'te yerine koyulabilir ve aşağıdaki görev uzayı dinamiği elde edilebilir;

$$\mathbf{J}_\Phi \ddot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{J}}_\Phi \dot{\mathbf{x}} + \{\mathbf{C}_2^{-1}\mathbf{C}_1 + \mathbf{K}\}\mathbf{J}_\Phi \dot{\mathbf{x}} + \{\mathbf{C}_2^{-1}\mathbf{K}\mathbf{C}_1\}\Phi(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (24)$$

Yukarıda (24)'teki terimleri yeniden düzenleyerek kısıtları gerçeklenmesini sağlayan görev uzayı dinamiği aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir;

$$\ddot{\mathbf{x}} + \{\mathbf{J}_\Phi^\# \dot{\mathbf{J}}_\Phi + \mathbf{J}_\Phi^\# \mathbf{L}_1 \mathbf{J}_\Phi\} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{L}_2 \Phi(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (25)$$

Bu eşitlikte, $\mathbf{L}_1 = \mathbf{C}_2^{-1}\mathbf{C}_1 + \mathbf{K}$ ve $\mathbf{L}_2 = \mathbf{C}_2^{-1}\mathbf{K}\mathbf{C}_1$ içeriğine sahiptir. (25)'te verilen $\mathbf{J}_\Phi^\#$ terimi \mathbf{J}_Φ matrisinin sağa ağırlıklı yalancı tersini temsil etmektedir.

Yukarıda (25)'te sadeleştirilmiş olarak verilen görev uzayı dinamiği sistemin istenilen kısıtlara yakınsaması için gerekli görev uzayı ivmesini ortaya koymaktadır. Ancak, denetleyicilerin konfigürasyon uzayında olduğu düşünüldüğünde bu dinamiğin ikinci bir dönüşümden daha geçirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, (16) ve (17)'de verilen eşitlikler kullanılarak konfigürasyon uzayı dinamiği aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$\mathbf{J}_x \ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}_x \dot{\mathbf{q}} + \{\mathbf{J}_\Phi^\# \dot{\mathbf{J}}_\Phi + \mathbf{J}_\Phi^\# \mathbf{L}_1 \mathbf{J}_\Phi\} \mathbf{J}_x \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{L}_2 \Phi(\mathcal{F}(\mathbf{q})) = \mathbf{0} \quad (26)$$

(25)'te verilen eşitlik görev uzayındaki kısıtların gerçeklenmesini sağlayan konfigürasyon uzayı dinamiğini temsil etmektedir. Bu denklemdeki terimlerin düzenlenmesiyle ivme denetimli sistem için gerekli olan referans ivme vektörü aşağıdaki gibi bulunabilir;

$$\ddot{\mathbf{q}}^{\text{des}} = -\{\mathbf{J}_x^{-1} \dot{\mathbf{J}}_x + \mathbf{J}_x^{-1} \mathbf{L}_3 \mathbf{J}_x\} \dot{\mathbf{q}} - \{\mathbf{J}_x^{-1} \mathbf{L}_2\} \Phi(\mathcal{F}(\mathbf{q})) \quad (27)$$

Burada, $\mathbf{L}_3 = \mathbf{J}_\Phi^\# \dot{\mathbf{J}}_\Phi + \mathbf{J}_\Phi^\# \mathbf{L}_1 \mathbf{J}_\Phi$ içeriğine sahiptir. Sistem üzerinde mevcut bozan etmenlerin uygun bir şekilde kestirilip geri beslenmesi koşulu altında, (27)'de verilen ivme referansı efendi sistem uç elemanının kısıtlanan gezege üzerinde kalmasını sağlayacaktır. Bu şekilde kısıtlı sistem denetleyici türetimi tamamlanmış olmaktadır. Yinelemeli dairesel yörüngeler içeren kısıtların sisteme uyarlanmasına ait detaylar 6. Bölüm'de sunulmuştur.

5.2. Köle Sistem Referans Takip Denetleyicisi

Kısıtlanmış gezege üzerinde, operatörün efendi sistemi kullanarak yaptığı serbest hareketin köle sistem tarafından takip edilmesi için ikinci bir denetleyiciye daha ihtiyaç vardır. Bu ikinci denetleyicinin görevi iki sistem hareketini senkronize ederek cerraha uzaktan işlem yapma yeteneğini kazandırmaktır. Denetleyici tasarımındaki hedef, daha önce (12)'de belirtildiği üzere, bozan etmenlerin her iki sistemde de kestirilip telafi edildiği varsayımından yola çıkarak efendi sistem tarafında yaratılan hareket referansını köle sistemin takibi için gerekli olan ivme vektörünü türetmektir. Bütünleşik sistem köle robottan kuvvet geri beslemesi içermediği için türetilen ivmeler sadece köle sistem için referans olacaktır.

Bir önceki kısımda olduğu gibi, denetleyici türetimine efendi ve köle sistemler arasında bir takip hatası tanımlayarak başlayabiliriz. İki sistem hareketi arasındaki muhtelif bir ölçeklendirmeyi de hesaba katarak takip hatası aşağıdaki gibi verilebilir;

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ms} = \mathbf{W}_1(\dot{\mathbf{x}}_m - \beta \dot{\mathbf{x}}_s) + \mathbf{W}_2(\mathbf{x}_m - \beta \mathbf{x}_s) \quad (28)$$

Burada, $\mathbf{W}_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{W}_2 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ve $\beta \in \mathbb{R}^{n \times n}$ köşegenel matrislerdir ve sırasıyla hata üzerinde hızın ağırlığını, hata üzerinde pozisyonun ağırlığını ve iki robotun hareketi arasındaki ölçeklendirmeyi temsil etmektedir. Referans takibi esnasında hareketin çerçeve oranını korumak adına bu üç matris $n \times n$ boyutlarındaki birim matrisin (\mathbf{I}_n) birer skalar katlaması olarak alınmıştır (örn. $\mathbf{W}_1 = w_1 \mathbf{I}_n$, $\mathbf{W}_2 = w_2 \mathbf{I}_n$ ve $\beta = \beta_1 \mathbf{I}_n$).

Yukarıda, (28) eşitliğinde verilen takip hatası üstel yokolan bir dinamik haline getirilebilirse köle sistemin efendi sistem tarafından yaratılan hareketi kopyalaması mümkün kılınabilir. Matematiksel olarak, bu durum aşağıdaki hata dinamiğinin sağlanmasını gerektirir;

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{ms} + \mathbf{K}_{ms}\boldsymbol{\epsilon}_{ms} = \mathbf{0} \quad (29)$$

Burada, $\mathbf{K}_{ms} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ takip hatasının sifira yakınsama hızını belirleyen kesin artı köşegenel bir matristir. (28)'de verilen içeriğin (29)'da yerine koyulup gerekli düzenlemelerin yapılmasıyla aşağıdaki ifade elde edilebilir;

$$\Lambda_1(\ddot{\mathbf{x}}_m - \beta\ddot{\mathbf{x}}_s) + \Lambda_2(\dot{\mathbf{x}}_m - \beta\dot{\mathbf{x}}_s) + \Lambda_3(\mathbf{x}_m - \beta\mathbf{x}_s) = \mathbf{0} \quad (30)$$

Burada, $\Lambda_1 = \mathbf{W}_1$, $\Lambda_2 = (\mathbf{W}_2 + \mathbf{K}_{ms}\mathbf{W}_1)$ ve $\Lambda_3 = (\mathbf{K}_{ms}\mathbf{W}_2)$ içeriklerine sahiptir. (30)'da verilen ifadede $*_m$ ve $*_s$ alakalı değişkenin efendi ve köle sisteme ait olduğunu belirtmektedir. İncelenen sistemlerin her ikisinde de ölçümler ve tahrikler konfigürasyon uzayında gerçekleştiği için, (16) ve (17)'de verilen ifadeler kullanılarak (30)'daki ifade konfigürasyon uzayı koordinatlarına aşağıdaki şekilde dönüştürülebilir;

$$\begin{aligned} & (\Lambda_1\mathcal{J}_m)\dot{\mathbf{q}}_m - (\Lambda_1\beta\mathcal{J}_s)\dot{\mathbf{q}}_s + \\ & (\Lambda_1\dot{\mathcal{J}}_m + \Lambda_2\mathcal{J}_m)\dot{\mathbf{q}}_m - (\Lambda_1\beta\dot{\mathcal{J}}_s + \Lambda_2\beta\mathcal{J}_s)\dot{\mathbf{q}}_s + \\ & \Lambda_3\mathcal{F}(\mathbf{q}_m) - \Lambda_3\beta\mathcal{F}(\mathbf{q}_s) = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (31)$$

Daha önce de belirtildiği gibi, köle sistemin efendi sistemi takibi, gerekli ivme referansının, bozan etmenleri telafi edilmiş olan köle sisteme beslenmesiyle elde edilebilir. Bu bağlamda (31)'deki ifade yeniden düzenlenerek aşağıdaki hale getirilebilir;

$$\ddot{\mathbf{q}}_m^{des} = \Psi_1\dot{\mathbf{q}}_m + \Psi_2\dot{\mathbf{q}}_m - \Psi_3\dot{\mathbf{q}}_s + \Psi_4\mathcal{F}(\mathbf{q}_m) - \Psi_5\mathcal{F}(\mathbf{q}_s) \quad (32)$$

Burada, $\Psi_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$ terimlerinin içeriği $k = 1, \dots, 5$ için aşağıdaki şekilde verilebilir;

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= \mathcal{J}_s^{-1}\beta^{-1}\mathcal{J}_m \\ \Psi_2 &= \mathcal{J}_s^{-1}\beta^{-1}(\dot{\mathcal{J}}_m + \mathbf{W}_1^{-1}\mathbf{W}_2\mathcal{J}_m + \mathbf{W}_1^{-1}\mathbf{K}_{ms}\mathbf{W}_1\mathcal{J}_m) \\ \Psi_3 &= \mathcal{J}_s^{-1}\beta^{-1}(\beta\dot{\mathcal{J}}_s + \mathbf{W}_1^{-1}\mathbf{W}_2\beta\mathcal{J}_s + \mathbf{W}_1^{-1}\mathbf{K}_{ms}\mathbf{W}_1\beta\mathcal{J}_s) \\ \Psi_4 &= \mathcal{J}_s^{-1}\beta^{-1}\mathbf{W}_1^{-1}\mathbf{K}_{ms}\mathbf{W}_2 \\ \Psi_5 &= \mathcal{J}_s^{-1}\beta^{-1}\mathbf{W}_1^{-1}\mathbf{K}_{ms}\mathbf{W}_2\beta \end{aligned}$$

Yukarıda (32)'de verilen köle sistem ivme vektörü ile köle sistem, efendi sistem tarafında operatörün yaptığı hareketi üstel olarak yokolan bir hata ile takip edebileceklerdir. Burada altının çözülmesi gereken bir nokta da efendi ve köle sistemler arasındaki iletişimde herhangi bir zaman gecikmesinin olmadığı varsayımdır. Yukarıda verilen denetleyiciler bu temel varsayım üzerine türetilmiştir. Arada ağ iletişimi gerektiren seviyede uzaktan işlemler için olası zaman gecikmelerine karşı yukarıdaki denetleyiciler değiştirilmelidir.

5.3. Denetleyicilerin Uyarlanması

Yukarıda önerilen metodolojinin ve türetilen denetleyicilerin uyarlanması, her biri 3 serbestlik derecesine sahip doğrusal motorlardan doğrudan tahrikle çalışan ve biri efendi bir diğeri de köle olarak görev alan iki delta robot üzerinde yapılmıştır. Deney platformuna ait detaylar bir sonraki bölümde sunulmuştur. Türetimi yapılan denetleyicilerin uyarlanması için sistem üzerindeki kısıtların doğru bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Yukarıda, 3. Bölüm'de de belirtildiği şekilde, önerilen yöntemin temeli efendi robotun uç elemanının gerçek zamanlı döngünün her anında hesaplanmış olan bir çemberin üzerinde kalma kısıtını öngörmektedir. Bununla beraber, sistemin hareket düzleminin yüksekliğinin de lazer ışınının odaklanmış olduğu bir z^{ref}

referans değerinde olması kısıtı hesaba katılarak kısıtlı sistem referans vektörü aşağıdaki gibi verilebilir;

$$\Phi(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} x^2 + y^2 - r^2 \\ z^{ref} - z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Burada, görev uzayı koordinatları x , y ve z zamana bağlı değişkenlerdir ve z^{ref} referansının sabit bir değer aldığı varsayılmaktadır. Daire yarıçapı r , 3.Bölüm'de anlatılan yöntemle gerçek zaman döngüsü içinde her iterasyon için tekrardan hesaplanmaktadır. Yukarıdaki belirtilen şekilde bir kısıtlı sistem referansı için kısıtlarla ilişkili jakobi aşağıdaki gibi verilebilir;

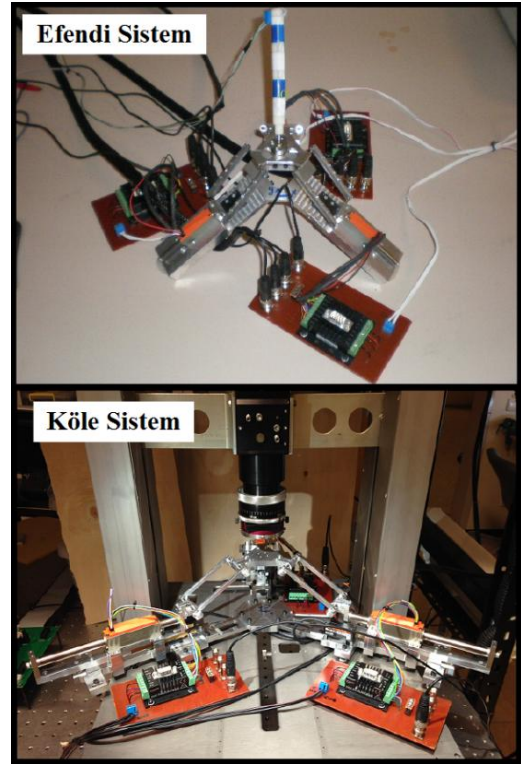
$$\mathcal{J}_\Phi = \begin{bmatrix} 2x & 2y & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

6. Deneyler

6.1. Deney Düzenneği

Bu çalışma kapsamında doğrusal tahrikle çalışan iki paralel delta robot görece uzaktan gezip kısıtlı hareket denetiminin uyarlanması için kullanılmıştır. Robotların her ikisi de Faulhaber marka LM serisi doğrusal motorlar içermekte ve dişli kutusu bulundurmamaktadır. Kinematik olarak efendi robot keops yapısına sahipken köle robot yatay yapıya sahiptir. Efendi ve köle robotlar için kinematik olarak farklı yapıların varoluşu senkronizasyon problemi daha da güç hale getirmektedir. Ancak önerilen metodun geçerliliğini göstermek adına bu çalışma çerçevesinde özellikle böylesi karmaşık bir sistem tercih edilmiştir.

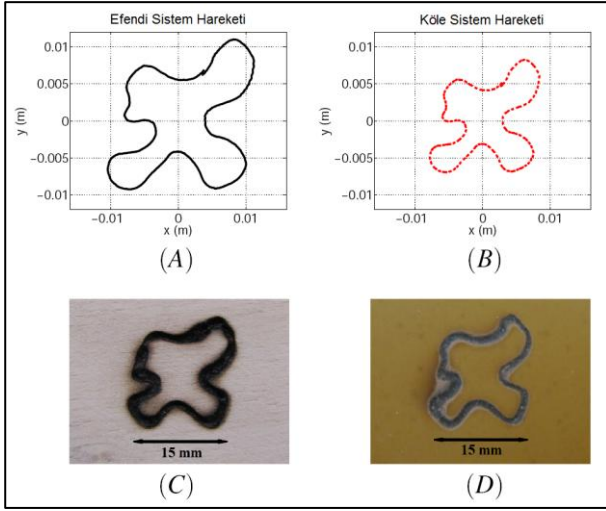
Uygulama aşamasında, köle robot 20 Watt güçle çalışan bir fiber lazerin altına yerleştirilmiş ve uç elemanı lazerin odak noktasına gelecek şekilde yüksekliği ayarlanmıştır. Deney düzenneğinin bir resmi aşağıda Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3: Deney Düzenneği.

6.2. DeneY Sonuçları

Yukarıda açıklanan platform kullanılarak deneyler yapılmış ve sonuçları sunulmuştur. Bu bağlamda biri ahşap bir diğeri de plastik olmak üzere iki farklı materyalin lazerle kesimi yapılmıştır. Deneylerde efendi ve köle robotlar arasındaki ölçeklendirme oranı %75 olarak alınmıştır ve efendi robot hareketi 0.75 oranında ölçeklendirilmiştir (örn. $\beta = 0.75 \times I_3$). Efendi ve köle sistemlerin takip cevapları sırasıyla Şekil 4-(A) ve Şekil 4-(B)'de gösterilmiştir. Lazer kesimi yapılan ahşap ve plastik de Şekil 4-(C) ve Şekil 4-(D)'de gösterilmiştir.



Şekil 4: DeneY Sonuçları. Efendi Sistem Cevabı (A), Köle Sistem Cevabı (B), Ahşap Materyal Lazer Kesim Cevabı (C), Plastik Materyal Lazer Kesim Cevabı (D)

7. Sonuçlar

Bu çalışmada yeni bir metod önerilmiş ve robotik bir sistem yardımıyla uzaktan lazer ameliyatını mümkün kılan bir yapı sunulmuştur. Önerilen yöntem, operasyonu yapan cerraha, lazerle kesilecek zeminde ait sanal kısıtlar yaratarak yardımcı olmaktadır. Bu yöntem ile sanal kısıt üzerinde serbest hareket mümkün kılınırken operatörün kısıtlı gezinme dışına çıkması engellenmektedir. Yöntemin pratikte uygulama bulmasıyla, hasta vücudu üzerinde önceden belirlenen bir çevritin uzaktan lazer cerrahi kesiminde yüksek hassasiyete ulaşılmış ve operatör tarafından gezinme üzerinde kesim derinliği ayarlanarak ameliyat başarı oranları yükseltilmiş olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma, Tübitak 111M359 ve 110M425 kodlu projelerden ve Tübitak-Bideb'den alınan finansal destek ve Konar Elektronik Endüstrisi firmasından alınan GRAB, ZZT ve RTOS yazılım destekleriyle gerçekleştirilmiştir.

Kaynakça

[1] T. Masuzawa, "State of the art of micromachining", CIRP Annals Manufacturing Technology, vol. 49, no. 2, pp. 473–488, 2000.

- [2] Y. Qin, A. Brockett, Y. Ma, A. Razali, J. Zhao, C. Harrison, W. Pan, X. Dai, and D. Loziak, "Micro-manufacturing: research, technology outcomes and development issues", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 47, no. 9-12, pp. 821–837, 2010.
- [3] N. Bloembergen, "Laser-material interactions; fundamentals and applications", in Laser ablation: mechanisms and applications II. American Institute of Physics, 1993, pp. 3–10.
- [4] G. Ho, W. S. Ng, M. Y. Teo, C.-K. Kwok, and W. S. Cheng, "Computer-assisted transurethral laser resection of the prostate (calrp): theoretical and experimental motion plan", Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, vol. 48, no. 10, pp. 1125–1133, 2001.
- [5] H. Monnich, D. Stein, J. Raczkowski, and H. Worn, "An automatic and complete self-calibration method for robotic guided laser ablation", in Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010, pp. 1086–1087.
- [6] R. Cernat, C. Matei, L. Olteanu, C. Riviere, and D. Dumitras, "Acoustooptic compensation of tremor for use in a handheld laser microsurgical instrument," in Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS'06. 28th Annual International Conference of the IEEE. IEEE, 2006, pp. 3862–3864.
- [7] J. W. Motkoski, F. W. Yang, S. H. Lwu, and G. R. Sutherland, "Toward robot-assisted neurosurgical lasers," Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, vol. 60, no. 4, pp. 892–898, 2013.
- [8] V. Franciose, A. Sahbani, and G. Morel, "A comanipulation device for orthopedic surgery that generates geometrical constraints with real-time registration on moving bones," in Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2011 IEEE International Conference on. IEEE, 2011, pp. 38–43.
- [9] L. S. Mattos, G. Dagnino, G. Becattini, M. Dellepiane, and D. G. Caldwell, "A virtual scalpel system for computer-assisted laser microsurgery," in Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2011, pp. 1359–1365.
- [10] D. Kim, H. Owada, N. Hata, and T. Dohi, "An er: Yag laser bone cutting manipulator for precise rotational acetabular osteotomy," in Engineering in Medicine and Biology Society, 2004. IEMBS'04. 26th Annual International Conference of the IEEE, vol. 1. IEEE, 2004, pp. 2750–2753.
- [11] E. A. Baran, E. Golubovic, T. E. Kurt, and A. Sabanovic, "Constant velocity control of a miniature pantograph with image based trajectory generation," in 9th Asian Control Conference (ASCC), 2013. IEEE, 2013, pp. 1–6.
- [12] J. Canny, "A computational approach to edge detection," Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, no. 6, pp. 679–698, 1986.
- [13] K. Ohnishi, M. Shibata, and T. Murakami, "Motion control for advanced mechatronics," Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, vol. 1, no. 1, pp. 56–67, 1996.