

Cerrahin Anlık Yönlendirilebildiği Robot Yardımlı Endoskop Kontrol Sistemi Mimarisi - NeuRoboScope

Mehmet İsmet Can Dede¹, Gökhan Kiper¹, Tolga Ayav², Enver Tatlıcıoğlu³, Barbaros Özdemirel³, Omar Maaroo¹, Gizem Ateş¹

¹Makine / ²Bilgisayar / ³Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Bölümü, İYTE
İzmir, Türkiye
candede, gokhankiper, tolgaayav, envertatlicioglu,
barbarosozdemirel, omarmaaroo, gizemates@iyte.edu.tr

Mustafa Berker, İlkay Işııkay, Şahin Hanalioğlu
Beyin ve Sinir Cerrahisi Ana Bilim Dalı
Hacettepe Üniversitesi
Ankara, Türkiye
mberker@hacettepe.edu.tr,
ilkayisikay,sahinhanalioğlu@gmail.com

Öz — Bu bildiri ele alınan çalışmada endoskopik hipofiz cerrahisinde kullanılan optik-kamera sistemini, cerrahin anlık isteklerini takip ederek yönlendirilmesine izin verecek robotik sistem geliştirilmektedir. Cerrah kendisi ameliyat sahasında ameliyatı gerçekleştirirken robotu yönlendirmesi gerekmektedir. Bu gereksinim için geliştirilmekte olan özgün alt bileşenler ve toplam sistem mimarisi bildiri içinde tanıtılmıştır ve çalışmanın sonuçları benzer minimal invaziv ameliyatların robot destekli ameliyata dönüşmesine imkan verebilecektir. Bildiri sistemin gereksinimlerinin oluşturulması için yapılan testler anlatılmıştır. Üzerinde durulan sistem gereksinimlerinden birisi robotun çalışma alanı, diğeri ise cerrahin kullanım kolaylığı ile ilgilidir.

Anahtar Kelimeler— endoskopik hipofiz cerrahisi, robotik cerrahi, hipofiz tümörü, minimal invaziv cerrahi

I. GİRİŞ

Bu bildiri bahsi geçen çalışma bir ameliyat robotu geliştirme üzerine kurgulanmıştır. Çalışma için seçilen ameliyat bir minimal invaziv ameliyat olan endoskopik hipofiz bezi tümörü ameliyatıdır. Hipofiz bezi her iki görme sinirinin arasında kafa tabanına yerleşmiş, özel bir salgı organıdır. Hipofizin ana görevi salgıladığı hormonlarla metabolizmayı düzenleyerek hayatın devamlılığını sağlamaktır. Bezelye büyüklüğünde küçük bir bez olmasına rağmen salgılarının işleviyle vücudun en önemli yönetici bezidir. Büyüme ve gelişme, su dengesi, tuz dengesi, şeker dengesi, kan basıncı, gebelik ve doğum, süt yapımı, cinsel organların gelişimi ve üreme gibi birçok işlevin düzenlenmesi, bu bezden vücuda salgılanan hormonlarca idame ettirilir. Bu bezin tümör gibi patolojileri, sıklıkla klinik olarak gürültülü belirti ve bulgular (görme kaybı, göğüsten süt gelmesi, cinsel istekte azalma, aşırı kilo alma, aşırı susama, sık idrara çıkma, ellerde ayaklarda büyüme gibi) ortaya çıkarır.

Hipofiz bezinin adenohipofiz adı verilen ön bölümündeki endokrin hücrelerden köken alan tümörler hipofiz adenomları olarak isimlendirilir. Hipofiz adenomlarının toplumdaki sıklığı, radyolojik çalışmalarda %22.5, otopsi çalışmalarında ise %14.4 olarak bulunmuştur [1]. Adenomlar, büyüklüklerine göre mikro- (<1 cm) ve makro-adenom (>1 cm) olarak sınıflandırılmaktadır. Makro-adenomların toplumdaki sıklığının 600'de bir olduğu tahmin edilmektedir. Klinik olarak belirti veren ve cerrahi tedavi gerektiren kafa içi tümörler içerisinde, glial ve meningeal tümörlerden sonra %10-25 oranı ile en sık üçüncü tümör

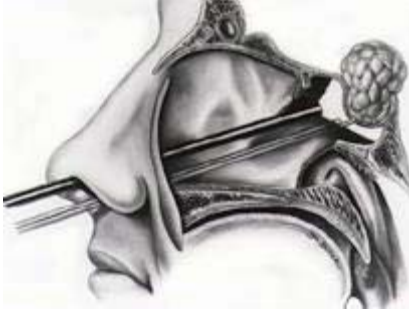
grubunu oluşturmaktadır [2]. Pitüiter tümörler primer santral sinir sistemi tümörleri içinde üçüncü sıradadır. Veriler genellikle Amerikan serilerine dayanır ama dünya geneline de uyarlanabilir. Toplumdaki yüksek yaygınlığa (prevalans) rağmen olguların yalnızca bir kısmında klinik bulgular ortaya çıkmakta ve tedavi gerekmektedir. Fakat potansiyel olarak hipofiz adenomları yıllar içinde büyüyerek klinik problemlere sebep olduğundan erken tanı ve etkin tedavi önem taşımaktadır.

Günümüzde hipofiz adenomlarına endoskopik cerrahi yaklaşım ya tamamıyla endoskopik ya da endoskop yardımcı mikrocerrahi yöntemi şeklinde kullanılmaktadır. Mikroskobik hipofiz cerrahisinde mikroskop yardımıyla buruna yerleştirilen rijit bir spekulum içerisinden bakarak 4-10X ile görüntü büyütülerek mikrocerrahi gerçekleştirilmektedir. Ancak spekulum içinden ve mutlak belli uzaklıktan (7-15 cm) bakılmak zorunda olduğundan özellikle kavernoza sinüs köşeleri suprasellar alanı görmek neredeyse olanaksızdır. Endoskopik hipofiz cerrahisi, mikroskobik hipofiz cerrahisi ile karşılaştırıldığında; iyi aydınlatma ve farklı yönlerde kullanılan fiberoptik-lens sistemi ile lezyonun yakınından, geniş ve açılı görüş alanı sağlamakta, nasal pasajda (burun içerisinde) bulunan anatomik yapılar korunarak sella tabanına kadar ulaşılmakta, ekstortör kullanılmamakta, daha rahat ve çeşitli cerrahi aletler kullanılabilen, kalıntı (rezidü) tümörler açılı endoskoplarla tespit edilerek çıkartılabilmekte, cerrahi prosedür daha az travmatik olmakta, ameliyat sonrası nazal tampon yerleştirme ihtiyacı olmamakta, böylece hastalar ameliyat sonrası dönemde daha konforlu olmakta ve komplikasyon olmadığı takdirde cerrahi sonrası birinci günde taburcu edilebilmektedir [3, 4]. Her iki yöntemin kıyaslandığı, yakın zamanda yayınlanan meta-analiz çalışmasında endoskopik cerrahi ile daha yüksek tümör rezeksiyon ve klinik kür oranlarına ve daha kısa hastanede yatış sürelerine ulaşıldığı, hasta konforunun daha iyi olduğu, böylelikle endoskopik cerrahinin daha etkin ve güvenli olduğu gösterilmiştir [5, 6].

Hem literatür hem klinik deneyimlerle endoskopik hipofiz cerrahisi ile sağlanan endokrinolojik ve radyolojik kür oranlarının daha iyi olduğu, endoskopik yaklaşımın mikroskobik cerrahiye göre maliyet-etkinliğinin daha yüksek (düşük maliyet, yüksek etki) olduğu ortaya koyulmuştur [7].

Bu ameliyatta endoskop adı verilen optik sistem, cerrah tarafından hastanın burun deliğinden girilerek önce burun

boşluğuna, oradan da hipofiz bezinin yerleştiği, kafatabanında sella turcica adı verilen eyer şeklindeki çukuruna hemen önündeki sfenoid sinüse (hava boşluğu) ilerletilmek suretiyle görüntü elde edilmekte ve yine burun deliğinden içeri ilerletilen özel cerrahi aletlerle hipofiz bezindeki tümör temizlenmektedir. Ameliyatın gerçekleştiği yer Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Endoskopik hipofiz bezi tümörü ameliyatının yandan şekilsel görüntüsü [8]

Endoskopun kısıtlılıkları arasında ise; mikroskobun sağladığı stereoskopik vizyon yokluğu nedeniyle görüntünün iki boyutlu elde edilebilmesi, derinlik hissinin algılanmaması, endoskop lensinin kirlenmesi, endoskopu tutmak için cerrahın (veya asistanın) bir elini kullanma zorunluluğu, bu nedenle zaten kısıtlı olan cerrahi alanda manipülasyon zorluğu/manevra kısıtlılığı (bu problem her iki burun deliğinden (binostri) çalışılarak kısmen aşılabilmektedir) ve uzun öğrenme süresi sayılabilir.

Bu ameliyat sırasında karşılaşılan en önemli sorunlardan biri, cerrahın bir elini devamlı olarak, görüntü sağlamak amacıyla kullanılan endoskop kontrolü için ayırmak zorunda olmasıdır. Bu durum, ortalama 2-4 saat süren ameliyat sırasında cerrahın yorulmasına ve tek elini kullanması nedeniyle manevra kabiliyetinin ve verimliliğinin azalmasına neden olmaktadır. Bu probleme çözüm olarak endoskopun asistan tarafından kontrol edilmesi, sabit endoskop tutucular, sesle komuta edilen robotik endoskop yönlendiriciler kullanılmaktadır. Aşağıdaki resimde ameliyat sırasında cerrahın sol elinde endoskopu tuttuğu, sağ elinde de bir cerrahi aleti kullandığı ve ameliyat asistanının da cerraha en az bir elini kullanarak başka bir cerrahi aletle yardımcı olduğu durum gözlemlenmektedir. Bu şekildeki çalışma biçimi ameliyat sırasında sıklıkla gerekmektedir. Ancak gerek asistan yardımıyla yapılan ameliyatların gerekse mevcut endoskop yönlendirici/tutucu sistemlerle yapılan ameliyatların önemli dezavantajları bulunması bu yöntemlerin klinik kullanımını sınırlandırmaktadır. Dezavantajlar genellikle kullanım kolaylığı, operasyon hızı ve güvenlik ile ilgilidir.



Şekil 2. Endoskopik hipofiz tümörü ameliyatı

Bu bildiriye konu olan çalışma neticesinde hipofiz bezinden kaynaklanan tümörlerin cerrahisi sırasında, bu işlemde kullanılan görüntüleme aracını (endoskop) cerrahın istediği şekilde anlık olarak yönlendirilmesine yarayan bir robotik sistem geliştirilecektir. Sistem ameliyatı gerçekleştiren cerrahın ameliyatta kullanılan -biri görüntü sağlayıcı endoskop olmak üzere- üç adet aleti aynı anda kullanmasına izin verecektir. Bu sayede cerrahi operasyonun performansının ve verimliliğinin artırılacağı ve ameliyat süresinin kısalmaya beklenecektir. Önerilen sistemde, cerrahın giyebileceği veya ameliyat sırasında herhangi bir cerrahi alete kolaylıkla monte edilebilen ana kumanda sistemi sayesinde cerrahın istekleri anında algılanarak ve uygun bir şekilde işlenerek endoskopu tutan robot kola hareket bilgisi iletilecektir. Bu sayede cerrah diğer iki eliyle farklı cerrahi aletleri kullanırken ameliyat boyunca istediği zaman endoskopu yönlendirebilecektir. Ayrıca ameliyat bölgesine robotu cerrah konumlayarak makro hareketlerin cerrah tarafından yapılması ve mikro hareketlerin robot tarafından yapılması sağlanarak sistemin kullanım güvenliği artırılmış olacaktır.

Bir sonraki bölümde mevcut endoskopik cerrahi robotlarının bir özeti çalışma mimarileri anlatılarak verilmiştir. Literatürde yer alan örnekler incelenerek ve cerrahların kullanım kolaylığı, operasyonun hassasiyeti ve sistem güvenliği düşünülerek geliştirilen sistem mimarisi bir sonraki bölümde anlatılmıştır. Bu çalışmanın daha önce geliştirilen sistemlere göre toplam sistem mimarisi dışındaki temel farkları özgün robot kinematikiğidir ve robotu yönlendirme sinyallerinin elde edilmesidir. Sistem mimarisini takiben alt sistemlerin tasarımı için gerekli girdilerin oluşturulması için yapılan testler ve sonuçları özetlenmiştir.

II. ROBOTİK CERRAHİ

Cerrahide robotik cihazların kullanımı her geçen gün yaygınlaşmaktadır [9]. Bu cihazların bir kısmı doğrudan operasyon için kullanılırken bir kısmı da cerraha yardımcı cihazlar olarak geliştirilmektedir. Operasyon ve destek cihazları genellikle minimal invaziv cerrahi operasyonlarda kullanılmaktadır. Cerrahi operasyonlarda kullanılan Da Vinci robotu tüm dünyada kabul görmüş bir cihazdır [10].

Özel olarak kafa ve boyun bölgesinin ameliyatında kullanılan pek çok robotik cihaz bulunmaktadır [11]. Görüntüleme cihazı olarak endoskopların kullanıldığı ameliyatlar için endoskop tutucu cihazlar geliştirilmiştir. Taniguchi vd. [12] 1994-2009 yılları arasında geliştirilmiş 27 endoskop robotu not etmişlerdir. Bunlardan sekizi insan üzerinde kullanılmış, diğerleri ise hayvanlar üzerinde denenmiş ya da yalnızca model olarak sunulmuştur. Bu sistemlerin çoğunda endoskop cihazında bir değişiklik yapılmaksızın bir robot kol ile konumlandırılması sağlanırken cerrah bu kolu genellikle bir kumanda ile kontrol etmektedir. Cerrahın el ya da ayakları ile kontrol edebileceği kumanda sistemlerine alternatif olarak ses ile [13] ya da cerrahın kafa hareketini [14] ya da ameliyat aletini takip eden bir görüntü işleme sistemi ile kontrol örnekleri de mevcuttur.

Taniguchi vd. [12] endoskop hareketleri için bir pivot noktası üzerinde yandönme (İng: yaw), yunuslama (İng: pitch) ve ileri-geri hareketlerinin yeterli olduğunu ifade etmektedir. Bu hareketleri sağlamak üzere aktif bir sistem gerekli iken endoskopun hastaya göre konumu genellikle pasif bir kol ya da

mobil bir tabla ile sağlanmaktadır. Pasif konumlandırma kolları piyasada yaygın olarak bulunmaktadır. Öte yandan cerrahın kontrol edebildiği motor tahrikli konumlama kolları da geliştirilmiştir [13, 15, 16].

Bu kısımda endoskop tutucu ve yönlendirici mekanizmalarından öne çıkanlardan bahsedilecektir. Kobayashi vd. [17] ağızdan giriş yapılarak gerçekleştirilen ameliyatlarda kullanılmak üzere Naviot isimli destek robotunu geliştirmişlerdir. Naviot sistemi, herhangi bir aletin üzerine yerleştirilebilen bir kumanda cihazı içermektedir. Kumanda sistemi üzerindeki iki düğmeyi cerrah başparmağı ile kontrol etmektedir. İki motorlu 5-çubuk mekanizması ve endoskopu tutan kol vasıtasıyla ucuna yakın yataklanmış olan endoskopun yandönme ve yunuslama hareketi kontrol edilmektedir. Ayrıca aktif optik odaklama sistemi ile görüntü boyutu 6 kata kadar büyütülebilmektedir. Taniguchi vd. [18] endoskopun yönelimi için iki serbestlik dereceli bir seri kol ve ileri-geri hareket yerine görüntü yakınlaştırmadan faydalanmışlardır. Nishikawa vd. [19] P-arm adını verdikleri hidrolik tahrikli 6-serbestlik dereceli Stewart-Gough platformu ile herhangi bir laparoskop cihazını yönlendirebilecek sistem geliştirmişlerdir.

Özellikle burun ve sinüs boşluğundan girilerek yapılan ameliyatlara için geliştirilmiş endoskop tutucu cihazlar da bulunmaktadır. Wurm vd. [20] paranasal sinüs ameliyatlarında kullanılmak üzere uç elemanında endoskop da içeren altı serbestlik dereceli bir seri robotik kol sistemi geliştirmişlerdir. Zimmerman vd. [21], Evolution 1 isimli mobil platform üzerinde 5 serbestlik dereceli bir seri kola bağlı 6 serbestlik dereceli bir Stewart-Gough platformu içeren bir cerrahi robot geliştirdiler. 6 serbestlik dereceli paralel mekanizma ileri-geri ve üç ekseninde dönme sağlayacak şekilde artıksıl olarak 10 µm konumlama hassasiyeti ile kontrol edilmiştir. Nimsky vd. [22] bu robotun transsfenoidal ameliyatta kullanılması üzerine çalışma yapmışlardır.

Kaynaklar incelendiğinde endoskopun denetimi için ya artıksıl serbestlik dereceli sistemlerin kullanıldığı, ya da 2 serbestlik dereceli açısal yönlendirme için robotik kol, ileri-geri hareket yerine ise optik odaklanma sistemi geliştirildiği görülmektedir. Minimal invaziv hipofiz tümörü ameliyatlarında ameliyat bölgesi içindeyken endoskop bir pivot noktası üzerinde küçük yandönme, yunuslama ve optik odaklama yerine ileri-geri hareketleri ile yönlendirilmektedir. Bu nedenle pasif bir konumlama koluna ek olarak küçük bir çalışma alanında bir pivot noktası üzerinde yüksek hassasiyetle yandönme, yunuslama ve ileri-geri hareketlerini bir arada yapacak bir sistem geliştirilmesi NeuRoboScope projesinde hedeflenmiştir. Ayrıca küçük bir çalışma alanında yüksek hassasiyetle konumlama görevi için paralel eyleyicilerin seri eyleyicilerden daha avantajlı olduğu bilinmektedir [23]. Bu yüzden aktif kol sistemi bir pivot noktası üzerinde bahsi geçen üç serbestlik derecesine sahip bir paralel manipülatör olarak tasarlanmaktadır. Ayrıca geliştirilen sistemde cerrahın iki elinde ameliyat aletleri mevcutken ve aletler ameliyat bölgesinde iken endoskop robotunu yönlendirmesi mümkün olacaktır. Paralel manipülatörün kinematik yapısı ile ve robot yönlendirme yöntemi itibarı ile bu çalışma önceki sistem mimarilerinden farklılık göstermektedir.

III. SİSTEM MİMARİSİ

NeuRoboScope sistemi ile hedeflenen cerrahın ameliyat sırasında zorlanmadan ameliyat bölgesi içinde olan endoskopun bir pivot noktası üzerinde iki ekseninde yönelimini ve ilerlemesini kontrol etmesidir. Bunun dışında ameliyat bölgesi içine endoskopun sevk edilmesi ve ameliyat bölgesinden çıkarılması cerrahın endoskopu kavrayarak kendisinin yapması hedeflenmiştir. Bu sayede hem hızlı hem de güvenli sevk işlemi gerçekleştirilecektir. Ayrıca robotun yapması gereken hareketlerin çalışma uzayının küçük tutulması sağlanarak temel bir güvenlik de sağlanmış olacaktır.

NeuRoboScope sistemi 5 adet alt sistemden oluşmaktadır. Bunlar şu şekildedir; (i) Pasif dengelenmiş Kol (PEK), (ii) aktif Endoskop Yönlendirici (KEY), (iii) Haberleşme Sistemi (HAS), (iv) Ana Kumanda Sistemi (AKS), (v) Kullanıcı ARayüzü (KAR). Bahsi geçen alt sistemlerin çalışma ilkeleri aşağıda açıklanmıştır. Sistemin çalışma modeli bir hayli detaylı olduğu için bu bildiriye verilmemiştir. Ancak NeuRoboScope sisteminin çalışma modeli ve modelin sınanması ile ilgili çalışma [24]'te mevcuttur.

Şekil 3'de bir çizimi verilen PEK, KEY'i taşıyacak ve ağırlığı dengelenmiş bir mekanik yapıdır. PEK'in üzerinde eyleyici bulunmayacaktır. Cerrahın ameliyat sırasında en az çaba ile KEY'i istediği konuma ve yönetime getirmesini sağlayacaktır. İstenilen konuma ve yönetime geldiğinde hareketli mafsalları frenlerle sabitlenebilecektir. Her mafsalında konum ölçümü için algılayıcı (encoder) olacak. En fazla 6 dönel mafsal yapısı olacaktır.



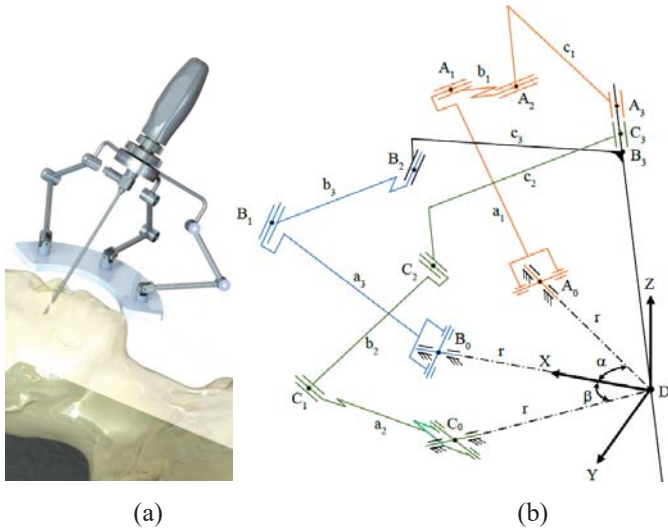
Şekil 3. PEK'in ameliyat masasına monte edilmiş hali

KEY, endoskopun bağlanacağı robot mekanizmasıdır ve bir tasarım resmi Şekil 4(a)'da verilmiştir. Üzerindeki eyleyici sistemler sayesinde endoskopun pivot noktası etrafında yunuslama ve yandönme hareketlerini ve ilerleme yönünde doğrusal hareketini sağlayacaktır. Mekanizma yapısı pivot noktası etrafında hareketleri garanti edilecektir.

Şekil 4(b)'de A_0 , B_0 , C_0 sabit noktaları ile ifade edilen manipülatörün kaidesi ile A_3 , B_3 , C_3 noktalarının tanımladığı uç elaman arasında üç bacak bulunmaktadır. Her bacak bir seri kinematik zincirden ibarettir. Kaide, uç eleman ve bunları birleştiren üç bacak iki bağımsız kinematik devre oluşturmaktadır. $A_0A_1A_2A_3$ ve $C_0C_1C_2C_3$ bacakları (yan bacaklar) beş serbestlik dereceli olup kaidede A_0D ve C_0D eksenlerinde birer döner mafsal (R) ve bu mafsal eksenleri etrafında dönebilen bir düzlemsel bağlantı (E) ile bu bacak düzlemi ile uç eleman arasındaki açının değişimine olanak veren

son bir R mafsaldan ibaret olup RER yapılandırmasına sahiptir. E düzlemsel bağlantı yapısı, mafsal eksenleri düzlem dik ve birbirlerine paralel olacak şekilde üç R döner mafsaldan oluşmaktadır. $A_0A_1A_2A_3$ düzlemi, düzlem içerisindeki sabit A_0D eksenindeki etrafında dönebilmekte olup Düzlem üzerindeki ilk döner mafsal eksen A_0D eksenine keskiştiğinden bir üniversal mafsal (U) teşkil etmektedir. Yani yan bacaklar URRR kinematik zincirine sahiptir. Ortadaki üçüncü bacak ise dört serbestlik dereceli bir seri zincir olup kaideden itibaren diğer bacakların ilk dört mafsali ile aynı yapıya, yani URR yapısına sahiptir. Bacaklar ile kaide arasındaki döner mafsalların özelliği, A_0D , B_0D ve C_0D eksenlerinin D noktasında keskişiyor olmasıdır. Keskişme noktası pivot noktasıdır. Keskişen eksenlerin üzerinde bulunduğu bacak düzlemleri $A_3B_3C_3$ uç eleman ekseninde keskişerek uç elemanın uzak hareket merkezli hareketini sağlarlar. Bu kinematik yapının avantajları dinamik dengelemeye uygun olması; yapısal simetri; aynı uç eleman hareketini yapabilen diğer paralel manipülatör alternatiflerine göre uzuv sayısının görece az olması; motorların yerleştirileceği mafsalların motor girdilerinin uç hareket girdileri ile ilişkisinin nispeten basit bir ilişki olması ve düz/ters kinematik denklem yapısının basitliği; motorların kaideye yakın mafsallara konumlandırılabilir olması şeklindedir.

KEY eksenleri kilitli iken pivot noktası işaretleyicileri aktif olmalıdır. Bu şekilde, cerrah endoskopu ameliyat yerine yerleştirirken hastanın üzerinde istediği noktayı pivot noktası olarak belirleyebilecektir. Manuel pivot ayar sistemi olmalı ve bu pivot noktası ameliyat yerine uzaklığı doktor tarafından ameliyat öncesinden belirlenmelidir.



Şekil 4. (a) KEY hasta üzerinde çalışır durumdayken (b) KEY'in kinematik yapısı

KEY sadece ameliyat bölgesi içindeyken hareketli olacaktır. İstenildiğinde ve acil durumlarda eksenler frenlenebilecektir. Tek komut ile bütün eksenler kilitlenebilecektir. Çalışma alanı üç eksenle sınırlı olacaktır. AKS'den HAS üzerinden iletilecek hareket istekleri ile sürülebilecektir. HAS üzerinden AKS'ye dokunma bilgilerini (kuvvet geribildirimi) iletebilecektir.

HAS, KEY ile AKS arasında çift yönlü veri iletimi sağlayacaktır. Güvenlilik protokolleri ile kablosuz haberleşmeyi kesintisiz olarak sağlayabilecektir.

AKS, cerrahın istediği zaman KEY'e hareket bilgisi iletmesini sağlayacaktır. 3 eksendeki hareket için ayrı ayrı bilgi üretebilecek bir algılayıcı altyapısı (örn: 3 eksen dönüölçer) olmalıdır. Donanım ve yazılım seviyesinde güvenlik önlemlerine sahip olacaktır. Doktorun eli ile kontrol sinyali üretebileceği herhangi bir yere (aspiratör aletine, hortumuna veya direkt cerrahın eline) takılıp çıkarılabilecektir. Sterilize edilebilir yapıda olacaktır.

KAR, güvenlik ve kullanım kolaylığı için gerekli anahtar sistemleridir. Ayrıca kullanıcıya durum bildirimini yapmaya yarayan ışıklı uyarı sistemleridir. KAR'da kullanılacak ışıklı uyarı sisteminin iletileceği bilgiler şu şekildedir: (i) Gereğinden fazla kuvvet uygulandı (ii) KEY devrede ama etkin değil (kullanıma hazır) (iii) KEY etkin ya da merkezleniyor (iv) endoskop hastaya çok yakın olduğu için merkezlenme yapılamadı (v) AKS'nin pili bitiyor (vi) Robotun sistemi devre dışıdır - Ameliyata elle devam et.

Planlanan sistem mimarisindeki alt sistemlerin tasarımlarına girdi sağlaması açısından yapılan testler bir sonraki bölümde açıklanmıştır.

IV. SİSTEM GEREKSİNİMLERİ TESTLERİ

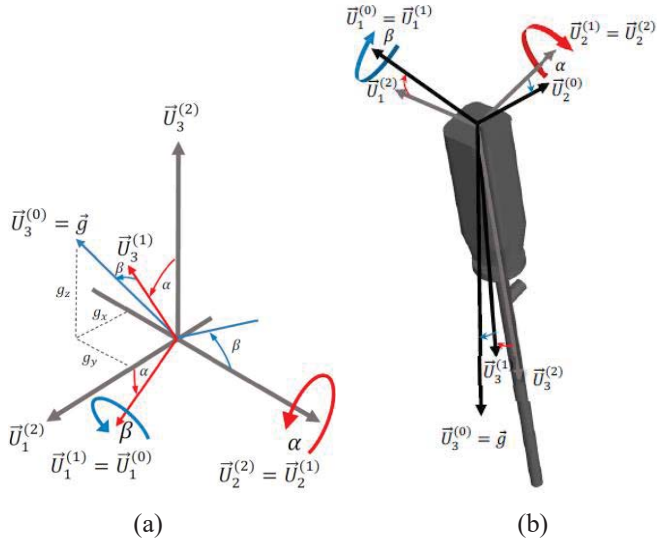
Sistem gereksinimlerini belirlemeye yönelik olarak üç ayrı test yapılmıştır. Ameliyat sırasında robotun ne kadarlık bir çalışma alanına sahip olması gerektiği bilgisini oluşturmak için iki farklı test yapılmıştır. Bunlardan ilkinde endoskopun ameliyat sırasında ameliyat bölgesi içinde hareketleri kaydedilmiştir. İkinci tip testlerde tomografi verileri toplanmıştır ve değerlendirilmiştir. Birinci tip testler endoskopun çalışma sırasındaki dönel hareket limitlerinin belirlenmesi için yapılmıştır. İkinci tip testler ise bir ameliyattan alınan verilerin istatistiksel bir zemine oturtulup genel bir çalışma alanı belirlenmesi için yapılmıştır. Bu bölümde bahsi geçen son test ise cerrahın robotu kullanım kolaylığının üretim öncesinde belirlenebilmesi için yapılmıştır. Aynı donanım altyapısını kullanarak endoskop robotunu yönlendirmek için iki tip kullanım senaryosu geliştirilmiştir. Çalışma içinde geliştirilen bir simülasyon üzerinde cerrahi ekibin kullanımına sunulan donanım ve üzerindeki kullanım senaryolarını içeren algoritmaların testleri neticesinde nicel kıyaslamalar ile en uygun kullanım senaryosu belirlenmiştir.

A. Endoskop Hareketlerinin Ölçümü

Ameliyat bölgesindeki çalışma alanının belirlenmesi için endoskop üzerine monte edilebilecek mutlak açısız konum ölçme cihazı geliştirilmiştir. Cihazın içindeki ivmeölçerler verileri işlenerek mutlak açısız konum bilgisi oluşturulmuştur. Başlangıç noktasından son konumuna belirli eksenler etrafındaki dönüşümünü tanımlayan birçok Euler açı sıralaması seçeneği vardır. Seçilen sıralama Şekil 5'te gösterilen Dönen Eksen Takımı Temelli (İng: Rotating Frame-Based, RFB) sıralamadır; önce $\vec{u}_2^{(2)}$ ekseninde α açısı ile ve takiben $\vec{u}_1^{(1)}$ ekseninde β açısı kadar döndürülmesi ile oluşmaktadır.

Ölçümler sırasında iki ayrı cerrahın 22 ayrı tip hareket sırasında veri toplanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda ameliyat sırasında toplanan veriler irdelendiğinde α açısının değişim aralığı $12^\circ - 45^\circ$ arasında ve β açısının değişimi $1^\circ - 22^\circ$ arasında hesaplanmıştır. Bu değer hasta anatomilerine göre değişiklik

gösterebilecek bir değer olmasına rağmen tasarım sınırları için gerekli bilgi elde edilmiştir.



Şekil 5. (a) Seçilen Euler açı sıralaması (b) İvmeölçer eksen takımının endoskop üzerinde yerleşimi

B. Tomografi Verileri Üzerinden Yapılan Ölçümler

Endoskop üzerinden yapılan ölçümlere ek olarak tomografi verileri üzerinden ölçümler gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler Şekil 6'da gösterilmiştir ve şu şekilde özetlenebilir:

A) Nostril-sella arası mesafe (çalışma derinliği): Orta hat sagittal düzlemde, robotik kolun kontrolünde endoskopun sabitleneceği pivot noktasından (burun deliği üst kenarı), hipofiz bezinin oturduğu sella turcica (Türk eyeri) isimli kemik yapının tabanına kadar olan mesafeyi belirtir. Endoskopun ileri-geri hareket açıklığını temsil etmektedir.

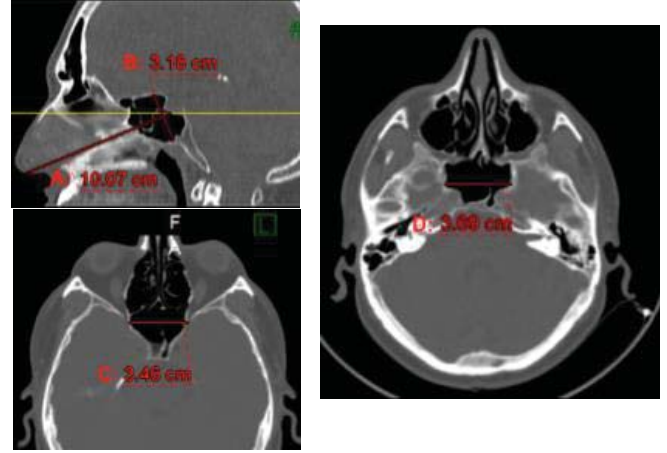
B) Planum-klivus arası mesafe (çalışma yüksekliği): Derinlik hattına dik olarak çizilen ve bu hat üzerinde en derindeki noktadan (sella tabanından) geçen hattın sfenoid sinüsün üst duvarı (planum sfenoidale) ile alt duvarı (klivus) arasında kalan kısmı olup, pivot noktasında sabitlenmiş endoskopun ucunun düşey ekseninde maksimum hareket açıklığını gösterir.

C) Sfenoid sinüs orta genişliği (çalışma genişliği – orta): A ile B hatlarının kesişim noktasından (sella tabanının orta noktası) geçen eksenel düzlemde (sarı hat) sfenoid sinüsün en geniş yerindeki transvers çapıdır.

D) Sfenoid sinüsün en yüksek genişliği (çalışma genişliği – klivus): Sfenoid sinüsün en geniş yerindeki (klival bölge) transvers çapı olup, sinüsün alt bölümlerinde ölçülmüştür. C hattına göre daha alt kesitlerde ölçülmekte olup, C ile birlikte endoskop ucunun lateral (sağ-sol, transvers) yönde en yüksek hareket sınırını göstermektedir.

Sözü edilen ölçümler, son bir yıl içerisinde Hacettepe Üniversitesi Tıp Fakültesi Nöroşirürji Anabilim Dalı'nda hipofiz adenomu tanısı alan ve ilk kez ameliyat olan 28 hastanın ameliyat öncesi cerrahi planlama amaçlı çekilen ince kesit (kesit kalınlığı: 1 mm) paranazal sinüs tomografileri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çekimler Siemens Somatom Perspective

cihazı (serial 78335) ile 0.6 mm kesit kalınlığında spiral acquisition kullanılarak, intravenöz kontrast ajanı verilmeden gerçekleştirildi. Çekim süresi 8.6 s, tarama uzunluğu 275.1 mm idi. Ölçüm değerleri alınan hastaların 11'i erkek, 17'si kadın ve yaş ortalaması 45,9±16,5 yıldır. Yapılan ölçümlerin sonucu olarak ortalamalar ve sapmalar Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 6. Tomografik ölçümlerin örnek gösterimi

Tablo 1. Radyolojik ölçüm sonuçları

Ölçüm	Ortalama ± Standart Sapma(SS)(cm)	%95 Güven Aralığı (cm) (Ort+2 SS)	%99,7 Güven Aralığı (cm) (Ort+3 SS)
A- çalışma derinliği	9,5±0,5	8,5-10,5	8-11
B- çalışma yüksekliği	2,7±0,5	1,7-3,7	1,2-4,2
C- orta çalışma genişliği	3,0±0,4	2,2-3,8	1,8-4,2
D- maksimal çalışma genişliği	3,4±0,5	2,4-4,4	1,9-4,9

C. Kullanım Kolaylığı Testleri

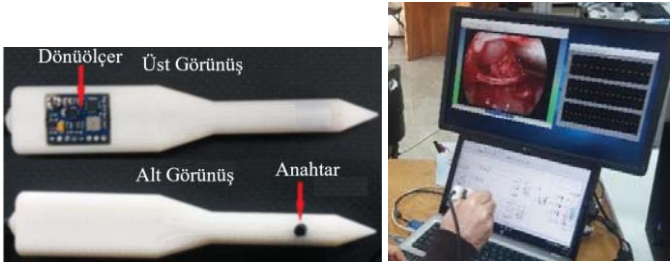
Sistemde cerrahın endoskopu yönlendiren robotu sürmesi için kullanılacak teleoperasyon sinyallerinin kullanım kolaylığı bakımından, sistem daha üretilmeden, belirlenmesi için bir simülasyon geliştirilmiştir. Söz konusu simülasyon, robot tarafından üç ekseninde yunuslama, yandönme ve eksenel ilerleme şeklinde hareket ettirilecek endoskop için gerekli sürüş bilgilerini cerrahın istemli el hareketlerinden toplayacaktır.

İstemli el hareketleri olarak belirlenen üç eksenindeki dönme hızları bir dönüölçer (İng: gyroscope) vasıtasıyla toplanmaktadır. Bu işlem için geliştirilen cerrahın kullandığı aspiratör aletini benzetimi olan cihaz Şekil 7'de verilmiştir.

Cerrah çalışma senaryosu gereği istemli hareketlerini anahtara basarak anlık olarak ileticektir ve anahtarı basmayı bıraktığında artık karşı tarafa yerinde sabit kalma bilgisi iletilecektir. Hareketlerin iletimi için cerrahın kullandığı aspiratörün dönüş hızları ölçülerek endoskop robotuna sürüş bilgisi olarak iletilecektir. Anahtarın aktive edilmesi ile endoskopu yönlendiren robota bilgi akışı aktive edilmektedir.

Bu safhada iki adet sürüş algoritması geliştirilmiştir. 1. algoritma, bilgisayar faresinin çalışmasına benzer şekilde, aspiratörün açılma konum bilgisini oranlayıp konum isteği olarak endoskop robotuna iletilecektir. 2. algoritmada ise aspiratörün açılma konum bilgisini endoskop robotuna hız isteği olarak iletilecektir. İki işlemden de tümlev alma işlemi yapılmaktadır

ve sistemdeki anahtar, tümlev işleminden kaynaklanabilecek birikimleri sıfırlamak için kullanılmaktadır. Simülâtörün kullanıcı ekranında endoskoptan alınan görüntü verilmekte ve endoskopun yönelimi kullanım sırasında değıştikçe görüntü de değışmektedir (Şekil 7). Bahsi geçen simülâtörün detaylı anlatımı [25]'te mevcuttur.



Şekil 7. Simülâtör cihazı ve arayüzü [25]

Geliştirilen simülâtör, endoskopik hipofiz ameliyatını gerçekleştiren ve üç kişiden oluşan cerrahi ekibinin kullanımına sunulmuştur. Elde edinilen nicel geri besleme neticesinde cerrahların kullanım ergonomisi ve ameliyat sırasında minimal hareket ile çalışabilmesi açısından 2. algoritmayı tercih ettikleri belirlenmiştir. Sistemde veri işleme yöntemi bu şekilde seçilmiştir ve parametreleri tasarım sırasında eniyilenecektir.

V. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu bildiriye bir minimal invaziv ameliyatı olan endoskopik hipofiz bezi tümörü ameliyatı için geliştirilmekte olan özgün robot sisteminin mimarisi anlatılmıştır. Sistemin toplam mimarisi dışındaki özgün tarafları robotun kinematik yapısı ve cerrahın ameliyat aletlerini kullanırken aynı anda endoskop robotunu da yönlendirme yöntemidir. Robot sisteminin gereksinimlerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalar üç ayrı test olarak özetlenmiştir. Endoskop hareketleri ölçüm testleri sonuçlarına göre ve %99,7'lik güven aralığına göre KEY'in çalışma alanı belirlenmiştir. Simülâtör üzerinden edinilen nicel verilere göre AKS'nin sinyallerinin işleme şeklinin aspiratörün açılma konum bilgisinin endoskop robotuna hız isteği olarak iletilmesi olarak geliştirilmesine karar verilmiştir. Sistemin tasarım çalışmaları bu bilgiler ışığında tamamlanmıştır. Sistemin üretim ve test faaliyetleri devam etmektedir.

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışmada sunulan araştırmaya destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederiz (Proje Numaraları: 115E725 ve 115E726).

KAYNAKÇA

[1] S. Ezzat, S.L. Asa, W.T. Couldwell, C.E. Barr, W.E. Dodge, M.L. Vance, I.E. McCutcheon, "The prevalence of pituitary adenomas," *Cancer*, 101(3), 613-619, 2004.

[2] J.A. Jane Jr, L.D. Sulston, E.R. Laws Jr, "Surgery for primary brain tumors at United States academic training centers: results from the Residency Review Committee for neurological surgery," *J Neurosurg*, 2005;103:789

[3] P. Cappabianca, L.M. Cavallo, E. de Divitiis, "Endoscopic Endonasal Transsphenoidal Surgery," *Neurosurgery*, 55(4), 933-941, 2004.

[4] M. Berker, D.B. Hazer, T. Yücel, A. Gürlek, A. Cila, M. Aldur, M. Onerci, "Complications of endoscopic surgery of the pituitary adenomas: analysis of 570 patients and review of the literature," *Pituitary*, 15(3), 288-300, 2012.

[5] B. Rotenberg, S. Tam, W.H. Ryu, N. Duggal, "Microscopic versus endoscopic pituitary surgery: a systematic review," *Laryngoscope*, 120(7), 1292-1297, 2010.

[6] Y. Gao, C. Zhong, Y. Wang, S. Xu, Y. Guo, C. Dai, Y. Zheng, Y. Wang, Q. Luo, J. Jiang, "Endoscopic versus microscopic transsphenoidal pituitary adenoma surgery: a meta-analysis," *World Journal of Surgical Oncology*, 12-94, 2014.

[7] L. Rudmik, Y.P. Starreveld, W.A. Vandergrift, S.M. Banglawala, Z.M. Soler, "Cost-effectiveness of the endoscopic versus microscopic approach for pituitary adenoma resection," *Laryngoscope*, 125(1), 16-24, 2015.

[8] H.D. Jho, R.L. Carrau, "Endoscopic endonasal transsphenoidal surgery: experience with 50 patients," *J. Neurosurg* 87:44-51, 1997.

[9] K. C. Kim, (Ed.) "Robotics in General Surgery," New York: Springer, 2014.

[10] Intuitive Surgical, Inc. 2015. "The da Vinci Surgical System". Intuitive Surgical - da Vinci Surgical System. http://www.intuitivesurgical.com/products/davinci_surgical_system/, Son erişim tarihi: 24 Haziran 2015.

[11] G.A. Grillone, S. Jalisi, "Robotic Surgery of the Head and Neck," Springer, 2015.

[12] K. Taniguchi, A. Nishikawa, M. Sekimoto, T. Kobayashi, K. Kazuhara, T. Ichihara, N. Kurashita, S. Takiguchi, Y. Doki, M. Mori, F. Miyazaki, "Classification, design and evaluation of endoscope robots," *Robot Surgery*. Editör: Baik, S. H. Rijeka: InTech, 2010.

[13] Y. Wang, K.P. Laby, D.R. Uecker, A.A. Mangaser, M. Ghodoussi, "Automated Endoscope System For Optimal Positioning," Patent no: US5878193, 1999.

[14] A. Nishikawa, T. Hosoi, K. Koara, N. Daiji, A. Hikita, S. Asano, F. Miyazaki, M. Sekimoto, Y. Miyake, M. Yasui, M. Monden, "Real-time visual tracking of the surgeon's face for laparoscopic surgery," *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - MICCAI 2001*. Editörler: Niessen, W. J., Viergever, M. A. Berlin: Springer.

[15] S. Aiono, J.M. Gilbert, B. Soin, P.A. Finlay, A. Gordan, "Controlled trial of the introduction of a robotic camera assistant (EndoAssist) for laparoscopic cholecystectomy," *Surg Endosc*, 16, 1267-1270, 2002.

[16] P. Hourley, "How to maintain the quality of laparoscopic surgery in the era of lack of hands?," *Acta chir belg*, 106, 22-26, 2006.

[17] E. Kobayashi, K. Masamune, I. Sakuma, T. Dohi, D. Hashimoto, "A new safe laparoscopic manipulator system with a five-bar linkage mechanism and an optimal zoom," *Comp Aid Surg*, 4, 182-192, 1999.

[18] K. Taniguchi, A. Nishikawa, T. Yohdaa, M. Sekimoto, M. Yasui, S. Takiguchi, Y. Seki, M. Monden, F. Miyazaki, "COVER: Compact Oblique Viewing Endoscope Robot for laparoscopic surgery," *Proceedings of CARS2006*, Berlin: Elsevier, 2006.

[19] A. Nishikawa, M. Sekimoto, K. Taniguchi, Y. Yamada, N. Miyoshi, S. Takiguchi, Y. Doki, M. Mori, F. Miyazaki, "Design and control of a compact endoscope manipulator: a biologically inspired approach," *Advanced Strategies for Robot Manipulators*, Editör: Shafiei, S. E. Rijeka: InTech, 2010.

[20] J. Wurm, H. Steinhart, K. Bumm, M. Vogege, C. Nimsky, H. Iro, "A novel robot system for fully automated paranasal sinus surgery," *International Congress Series*, 1256, 633-638, 2003.

[21] M. Zimmermann, R. Krishnan, A. Raabe, V. Seifert, "Robot-assisted navigated neuroendoscopy," *Neurosurgery*, 51(6), 1446-1452, 2002.

[22] C. Nimsky, J. Rächinger, H. Iro, R. Fahlbusch, "Adaptation of a hexapod-based robotic system for extended endoscope-assisted transsphenoidal skull base surgery," *Minim Invasive Neurosurg*, 47(1), 41-46, 2004.

[23] J.P. Merlet, "Parallel Robots" (2. Basım), Dordrecht: Springer, 2006.

[24] B. Uzun, T. Ayav, M.I.C. Dede, M. Berker, İ. Işııkay, Ş. Hanalioğlu, B. Özdemirel, G. Kiper, E. Tatlıcıoğlu, O.W. Maarroof, O. Işııtman, G. Ateş, A. Yaşır "Neuroscope Sisteminin Model Tabanlı Sınaması," *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, pp. 347-352, 29 Eylül - 1 Ekim 2016.

[25] M. İ. C. Dede, O. W. Maarroof, G. Ateş, M. Berker, İ. Işııkay, and Ş. Hanalioğlu "Unilateral Teleoperation Design for a Robotic Endoscopic Pituitary Surgery System," *New Trends in Medical and Service Robots Design, Analysis and Control*, Part XIII, M. Husty and M. Hofbaur(Eds.), 101-115, Springer, Cham, 2018.