

## Derleme

# Nöroşirürji'de Robotik Cerrahi Kullanımı

## Robotic Surgery in Neurosurgery

Barış KÜÇÜKYÜRÜK<sup>1</sup>, Fatih ÇALIŞ<sup>2</sup><sup>1</sup>İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Tıp Fakültesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye<sup>2</sup>Koç Üniversitesi Tıp Fakültesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye

## ÖZ

Robotik cerrahi birçok cerrahi disiplinde artan bir popüleriteye sahiptir. Robotik cerrahi sayesinde cerrahi tedavinin mümkün olan en az invazif hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Bu sayede daha düşük komplikasyon oranı oluşması, daha kısa hastane yatış süresi sağlanması ve daha iyi kozmetik sonuçlar elde edilmesi ön görülmektedir. Derlemede nöroşirürji alanındaki robotik cerrahi uygulamalarının güncel durumu konusunda bilgi birikiminin aktarılması, robotik cerrahinin sağladığı avantajların ve dezavantajların tartışılması ve henüz cevabını bulmamış problemlerin ortaya konulması amaçlanmıştır. Bu bağlamda robotik cerrahi uygulamaları kranial ve spinal nöroşirürjikal yöntemler açısından incelenmiştir ve tartışılmıştır. Kranial uygulamalarda hesaplama hatalarını azaltan stereotaktik sistemler öne çıkarken, spinal cerrahide hedefleme hatalarını azaltan navigasyon bazlı sistemler daha sık kullanım alanı bulmuştur.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER:** Nöroşirürji, Omurga cerrahisi, Robotik cerrahi, Stereotaksi

## ABSTRACT

The popularity of robotic surgery showed an immense increase recently. This affinity is due to the minimal invasiveness of this method, which hypothetically facilitates fewer complications, shorter hospital stay, and better cosmetic results. This article focuses on up-to-date literature data about robotic surgery applications in neurosurgery and discusses its advantages and problems yet to be solved. Therefore, the subjects of robotic surgery in cranial and spinal surgery have been discussed separately. Cranial robotic applications focus more on stereotactic applications, which decrease calculation errors. On the other hand, spinal robotic surgery concentrates on spinal navigation systems, which decrease targeting mistakes.

**KEYWORDS:** Neurosurgery, Spinal surgery, Robotic surgery, Stereotaxy

## ■ GİRİŞ

Robotik cerrahi birçok cerrahi disiplinde rutin ve genel bir uygulama haline gelmiştir. Bu giderek artan popülerite, hastalara sunulan cerrahi tedavinin mümkün olan en az invazif hale getirilebilmesi amacıyla dayanmaktadır. Bu sayede daha az komplikasyon görülmesi, daha kısa hastane yatış süreleri sağlanması ve daha iyi kozmetik sonuçlar elde edilmesi hedeflenmektedir. Diğer taraftan nöroşirürji dışındaki cerrahi branşlardaki bu eğilim, farklı cerrahi teknik ve ekipman gereksinimlerinin henüz tam anlamıyla karşılanmamış olması sebebiyle nöroşirürji pratiğinde karşılığını bulamamıştır.

Henüz emekleme döneminde olsa da robotik cerrahinin nöroşirürjinin bazı temel problemlerine cevap bulabileceği, en azından bu alanda belirgin iyileşme sağlayacağı öne sürülmüştür. Uzun süreli ameliyatlarda cerrah yorgunluğu ile ortaya çıkan tremor ve stereotaktik sistemlerde görülen insan faktörüne bağlı hesaplama hataları bu problemlerin en önde gelenleridir. Diğer taraftan robotik cerrahinin cerrahi dokudaki sürekli ve anlık değişimlere ne kadar uyum sağlayabileceği ve cerrahi pratikte önemli bir faktör olan haptik uyarının (dokunma sonrası geribildirim duyusu) nasıl sağlanacağı soruları canlılığını korumaktadır.



Yazışma adresi: Barış KÜÇÜKYÜRÜK

E-posta: baris.kucukyuruk@istanbul.edu.tr

Bu derlemede nöroşürji alanındaki robotik cerrahi uygulamalarının güncel durumu konusunda bilgi birikimini aktarmak ve robotik cerrahinin sağladığı avantajlar ve henüz cevabını bulmamış problemlerin tartışılması amaçlanmıştır.

## ■ NÖROŐİRÜRJİDE ROBOTİK CERRAHİ UYGULAMALARI

### Kranial Cerrahide Robotik Uygulamalar

Kranial cerrahide hedefin yerleşim yerinin daha iyi tanımlanabilmesi için gösterilen çabalar, Pierre Paul Broca'nın 1813'te geliştirdiği kraniometrik ölçüm cetvellerine dayanır (8). Takip eden yüzyılda bu temel ölçüm cihazlarının geliştirilmesi ve daha yaygın kullanım alanı bulması sağlanmıştır. Modern anlamda ilk çerçeveleli stereotaktik sistem 1947'de Spiegel ve Wycis tarafından kullanılmıştır. Bu sayede intrakranial lezyonların yerleşim yeri 3-boyutlu kartezyen sistem temelinde saptanabilir hale gelmiştir (4,8). Nöroşürji pratiğinde çığır açıcı bir uygulama olan stereotaktik sistemler daha da geliştirmiş ve direkt cilt işaretlemeleri ya da kafatasına sabitlenmiş işaretçileri temel alan çerçevesiz sistemler ortaya çıkmıştır. Diğer taraftan cerrahi planlama basamaklarının karmaşıklaşması ve sayısının çoğalması, insan hatası faktörünün belirginleşmesine ve 21. yüzyıl itibariyle amaçlanan mükemmele yakın sonuçların elde edilmesinde güçlüklerin çıkmasına sebep olmuştur. Bu problemler özellikle derin yerleşimli lezyonlara uygulanan biyopsi işlemlerinde ve epilepsi cerrahisi öncesi tanı amaçlı genellikle çok sayıdaki EEG kayıt elektrodu yerleştirilen cerrahilerde gündeme gelmektedir. Hesaplamaların ve işaretlemelerin daha hızlı ve hatasız yapılabilmesi amacıyla son 20 yıldır robotik cerrahi giderek daha fazla nöroşürji alanında kendine yer bulmuştur.

Nöroşürji alanında robot kullanımı 1985 yılında PUMA 200 (Unimation) robotik sistemi ile uygulanan stereotaktik beyin biyopsisi ile başlamıştır (5,27). Dönemin şartları göz önüne alındığında, stereotaktik çerçevenin manuel olarak hazırlanması ve hesaplamaların yapılması uzun vakit almaktaydı. Buna karşın PUMA 200 robotu bilgisayarlı tomografi (BT) görüntülerini baz alarak tüm hedef hesaplama işlemlerini mevcut teknolojinin çok ötesinde bir hızda gerçekleştirebilmekteydi. PUMA 200 yeni bir devrin kapısını aralasa da, bu robotun aslında sağlık alanında kullanılmasının amaçlanmamış olması sebebiyle güvenlik endişeleri ortaya çıkmış ve bir süre sonra kullanımı terk edilmiştir. Takip eden süreçte *Neuromate* (Renishaw Mayfield, Lyon, France), *Pathfinder* (Prosurge, High Wycombe, United Kingdom), *NeuroArm* (University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada), ve Renaissance (MAZOR Robotics) sistemleri kullanıma girmiştir.

*Neuromate* "Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi" (FDA) onayı alan ilk sistemdir (5). Altı düzlemde (ileri/geri, sağ/sol, ve yukarı/aşağı) hareket serbestliği sağlayan kolu ile derin beyin stimülasyonu, endoskopi, ve invaziv EEG monitörizasyonu yerleştirilmesi amacıyla çeşitli nöroşürjikal uygulamalarda kullanılmaktadır (11). Bir diğer sistem olan *Pathfinder* robotu da benzer amaçlarla kullanılmaktadır. Diğer taraftan bu sistem robotik kolların yönlendirmesini *Neuromate*'de olduğu gibi preoperatif radyolojik görüntüleri temel alarak değil, hasta

başına sabitlenmiş kamera-yansıtıcı sistemi aracılığıyla anlık ve canlı görüntüler ile sağlanmaktadır (6). *NeuroArm* robotu ise stereotaksinin ötesinde imkanlar sağlaması ile bu iki sistemden ayrılmaktadır. Manyetik rezonans uyumlu bir robotik sistem olan *NeuroArm* ile cerrahin ayrı bir ortamdan kontrol ettiği robotik kol aracılığıyla bipolar koterizasyon, aspirasyon ve irrigasyon yapılabilir (30).

Kranial nöroşürjikal uygulamalarda robotik cerrahinin yer edinmesi için aşılması gereken ilk aşama robotik kola altı düzlemde hareket kazandırmak olmuştur. Bu sayede insan el bileği ve parmak hareketlerine benzer hareket kabiliyeti elde edilebilmiştir. Yukarıda aktarılan robotik uygulamalardan görüldüğu üzere bu özellik güncel robotik sistemlerde mevcuttur.

Diğer bir aşama ise tam anlamıyla aşılamamıştır. Kranial nöroşürji ameliyatları, klasik halinde bile küçük açıklıklardan uygulanan cerrahi girişimlerdir. Dahası, cerrahi mikroaletler manipölasyonu mümkün olmayan sert yapıların ya da hareket ettirilmesi hasta sağlığı açısından güvenli olmayacak yapıların etrafından dolaşmak durumundadır. Mevcut teknolojilerin büyük kısmında, robotik kolun ucuna iliştirilen düz ve sabit şekilli cerrahi enstrümanların en uç noktası bilgisayar tarafından kartezyen sistemde takip edilmektedir. İki nokta arasındaki en kısa düz hattın kullanılacağı ve aradaki hat boyunca hasar görebilecek yapıların olmadığı senaryolarda, bu yöntem asgari düzeyde güvenli olarak kullanılmaktadır. Diğer taraftan ulaşılması istenen dokunun etrafından dolaşılması gerekli yapılar ile çevreleği durumlarda eğimli cerrahi aletlere gereksinim duyulmaktadır. Dahası cerrahi aletin ucundan bağımsız olarak, gövdesi de bazı hassas dokulara temas edebilmekte ve bunları manipüle etmek durumunda kalmaktadır. Bu durumda cerrahi enstrümanın tümünün 3 boyutlu ortamda tanınması gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla ortaya çıkan bilgisayar hesaplama yükü, mevcut sistemlerin sınırlarını zorlayabilmektedir.

### Spinal Cerrahide Robotik Uygulamalar

Spinal cerrahi teknolojik gelişmelerin her zaman hızlıca adapte edildiği bir cerrahi disiplin olagelmıştır. Spinal enstrümantasyon başarısının hâlâ bireysel eğitim ve yeteneğe bağlı oluşu, derin dokularda cerrahi aletleri yönlendirmenin zorlukları ve hasta sağlığı açısından devam eden problemler bu gereksinimi doğurmaktadır. Spinal cerrahi alanında robotik cerrahi uygulamaları iki başlık altında incelenebilir: (i) bilgisayar destekli navigasyon sistemleri; (ii) telecerrahi sistemleri.

Bilgisayar destekli navigasyon sistemleri ilk defa 2011 yılında *SpineAssist* (MAZOR Robotics, Orlando, Florida) isimli sistemin FDA onay alması ile kullanıma girmiştir (5,20). Takip eden süreçte *Airo Mobile Intraoperative BT tabanlı bilgisayar destekli navigasyon sistemi* (Brainlab®), *O-arm destekli Stealth Station* (Medtronic®), *Ziehm Vision FD Vario 3-D*, ve *Stryker SpineMask*® gibi çeşitli sistemler cerrahi kullanıma sunulmuştur. Bu sistemlerin tümü, C-kollu skopi ya da peroperatif BT görüntülerini hastanın preoperatif görüntülemeleri ile birleştirerek navigasyon sağlama prensibi ile çalışırlar. Diğer taraftan navigasyon sisteminin sabit kolunun kullanım şekli ile birbirlerinden ayrılırlar. *Airo Mobile* ve *Stealth Station* sistemleri

kemik omurga düzeyine ulaştıktan sonra sabit navigasyon kolunun omurgaya, genellikle spinöz çıkıntılara sabitlenmesi ile kullanılırken, SpineMask sistemi direkt olarak hasta cildi üzerine yerleştirilen takip ediciler aracılığıyla kullanılmaktadır. İlk sistemdeki temel problem kemiğe tutturulmuş navigasyon kolunun hiçbir şekilde dokunulmaması gereksinimi iken, ikinci sistemde ise cerrahi diseksiyon derinleştikçe cilt dokularının hareket etmesi ile ortaya çıkabilecek hesaplama hatalarıdır (25).

Bahsi geçen spinal navigasyon sistemlerinin tümü daha az invaziv cerrahi girişimlere imkan tanıyarak komplikasyon oranında azalma ve hızlı iyileşme hedeflemektedir. Ancak literatürde genellikle pedikül vidası yerleştirme ameliyatları üzerine toplanan bilgi birikimi, bu sistemlerin avantajlı fiyat-etkinlik dengesine sahip olup olmadıklarını sorgulamaktadır (25).

Geleneksel free-hand teknik ile navigasyon eşliğinde yerleştirilen pedikül vidalarının başarısını karşılaştıran çalışmaların bir kısmında navigasyon sistemlerinin üstünlüğü gösterilmiştir (1,28,35). Bu çalışmalarda istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha düşük vida yerleştirme hatasının yanı sıra daha kısa ameliyat süresi de bildirilmiştir. Diğer taraftan 10.000 adet vidadaya ulaşılmış literatür birikimini gözden geçiren meta-analizlerde de, doğru hedeflemede navigasyon lehine istatistiksel olarak anlamlı başarı farkı saptanmış olsa da, her iki teknik arasında nörolojik sonuçlar ve tekrarlayan operasyon gereksinimi açısından anlamlı fark gösterilememiştir (10,29,32). Bu meta-analiz çıkarımları navigasyon sistemlerinin yüksek geliştirme ve uygulama maliyetleri de göz önüne alındığında, tabana yayılan bir kullanıma sunulmalarının mümkün olup olmadığının sorgulanmasını da beraberinde getirmiştir (25).

Spinal robotik cerrahinin önemli bir avantajı, tıbbi ekibin ve hastanın maruz kaldığı radyasyonun azaltılması aşamasında öne çıkmaktadır. İyonize radyasyon; katarakt, lösemi ve tiroid başta olmak üzere diğer solid organ malignitelerinin gelişmesi için önemli bir risk faktörü olarak bilinmektedir (23,24). Floroskopi temelli spinal navigasyon sistemlerinde, geleneksel yöntemlerin üçte biri oranında floroskopi çekimi bildirilmiştir (13). Ayrıca bu çekimlerin birçoğunun hastanın radyolojik görüntülerinin navigasyon sistemi ile eşleştirilmesi sırasında yapıldığını ve tıbbi ekibin bu sırada radyasyon kaynağından uzaklaşma imkanının olduğu yorumu yapılmıştır. Benzer sonuçlar BT-temelli sistemlerde de saptanmıştır. Geleneksel floroskopi çekimlerinde hastanın maruz kaldığı radyasyon dozu ile peroperatif çekilen BT ile ortaya çıkan radyasyon dozları karşılaştırılmıştır ve BT temelli sistemlerde istatistiksel olarak anlamlı düzeyde düşük dozlar saptanmıştır (12).

Spinal cerrahide kullanılan diğer robotik cerrahi uygulaması olan telecerrahi, cerrahin tam kontrolünde olan robotik sistemin cerrahin ellerinin uzantısı şeklinde görev gördüğü sistemlerdir. Tıbbi kullanımına 2000 yılında izin verilen Da Vinci Sistemi (Intuitive Surgical, Sunnyvale, California) en bilinen örneğidir. Robotun en önemli avantajı 3 boyutlu görüntü altında cerrahin her iki elini de hareket kısıtlaması olmadan kullanmasının mümkün olmasıdır. Ek olarak yaklaşık 10 kat görüntü büyütme izin vermesi, el titremesini engellemesi ve cerrahin ergonomik bir pozisyonda çalışmasına izin vermesi de diğer avantajlarıdır (25).

Da Vinci sistemi bu avantajları sebebiyle jinekoloji ve ürolojide geniş kullanım alanı bulsa da, nöroşürüjide kullanımı son 10 yıl içindeki olgu sunumu ya da ufak seriler düzeyinde kısıtlı kalmıştır. Daha önceki yıllarda bir grup hastada uygulanan ancak yaygın uygulama bulmaması sebebiyle terkedilen laparoskopik yol ile anterior lumbal interbody füzyon (ALIF) yerleştirilmesi ameliyatı (25), Da Vinci sistemi ile de bir grup hastada denenmiş ve umut verici sonuçlar alınmıştır (3,16,18,33). Ancak bahsi geçen olgu grubunun sıklığı ve aksi tarafta klasik nöroşürüj eğitiminden çok farklı bir eğitim gerekliliği bu yöntemin yaygın kullanıma girmesini engellemektedir.

Da Vinci Robotik Cerrahi Sisteminin nöroşürüjideki en güncel kullanımlarından biri de, kraniovertebral bileşkeye transoral yaklaşımdır (5). Halihazırda Da Vinci sistemi baş-boyun cerrahisinde transoral yol ile orofarinks tümörlerinin tedavisinde, total laringektomide ve obstrüktif uyku apnesi tedavisinde kullanılmaktadır (9,14,15,21). Bu bağlamda anatomik olarak yakın komşulukta olan kraniovertebral bileşkede de kullanılabilmesi düşünülmüştür (7,17,22,34). Bu olgu sunumlarında klasik transoral yaklaşımda karşılaşılan dar koridora hapsedilmiş bir cerrahiye göre daha geniş bir cerrahi koridor elde edildiği bildirilmiştir. Potansiyel olarak da, geleneksel transoral cerrahide sahanın yukarı ya da aşağı yönde genişletilmesi için gereken manevralara ayrılması ya da yumuşak damak kesilmesi gibi invaziv manevralara gerek kalmayabileceği görüşü aktarılmıştır. Ayrıca cerrahi sahada derinleşildikçe, robotik cerrahinin görüntü kalitesi ve ışıklandırma açısından belirgin üstün olduğu kaydedilmiştir. Ancak tüm bildiriler Da Vinci sisteminin henüz kafatabanı için gerekli cerrahi aletlere sahip olmadığı üzerinde birleşmektedirler.

## ■ TARTIŞMA

Hem kranial hem de spinal cerrahi uygulamalarında nöroşürüj, vücudun derin bölümlerinde yerleşim gösteren hassas nörolojik doku ile uğraşan ve bu katlara ulaşana kadar kendi doğal yapı ve dengelerini barındıran farklı yumuşak dokular ile de nazikçe ilgilenmek durumunda olan bir cerrahi disiplindir. Nöroşürüjünün bağımsız bir bilim dalı olarak tanınmasından bu yana, bazı temel problemler yaklaşık iki yüzyıldır hâlâ geçerliliğini korumaktadır. Hedefin doğru olarak tespit edilmesi, uzun süren cerrahiler süresince mikrodiseksiyonun yorulmadan aynı hassasiyette devam ettirilebilmesi ve cerrahi sonrası iyileşme sürecinin kısaltılması için atılması gerekli adımlar hâlâ tam anlamıyla cevap bulmamıştır.

Bu problemlerin en azından bir kısmının cevaplanabilmesi adına, nöroşürüj teknolojik gelişmelerden en fazla yararlanan branşlar arasında önde gelmektedir. Zamanla, 1980'li yıllar sonrasında gelişen ve kullanıma giren radyolojik tetkiklerin hızlıca nöroşürüjiye adapte edilmesi, daha kaliteli cerrahi aletlerin kullanıma girmesi, optik ve elektronik alanındaki ilerlemelerin cerrahi mikroskopların kapasitesini artırması nöroşürüjünün faydalandığı imkanlar arasında bulunmaktadır. Bu bağlamda makine – elektronik endüstrisinde gelişmelerin tıbbi son ürünlerinden biri olan robotik cerrahi de nöroşürüj alanında kendine yer bulmaktadır.

Henüz tıbbın herhangi bir alanında tam otomatize, başka bir deyişle kendi başına karar alan ve uygulayan bir robotik

sistem, yaygın kullanıma girmemiştir. Mevcut gelişmeler ve imkanlar dahilinde üç tip robotik cerrahiden bahsetmek mümkündür: (i) Denetlemeli Sistemler: Yapılacak cerrahi işlem cerrahi ekip tarafından önceden programlanır ve sisteme yüklenir. Cerrahi basamaklar, cerrahi ekip tarafından denetlenmekle birlikte, tamamen robot tarafından tamamlanır. Epilepsi cerrahisi öncesi EEG kayıt elektrodlarının yerleştirildiği girişimler bu tipe örnektir. (ii) Telecerrahi Sistemleri: Cerrahin hastadan ayrı bir ortamda bulunduğu halde, hasta yanındaki robotu bir kumanda paneli aracılığıyla kullanarak cerrahi işlemi gerçekleştirir. DaVinci robot sistemi en yaygın kullanılan sistemdir. Kranial cerrahide NeuroArm ise bir diğer örnektir (iii) Paylaşımlı Sistemler: Cerrah ve robotun, kontrol imkanını paylaştığı sistemler. Spinal cerrahi alanındaki uygulamalarda robot uygun implant rotasını belirlese de son karar cerraha aittir.

Günlük pratik açıdan bakıldığında nöroşürji alanının tümüne hitap eden ve problemlere cevap olabilecek bir robotik sistem oluşturmanın ne kadar güç olacağı aşikardır. Farklı cerrahi disiplinlerin tarihsel gelişimleri sırasındaki gereksinimleri bu çeşitliliği ortaya çıkarmıştır.

Nöroşürji doğası gereği uzun ameliyat süreleri gerektiren ve bu süre boyunca kimi zamanlar ergonomik olmayan pozisyonlarda çalışmasını zorunlu kılan bir disiplindir. Bu durum iki yönden olumsuz sonuçlara sebebiyet vermektedir: hasta sağlığı ve cerrah yıpranması. Robotik cerrahi bu iki konuda da önemli avantajlar sağlama potansiyeline sahip görülmektedir. Nöroşürji ameliyatlarının önemli bir kısmı mikroskop altında hassas sinir dokusu ve damar yapılarının diseksiyonunu içerir. Uzun süren ameliyatlarda cerrahın yorulmasına ve nihayetinde diseksiyon becerisinin azalmasına ve el titremesini beraberinde getirmektedir. Bu durum en hassas diseksiyonun, ameliyatın son aşamalarında gerekli olduğu bazı durumlarda, özellikle hasta sağlığını olumsuz etkileyebilmektedir. Diğer açıdan ise, uygun olmayan pozisyonlarda uzun yıllar devam ettirilen çalışma yöntemi, cerrahların omurga, kalça ve alt ekstremitelerinde daha çabuk yıpranma ortaya çıkmasına ve iş gücü kaybına neden olabilmektedir (2,8). Bu amaçla son 10 yıl içinde önce nöroşürji dışında baş-boyun cerrahisinde, ardından çok güncel olarak nöroşürjikal kafatabanı girişimlerinde Da Vinci robot sisteminin kullanımı gündeme gelmiştir (7).

Da Vinci Robotik Cerrahi Sistemi öncelikle üroloji ve jinekoloji alanlarında kendine yer bularak popülerleşmiştir. Bu sistemin 7 eklem hareket yönüne sahip dört kolu sayesinde, 3 boyutlu görüntü ile telecerrahi, hasta ve cerrahın aynı oda içinde olmadan gerçekleştirilen cerrahi, sağlaması itibarıyla nöroşürji alanında da kendine yer bulacağı ön görülmüştür. Dahası cerrahın oturarak ve rölatif olarak daha ergonomik pozisyonda çalışıyor olmasının cerrahi hata ve yıpranma oranını düşürebileceği öne sürülmüştür. Ayrıca ameliyatın süresinden bağımsız olarak, robotik sistem cerrahın el titremesini cerrahi diseksiyona yansıtmadığı için, başarının yükseleceği yargısına varılmıştır. Da Vinci Robotik Cerrahi Sistemi halihazırda C1-C2 yerleşimli üst servikal seviye patolojileri, intrauterin meningomyelosele tamiri ve spinal tümör rezeksiyonunda kullanılmıştır (5,26). Ayrıca intradural kafatabanı kitleleri ve anevrizma cerrahisi amaçlı keyhole

cerrahileri için de uygun olabileceği düşünülmüştür (19). Diğer taraftan bir takım tasarım ve ekonomik problemlerden ötürü yaygınlaşması yavaş seyretmektedir. Bu faktörlerden en sık vurgulanmış olanı Da Vinci Robotik Cerrahi Sistemi'nin kafatabanı ve spinal cerrahide temel cerrahi araçlardan biri olan yüksek devirli drill sistemlerine sahip olmayışıdır (5). Ancak, daha az dile getirilmiş olsa da, nöroşürjide cerrahin elindeki aletler aracılığıyla indirekt elde ettiği dokunma hissinin (haptik uyarı) şu aşamada mümkün olmayışı cerrahi işlemin başarısı ve sürdürülebilirliği açısından bir önceki faktör kadar önemli olduğunu düşünülmektedir. Ek olarak, bazı durumlarda Da Vinci sisteminin kollarında çaprazlamalar ve kilitlemeler ortaya çıkabilmektedir, ki bu durumun nöroşürji pratiğinde tamir edilemez hatalara sebep olabileceği düşünülmektedir.

Yorgunluk ve yıpranmanın getirdiği olumsuz sonuçların yanı sıra, spinal cerrahiye özel olarak, hiç küçümsememesi gereken bir başka durum daha söz konusudur. Spinal cerrahide, özellikle enstrümantasyon ameliyatlarında, tekrarlayan çok sayıda radyolojik görüntülemeler hem hastada hem de tıbbi ekipte önemli düzeyde radyasyon maruziyetine sebep olabilmektedir. Geleneksel enstrümantasyon cerrahisi uygulanan ameliyatlarda cerrahın maruz kaldığı yıllık ortalama radyasyon dozunun bir ortopedist kalça cerrahının aldığı dozun 50 katına ulaşabildiği gösterilmiştir (31). Bu oran geleneksel spinal enstrümantasyon için ölçülmüş değerlerdir; peroperatif skopi görüntülemelerinin daha sık uygulandığı minimal invaziv spinal cerrahide ortaya çıkan radyasyon etkisinin daha da fazla olduğu düşünülmektedir. Radyasyona karşı koruyucu kıyafet, gözlük ve eldivenler ile tıbbi ekibin korunması bir düzeye kadar sağlansa da, hastanın maruziyete karşı ne kadar korunabildiği hakkında soru işaretleri devam etmektedir. Bu açıdan bakıldığında stereotaktik cerrahi anlayışının adapte edildiği spinal navigasyon sistemleri, en azından teorik düzeyde, radyasyon maruziyetini önemli düzeyde azaltıyor gözükmektedir.

## ■ KAYNAKLAR

1. Amiot LP, Lang K, Putzier M, Zippel H, Labelle H: Comparative results between conventional and computer-assisted pedicle screw installation in the thoracic, lumbar, and sacral spine. *Spine (Phila Pa 1976)* 25:606-614, 2000
2. Berguer R: Surgery and ergonomics. *Arch Surg* 134:1011-1016, 1999
3. Beutler WJ, Peppelman WC Jr, DiMarco LA: The da Vinci robotic surgical assisted anterior lumbar interbody fusion: Technical development and case report. *Spine (Phila Pa 1976)* 38:356-363, 2013
4. Blomstedt P, Olivecrona M, Sailer A, Hariz MI: Dittmar and the history of stereotaxy; or rats, rabbits, and references. *Neurosurgery* 60:198-201,2007; discussion 201-202
5. Douglis JJ, Gonzalez-Blohm SA, Filis AK, Shea TM, Aghayev K, Vrionis FD: Robotics in neurosurgery: Evolution, current challenges, and compromises. *Cancer Control* 22:352-359, 2015
6. Eljamel MS: Validation of the PathFinder neurosurgical robot using a phantom. *Int J Med Robot* 3:372-377, 2007



7. Eroglu U, Meço C, Çağlar S, Ugur HÇ: Pure robotic surgery for odontoid tumor: First case. *World Neurosurg* 116:299-304, 2018
8. Fomenko A, Serletis D: Robotic stereotaxy in cranial neurosurgery: A qualitative systematic review. *Neurosurgery* 2017 (Epub ahead of print)
9. Friedman M, Hamilton C, Samuelson CG, Kelley K, Taylor D, Pearson-Chauhan K, Maley A, Taylor R, Venkatesan TK: Transoral robotic glossectomy for the treatment of obstructive sleep apnea-hypopnea syndrome. *Otolaryngol Head Neck Surg* 146:854-862, 2012
10. Gelalis ID, Paschos NK, Pakos EE, Politis AN, Arnaoutoglou CM, Karageorgos AC, Ploumis A, Xenakis TA: Accuracy of pedicle screw placement: A systematic review of prospective in vivo studies comparing free hand, fluoroscopy guidance and navigation techniques. *Eur Spine J* 21:247-255, 2012
11. Haegelen C, Touzet G, Reyns N, Maurage CA, Ayachi M, Blond S: Stereotactic robot-guided biopsies of brain stem lesions: Experience with 15 cases. *Neurochirurgie* 56:363-367, 2010
12. Kim CW, Lee YP, Taylor W, Oygar A, Kim WK: Use of navigation-assisted fluoroscopy to decrease radiation exposure during minimally invasive spine surgery. *Spine J* 8:584-590, 2008
13. Kraus MD, Krischak G, Keppler P, Gebhard FT, Schuetz UH: Can computer-assisted surgery reduce the effective dose for spinal fusion and sacroiliac screw insertion? *Clin Orthop Relat Res* 468:2419-2429, 2010
14. Lawson G, Mendelsohn AH, Van Der Vorst S, Bachy V, Remacle M: Transoral robotic surgery total laryngectomy. *Laryngoscope* 123:193-196, 2013
15. Lee JM, Weinstein GS, O'Malley BW Jr, Thaler ER: Transoral robot-assisted lingual tonsillectomy and uvulopalatopharyngoplasty for obstructive sleep apnea. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 121:635-639, 2012
16. Lee JY, Bhowmick DA, Eun DD, Welch WC: Minimally invasive, robot-assisted, anterior lumbar interbody fusion: A technical note. *J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg* 74:258-261, 2013
17. Lee JY, Lega B, Bhowmick D, Newman JG, O'Malley BW Jr, Weinstein GS, Grady MS, Welch WC: Da Vinci Robot-assisted transoral odontoidectomy for basilar invagination. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec* 72:91-95, 2010
18. Lee Z, Lee JY, Welch WC, Eun D: Technique and surgical outcomes of robot-assisted anterior lumbar interbody fusion. *J Robot Surg* 7:177-185, 2013
19. Marcus HJ, Seneci CA, Payne CJ, Nandi D, Darzi A, Yang GZ: Robotics in keyhole transcranial endoscope-assisted microsurgery: A critical review of existing systems and proposed specifications for new robotic platforms. *Neurosurgery* 10 Suppl 1:84-95, 2014; discussion: 95-96
20. Mattei TA, Rodriguez AH, Sambhara D, Mendel E: Current state-of-the-art and future perspectives of robotic technology in neurosurgery. *Neurosurg Rev* 37:357-366, 2014; discussion: 366,
21. Mendelsohn AH, Remacle M: Transoral robotic surgery for laryngeal cancer. *Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg* 23:148-152, 2015
22. Molteni G, Greco MG, Presutti L: Transoral robotic-assisted surgery for the approach to anterior cervical spine lesions. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 274:4011-4016, 2017
23. Mountford PJ, Temperton DH: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP) 1990. *Eur J Nucl Med* 19:77-79, 1992
24. Mroz TE, Abdullah KG, Steinmetz MP, Klineberg EO, Lieberman IH: Radiation exposure to the surgeon during percutaneous pedicle screw placement. *J Spinal Disord Tech* 24:264-267, 2011
25. Overley SC, Cho SK, Mehta AI, Arnold PM: Navigation and robotics in spinal surgery: Where are we now? *Neurosurgery* 80:S86-S99, 2017
26. Perez-Cruet MJ, Welsh RJ, Hussain NS, Begun EM, Lin J, Park P: Use of the da Vinci minimally invasive robotic system for resection of a complicated paraspinal schwannoma with thoracic extension: Case report. *Neurosurgery* 71:209-214, 2012
27. Ponnusamy K, Mohr C, Curet MJ: Clinical outcomes with robotic surgery. *Curr Probl Surg* 48:577-656, 2011
28. Schwarzenbach O, Berlemann U, Jost B, Visarius H, Arm E, Langlotz F, Nolte LP, Ozdoba C: Accuracy of computer-assisted pedicle screw placement. An in vivo computed tomography analysis. *Spine (Phila Pa 1976)* 22:452-458, 1997
29. Shin BJ, James AR, Njoku IU, Hartl R: Pedicle screw navigation: A systematic review and meta-analysis of perforation risk for computer-navigated versus freehand insertion. *J Neurosurg Spine* 17:113-122, 2012
30. Sutherland GR, Lama S, Gan LS, Wolfsberger S, Zareinia K: Merging machines with microsurgery: Clinical experience with neuroArm. *J Neurosurg* 118:521-529, 2013
31. Theocharopoulos N, Perisinakis K, Damilakis J, Papadokostakis G, Hadjipavlou A, Gourtsoyannis N: Occupational exposure from common fluoroscopic projections used in orthopaedic surgery. *J Bone Joint Surg Am* 85-A:1698-1703, 2003
32. Verma R, Krishan S, Haendlmayer K, Mohsen A: Functional outcome of computer-assisted spinal pedicle screw placement: A systematic review and meta-analysis of 23 studies including 5,992 pedicle screws. *Eur Spine J* 19:370-375, 2010
33. Yang MS, Yoon DH, Kim KN, Kim H, Yang JW, Yi S, Lee JY, Jung WJ, Rha KH, Ha Y: Robot-assisted anterior lumbar interbody fusion in a Swine model in vivo test of the da vinci surgical-assisted spinal surgery system. *Spine (Phila Pa 1976)* 36:E139-143, 2011
34. Yang MS, Yoon TH, Yoon DH, Kim KN, Pennant W, Ha Y: Robot-assisted transoral odontoidectomy: Experiment in new minimally invasive technology, a cadaveric study. *J Korean Neurosurg Soc* 49:248-251, 2011
35. Yu X, Xu L, Bi LY: Spinal navigation with intra-operative 3D-imaging modality in lumbar pedicle screw fixation. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi* 88:1905-1908, 2008