

## Spinal Yaklaşımlarda Robotik Cerrahi

### Robotic Surgery in Spinal Approach

Pınar KURU BEKTAŞOĞLU,<sup>a,b</sup>  
Bora GÜNER<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Beyin ve Sinir Cerrahisi Kliniği,  
Sağlık Bilimleri Üniversitesi  
Fatih Sultan Mehmet Eğitim ve  
Araştırma Hastanesi,  
<sup>b</sup>Fizyoloji AD,  
Marmara Üniversitesi Tıp Fakültesi,  
İstanbul

Geliş Tarihi/Received: 15.11.2016  
Kabul Tarihi/Accepted: 25.09.2017

Yazışma Adresi/Correspondence:  
Bora GÜNER  
Sağlık Bilimleri Üniversitesi  
Fatih Sultan Mehmet Eğitim ve  
Araştırma Hastanesi,  
Beyin ve Sinir Cerrahisi Kliniği,  
İstanbul, TÜRKİYE  
boragurer@gmail.com

**ÖZET** Son zamanlarda robotik cerrahi birçok farklı cerrahi girişimde kullanım yeri bulmaktadır. Son iki dekat robotik spinal cerrahi için dönüm noktası olmuştur. Günümüzde transpediküler vida fiksasyonu, vertebroplasti gibi birçok spinal girişim robot destekli sistemlerle kolayca yapılabilir. Bu derlemede, robotik sistemlerin spinal cerrahideki rolüne kısa bir bakış yapmaktayız.

**Anahtar Kelimeler:** Cerrahi, bilgisayar yardımı; cerrahi işlemler, minimal girişimsel

**ABSTRACT** Recently, robotic surgery has been widely used in numerous surgical operations. Last two decades were the milestones of robotic spinal surgery. Many spinal procedures such as transpedicular screw fixation, vertebroplasty, etc., can easily be managed by robot-assisted systems. In this review, we had a look at the role of robotic systems in spinal surgery.

**Keywords:** Surgery, computer-assisted; surgical procedures, minimally invasive

Robotik cerrahi günümüzde pek çok cerrahi alanda kullanım kolaylığı ve çeşitliliği sağlamaktadır. Spinal yaklaşımlarda robotik cerrahide son 20 yılda hızlı bir ilerleme sağlanmıştır. Robot destekli omurga cerrahisi, vertebroplasti, dejeneratif disk hastalığı, spondilolistezis, deformite düzeltme, travma, omurgayı etkileyen tümörlerin ablasyonu ya da rezeksiyonu, enfeksiyonlar, biyopsi ve faset blokaj gibi bir çok amaçlı uygulanabilmektedir.<sup>1-5</sup> Omurga cerrahisi omurganın kritik yapıları (damar, omurilik v.b.) olan komşuluğu nedeniyle çok yüksek derecede hassasiyet gerektirmektedir. Daha hassas ve etkin cerrahi sonuçlar ile daha az komplikasyon istemi robotik cerrahinin geliştirilmesinde önemli faktörlerin başında gelmektedir. Robotik sistemler, spinal enstrümantasyonda dura ve nörovasküler yapılarda meydana gelen hasarın en aza indirilmesi, radyasyon maruziyetinin azaltılması açısından üstünlük sağlamaktadır.<sup>6</sup> Bu derlemede minimal invaziv omurga cerrahisinde güncel yaklaşımlar ve robotik cerrahinin geleceği incelenmiştir.

#### TARİHÇE

1990'lı yılların başında üroloji, jinekoloji ve genel cerrahide laparoskopik ameliyatlara birlikte robotik cerrahi gelişmeye başlamıştır.<sup>7,8</sup> Da Vinci cerrahi sisteminin (Intuitive Surgical, Inc.) genel cerrahide kullanımı 2000 yılında, ürolojide kullanımı 2001 yılında ve jinekolojide kullanımı 2005 yılında FDA tarafından onaylandı.<sup>8</sup> Yal-

nızca 2010 yılında 300,000 üzerinde robotik cerrahi yapılmış ve kullanım alanı gün geçtikçe artmaktadır.<sup>8</sup>

Robotik omurga cerrahisinde en erken çalışmalar 1992 yılında Fransız araştırmacılar tarafından PUMA 260 model endüstriyel bir robotun ameliyathanede kullanım için uyarlanmasıyla başlamıştır.<sup>9</sup> Robot transpediküler fiksasyon sırasında lazer bir işaretleyici ile cerrahi sahada vida giriş noktalarını tespit etmek üzere tasarlanmıştır. 1995 yılında Santos-Munné ve ark., transpediküler fiksasyon için PUMA 560 model bir endüstriyel robotu adapte etmişlerdir.<sup>10</sup> Sonraki yıllarda Fraunhofer Enstitüsü'nden bir grup araştırmacı Evolution 1 (Universal Robot Systems (URS)) adlı cerrahi robotu nöroşirürji için geliştirmişlerdir. 'Robots and Manipulators for Medical Applications' ya da RoMed adlı çalışma kapsamında omurga cerrahisi için uyarlanmıştır.<sup>11</sup> Ancak ilerleyen yıllarda ticari olarak bu ürün piyasadan çekilmiştir.<sup>12</sup> Omurga cerrahisinde ilk kullanıma giren robot Mazor SpineAssist (SA) sistemidir.<sup>5</sup> İki dekattan uzun süredir cerrahların kullanımında olan robotik sistemler halen daha gelişime açık olup, endüstriyel gelişmeler doğrultusunda hızla ilerlemektedir.

## VIDA YERLEŞTİRMEK İÇİN TASARLANMIŞ ROBOTLAR

### SPİNEASSİST/RENAISSANCE

'Miniature Robot for Surgical Procedures' ya da diğer adıyla 'MARS' 2003 yılında Shoham ve ark., tarafından bildirilmiştir. MARS daha sonrasında SpineAssist'e evrilmiştir. SpineAssist (Mazor Surgical Technologies, Kayserya, İsrail) kemik üzerine yerleştirilen minyatür (2,5 çapı, 250 g ağırlığı) bir robottur (Resim 1).<sup>13,14</sup>

Cerraha ameliyat sırasında vida giriş noktalarını tayin eden, ardından işlemin kalanını cerrahın inisiyatifine bırakan, yarı-aktif, cerrahi bir alettir. Pedikül vidalama, trans-faset ve trans-laminer vidalama, biyopsi, skolyoz cerrahisi, vertebroplasti ve kifoplasti başta olmak üzere birçok alanda tercih edilebilir.<sup>5</sup> Şu anda piyasada ticari olarak omurga cerrahisinde kullanımı FDA ve CE onaylı tek üründür.<sup>7</sup> Sinir hasarı komplikasyonu çok düşük, yüksek oranda netliği olan, omurgada güvenli implanta izin veren bir sistemdir. Birkaç temel adım tamamlandıktan sonra hızlı bir öğrenme sürecinin ardından mükemmel sonuçlar beklenebilir.<sup>15</sup> Renaissance, yazılımı ve kullanıcı arayüzü geliştirilmiş bir üst modelidir. Servikal omurga ameliyatı yapılan ilk robotik teknolojidir.<sup>3</sup>



RESİM 1: SpineAssist robotunun görüntüsü (Mazor Surgical Technologies izni alınarak kullanılmıştır.)

Kadavra çalışmaları incelendiğinde SpineAssist pedikül vidalarını ve trans-laminer vidaları kesin olarak kılavuzluk ettiği ve floroskopik yöntemle karşılaştırıldığında operasyon zamanı (ilk kullanımda bile), enstrümantasyon kesinliği ve radyasyon maruziyeti açısından üstün olduğu görüldü.<sup>16</sup>

Devito ve ark., 2010 yılında SpineAssist kullanımını 2005-2009 yılları arasında 14 farklı hastanede retrospektif olarak taradıkları ve 842 hastayı analiz ettikleri çalışmanın sonuçlarını yayınlamışlardır. İntraoperatif floroskopi ile değerlendirilen 635 hastanın vidalarının %98'inin (3204/3271) doğru yerleştirildiği bildirilmiştir.<sup>17</sup> 2011 yılında Kantelhardt ve ark., SpineAssist ile vida yerleştirilen 55 hastayı ve konvansiyonel yöntem ile opere olan 57 hastayı retrospektif olarak karşılaştırmışlardır.<sup>18</sup> Robot grubunda konvansiyonel gruba göre vidalarda daha az sapma olmuş (%94,5 ve %91,4), daha az X ışını maruziyeti (34 saniye ve 77 saniye) olmuş, işlem sonrası daha kısa bir iyileşme süreci gözlenmiş ve daha az opioid kullanımı gerekmiştir. Ringel ve ark., yaptıkları prospektif randomize kontrollü bir çalışmada ise konvansiyonel yöntemle yerleştirilen vidaların yerleşimi %93 doğru iken robotik yöntemde bu oran %85'tir.<sup>19</sup> Robotik yöntemle yerleştirilip yanlış pozisyonda olan vidaların çoğunun lateral yerleşimli olduğu izlenmiştir. Robotun omurgaya tutturulması hassasiyet gerektirir ve potansiyel olarak vidaların malpozisyonuna ve implantasyon kanü-

lünün vida giriş yerinden kaymasına neden olabilir.

SpineAssist ile yapılacak robotik işlemler 5 adımdan oluşur:<sup>14,17</sup>

**Ameliyat öncesi planlama:** Giriş noktasının ve vida yolağın belirlenmesi için çalışma istasyonunda kullanılacak bilgisayarlı tomografi (BT) çekimi yapılır. Çekilen BT çalışma istasyonuna yüklenir. Akabinde vida giriş noktaları ve yolaklar belirlenir.

**Platformun kemik yapıya yerleştirilmesi:** Görüntü kaydı için optimal robotik platform hastanın kemiğine yerleştirilir.

**Görüntü netleştirme ve kayıt:** Görüntü netleştirme hedefi robotik platforma bağlanır, anteroposterior ve 60° oblik floroskopik görüntüler elde edilir ve yarı-otomatik olarak preoperatif BT görüntüleriyle eşleştirilir (Resim 2).

**Robotun kurulumu ve hareket ettirilmesi:** Robot kurulum iskeletine eklenir. Sonrasında hareket eder ve pozisyona kilitlenir, robotun distal kolundan rehber tüp içinde girmesi planlanmış vida/alet yörüngede ilerletilir. Rehber tüp küçük bir cilt kesisi ile içeri ilerletilir ve hastanın kemik yapısına nazikçe sabitlenir (Resim 3).



**RESİM 2:** Spine Assist görüntüleme istasyonu (Mazor Surgical Technologies izni alınarak kullanılmıştır.)

**Yörüngenin yürütülmesi:** Delici alet rehber tüp içinden planlanan yörüngede perkütan olarak çalıştırılır. Delik bir tüp çalışılan kanala yerleştirilir ve posterior vertebral duvardan pedikül içinde ilerletilir. Kirschner teli (K-teli) omur gövdesine yerleştirilir ve delik tüp geri çekilir. Bu işlem tüm yörüngeler delinene kadar tekrarlanır ve K-teli tüm seviyelerde yerleştirilir. Bu noktada robotun rehberliği tamamlanır. Sistem daha sonra ihtiyaç olması durumuna karşı yerinde tutulur.

#### SPINEBOT, SPINEBOT V 2 AND CORA

Koreli araştırmacılar tarafından transpediküler fiksasyon amacıyla geliştirilmiştir. SPINEBOT otomatik delim yaparken, CoRA (cooperative robotic assistant) sisteminde otomatik vida yerleştirme özelliği de bulunmaktadır.<sup>20,21</sup> 2010 yılında ise SPINEBOT v2, SPINEBOT'tan farklı olarak yeniden tasarlandı.<sup>22</sup> SPINEBOT'ta bulunan optik izleme özelliği SPINEBOT v2'de yerini biplanar floroskopiye bırakmıştır. FDA onayı bekleyen cihaz halen daha geliştirilme ve patent aşamasındadır.

#### DiĞER

Alman Havacılık Merkezi (DLR), transpediküler fiksasyon için *VectorBot* adında X-ışını yerine işaretleme kullanılarak vertebra pozisyonunu tespit eden bir robot tasarlanmış ancak piyasaya sürülmeden proje iptal edilmiştir.<sup>12,22</sup> Uzun soluklu klinik çalışmalar bulunmamaktadır.

*Neuroglide*, servikal interbody füzyonu için Kosztrzewskive ark., tarafından özellikle atlanto-aksiyel füzyon için (C1-C2) 2012 yılında tasarlanmıştır. Henüz klinik çalışma alanı bulunmamıştır.<sup>23</sup>

Boschetti ve ark., 2005 yılında transpediküler fiksasyon cerrahisinde delici bir robotic system olarak



**RESİM 3:** Spine Assist ile cerrahi işlem (Mazor Surgical Technologies izni alınarak kullanılmıştır.)

“robot in medical environment” (*RIME*) projesini geliştirmişlerdir.<sup>24</sup> Temel özelliği uzaktan yönetilebilen bir sistem olmasıdır. Bu sistem üzerine çalışmalar halen daha devam etmektedir.

Jin ve ark., pedikül vidası yerleştirmek için kızılötesi izleme aracı barındıran yeni bir cerrahi robot geliştirmişler ve adımı robot spinal surgical system (*RSSS*) vermişlerdir.<sup>25</sup> Bu robot henüz deney aşamasında olup, literatürde kadavra ve hayvan çalışması bulunmamaktadır ve FDA onayı yoktur.

## ENDOSKOPIK GİRİŞİMLER İÇİN ROBOTLAR

### DA VINCI CERRAHİ SİSTEMİ: SPİNAL UYGULAMALARI

da Vinci cerrahi robotları (Intuitive Surgical, Sunnyvale, CA, USA), ürolojik ve jinekolojik cerrahilerin yanı sıra, sınırlı da olsa, endoskopik spinal girişimler için de test edilmiştir. da Vinci öncelikli olarak yumuşak doku için tasarlandığından kemik üzerinde yapılacak cerrahi işlem için yeterli değildir.<sup>26</sup> Yang ve ark., da Vinci'nin spinal girişimlerde kullanımına yönelik deneysel çalışmaları derlemişler ve 5 hastada başarılı paravertebral tümör rezeksiyonu bildirmişlerdir.<sup>2</sup> 2011 yılında da başarılı bir paraspinal schwannom rezeksiyonu yapmışlardır.<sup>27</sup> Lee ve ark., iki kadavrada yaptıkları çalışmada da Vinci'nin kranioservikal bileşke transoral dekompresyonun uygunluğunu göstermişlerdir ve aynı yıl transoral odontoidektomi de gerçekleştirmişlerdir.<sup>28,29</sup> Ponnusamy ve ark., domuzda posterior yaklaşımla başarılı laminotomi, laminektomi, disk insizyonu ve dura dikişi bildirmişlerdir.<sup>30</sup> Kim ve ark., da Vinci kullanarak domuzda anterior lomber interbody füzyon (ALIF) cerrahisi gerçekleştirmiş ve disk aralığına metal bir kafes yerleştirmişlerdir.<sup>31</sup> 2013 yılında yapılan iki ayrı çalışmada da Vinci robotu kullanılarak yapılan ALIF vakalarında azalmış komplikasyon ve başarılı cerrahi sonuçlar bildirilmiştir.<sup>7,32</sup>

### OMURİLİK İÇİN MİKROENDOSKOPI (MINOSC)

Subaraknoid aralıkta yapılacak girişimsel işlemler için geliştirilmiş bir robottur. Ascari ve ark., çevre anatomik yapıları görüntülemek ve lokal elektrostimülasyon için deneysel kullanımını bildirmişlerdir.<sup>33</sup> Henüz klinik yansımaları yoktur.

## İĞNE BAZLI GİRİŞİMLER İÇİN ROBOTLAR

*AcuBot*, 2003 yılında floroskopi rehberliğinde bir ya da iki planı, ya da intraoperatif BT kullanarak perkütan iğne

yerleştirme amacıyla tasarlanmış bir robottur.<sup>34</sup> *AcuBot* FDA onayı almış ve 20 hasta ile yapılan spinal sinir blokajı klinik çalışması 2005 yılında yayınlanmıştır.<sup>4</sup> Güncel olarak spinal işlemlerde tercih edilmemekte, karaciğer ve akciğer gibi yumuşak dokularda kullanımına yönelik çalışmalar devam etmektedir.<sup>35</sup>

*Innomotion*, MR eşliğinde kanül, biyopsi probu, drenaj, ilaç uygulama ve tümör yıkımı gibi işlemlerin yapılabilmesi için bir uzaktan kumanda edilebilen bir cerrahi alet olarak tasarlanmıştır.<sup>3</sup> 2010 yılında ticarileştirilme süreci durdurulan robotun güncel durumu ve geleceği hakkında net bir bilgiye erişilememiştir.

*DLR's LWR III*, spinal biyopsiler ve vertebraplastiler için Tovar-Arriga ve ark., intraoperatif 3D radyografi görüntüleri ve kızılötesi izleme sistemini birleştiren cerrahi bir robot sistemidir.<sup>1</sup> Bu cihaz henüz bir araştırma prototipi olup geliştirilmeye devam etmekte ve ticari olarak piyasada bulunmamaktadır.

*Tokyo Üniversitesi'nin vertebroplasti robotu*, bir grup Japon araştırmacının vertebroplasti için geliştirdiği bu robotik cerrahi sistemi ameliyat öncesi görüntülemelere göre yapılan operasyon planını operasyon sırasında floroskopik yöntemle takip etmektedir.<sup>36</sup>

*SpineNav*, 2008 yılında Ju ve ark., tarafından perkütan vertebroplasti için otonom iğne yerleştirme ya da uzaktan kumanda edilebilen mekanizma ile çalışan bir robottur.<sup>37</sup> Bu robot BT içinde kullanılmak için tasarlanmış ve metal koruyuculu platform ile intraoperatif görüntüler hastaya göre oryantasyon hakkında bilgi verir. Güncel klinik ya da kadavra çalışması bulunmamaktadır.

## GÜNCEL ROBOTİK CERRAHİ UYGULAMALAR

### PEDİKÜL VİDALAMA

Transpediküler fiksasyon robotik bilimcilerin ilk dikkatini çeken girişimlerden biridir.<sup>6</sup> Robotik cerrahi ile transpediküler vida fiksasyonu, yüksek yetkinlik, daha az komplikasyon ve minimal radyasyon maruziyeti ile başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir.

### OMURGA GÖVDESİNİN GÜÇLENDİRİLMESİ

Vertebroplasti, robotik cerrahi açısından sık uygulama alanı bulan bir işlemdir. Robotik cerrahi ile yapılan vertebroplasti işlemlerinde radyasyon maruziyeti azalmaktadır.

### ANTERİOR LOMBER INTERBODY FÜZYONU (ALIF)

ALIF cerrahisinde da Vinci sisteminin kullanılmasının görüntü alanını genişletme ve morbiditeyi azaltma açı-



sından avantaj düşünülmüştür. Ancak yaygın klinik kullanımı yoktur.<sup>7</sup>

## DİĞER

Posterior omurgada posterior lomber interbody füzyonu, spinal tümör rezeksiyonu, biyopsi, laminektomi ve subaraknoid aralık inceleme, lokal elektrostimülasyon için robot kullanımı bildirilmiştir.<sup>1,2,33,38,39</sup>

## ÖĞRENME EĞRİSİ

Robotik cerrahide başarı, cerrahın tecrübe kazanmasıyla artmaktadır. Bir grup araştırmacı 2010 yılında %89,3 kesinlik belirtmişken 2014 yılında robotik rehberliğin kesinliğini %99 olarak bildirmişlerdir. Bu farklılığı kazanılan tecrübe ile açıklamışlardır.<sup>14,17</sup> 2013 yılında Hu ve Lieberman robotik yardımla pedikül vidası yerleşiminin cerrah deneyimlendikçe arttığını bildirmişlerdir. Aynı cerrahın ameliyat ettiği 174 hastada ilk 30 hastada

doğru yerleşim oranı %82 iken, sırasıyla %93, %91, %95 olarak diğer 30'ar kişilik gruplarda başarı oranı artmıştır. Deneyim kazanıldıkça robottan manuele dönerek vida yerleştirme oranı ve malpozisyonadaki vida sıklığı azalmıştır.<sup>40</sup>

## SONUÇ

Robotik omurga cerrahisinde birçok avantaj bulunmakla birlikte sınırlılıkları da bulunmaktadır. Bu alanda yapılacak daha fazla randomize kontrollü çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Robotik teknolojinin gelişmesi, cerrahi deneyimin artması ve maliyetin azalması ile daha başarılı sonuçlar elde edilebilecektir. Robotik rehberliğin rutin kullanımı daha güvenli işlemlere zemin hazırlamanın yanı sıra daha kısa cerrahi süresi, daha hızlı iyileşme periyodu ve günlük yaşama daha erken dönmeyi sağlayacaktır. Ayrıca ameliyat ekibinin işlem sırasında daha az radyasyona maruz kalması sağlanacaktır.

## KAYNAKLAR

1. Tovar-Arriaga S, Tita R, Pedraza-Ortega JC, Gorrostieta E, Kalender WA. Development of a robotic FD-CT-guided navigation system for needle placement-preliminary accuracy tests. *Int J Med Robot* 2011;7(2):225-36.
2. Yang MS, Jung JH, Kim JM, Kim CH, Yi S, Ha Y, et al. Current and future of spinal robot surgery. *Korean J Spine* 2010;7(2):61-5.
3. Melzer A, Gutmann B, Remmele T, Wolf R, Lukoscheck A, Bock M, et al. INNOMOTION for percutaneous image-guided interventions: principles and evaluation of this MR- and CT-compatible robotic system. *IEEE Eng Med Biol Mag* 2008;27(3):66-73.
4. Cleary K, Watson V, Lindisch D, Taylor RH, Fichtinger G, Xu S, et al. Precision placement of instruments for minimally invasive procedures using a 'needle driver' robot. *Int J Med Robot* 2005;1(2):40-7.
5. Barzilay Y, Liebergall M, Fridlander A, Knoller N. Miniature robotic guidance for spine surgery--introduction of a novel system and analysis of challenges encountered during the clinical development phase at two spine centres. *Int J Med Robot* 2006;2(2):146-53.
6. Bertelsen A, Melo J, Sánchez E, Borro D. A review of surgical robots for spinal interventions. *Int J Med Robot* 2013;9(4):407-22.
7. 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)* 2013;38(4):356-63.
8. Wedmid A, Llukani E, Lee DI. Future perspectives in robotic surgery. *BJU Int* 2011;108(6 Pt 2):1028-36.
9. Sautot P, Cinquin P, Lavalée S, Troccaz J. Computer assisted spine surgery: a first step toward clinical application in orthopaedics. In *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE, Engineering in Medicine and Biology Society*. Paris, France 1992;1071-2.
10. Santos-Munné JJ, Peshkin MA, Mirkovic S, Stulberg SD, Kienzie TC, Morgan K. A stereotactic/robotic system for pedicle screw placement. In *Proceedings of the Medicine Meets Virtual Reality III Conference*, Morgan K, Sattava R, Sieburg H, et al. (eds.). IOS Press/Ohmsa: San Diego, CA 1995;326-33.
11. Niesing B. Robots for spine surgery. *Fraunhofer Mag* 2001;46-7.
12. Gomes P. Surgical robotics: Reviewing the past, analysing the present, imagining the future. *Robot Comput Integr Manuf* 2010;1-6.
13. Shoham M, Burman M, Zehavi E, Joskowicz L, Batkilin E, Kunicher Y. Bone-mounted miniature robot for surgical procedures: concept and clinical applications. *IEEE Trans Rob Autom* 2003;19(5):893-901.
14. Barzilay Y, Schroeder JE, Hiller N, Singer G, Hasharoni A, Safran O, et al. Robot-assisted vertebral body augmentation: a radiation reduction tool. *Spine (Phila Pa 1976)* 2014;39(2):153-7.
15. Barzilay Y, Kaplan L, Liebergall M. Miniature robotic guidance for spine surgery. In *Medical Robots*; Vanja Bozovic (ed.), ISBN 978-3-902613-18-9, PP 219-232, Advanced Robotic Systems International & Pro Verlag, Vienna, Austria.
16. Hardenbrook M, Khanna AJ, Lieberman I, Wang J, Guyer RD: Miniature Robotic Guidance In MIS Spinal Surgery--Accuracy, Radiation And Procedure Time. *The Internet Journal of Minimally Invasive Spinal Technology* 2008;2(3).
17. Devito DP, Kaplan L, Dietl R, Pfeiffer M, Horne D, Silberstein B, et al. Clinical acceptance and accuracy assessment of spinal implants guided with SpineAssist surgical robot: retrospective study. *Spine (Phila Pa 1976)* 2010;35(24):2109-15.
18. Kantelhardt SR, Martinez R, Baerwinkel S, Burger R, Giese A, Rohde V. Perioperative course and accuracy of screw positioning in conventional, open robotic-guided, percutaneous robotic-guided, pedicle screw placement. *Eur Spine J* 2011;20(6):860-8.
19. Ringel F, Stür C, Reinke A, Preuss A, Behr M, Auer F, et al. Accuracy of robot-assisted placement of lumbar and sacral pedicle screws: a prospective randomized comparison to conventional freehand screw implantation. *Spine (Phila Pa 1976)* 2012;37(8):E496-501.

20. Chung GB, Kim S, Lee SG, Yi BJ, Kim W, Oh SM, et al. An image-guided robotic surgery system for spinal fusion. *Int J Control Autom Syst* 2006;4(1):30-41.
21. Lee J, Hwang I, Kim K, Choi S, Chung WK, Kim YS. Cooperative robotic assistant with drill-by-wire end-effector for spinal fusion surgery. *Indust Robot Int J* 2009;36(1):60-72.
22. Kim S, Chung J, Yi BJ, Kim YS. An assistive image-guided surgical robot system using O-arm fluoroscopy for pedicle screw insertion: preliminary and cadaveric study. *Neurosurgery* 2010;67(6):1757-67.
23. Kostrzewski S, Duff JM, Baur C, Olszewski M. Robotic system for cervical spine surgery. *Int J Med Robot* 2012;8(2):184-90.
24. Boschetti G, Rosati G, Rossi A. A haptic system for robotic assisted spine surgery. *Proceedings of IEEE Conference on Control Applications* 2005;19-24.
25. Jin H, Wang L, Hu Y, Zhang J, Zheng Z. Design and control strategy of robotic spinal surgical system. In: *IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering*, 2011: Harbin, China; 2011. p. 627-32.
26. Karas CS, Chiocca EA. Neurosurgical robotics: a review of brain and spine applications. *J Robot Surg* 2007;1(1):39-43.
27. Yang MS, Kim KN, Yoon DH, Pennant W, Ha Y. Robot-assisted Resection of Paraspinal Schwannoma. *Journal of Korean Medical Science* 2011;26(1):150-3.
28. Lee JY, O'Malley BW, Newman JG, Weinstein GS, Lega B, Diaz J, et al. Transoral robotic surgery of craniocervical junction and atlantoaxial spine: a cadaveric study. *J Neurosurg Spine* 2010;12(1):13-8.
29. Lee JY, Lega B, Bhowmick D, Newman JG, O'Malley BW Jr, Weinstein GS, et al. Da Vinci Robot-assisted transoral odontoidectomy for basilar invagination. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec* 2010;72(2):91-5.
30. Ponnusamy K, Chewning S, Mohr C. Robotic approaches to the posterior spine. *Spine (Phila Pa 1976)* 2009;34(19):2104-9.
31. Kim MJ, Ha Y, Yang MS, Yoon DH, Kim KN, Kim H, et al. Robot-assisted anterior lumbar interbody fusion (ALIF) using retroperitoneal approach. *Acta Neurochir (Wien)* 2010;152(4):675-9.
32. Lee Z, Lee JY, Welch WC, Eun D. Technique and surgical outcomes of robot-assisted anterior lumbar interbody fusion. *J Robot Surg* 2013;7(2):177-85.
33. Ascari L, Stefanini C, Bertocchi U, Dario P. Robot-assisted endoscopic exploration of the spinal cord. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C. J Mech Eng Sci* 2010; 224(7):1515-29.
34. Stoianovici D, Cleary K, Patriciu A, Mazilu D, Stanimir A, Craciunoiu N, et al. Acubot: a robot for radiological interventions. *IEEE Trans Rob Autom* 2003;19(5):927-30.
35. Badaan S, Petrisor D, Kim C, Mozer P, Mazilu D, Gruionu L, et al. Does needle rotation improve lesion targeting? *Int J Med Robot* 2011; 7(2):138-47.
36. Onogi S, Gotoh M, Nakajima Y, Kobayashi E, Sakuma I, Koyama T, et al. Vertebral robotic puncture for minimally invasive spinal surgery: puncture accuracy evaluation for vertebral model. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 2009;4(suppl 1):121-2.
37. Ju H, Zhang J, An G, Pei X, Xing G. A robot-assisted system for minimally invasive spine surgery of percutaneous vertebroplasty based on CT images. In: *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, 2008. Chengdu, China 2008;290-5.
38. Pnnusamy K, Chewning S, Mohr C. Robotic approaches to the posterior spine. *Spine* 2009;34:2104-9.
39. Wang T, Luan S, Hu L, Liu Z, Li W, Jiang L. Force-based control of a compact spinal milling robot. *Int J Med Robot* 2010;6(2):178-85.
40. Hu X, Lieberman IH. What is the learning curve for robotic-assisted pedicle screw placement in spine surgery? *Clin Orthop Relat Res* 2014;472(6):1839-44.