



Omurga cerrahisinde hibrit ameliyathane

Hybrid operating room in spine surgery

Serdar Kahraman¹, Ömer Erşen²

¹Anadolu Sağlık Merkezi Johns Hopkins Hastanesi, Nöroşirürji Kliniği, İstanbul

²Gülhane Tıp Fakültesi, Gülhane Eğitim ve Araştırma Hastanesi, Ortopedi ve Travmatoloji Kliniği, Ankara

Teknolojik gelişmelere paralel olarak yeni geliştirilen tıbbi cihazları ameliyathanelerimize uyarlayarak daha güvenli cerrahiler gerçekleştirmeye çalışmaktayız. Bu ihtiyacımızın gerçeğe dönüşmesiyle hibrit ameliyathaneler yaygınlaşmaya başladı. “Hibrit ameliyathane” kavramı, radyo-geçirgen (radyolusen) ameliyathane masasından cerrahi robotlara kadar ameliyathane kullanmakta olduğumuz tüm teknolojik cihazları kapsamaktadır. Her geçen gün yeni geliştirilen cihazlarla hibrit ameliyathane kavramı genişlemekte ve biz cerrahlar için ameliyatları daha güvenli hale getirmektedir.

Anahtar sözcükler: hibrit ameliyathane; omurga cerrahisi; cerrahi navigasyon; medikal robotik

In parallel with technological developments, we are trying to perform safer surgeries by adapting newly developed medical devices to our operating rooms. With the realization of this need, hybrid operating rooms began to become widespread. The concept of the hybrid operating room includes all the technological devices we use in the operating room, from the radiolucent operating room table to the surgical robots. The concept of the hybrid operating room is expanding day by day with newly developed devices and makes the surgeries safer for us surgeons.

Key words: hybrid operating room; spine surgery; surgical navigation; medical robotics

Cerrahi tekniklerin daha karmaşık hale gelmesi ve ameliyatların daha güvenli şekilde yapılabilmesi için gösterilen çabalar nedeniyle geleneksel ameliyathaneler gereksinimimizi karşılamamaya başlamıştır.^[1,2] Hibrit ameliyathane, hastanın tedavisinin en güvenli ve en etkin şekilde yapılabilmesi için gerekli olan tüm tıbbi gereçleri içeren bir kavram olarak ortaya çıkmıştır. Hibrit ameliyathane, tanım olarak gelişmiş tıbbi görüntüleme sistemleri ve tıbbi cihazların aynı anda kullanılabilirdiği ameliyathane odaları için kullanılan terimdir. Mobil floroskopi cihazlarının 1970’li yıllarda kullanıma girmesiyle ortaya çıkmıştır. Hibrit ameliyathane kavramı, cerrahın kullanacağı aletlerin yanı sıra anestezi ekibi ve girişimsel radyoloji ekibinin kullanacağı ameliyathane içi bilgisayarlı tomografi, minimal müdahaleci cerrahi ekipman, navigasyon sistemleri ve dijital çıkarma anjiyografi gibi pek çok donanımı içermektedir.^[1,3,4]

Hibrit ameliyathaneler, günümüzde pek çok dal tarafından kullanılmakta olup, her geçen gün kullanım alanı genişlemektedir. Omurga cerrahisinde de minimal müdahaleci cerrahideki ilerlemeler, uygulanan

implantların en uygun ve güvenli yerleştirilmesi için çeşitli artırılmış gerçeklik tabanlı cihazın kullanılmaya başlanması nedeniyle hibrit ameliyathane gereksinimi artmıştır.^[5-7] Omurga cerrahisinde travmadan deformiteye kadar hemen her cerrahi yaklaşımda hibrit ameliyathane kullanımı giderek standart duruma gelmeye başlamıştır.

RADYO-GEÇİRGEN (RADYOLUSEN) AMELİYATHANE MASASI

Hibrit ameliyathanenin olmazsa olmaz en temel parçalarından biri de radyolusen mobil ameliyat masasıdır. Eski dönemlerde basit bir masada cerrahi işlemler gerçekleştirilirken, günümüzde hibrit ameliyathane teknolojik donanımıyla uyumlu masalar kullanmaktayız. Hidrolik sistemlerin masalara adapte edilmesi ve masaların modüler hale getirilmesi, uygulanacak ameliyat için ideal hasta pozisyonu sağlanmasına olanak vermektedir. Aynı zamanda steril alan bozulmadan uygun radyolojik değerlendirme yapılabilmesi için masaların ameliyathanedeki görüntüleme sistemlerini

İletişim / Contact: Prof. Dr. Serdar Kahraman • E-posta / E-mail: serkah@hotmail.com

ORCID iD: Serdar Kahraman, 0000-0003-2489-3854 • Ömer Erşen, 0000-0001-7351-6305

Geliş / Received: 28 Ekim 2021 • **Kabul / Accepted:** 16 Aralık 2021

engellemeyecek şekilde radyo-geçirgen olması gereklidir.^[8,9] Omurga cerrahisinin güvenli yapılabilmesi için günümüzde farklı özelliklerde pek çok tip ameliyathane masası mevcuttur.

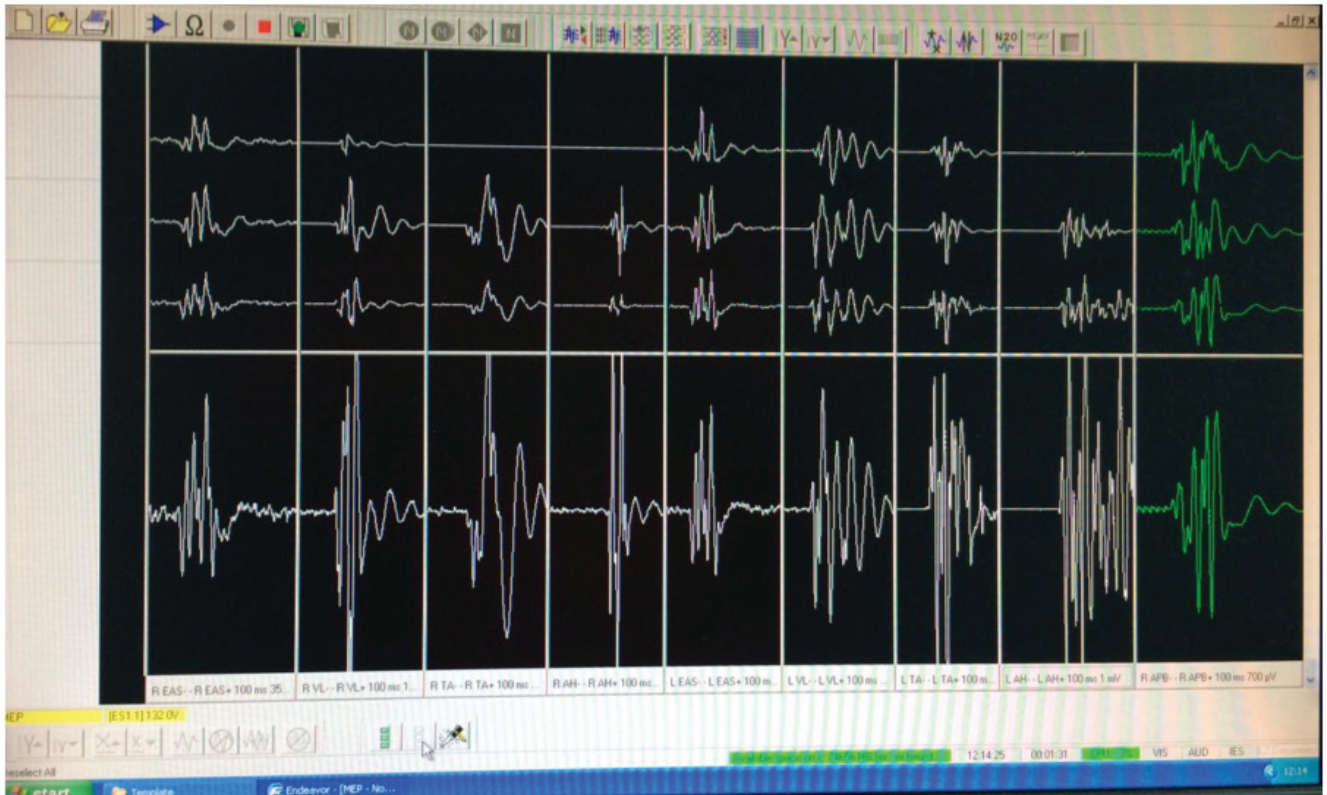
NÖROMONİTÖRİZASYON

Hibrit ameliyathanede omurga cerrahisinin güvenli şekilde yapılmasını sağlayan donanımlardan biri de nöromonitörizasyondur. Cerrahi esnasında hastanın nörofizyolojik takibinin yapılmasını ve istenmeyen nörolojik komplikasyonların önlenmesini sağlar.^[10] Omurga cerrahisinde özellikle deformite ve tümör ameliyatlarında potansiyel nörolojik yaralanmanın önüne geçmek için nöromonitörizasyon kullanılmaktadır. Somatosensoryel uyarılmış potansiyeller ile spinal kord dorsal kolonun (dokunma, iki nokta ayırım, titreşim, propriosepsiyon) fonksiyonları değerlendirilirken, motor uyarılmış potansiyeller kullanılarak spinal kord ventral kolon fonksiyonları değerlendirilir. Ayrıca ameliyat esnasında elektromiyografi (EMG) ve stimülasyon probu ile özellikle lomber bölgede sinir köklerinin fonksiyonları kontrol edilebilmektedir (Şekil 1).^[10,11] Hastanın uygun şekilde değerlendirilebilmesi için en önemli konulardan biri anestezi ekibinin uyumu ve nöroanestezi tekniğidir. Uygun olmayan anestezi tekniklerinde, hastanın vücut ısısının düşmesi

durumunda, hipotansiyon ve kan kaybı olması durumunda, teknik olarak elektrotların uygun kaslara yerleştirilmemesi gibi durumlarda hatalı veya eksik nöromonitör bildirimleri kayıtlanabilmekte ve nöromonitörizasyona rağmen nörolojik fonksiyon kayıpları ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle cerrah, anestezi ve nöromonitör takibi yapan nörolog, ekip olarak uyum içinde çalışmalıdır.

AMELİYAT MİKROSKOBU

Günümüzde omurga cerrahisinde pek çok işlem esnasında mikroskop kullanımı standart hale gelmiştir. Ancak yeni nesil filtreli mikroskoplar hibrit ameliyathanenin donanımı içerisinde özel bir konumdadır. Ancak omurga ve omurilik tümörlerinin mikrocerrahi rezeksiyonlarında floresan ve benzeri filtreli ameliyat mikroskoplarının kullanılması ile infiltratif lezyonlarda normal dokunun tümör dokusundan ayırt edilmesi çok daha kolay hale gelmektedir. İşlem esnasında hastaya uygulanan sodyum floresein hücre içi alanda toplanır ve özellikle kan-beyin bariyerinin bozulduğu alanları gösterir.^[12,13] Pratik olarak kontrast tutan tümöral doku floresan filtre ile cerrahi sınır olarak belirlenebilmektedir. Ayrıca vasküler boyanma sağlanması diğer bir avantajıdır. Bu nedenle özellikle intradural lezyonlarda kullanımı cerraha büyük fayda sağlamaktadır. Sodyum floresein özellikle retina anjiyografilerinde



Şekil 1. Nöromonitör ekranından hastanın motor aktivitesinin takibi.



Şekil 2. Floresan mikroskop.

kullanılan, bulunması kolay ve ucuz, toplardamar yoldan uygulanması kolay, yan etkisi de çok az olan bir maddedir. Beyin omurilik sıvısını (BOS) boyadığı için, dural hasarlar da BOS kaçağından şüphelenilen vakalarda da kontrol için sodyum floresein kullanılabilir (Şekil 2).

Benzer şekilde indosiyenin yeşili de kullanılabilir. İndosiyenin yeşili, infrared ışığa yakın dalga boyundadır ve özel kamera sistemleriyle takip edilebilir. Günümüzde pek çok dokunun dolaşımını takip etmek için kullanılmaktadır.^[14] İndosiyenin yeşili video anjiyografi ile bütünleşmiş filtreli ameliyat mikroskobu kullanımı, floresan filtre mikroskoba benzer şekilde intramedüller tümör cerrahilerinde, damar anomalilerinin tespitinde ve cerrahisinde kullanılabilir.^[14,15]

AMELİYAT SIRASINDA RADYOLOJİK GÖRÜNTÜLEME

Hibrit ameliyathane içerisinde bulunan görüntüleme yöntemleri, uygulanan implantların uygun ve güvenli şekilde yerleştirildiğini görmek, ayrıca uygulanan yöntemin hata payını düşürmek amacıyla kullanılmaktadır. Diğer avantajı, hasta ve ameliyat ekibinin daha az radyasyon alması ve ameliyat süresini kısaltmasıdır. Ameliyat

sırasında kullanılan yeni nesil navigasyon uyumlu mobil skopi cihazlarından, ameliyathane içi tomografi ve manyetik rezonans görüntüleme cihazlarına kadar geniş bir yelpazede görüntüleme sistemi, hibrit ameliyathane donanımı içerisinde bulunabilmektedir.

Omurga cerrahisinde yerleştirilen vidaların yerlerinin doğrulanması için genellikle C-kollu floroskopi cihazları kullanılmaktadır. Ancak C-kollu skopi ile elde edilen görüntüler iki boyutlu olup aksiyel değerlendirme olanağı vermemektedir. Bu yöntemle elde edilen görüntülemelerde yaklaşık %25 olasılıkla pedikül malpozisyonu olan vidalar saptanamayabilir. Deformite olgularında bu oran %50'lere kadar çıkabilmektedir.^[5,16-18] Bu nedenle standart C-kollu skopi alternatifi olarak üç boyutlu floroskopi veya ameliyat içi tomografi hibrit ameliyathane donanımı arasında yerini almaktadır.

Üç boyutlu floroskopide C-kollu ile elde edilen görüntüler bir bilgisayar yazılımı ile birleştirilerek üç boyutlu görüntüler elde edilir. Üç boyutlu floroskopi ile de bilgisayarlı tomografi kalitesine yakın görüntüler elde edilir ve uygun yazılımlarla navigasyon için kullanılabilir.^[19,20]

NAVİGASYON ve ROBOTİK CERRAHİ

Görüntüleme sistemleri ile ilişkili navigasyon ve robotik cerrahi günümüzde pek çok alanda yer aldığı gibi omurga cerrahisinde de giderek popüler hale gelmektedir. Omurga cerrahisinde görüntüleme sistemlerinin yönlendirdiği robotik sistemler aracılığıyla doğru ve güvenli şekilde pedikül vidası yerleştirilebilmektedir.^[19]

Genel olarak robotik sistemler üç ana kategoride değerlendirilir. İlki denetleyici kontrollü sistemlerdir. Bu sistemde cerrah, ameliyatı önceden radyolojik görüntüler üzerinde planlar ve robotik kol ameliyatı cerrahin yakın gözetiminde gerçekleştirir. Tele-cerrahi sisteminde cerrah, robotu gerçek zamanlı olarak kontrol eder. Paylaşımlı kontrollü sistemlerde, cerrah da robot da eş zamanlı olarak cerrahi aletlerin kontrolünü yapar.^[20] Günümüzde omurga cerrahisinde kullanılan sistemler genellikle paylaşımlı kontrollü sistemlerdir. Ameliyat sırasında görüntüleme destekli navigasyon sistemleri ise uzun süredir kullanıldığından hibrit ameliyathanelerde

giderek standart kullanıma giren donanım olarak göze çarpmaktadır (Şekil 3).^[19]

Teorik olarak görüntüleme sistemleri ile ilişkili navigasyon ve robotik cerrahi sistemlerinin serbest elle vida yerleştirilmesine göre daha doğru pozisyonda vida yerleştirilmesi, minimal müdahaleci tekniklerle cerrahi yapabilme ve daha az radyasyona maruz kalma gibi avantajları mevcuttur.^[19] Serbest el tekniği ve iki boyutlu floroskopi ile yerleştirilen vidalarda %30'a varan oranda pedikül dışına çıkma hatası bildirilmiştir. Hatta bu oran deformite ve tümör gibi anatominin patolojik olarak değiştiği durumlarda daha fazladır.^[5,16,21,22] Robotik sistemlerle pedikül vidası yerleştirme konusunda yapılan çeşitli çalışmalarda vida doğruluk oranı %91-98 olarak bildirilmiştir.^[22-24] Ancak, Ringel ve ark.'nın yapmış olduğu prospektif randomize kontrollü çalışma gibi yayınlarda, robot grubunda standart floroskopi grubuna göre daha yüksek hata ile vida yerleştirildiği gösterilmektedir.^[25]



Şekil 3. Ameliyat sırasında görüntüleme eşliğinde navigasyon kullanılarak pedikül vidası yerleştirilmesi.

Minimal müdahaleci cerrahide navigasyonun etkinliğini gösteren pek çok çalışma bulunmaktadır. Ameliyat içi bilgisayarlı tomografi kılavuzluğunda, navigasyon sistemi kullandıkları 217 hastayı kapsayan çalışmada Baky ve ark. navigasyon ile floroskopiye karşılaştırmışlar ve navigasyonla hatalı vida yerleştirme oranının iki kat az olduğunu, kritik seviyede hatalı yerleştirilen vida oranının ise altı kat daha az olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca tekrar ameliyathaneye dönüş yapılarak vidaların revize edilme oranı standart C-kollu floroskopi grubunda yaklaşık %2,4 olarak bulunmuştur.^[26]

Navigasyon sistemlerinden beklentimiz, vida yerleştirmede tam doğruluk sağlaması ve özellikle deformite, tümör cerrahilerinde daha güvenli sonuçlar elde etmemizi sağlamasıdır. Oba ve ark. adölesan idiyopatik skolyozda, hibrit ameliyathanede bilgisayarlı tomografi eşliğinde navigasyon kullandıkları hastalarda vida pedikül perforasyon oranını yaklaşık %3,4 olarak bulmuşlardır. Ayrıca navigasyonun referans noktasından 6 seviyeden fazla uzaklaşılmasında pedikül perforasyon oranının arttığını bildirmişlerdir.^[27] Kaur ve ark. ise navigasyon sistemiyle ameliyat edilen adölesan idiyopatik skolyoz hasta sonuçlarını ulusal veri tabanında araştırarak daha güvenli cerrahi yapıp yapılmadığını değerlendirmiş ve navigasyonla yapılan cerrahilerde daha az komplikasyon oranı ve daha kısa süre hastane yatışı olduğunu bulmuşlardır. Ancak nörolojik komplikasyonlar açısından ve ilk 90 günde tekrar ameliyat oranı açısından navigasyon sistemi kullanılması ile kullanılmaması arasında fark bulunamamıştır. Ayrıca navigasyon sistemiyle maliyetin de arttığını bildirmişlerdir.^[28]

Navigasyon sistemiyle bütünleşip çalışan robot sistemleri olduğu gibi, navigasyonsuz çalışan robotlar da hibrit ameliyathane donanımı arasında kullanılmaktadır. Lee ve ark. çok merkezli çalışmalarında bu iki robot tipini güvenli vida yerleştirme konusunda karşılaştırmışlardır. Her iki robotun da vida yerleştirme güvenliği ve vida başına harcanan süre konusunda benzer olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca navigasyonun eşlik ettiği sistemlerde radyasyona maruz kalma süresinin ve kan transfüzyon oranının daha az olduğunu bildirmişlerdir.^[29]

Hibrit ameliyathane her ne kadar cerrahi ekibe yardımcı pek çok özellik barındırır da, yüksek bir maliyeti de beraberinde getirmektedir. Ancak hibrit ameliyathane ile geleneksel ameliyathanenin karşılaştırıldığı maliyet analizi araştırmasında Attigah ve ark. hibrit ameliyathanenin süre ve komplikasyonlar göz önüne alındığında maliyet etkinliğinin daha yüksek olduğunu göstermişlerdir.^[30]

Hibrit ameliyathanedeki ameliyathane içi görüntüleme sistemlerine ait dezavantajlardan biri de yüksek radyasyona maruz kalma riskidir. Ancak göreceli olarak

düşük doz radyasyonla görüntüleme sağlayan sistemlerin gelişmesi ve radyasyon güvenliği kurallarına uyulmasıyla bu risk minimuma indirilebilmektedir. Ayrıca birçok robotik cerrahi cihazı navigasyon yazılımları aracılığıyla az sayıda görüntü alarak çalıştığından, teorik olarak daha az radyasyona maruz kalınmaktadır. Radyasyon güvenliğini araştırılan çalışmalarda robotik cerrahide geleneksel floroskopik yöntemlerden daha az radyasyon maruziyeti olduğu gösterilmiştir.^[1,19]

Sonuç olarak omurga cerrahisinde kullanılan hibrit ameliyathane kavramı, teknolojik donanımdaki ilerleme ve yeniliklere paralel olarak geleneksel ameliyathanelerin yerini almaya adaydır. Teknolojik gelişmeler; yeni nesil donanımın ameliyathaneye bütünleşmesini sağlamakla kalmamış, teknik olarak komplikasyonları azaltarak maliyet etkin çalışmaya olanak vermiştir. Bu yolla hasta ve cerrah güvenliğini en üst basamağa taşıyan hibrit ameliyathaneler ayrıca ameliyat sürelerini kısaltarak anesteziye bağlı komplikasyon oranını da düşürmektedir.

KAYNAKLAR

1. Jin H, Lu L, Liu J, Cui M. A systematic review on the application of the hybrid operating room in surgery: experiences and challenges. *Updates Surg* 2021 Mar 11. **Crossref**
2. Watanabe H, Shimojo Y, Hira E, Kuramoto S, Muroi T, Oka K, et al. First establishment of a new table-rotated-type hybrid emergency room system. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med* 2018;26(1):80. **Crossref**
3. Gebhard F, Riepl C, Richter P, Liebold A, Gorki H, Wirtz R, et al. Der Hybridoperationssaal. Zentrum intraoperativer Bildgebung [The hybrid operating room. Home of high-end intraoperative imaging]. *Unfallchirurg* 2012;115(2):107-20. **Crossref**
4. Drevets P, Chung JM, Schampaert S, Schroeder C. Hybrid operating room: one-stop-shop for diagnosis, staging, and treatment. *Innovations (Phila)* 2019;14(5):463-7. **Crossref**
5. Burström G, Cewe P, Charalampidis A, Nachabe R, Söderman M, Gerdhem P, et al. Intraoperative cone beam computed tomography is as reliable as conventional computed tomography for identification of pedicle screw breach in thoracolumbar spine surgery. *Eur Radiol* 2021;31(4):2349-56. **Crossref**
6. Santos ER, Ledonio CG, Castro CA, Truong WH, Sembrano JN. The accuracy of intraoperative O-arm images for the assessment of pedicle screw position. *Spine (Phila Pa 1976)* 2012;37(2):E119-25. **Crossref**
7. Garber ST, Bisson EF, Schmidt MH. Comparison of three-dimensional fluoroscopy versus postoperative computed tomography for the assessment of accurate screw placement after instrumented spine surgery. *Global Spine J* 2012;2(2):95-8. **Crossref**
8. Habibi AA, Bi AS, Owusu-Sarpong S, Mahure SA, Ganta A, Konda SR. History, indications, and advantages of orthopaedic operating room tables: a review. *Eur J Orthop Surg Traumatol* 2021 Aug 19. **Crossref**

9. Kreienfeld H, Klimpel H, Böttcher V. Use of X-rays in the operating suite. In: Krettek C, Aschemann D (eds) *Positioning Techniques in Surgical Applications: Thorax and Heart Surgery— Vascular Surgery — Visceral and Transplantation Surgery — Urology — Surgery to the Spinal Cord and Extremities — Arthroscopy — Paediatric Surgery — Navigation/ISO-C 3D*. Springer:Berlin, Heidelberg, 2006: pp 19-40. [Crossref](#)
10. Halsey MF, Myung KS, Ghag A, Vitale MG, Newton PO, de Kleuver M. Neurophysiological monitoring of spinal cord function during spinal deformity surgery: 2020 SRS neuromonitoring information statement. *Spine Deform* 2020;8(4):591-6. [Crossref](#)
11. Fehlings MG, Brodke DS, Norvell DC, Dettori JR. The evidence for intraoperative neurophysiological monitoring in spine surgery: does it make a difference? *Spine (Phila Pa 1976)* 2010;35(9 Suppl):S37-46. [Crossref](#)
12. Sun Z, Jing L, Fan Y, Zhang H, Chen L, Wang G, et al. Fluorescein-guided surgery for spinal gliomas: Analysis of 220 consecutive cases. *Int Rev Neurobiol* 2020;151:139-54. [Crossref](#)
13. Acerbi F, Broggi M, Schebesch KM, Höhne J, Cavallo C, De Laurentis C, et al. Fluorescein-Guided surgery for resection of high-grade gliomas: a multicentric prospective phase II study (FLUOGLIO). *Clin Cancer Res* 2018;24(1):52-61. [Crossref](#)
14. Lee YJ, van den Berg NS, Orosco RK, Rosenthal EL, Sorger JM. A narrative review of fluorescence imaging in robotic-assisted surgery. *Laparosc Surg* 2021;5:31. [Crossref](#)
15. Endo T, Aizawa-Kohama M, Nagamatsu K, Murakami K, Takahashi A, Tominaga T. Use of microscope-integrated near-infrared indocyanine green videoangiography in the surgical treatment of intramedullary cavernous malformations: report of 8 cases. *J Neurosurg Spine* 2013;18(5):443-9. [Crossref](#)
16. Maejima R, Takeuchi M, Wakao N, Kamiya M, Aoyama M, Joko M, et al. Reliability of an intraoperative radiographic anteroposterior view of the spinal midline for detection of pedicle screws breaching the medial pedicle wall in the thoracic, lumbar, and sacral spine. *World Neurosurg* 2019;125:e257-61. [Crossref](#)
17. Sarwahi V, Ayan S, Amaral T, Wendolowski S, Gecelter R, Lo Y, et al. Can postoperative radiographs accurately identify screw misplacements? *Spine Deform* 2017;5(2):109-16. [Crossref](#)
18. Holly LT, Foley KT. Image guidance in spine surgery. *Orthop Clin North Am* 2007;38(3):451-61. [Crossref](#)
19. Kochanski RB, Lombardi JM, Laratta JL, Lehman RA, O'Toole JE. Image-guided navigation and robotics in spine surgery. *Neurosurgery* 2019;84(6):1179-89. [Crossref](#)
20. Nathoo N, Cavuşoğlu MC, Vogelbaum MA, Barnett GH. In touch with robotics: neurosurgery for the future. *Neurosurgery* 2005;56(3):421-33. [Crossref](#)
21. Parker SL, McGirt MJ, Farber SH, Amin AG, Rick AM, Suk I, et al. Accuracy of free-hand pedicle screws in the thoracic and lumbar spine: analysis of 6816 consecutive screws. *Neurosurgery* 2011;68(1):170-8. [Crossref](#)
22. Gelalis ID, Paschos NK, Pakos EE, Politis AN, Arnaoutoglou CM, Karageorgos AC, et al. Accuracy of pedicle screw placement: a systematic review of prospective in vivo studies comparing free hand, fluoroscopy guidance and navigation techniques. *Eur Spine J* 2012;21(2):247-55. [Crossref](#)
23. 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. [Crossref](#)
24. Togawa D, Kayanja MM, Reinhardt MK, Shoham M, Balter A, Friedlander A, et al. Bone-mounted miniature robotic guidance for pedicle screw and translaminar facet screw placement: part 2--Evaluation of system accuracy. *Neurosurgery* 2007;60(2 Suppl 1):ONS129-39. [Crossref](#)
25. Ringel F, Stüer 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. [Crossref](#)
26. Baky FJ, Milbrandt T, Echternacht S, Stans AA, Shaughnessy WJ, Larson AN. Intraoperative computed tomography-guided navigation for pediatric spine patients reduced return to operating room for screw malposition compared with free-hand/fluoroscopic techniques. *Spine Deform* 2019;7(4):577-81. [Crossref](#)
27. Oba H, Ikegami S, Kuraishi S, Uehara M, Takizawa T, Munakata R, et al. Perforation rate of pedicle screws using hybrid operating room combined with intraoperative computed tomography navigation for adolescent idiopathic scoliosis: impact of distance from the reference frame and other risk factors. *Spine (Phila Pa 1976)* 2020;45(20):E1357-64. [Crossref](#)
28. Kaur J, Koltsov JCB, Kwong JW, Cheng I, Vorhies JS. Does navigation make spinal fusion for adolescent idiopathic scoliosis safer? Insights from a national database. *Spine (Phila Pa 1976)* 2021;46(19):E1049-57. [Crossref](#)
29. Lee NJ, Zuckerman SL, Buchanan IA, Boddapati V, Mathew J, Leung E, et al. Is there a difference between navigated and non-navigated robot cohorts in robot-assisted spine surgery? A multicenter, propensity-matched analysis of 2,800 screws and 372 patients. *Spine J* 2021;21(9):1504-12. [Crossref](#)
30. Attigah N, Demirel S, Hakimi M, Buijnen H, Schöffski O, Müller A, et al. Hybrid operating rooms versus conventional operating rooms: Economic comparisons in vascular surgery using the example of endovascular aneurysm repair. *Chirurg* 2017;88(7):587-94. [Crossref](#)