



Nöroşirürjide AR, VR Uygulamaları ve 3B Modelleme

AR, VR Applications and 3D Modeling in Neurosurgery

Serdar Onur AYDIN¹, Mehmet Özgür YILMAZ¹, Mustafa Umut ETLİ², Oğuz BARAN^{1,3}

¹Koç Üniversitesi Hastanesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Ana Bilim Dalı, Mikro-Endo Nöroşirürji ve Nöroanatomik Laboratuvarı, İstanbul, Türkiye

²Sağlık Bilimleri Üniversitesi Ümraniye Eğitim ve Araştırma Hastanesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Kliniği, İstanbul, Türkiye

³Koç Üniversitesi Hastanesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Ana Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye

Yazışma adresi: Serdar Onur AYDIN ✉ dr.serdaraydin@gmail.com

ÖZ

Gelişen teknoloji, nöroşirürji eğitimine ve pratiğine yeni ve faydalı olanaklar sağlamaktadır. Bilgisayarlı görüntüleme yöntemleri, nöronavigasyon sistemleri, mikroskop ve endoskop gibi son derece teknolojik araçların yanında son dönemde artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik uygulamaları ve 3-boyutlu (3B) modellerin kullanımı sıklıkla artmıştır. 2 boyutlu radyolojik görüntülerin ve fotoğrafların yerini aynı görüntüleri kullanarak oluşturulan 3-boyutlu modeller almakta olup ve bu görüntülerin bilgisayara bağlı kalmadan görüntülenmesini sağlayan sanal gerçeklik uygulamalarının sayısı artmaktadır. Eğitim alanında özellikle radyolojik ve anatomik görüntülerin 3-boyutlu modeller olarak görüntülenmesi, uzaysal konularının nöroşirürji uzmanlarının zihninde daha iyi oturmasına yardımcı olurken sanal gerçeklik uygulamalarıyla öğrenim süreci zenginleştirilmektedir. Nöroşirürji pratiğinde ise sanal gerçeklik uygulamaları ile yapılan simülasyonlar el becerisini geliştirme ve cerrahi pratik yapma olanağı sağlamaktadır. Artırılmış gerçeklik uygulamalarının, özellikle nöronavigasyon alanında olmak üzere hem spinal hem de kranial cerrahiler sırasında kullanımı hızla artmaktadır. Bu yazımızda nöroşirürji eğitim ve pratiğinde kullanılmaya başlanan artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik ve 3-boyutlu model çalışmalarını ve bu çalışmaların nöroşirürji eğitimi ve pratiğinde kullanımlarını ve olası faydalarını tartıştık.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Artırılmış gerçeklik, Sanal gerçeklik, 3-boyutlu modelleme

ABSTRACT

Advances in technology provide new and beneficial opportunities for neurosurgery education and practice. In the daily practice of neurosurgery, high technology devices such as computerized imaging methods, neuronavigation systems, and microscopes and endoscopes are commonly used by neurosurgeons. In addition to these devices, augmented reality and virtual reality applications and 3-dimensional models are being used increasingly frequently. Two-dimensional radiological images and photographs are replaced by 3-dimensional models that are created by using the same pictures. The number of augmented and virtual reality applications that allow these images to be viewed without being connected to a computer is increasing. In the field of education, visualizing radiological and anatomical images as 3-dimensional models helps neurosurgeons better determine their spatial positions in their minds. At the same time, the learning process is enriched with augmented and virtual reality applications. In neurosurgery practice, simulations with virtual reality applications allow the development of surgical skills and a chance to practice without causing harm. Augmented reality applications are rapidly progressing in the use of spinal and cranial surgeries, particularly in neuronavigation. In this article, we discussed the use of augmented reality, virtual reality, and 3-dimensional model studies in neurosurgery education and practice, and their possible benefits.

KEYWORDS: Augmented reality, Virtual reality, 3-Dimensional modeling

■ GİRİŞ

Günümüze kadar yapılan cerrahi ve anatomik çalışmalar incelendiğinde nöroşürüj pratiğinin gerçekleştirilmesi için anatomik bilgi büyük önem taşımaktadır. Nöroşürüjde sinir dokularının bütünlüğünü korumak esastır ve bunu sağlamak için anatomiye hâkim olmak gerekir. Sinir sisteminin karmaşık ve gizemli anatomisi hakkındaki mevcut bilimiz anatomi diseksiyonlarına ve cerrahi deneyimlere dayanır (35).

Öğrenme ve uygulama, nöroşürüj eğitiminin temel ve en önemli basamaklarıdır. Tüm nöroşürüj uzmanları, dünya çapında artan sayıda düzenlenen kurslara, becerilerini ve bilgilerini geliştirmek için ilgi göstermektedirler (21). Nöroanatomi bilgisi, nöroşürüj uzmanlığının temel öğelerindendir (6). Bu bilgiler ışığında yapılan, ulaşılması zor bölgelerdeki patolojileri ortadan kaldırmak için vasküler, nöral yapıların mikrodiseksiyonu günlük nöroşürüj pratiğinin birer parçasıdır.

Gelişen teknoloji, günlük hayatın her alanında olduğu gibi nöroşürüj eğitime ve pratiğine yeni ve faydalı olanaklar sunmaktadır. Görsel araçlar ve görüntüleme sistemleri, nöroşürüj uzmanları için preoperatif planlamada, intraoperatif cerrahi esnasında ve postoperatif dönemde her zaman önemli bir rol oynamıştır. Bununla birlikte, bilgisayar tabanlı görüntüleme sistemleri ve yazılı literatür çoğunlukla iki boyutlu (2B) görüntüler ve etkileşimli olmayan üç boyutlu (3B) görüntülerden oluşur. Bu nedenle nöroşürüj uzmanları, lezyonun beyindeki tam konumunu, çevresindeki yapılarla ilişkisini ve lezyona herhangi bir fonksiyonel alana zarar vermeden ulaşmak için kullanılacak güvenli koridorları planlamalıdır. Anatomi bilgileri, hasta muayenesi ve radyolojik görüntülemelerinde topladıkları tüm bilgileri zihinsel olarak 3 boyuta çevirerek operasyona hazırlanır. Nöroşürüj eğitimi; ameliyathane içerisinde hasta pozisyonunun verilmesinden ameliyatın tüm aşamalarının adım adım gözlemlemesini ve pratik yapılmasını kapsar (1). Hastaların radyolojik görüntülerinin, öğrenilen anatomik yapıların ve yaklaşımların doğru bir şekilde üst üste bindirilmesi birkaç yıl alır. Bu sayede hastanın ve ameliyathanenin cerrahi pozisyonundan cilt insizyonuna ve cerrahi manevralara kadar karar verilebilir. 3B modellerin, bu modelleri manipüle etme şansının ve 3B simülasyon deneyiminin beyin cerrahisi asistanlarının eğitimi için öğretici ve bilgilendirici olduğu gösterilmiştir (2).

Son on yılda mikroskopi ve endoskopinin gelişmesiyle birlikte ameliyathanelerin çoğu rahat bir görüş için güçlü bir aydınlatma ile mikroskopun oküleri veya bir ekran aracılığıyla takip edilmektedir (6). Bu teknolojik ilerlemelerle beraber, yeni nöronavigasyon sistemleri, stereoskopik mikroskoplar ve yeni artırılmış gerçeklik (Augmented reality - AR) ve sanal gerçeklik (Virtual reality - VR) senaryolarının hepsi, daha kolay cerrahi planlama, lezyonların doğru lokalizasyonu ve nöroşürüj uzmanının kafasında cerrahi prosedürün 3 boyutlu yapısını anlama ve oluşturmaya yardımcı olur. Son zamanlarda AR, cerrahide popüler ve kullanışlı bir araç hâline gelmiştir (5). Tıbbi görüntüler navigasyon sistemlerine yönlendirilebildiği gibi yine bu görüntüler, AR gözlükleriyle holografik AR görüntüleri olarak da kullanılabilir. AR, gerçek dünyada bilgisayarlar tarafından oluşturulan dijital görüntülerin izlenmesini, cerrahi alanın anatomik görüntüler veya dijital radyolojik görüntülerle bütünleştirilmesini sağlar.

Artırılmış Gerçeklik – Augmented Reality (AR)

AR teknolojisi, son yıllarda sağlık bilimleri gibi birçok alanda artan bir popülerlik kazanmıştır (19). Mobil teknolojilerdeki son gelişmeler, mobil cihazlar için AR görüntülerinin kullanılmasını ve oluşturulmasını sağlamıştır. Mobil cihaz ve AR teknolojisi yeni geliştirilen yaklaşımlardır. AR yoluyla öğrenmenin daha eğlenceli, ilginç ve etkili olduğunu gösteren çalışmalar vardır (17,18,20).

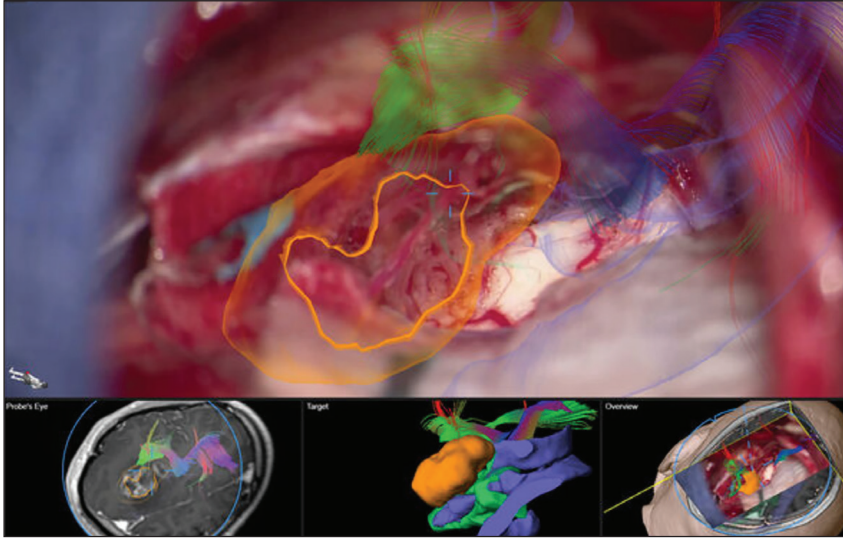
AR’de, gerçek ortam bir arka plan olarak kullanılır ve gerçek dünyanın video görüntüsü üzerine dijital görüntüler olarak oluşturulan 3B nesnelere, dokular ve şekiller eklenerek bir gerçeklik duygusu oluşturulur (12). Kullanıcılar ve AR için en önemli şey olan gerçeklik duygusu, sanal nesnelere kullanıcı ortamına getirilmesiyle mümkün kılınmıştır (33). AR, yeni teknolojik gelişmeler ile gündelik hayatta kullanılan cep telefonları veya tabletler ile kolayca kullanılabilir hâle gelmiştir. Günümüzde gerçek dünya ile interaktif çalışabilen ve farklı amaçlarla geliştirilmiş olsa bile nöroşürüj pratiğinde ve eğitiminde kullanılmaya elverişli birçok mobil uygulama bulunmaktadır (15).

AR teknolojisi, karmaşık konuları daha anlaşılır hâle getirmesi ve öğrenmeyi kolaylaştırması ile eğitim alanlarında kullanılmaya başlanmıştır (16). Yine bu teknoloji nesnelere farklı bakış açılarından 3B görünümü aracılığıyla etkileşim sağlamak ve nöroanatomi anlamak için çok önemli olan uzamsal ve pratik becerileri geliştirmeye faydalıdır (10). Ayrıca cerrahi el becerisi olarak hastalıkların tanı ve tedavisi anatomi bilgisini gerektirir. Özellikle bu materyaller, karmaşık 3B anatomik yapıların ve ilişkilerin anlaşılması için faydalıdır (14).

Nöronavigasyonunun klinik bir uygulaması olarak, bilgisayarlı tomografiden (BT) veya manyetik rezonans (MR) alınan görüntüleri gerçek cerrahi alana yansıtmak için cerrahi prosedürlerde AR uygulanmıştır (11). Şekil 1’de cerrahi sırasında mikroskopi görüntüsü ve AR görüntüleri aynı anda görülmektedir. Çeşitli gözlükler veya bir ekran vasıtasıyla veya görüntünün hastanın kafasına yansıtılması gibi görselleştirme teknikleri ile 3B olarak görüntüler hasta üzerinde gösterilmiştir (28). Spinal cerrahide de AR görüntülerinin kadavra gövdelerinin üzerine uygulanması ile başarılı bir şekilde minimal invaziv perkütan posterior transpediküler vida uygulaması başarıyla gerçekleştirilmiştir (13). Özellikle kraniyal prosedürler sırasında ameliyat öncesi veya sırasında kullanılacak, noninvaziv, etkili ve güvenli bir sistem olarak kullanılmaya başlanmıştır (7).

Sanal Gerçeklik – Virtual Reality (VR)

VR ve simülasyonlar, kullanıcılar tarafından bilgisayar aracılığıyla oluşturulan 3B sahnelerin yüksek düzeyde etkileşimli görselleştirilmesi ve kontrolünü kolaylaştıran bir arayüzden oluşur. Ses, manuel kontroller ve gerçekçi bileşenlerle, gerçek bir deneyime benzer duyuusal deneyimler sağlar. Yüksek maliyetleri olan ve tehlikeli bir durumla karşılaşmamak için havacılık ve askeri alanda yaygın olarak AR ve VR simülasyonları kullanılırken cerrahi simülasyonlarda da, cerrahları sanal araçlar aracılığıyla eğitmek hastaların yerini almaktadır (26). Özellikle ameliyat öncesi planlamada, pozisyonlandırılmada ve lezyonlara yaklaşımda ciddi hazırlık gerektiren nöroşürüj alanında 3B modelleri manipüle etme ve anatomiye farklı açı-



Şekil 1: Nöronavigasyon ile AR teknolojisinin birlikte kullanılmasıyla elde edilen görüntü. Tümör ve traktografi görüntülerinin mikroskopta gerçek görüntü üzerine yansıtılması. Link: <https://www.leica-microsystems.com/products/surgical-microscopes/p/arveo-8/>.

lardan görme yeteneğinin faydalı olduğu gösterilmiştir (25). Gelişmiş bir VR cerrahi simülâtörü, görsel ve dokunsal geri bildirimle etkileşimli cerrahi manipülasyona izin veren bir ortam sağlayabilir. Simülâtördeki VR ortamı, fiziksel nesnelere ve çeşitli cerrahi senaryoları temsil eder. Bu sahnelerde anatomik nesnelere ameliyathanesinin 3B sanal ortamında konumlandırılabilir ve cerrahi manipülasyon yapılabilir. Karmaşık anatomisi ve olası komplikasyonların kötü sonuçları olabilen nöroşirürji ameliyatları için koagülasyon, diseksiyon yapma gibi cerrahi işlemler taklit edilerek el becerisini geliştirici VR simülasyonları eğitim ve pratik amaçlı kullanılmaktadır (8).

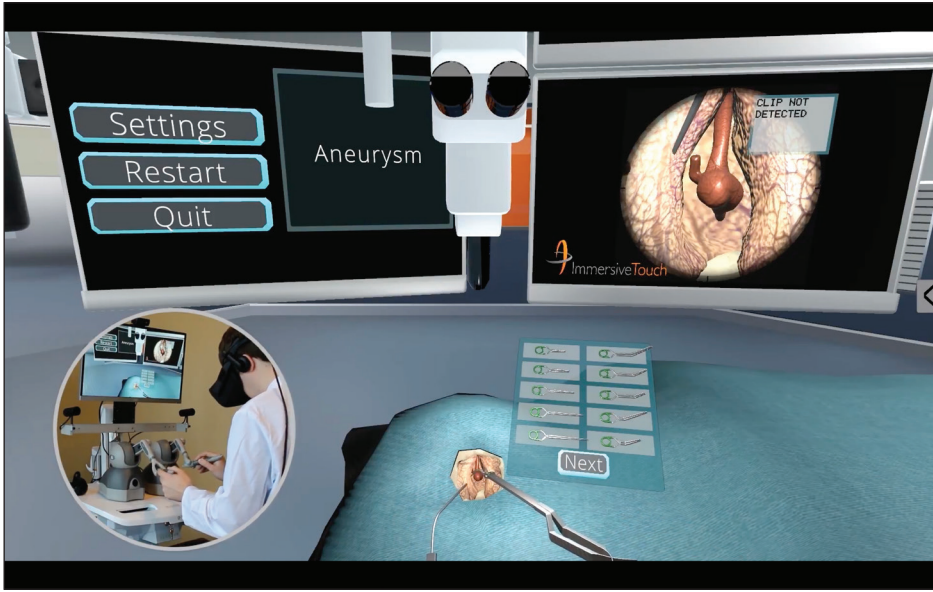
NeuroVR'ın (Inc., Quebec Canada) ve ImmersiveTouch (Inc., Chicago, IL), nöroşirürji eğitimi için simülâtörler ve simülasyon temelli eğitim sağlama konusunda çalışmaları mevcuttur (4,22). Nöroşirürji eğitimi görenlerin risksiz bir ortamda pratik yapmaları için çeşitli modeller geliştirmişlerdir (1,3,30). NeuroVR platformu, Şekil 2'de cihazın tam hâli görülmekte, okülerden takip edilerek yapılan bir beyin ameliyatının çalışma alanına sahiptir. Vaskülerize dokunun diseksiyonu sırasında kanama görülebilir ve kanama kontrolü için koagülasyon yapılabilir. ImmersiveTouch, Şekil 3'te görüldüğü üzere eğitim için aşamaları olan ve birçok cerrahi senaryo içeren bir simülâtördür. Tümörün çıkarılması sırasında cerrahi aspiratör, ultrasonik aspiratör, bipolar elektrokoter ve mikro makas kullanılmaktadır (38).

Sentetik simülasyon, ikna gücünü artırmak için gerçekçi ortamları temsil eden fiziksel malzemeler kullanılarak oluşturulur. Sentetik nesnelere de gittikçe popülerleşerek her geçen gün yaygınlaşmakta ve AR, VR teknolojileriyle beraber kullanılarak kadavra modellerinin yerini alabilmektedir (9).

VR simülâtörleri, bir eğitmen gözetimi olmaksızın, kullanıcının performansını takip etmek ve geri bildirim sağlamak için prosedürden önce kullanıcıları bilgilendirebilir ve ölçülebilir (32,37). Bu teknoloji, kadavraların veya hastaların erişilebilirliğine bakılmaksızın, her zaman kolaylık içinde bağımsız öğrenme ve uygulama için bir fırsattır.



Şekil 2: NeuroVR. Tümör rezeksiyonu için yapılan simülasyonun görünümü. Link: <https://neurosim.mcgill.ca/neurotouch>.



Şekil 3: Immersivetouch. Anevrizma kliplenmesi için yapılan simülasyonun görünümü. Link: <https://www.immersivetouch.com/immersivesim-training>.

3B Modelleme

Sürekli incelenen radyolojik görüntüler nöroşirürji eğitiminin de bir parçasını oluşturur. Özellikle, karmaşık ve birbirinden farklı morfolojideki anevrizmalar ile arteriyovenöz malformasyonlar gibi hastaya özgü hastalıklar hakkında kapsamlı bilgi ve deneyim gerektirir. Patolojilere başarılı ve güvenli bir yaklaşım için çevredeki yapıların ve damarların anlaşılması esastır. 3B modelleme lezyonun gerçekçi bir şekilde ve farklı açılardan görüntülenmesine ve anatominin daha derinden anlaşılmasına yardımcı olur.

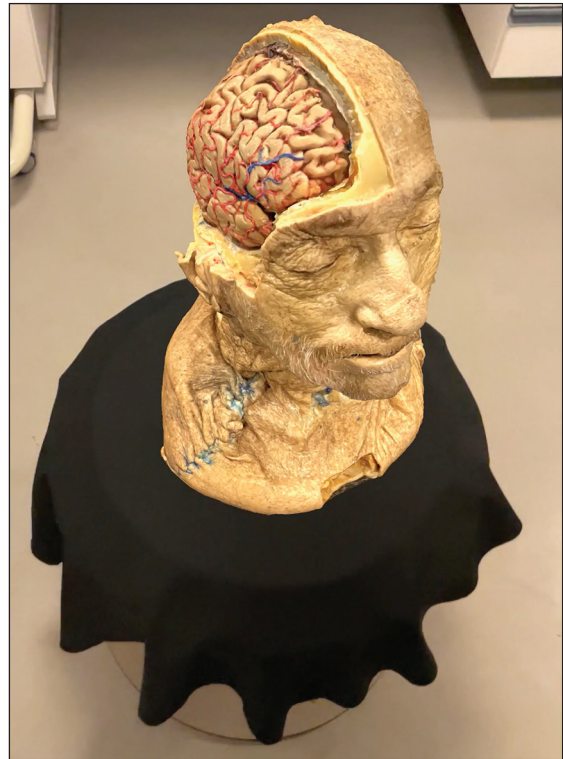
Nöroanatomi AR, VR ve 3B Modelleme

Sinir sistemi karmaşık ve ayrıntılı bir anatomiye sahip olup beyin, kranial sinirler ve omurga olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Bunların dışında, nöroglial hücreler tarafından yapılan çok sayıda ayrıntılı ve bağlantısallığı tam olarak keşfedilmemiş lif yolları, çekirdekler, kranial sinirler ve kökler, birbirine bağlı çok katmanlı hücreler, çok katmanlı zar sistemi ve hayati önem taşıyan arteriyel ve venöz dolaşım sistemi mevcuttur.

Bu nöral mikromimariyi kavramak için nöroanatomi çalışmalarında, genellikle kadavra diseksiyonları tercih edilir. İnsan anatomisi üzerinde çalışmak ve pratik yapmak için kadavra diseksiyonu altın standart olarak kabul edilir (34). Nöroanatomi çalışmalarında, anatomik yapılar özenli diseksiyonlar ile incelenir ve bu yapılar arasındaki ilişkiler fotoğraf çekilerek ortaya konularak bilimsel makalelerde paylaşılmaktadır (29). Ancak, kadavra diseksiyonu tek başına kullanıldığında anatomiyi öğrenmek için yüksek maliyetli ve yetersiz olarak kabul edilmektedir (24,36).

Patolojik dokular, BT ve MR görüntüleri üzerinden yapılan hacim hesaplamaları ve yapıları birbirinden ayıran segmentasyon gibi işlemlerle 3B modeller üzerinde daha net gösterilebilir. Ancak elde edilen sonuçlar dokunun gerçek renklerinden yoksundur. Gerçekçi bir izlenim vermek için 3B modellerin manuel olarak dokulandırılması ve renklendirilmesi gerekmektedir.

Fotogrametrik yöntem, kadavra diseksiyonlarını fotoğraflayarak görüntüleri 3B olarak görüntülemek için başka bir yöntemdir. Bu yöntemle çeşitli açılardan çekilmiş bir fotoğraf kümesi birleştirilerek, gerçek numune ile aynı renkte ve tam bir 3B model oluşturulur (27). Daha sonra bu alınan 3B modeller dijital ortamda çeşitli programlar aracılığıyla AR ve VR platformlarında görüntülenebilir. Şekil 4'de görüldüğü üzere 3B bir kadavra modelinin AR ile görüntülenmesi ve incelenmesi mümkündür.



Şekil 4: Fotogrametri ile yapılmış 3B bir kadavra modelinin AR ile yatay bir düzlem üzerine yerleştirilmiş görüntüsü.

Fotoğraflar ile karşılaştırıldığında, bilgisayar tabanlı 3B modeller sınırsız görüş açısı ve perspektif, taşınabilirlik ve uzun ömür sağlar (31). Bu nedenlerle anatomi eğitiminde bu tarz yenilikçi yöntem ve teknolojilere önem verilmelidir (23).

■ SONUÇ

Günümüzün teknolojik olanakları hızla artarken gittikçe geleneksel öğrenim ve eğitim modellerinin yerini yeni ve modern teknikler almaktadır. Tanı ve tedavi sürecinde de AR ve VR uygulamaları rutin çalışmalara dahil olmaktadır. Yüksek maliyetli, kullanımı kısıtlı ve zor ulaşılır yöntemler yerine aynı anda tüm dünyada kullanılabilir ve teknolojik gelişmelerle geliştirilebilir yeni eğitim, tanı ve tedavi olanaklarının takip edilmesi ve günlük pratiğe dahil edilmesi büyük önem taşımaktadır.

■ KAYNAKLAR

- Alaraj A, Charbel FT, Birk D, Tobin M, Luciano C, Banerjee PP, Rizzi S, Sorenson J, Foley K, Slavin K, Roitberg B: Role of cranial and spinal virtual and augmented reality simulation using immersive touch modules in neurosurgical training. *Neurosurgery* 72 Suppl 1:115-123, 2013
- Alaraj A, Lemole MG, Finkle JH, Yudkowsky R, Wallace A, Luciano C, Banerjee PP, Rizzi SH, Charbel FT: Virtual reality training in neurosurgery: Review of current status and future applications. *Surg Neurol Int* 2:52, 2011
- Andolfi C, Plana A, Kania P, Banerjee PP, Small S: Usefulness of three-dimensional modeling in surgical planning, resident training, and patient education. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A* 27:512-515, 2017
- Azarnoush H, Alzhrani G, Winkler-Schwartz A, Alotaibi F, Gelinias-Phaneuf N, Pazos V, Choudhury N, Fares J, DiRaddo R, Del Maestro RF: Neurosurgical virtual reality simulation metrics to assess psychomotor skills during brain tumor resection. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 10:603-618, 2015
- Barsom EZ, Graafland M, Schijven MP: Systematic review on the effectiveness of augmented reality applications in medical training. *Surg Endosc* 30:4174-4183, 2016
- Bernardo A: Virtual reality and simulation in neurosurgical training. *World Neurosurg* 106:1015-1029, 2017
- Besharati Tabrizi L, Mahvash M: Augmented reality-guided neurosurgery: Accuracy and intraoperative application of an image projection technique. *J Neurosurg* 123:206-211, 2015
- Bras S, Soares SC, Cruz T, Magalhaes T, Marques B, Dantas C, Fernandes N, Fernandes JM: The feasibility of an augmented reality system to study the psychophysiological correlates of fear-related responses. *Brain Behav* 8:e01084, 2018
- Chawla S, Devi S, Calvachi P, Gormley WB, Rueda-Esteban R: Evaluation of simulation models in neurosurgical training according to face, content, and construct validity: A systematic review. *Acta Neurochirurgica* 164(4):947-966, 2022
- Cheng KH, Tsai CC: Affordances of augmented reality in science learning: Suggestions for future research. *J Sci Edu Technol* 22:449-462, 2013
- Contreras López WO, Navarro PA, Crispin S: Intraoperative clinical application of augmented reality in neurosurgery: A systematic review. *Clin Neurol Neurosurg* 177:6-11, 2019
- Deutschmann H, Steininger P, Nairz O, Kopp P, Merz F, Wurstbauer K, Zehentmayr F, Fastner G, Kranzinger M, Kametriser G, Kopp M, Sedlmayer F: "Augmented reality" in conventional simulation by projection of 3-D structures into 2-D images: A comparison with virtual methods. *Strahlenther Onkol* 184:93-99, 2008
- Felix B, Kalatar SB, Moatz B, Hofstetter C, Karsy M, Parr R, Gibby W: Augmented reality spine surgery navigation: Increasing pedicle screw insertion accuracy for both open and minimally invasive spine surgeries. *Spine*, 2022 (Online ahead of print)
- Hu HZ, Feng XB, Shao ZW, Xie M, Xu S, Wu XH, Ye ZW: Application and prospect of mixed reality technology in medical field. *Curr Med Sci* 39:1-6, 2019
- Ifenthaler D, Eseryel D: Facilitating complex learning by mobile augmented reality learning environments. In: Huang R, Kinshuk Spector JM (eds). *Reshaping Learning*. New Frontiers of Educational Research. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013
- Ingrassia PL, Mormando G, Giudici E, Strada F, Carfagna F, Lamberti F, Bottino A: Augmented reality learning environment for basic life support and defibrillation training: Usability study. *J Med Internet Res* 22:e14910, 2020
- Izard SG, Juanes JA, Garcia Penalvo FJ, Estella JMG, Ledesma MJS, Ruisoto P: Virtual Reality as an educational and training tool for medicine. *J Med Syst* 42:50, 2018
- Jones C, Jones D, Moro C: Use of virtual and augmented reality-based interventions in health education to improve dementia knowledge and attitudes: an integrative review. *BMJ Open* 11:e053616, 2021
- Kamphuis C, Barsom E, Schijven M, Christoph N: Augmented reality in medical education? *Perspect Med Educ* 3:300-311, 2014
- Karami B, Koushki R, Arabgol F, Rahmani M, Vahabie AH: Effectiveness of virtual/augmented reality-based therapeutic interventions on individuals with autism spectrum disorder: A comprehensive meta-analysis. *Front Psychiatry* 12:665326, 2021
- Karbasi Z, Niakan Kalhori SR: Application and evaluation of virtual technologies for anatomy education to medical students: A review. *Med J Islam Repub Iran* 34:163, 2020
- Knafo S, Penet N, Gaillard S, Parker F: Cognitive versus virtual reality simulation for evaluation of technical skills in neurosurgery. *Neurosurg Focus* 51:E9, 2021
- McKeown PP, Heylings DJ, Stevenson M, McKelvey KJ, Nixon JR, McCluskey DR: The impact of curricular change on medical students' knowledge of anatomy. *Med Educ* 37:954-961, 2003
- McLachlan JC: New path for teaching anatomy: Living anatomy and medical imaging vs. Dissection. *Anat Rec B New Anat* 281(1):4-5, 2004
- Pelargos PE, Nagasawa DT, Lagman C, Tenn S, Demos JV, Lee SJ, Bui TT, Barnette NE, Bhatt NS, Ung N, Bari A, Martin NA, Yang I: Utilizing virtual and augmented reality for educational and clinical enhancements in neurosurgery. *J Clin Neurosci* 35:1-4, 2017

26. Robison RA, Liu CY, Apuzzo MLJ: Man, mind, and machine: The past and future of virtual reality simulation in neurologic surgery. *World Neurosurgery* 76:419-430, 2011
27. Roh TH, Oh JW, Jang CK, Choi S, Kim EH, Hong CK, Kim SH: Virtual dissection of the real brain: Integration of photographic 3D models into virtual reality and its effect on neurosurgical resident education. *Neurosurg Focus* 51:E16, 2021
28. Satoh M, Nakajima T, Yamaguchi T, Watanabe E, Kawai K: Evaluation of augmented-reality based navigation for brain tumor surgery. *J Clin Neurosci* 94:305-314, 2021
29. Shaffer K: Teaching anatomy in the digital world. *N Engl J Med* 351:1279-1281, 2004
30. Shakur SF, Luciano CJ, Kania P, Roitberg BZ, Banerjee PP, Slavin KV, Sorenson J, Charbel FT, Alaraj A: Usefulness of a virtual reality percutaneous trigeminal rhizotomy simulator in neurosurgical training. *Neurosurgery* 11 Suppl 3:420-425; discussion 425, 2015
31. Spitzer VM, Scherzinger AL: Virtual anatomy: An anatomist's playground. *Clin Anat* 19:192-203, 2006
32. Suebnukarn S, Haddawy P, Rhiemora P, Jittimane P, Viratket P: Augmented kinematic feedback from haptic virtual reality for dental skill acquisition. *J Dent Educ* 74:1357-1366, 2010
33. Sumadio DD, Rambli DRA: Preliminary evaluation on user acceptance of the augmented reality use for education. *IEEE* 2:461-465, 2010
34. Triepels CPR, Smeets CFA, Notten KJB, Kruitwagen R, Futterer JJ, Vergeldt TFM, Van Kuijk SMJ: Does three-dimensional anatomy improve student understanding? *Clin Anat* 33:25-33, 2020
35. Weeks JK, Amiel JM: Enhancing neuroanatomy education with augmented reality. *Med Educ* 53:516-517, 2019
36. Winkelmann A: Anatomical dissection as a teaching method in medical school: A review of the evidence. *Med Educ* 41:15-22, 2007
37. Yamamoto T, Abolhassani N, Jung S, Okamura AM, Judkins TN: Augmented reality and haptic interfaces for robot-assisted surgery. *Int J Med Robot* 8:45-56, 2012
38. Yudkowsky R, Luciano C, Banerjee P, Schwartz A, Alaraj A, Lemole GM Jr, Charbel F, Smith K, Rizzi S, Byrne R, Bendok B, Frim D: Practice on an augmented reality/haptic simulator and library of virtual brains improves residents' ability to perform a ventriculostomy. *Simul Healthc* 8:25-31, 2013