



Nöroşirürjide İntraoperatif Sanal ve Artırılmış Gerçeklik

Intraoperative Virtual and Augmented Reality in Neurosurgery

Görkem YAVAŞ¹, Kadri Emre ÇALIŞKAN²

¹Kars Harakani Devlet Hastanesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Kliniği, Kars, Türkiye

²Ege Üniversitesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Anabilim Dalı, İzmir, Türkiye

Yazışma adresi: Görkem YAVAŞ ✉ gorkemyavas@gmail.com

ÖZ

İntrakranial patolojilerin cerrahisinde intraoperatif patolojinin yerinin milimetrik boyutlarda tayin edilmesi, kitle boyutlarının ve üç boyutlu (3B) yapısının ortaya konulması, önemli yapılarla komşuluklarının belirlenmesi hastanın sağkalım süresi, kitlenin tam olarak çıkartılması, postoperatif dönemde hastanın nörolojik kaybının olmaması açısından oldukça önemlidir. Bu anlamda son yıllarda geliştirilen sanal ve artırılmış gerçeklik mobil cihazlar ile gerçek görüntü üzerine preoperatif rutin olarak hastaya yapılan 3B bilgisayarlı tomografi (BT) ve/veya manyetik rezonans (MR) görüntülerinin yansıtılması ile cerrahin gözünün önünde cerrahi uygulanacak patolojinin, operasyon sırasında öneme sahip anatomik yapıların segmentasyon teknikleri kullanılarak renkli, yüksek doğruluk ve kolaylıkla cilt insizyonundan itibaren operasyonun tüm aşamalarında görülmesi amaçlanmaktadır.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Sanal gerçeklik, Artırılmış gerçeklik, Nöronavigasyon

ABSTRACT

Intraoperative image guidance has been a necessity in neurosurgical operations for the past two decades for localizing the pathology. Intraoperative determination of localization and size of intracranial pathologies (primary or secondary tumors, vascular pathologies, hydrocephalus, epileptic focus, etc.) and the 3D structure provide a significant advantage for the resection of pathology without any insult to adjacent important structures in order to prevent any neurological deficit and improve patient pathology-based survival. In this sense, virtual and augmented reality technologies with mobile devices can recognize the specific target on the patient's skull and enable 3D image fixation of the patient's head. These new techniques can show real pathology in real time together with the adjacent important structures in 3D. Reconstructed 3D segmentation of the pathology can be shown on the skin surface and during surgery with high accuracy and relative ease at all stages of the operation, by using 3D segmentation techniques.

KEYWORDS: Virtual reality, Augmented reality, Neuronavigation

■ GİRİŞ

Nöronavigasyon teknikleri son yıllarda beyin ve sinir cerrahisinde oldukça sık olarak kullanılmakta, bu sayede hastaya daha az zarar veren ve daha yüksek doğrulukta (daha az rezidü patoloji, daha az postoperatif defisit) minimal invazif cerrahiler ile hastanın postoperatif sağkalımı artmakta, postoperatif erken ve geç dönem komplikasyonları azalmaktadır. Bu amaçla rutinde kullanılan nöronavigasyon teknikleri yüksek maliyetli, kullanımı zaman

alan ve bazı kısıtlamalar (pron pozisyonunda uygulama güçlüğü, lezyonun gösterilmesinde yüksek sapma, çivili başlık kullanma zorunluluğu vb.) içeren tekniklerdir. Bu nedenle mevcut nöronavigasyon tekniklerine ek olarak daha hızlı, cerrah için daha konforlu ve daha yüksek doğrulukta patolojiyi ortaya koyacak yeni nöronavigasyon tekniklerine ihtiyaç vardır. Son yıllarda sanal ve artırılmış gerçeklik teknolojisine sahip mobil cihazlar (telefon, tablet vb.), artırılmış gerçeklik özelliğine sahip cerrahi mikroskoplar, karma gerçeklik teknolojisine sahip giyilebilir cihazlar (gözlük vb.) ile yapılan çalışmalar

intraoperatif nöronavigasyonda, rutinde kullanılan teknolojiler ile karşılaştırılmakta ve hatta geleneksel nöronavigasyon tekniklerinin yerini almaktadır. Bu çalışmalarda fotometri tekniği kullanılarak gerçek görüntü ile sanal oluşturulan üç boyutlu (3B) hastaya özel BT ve/veya MR görüntülerinin otomatik olarak hizalanmasını mümkün kılan teknikler kullanılmaktadır. Bu eşleştirilen görüntülerde patolojinin yeri, şekli, önemli komşu yapılar ile birlikteliği ortaya konulabilmektedir.

■ SANAL (VR), ARTIRILMIŞ (AR) GERÇEKLİĞİN TARİHİ ve CERRAHİ KULLANIMININ GELİŞTİRİLMESİ

Son 15 yıl içerisinde nöronavigasyon beyin cerrahisi ameliyatlarında minimal invaziv cerrahiler ve güvenli cerrahiler için olmazsa olmaz olmuştur. Ancak bu sistemler hâlâ ergonomik değildir. Cerrah, cerrahi alandan uzakta başka bir ekrana bakmak zorundadır. Bu ekranda gördüğü sanal görüntüyü, gerçek cerrahi görüntü üzerinde yorumlaması gerekmektedir. Artırılmış gerçeklik, direkt olarak gerçek çevre ile sanal görüntüyü üst üste getirmektedir. Bu doğrultuda cerrahi planlamada, gelecekte kullanılabilecek oldukça yararlı bir teknolojidir. Esas amaç, anatomik detayların olduğu hastaya özel 3B sanal modelin gerçek cerrahi alanla eşleştirmektir. Böylelikle gerçek cerrahi görüntüyü, her türlü zenginleştirmektedir.

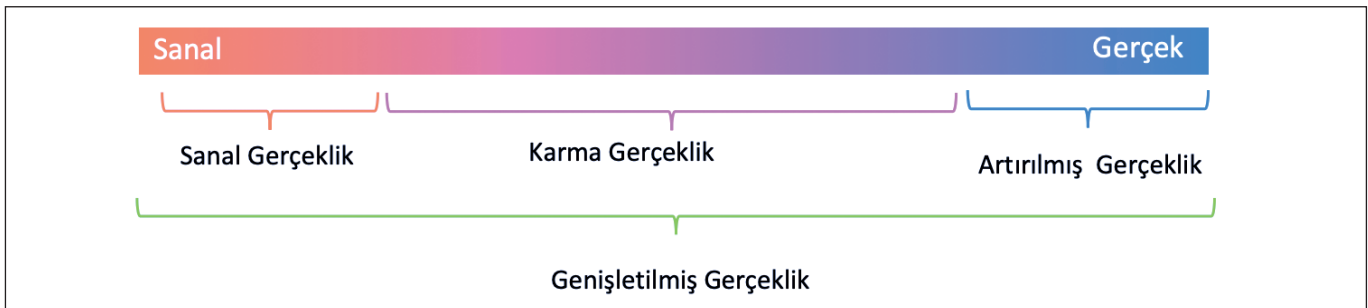
Beyin cerrahisinde bu sisteme olan ihtiyaç diğer cerrahilere göre daha fazladır. Cerrahi alan çok küçüktür ve cerrahi alan yüksek derinlik taşımaktadır. Bu derinlikten dolayı gereksiz müdahale, ekartasyon vasküler veya nöronal hasara yol açabilir. Bu amaçla minimal invazif beyin cerrahisi terimi ortaya çıkmış ve gün geçtikçe önem kazanmıştır.

Genişletilmiş gerçeklik (extended reality), gerçek görüntüler ile sanal görüntülerin birbirine üzerine getirilmesi ve bu yaratılan gerçeklik ile kullanıcının iletişime geçmesini olanaklı kılar. Bu teknolojiler ilk olarak sanal gerçeklik ile 1965 yılında Sutherland ile başladı (21,25). İlk yapılan çalışmalarda bir ekrandan kamera üzerindeki görüntüye basit 3B çizimler yansıtılmış ve kullanıcının hareketi ile pozisyonunun değişimi sağlanmıştır. Bu sistem daha sonrasında Morton Heilig tarafından Sensorama adını almıştır (11). Philco ve ark. ilk olarak giyilebilir başa sabitlenen gözlükler ile VR yapmayı başarmışlardır (Demokles'in Kılıcı) (16). Teknolojinin ilerlemesi ile ABD Hava Kuvvetleri ve NASA (National Aeronautics and

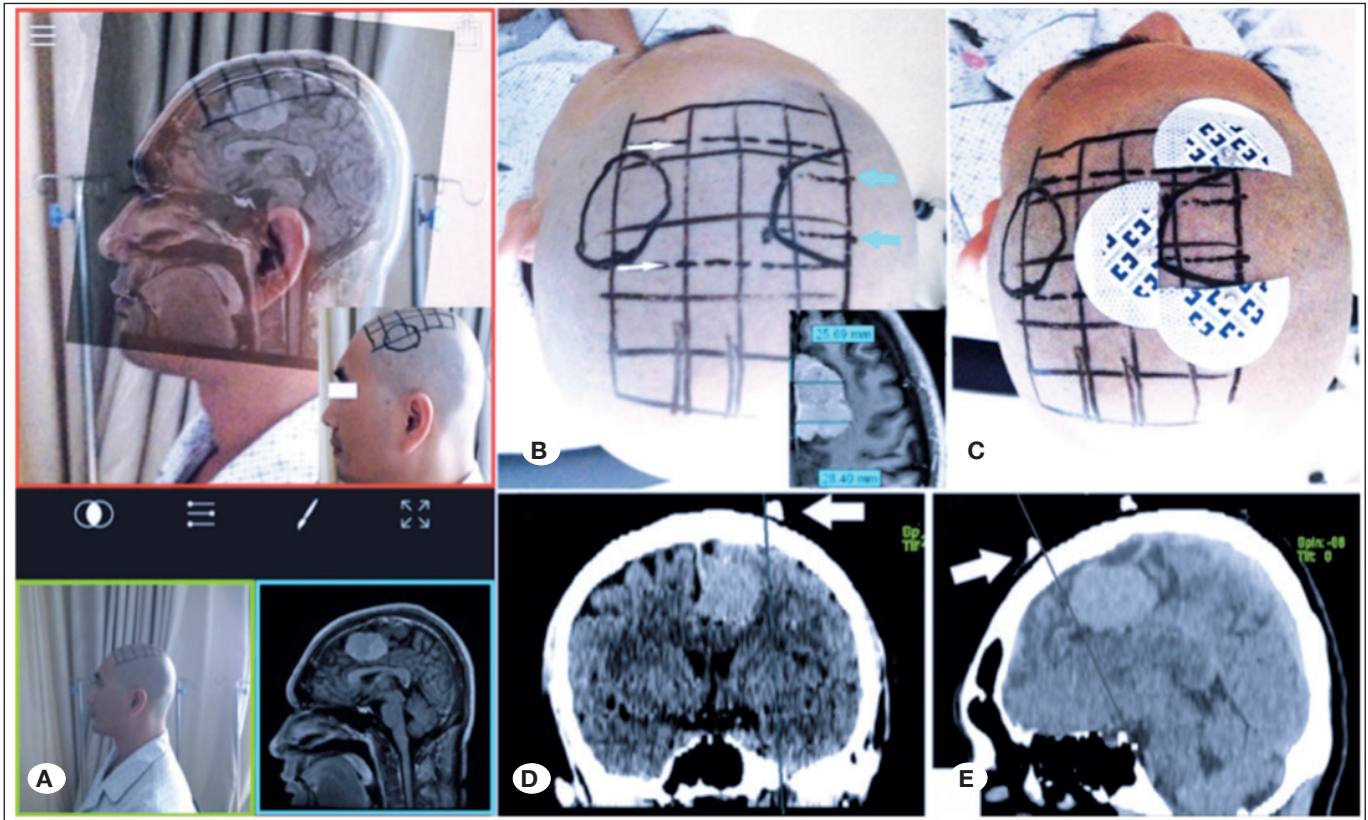
Space Administration)'nın çalışmalarının da etkisi ile gözlük üzerinde 3 boyutlu, stereoskopik baş hareketi algılayıcılar ve el-vücut hareket algılayıcılar ile şu anki mevcut hâlini almıştır. 2018'de 27 milyar dolar olan pazar payı, 2020'de 209 milyar dolara çıkmıştır.

Genişletilmiş gerçeklik sanal, artırılmış ve karma gerçeklik olarak üçe ayrılmaktadır (Şekil 1). Sanal gerçeklik teknolojisi, ilk olarak ortaya çıkan, kullanıcının gerçek dünyadan tamamen soyutlanarak sanal 3B, etkileşime giren dünyadan oluşmaktadır. Artırılmış gerçeklikte ise gerçek görüntülerin üzerine sanal 3B görüntülerin yerleştirilmesi ve sabitlenmesi sağlanmaktadır. Bu sayede kullanıcı, sanal ile gerçek görüntüyü aynı anda görebilmektedir.

Artırılmış gerçeklik ile ilgili çalışmalar çeşitlilik göstermektedir. Gerçek cerrahi alanın görüntülenmesi mikroskop, endoskopik, elle tutulan veya cerrahın başına sabitlenen kameralarla yapılmaktadır. Çalışmaların genelinde mikroskop ile artırılmış gerçeklik çalışılmıştır ve bu sistemler nöronavigasyon sistemleri ile hız kazanmıştır. Beyin ve Sinir Cerrahisi kliniklerinde kullanılan optik takip sistemi tabanlı nöronavigasyon sistemlerinin mikroskoplar ile entegrasyonu sayesinde cerrah mikroskop öykülerinden cerrahi alanda sanal 3B patolojiyi veya BT, MR görüntülerini görebilmektedir ve yapılan çalışmalarda bu teknolojilerin cerrah açısından faydalı olduğu görülmüştür (25). Tümör cerrahisinde, AR'ın yüzeysel lezyonların insizyon planlanmasında, kraniotominin yeri, büyüklüğünde ve tümörün rezeksiyonunda faydalı olduğu gösterilmiştir (5). AR için mobil telefonlar, tabletler, başa sabitlenen cihazlar ve mikroskoplar kullanılmıştır. Bir çalışmada, projektör yardımıyla hastanın kafasına yansıtılan görüntü ile tümör sınırları 1,2 mm. hata payı ile gösterilmiştir (1). Sina (Intraoperative Neurosurgical Assistant Application) isminde bir uygulama ile basitçe hastaya ait preoperatif BT ve MR görüntüleri semitransparan şekilde hastanın kafası üzerine tablet veya mobil telefon ile bakılarak tümör sınırları ve yeri doğrulukla bulunabilmektedir (Şekil 2) (8). Bu teknikler, konvansiyonel nöronavigasyon teknikleri uygun olmadığında kullanılabilir ve yapılan bir çalışmada 4.4 mm. standart sapma ile doğrulukla kullanılabilir (4). Bu sistemin dezavantajı, hastanın preoperatif 2B görüntüleri hastanın kafası ile manuel olarak eşleştirilmesi, mobil cihazın hastaya dik olarak tutulması gerekmesi, görüntünün sabitlenmesinin mümkün olmaması ve 3B olarak kullanılmasının mümkün olmamasıdır (28). AR ve karma gerçeklik teknolojiler ile bu limitasyonlar aşılabilir (20). Bu yaklaşım ile cerrahın kullandığı



Şekil 1. Genişletilmiş gerçeklik ve diğer gerçeklik teknolojileri ile ilişkisi. Sanal, karma ve artırılmış gerçeklik olmak üzere 3'e ayrılır.



Şekil 2: Sina uygulaması ile projeksiyon yöntemi ile intrakranial patolojinin hasta üzerinde görülmesi.

mobil telefon veya tablet ile preoperatif BT ve MR görüntüleri gerçek görüntüdeki hastanın kafası ile eşleşmekte ve bu sayede cerrah kendi görüş açısından eşleşen ve zenginleşen, tümörün yerini, büyüklüğünü, derinliğini ve boyutunu görebilmektedir (5). Yapılan 25 adet olgu içeren çalışmada, Microsoft Hololens kullanılarak manuel eşleştirme ile standart nöronavigasyon teknikleri ile karşılaştırıldığında 4,4 mm. ortalama hata ile tümör lokalizasyonu doğrulukla gösterilebilmiştir (4). Hololens ile preoperatif cerrahi planlama süresi 5 dakika, 20 saniye olarak hesaplanmış, bu sayı standart nöronavigasyon tekniklerinde 4 dakika, 25 saniye olarak hesaplanmıştır (13). Kamera tabanlı hareket yakalama sistemi ile preoperatif BT ve MR görüntüleri otomatik olarak eşleştirilebilmektedir ve cerrahın bakış açısı ve yönü ile otomatik olarak hareket etmekte ve dönmektedir. Böylelikle bu görüntülerin oryantasyonu ve gerçekte temsil ettiği yer değişmemektedir. Bu yöntem ile bir çalışmada, intrakranial yapıların 1 mm. standart sapma ile doğrulukla gösterildiği bildirilmiştir (26). Optik büyütmenin veya sınırlı görüş açısından cerrahi mikroskop kullanılması gerekmektedir. Mikroskop kullanımı sırasında mikroskop ve mikroskop okülerinde AR teknolojileri beraber kullanılabilir (2). Transsfenoidal mikroskopik cerrahide işaret ile eşleştirme yapılan bir çalışmada 2,33 mm. standart sapma ile tümör lokalizasyonu sağlanmıştır. Otomatik eşleştirme ile uygulanan başka bir çalışmada bu oran 0,83 mm.'ye kadar düşürülebilmektedir (3). AR özellikle atipik anatomiye sahip ve reoperasyon nedeniyle landmarkların olmaması durumunda daha faydalıdır (14). Mikroskop ile AR teknolojisi kombinasyonunun en büyük

dezavantajı beyinde orta hat kayması nedeniyle hassas eşleştiriminin kaybolmasıdır.

Nörovasküler cerrahide, AR teknolojileri ile vasküler yapıların görüntülenerek kraniotominin yerini, pozisyonunu ve büyüklüğünü planlamak mümkündür. AR ile hematoma yeri doğrulukla bulunabilir ve bu sayede minimal invaziv endoskopik hematoma boşaltılması operasyonu yapılabilir. Ekstrakranialden intrakranial olarak yapılan by-pass cerrahisinde, AR uygun damarın lokalizasyonu ve disseksiyonunda, kraniotominin planlanmasında, donör damarın tespitinde faydalı bulunmuştur (22). AR ile bazı çalışmalarda damarların ve anevrizmaların akım dinamikleri de çalışılmıştır. Karmonik ve ark. yaptığı bir çalışmada 4 boyutlu faz kontrast MR görüntüleri Hololens'e aktarılmış ve bu sayede kan akış hızı, akım paterni ameliyat öncesinde ve ameliyat sırasında görülebilmektedir (15).

Stereotaktik cerrahide ise AR, derin yerleşimli lezyonlardan özellikle biyopsi için istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Cerrahi hedef ve biyopsi doğrultusunun hesaplanmasında AR faydalıdır (23).

Eksternal ventriküler drenaj takılması, beyin cerrahisinde sıklıkla hidrosefali, intraventriküler kanama nedeniyle yapılan bir ameliyattır. Bu işlem anatomik landmarklar kullanılarak kateterin serbest olarak el yardımıyla yerleştirilmesi ile yapılır. Hastaya ait anatomik varyasyonlar ve orta hatta kayma bu işlemi oldukça zorlaştırmaktadır. Yapılan bir çalışmada Sina EVD (ekstraventriküler drenaj) yerleştirilmesi için faydalı olarak görülmüştür. Cerrahin yanında Sina ile mobil cihazda takip

eden asistan, cerrahı daha doğru bir şekilde yönlendirmiştir (9). Bu çalışma ve yöntem, manuel olarak mobil cihazın aynı oryantasyonda taşınması gerekliliği nedeniyle sınırlıdır. HoloLens ile yapılan bir çalışmada, AR ile EVD takılması, serbest olarak el ile takılmasından daha üstün olarak bulunmuştur (Şekil 3) (17). HoloLens ile 1,07 deneme ile EVD başarılı bir şekilde ventrikül içerisine yerleştirilirken, serbest el tekniği ile bu oran ortalama 2,33 denemedir. Hedefteki sapma miktarı, HoloLens ile 4,34 mm. iken serbest el ile 11,26 mm. olarak hesaplanmıştır. Kraniosinoz cerrahisinde ise derin anatomik yapıların lokalizasyonunun bilinmesi ve osteotomi lokalizasyonunun planlanmasında faydalı olduğu gösterilmiştir (10).

Karma gerçeklik teknolojisinde, giyilebilir gözlük gibi cihazlar ile gerçek çevre ve cerrahi alanı analiz edilip sanal objeler gerçek görüntü üzerine yerleştirilebilir. Karma gerçeklik 2010'dan sonra giyilebilir teknolojilerle ortaya çıkmış, Microsoft, Google, Magic Leap ve Apple gibi bazı büyük firmalar tarafından geliştirilmektedir. Ancak bu gözlükler ve bu teknoloji yüksek maliyetli ve görüntü işleme kapasiteleri cerrahi kullanım için henüz yeterli değildir (2). Ayrıca bu cihazlar sadece geliştiriciler tarafından temin edilebilir olup bireysel kullanımları ve ulaşımları zorludur.

■ ARTIRILMIŞ GERÇEKLİK İLE NÖRONAVİGASYON ve SINIFLANDIRILMASI

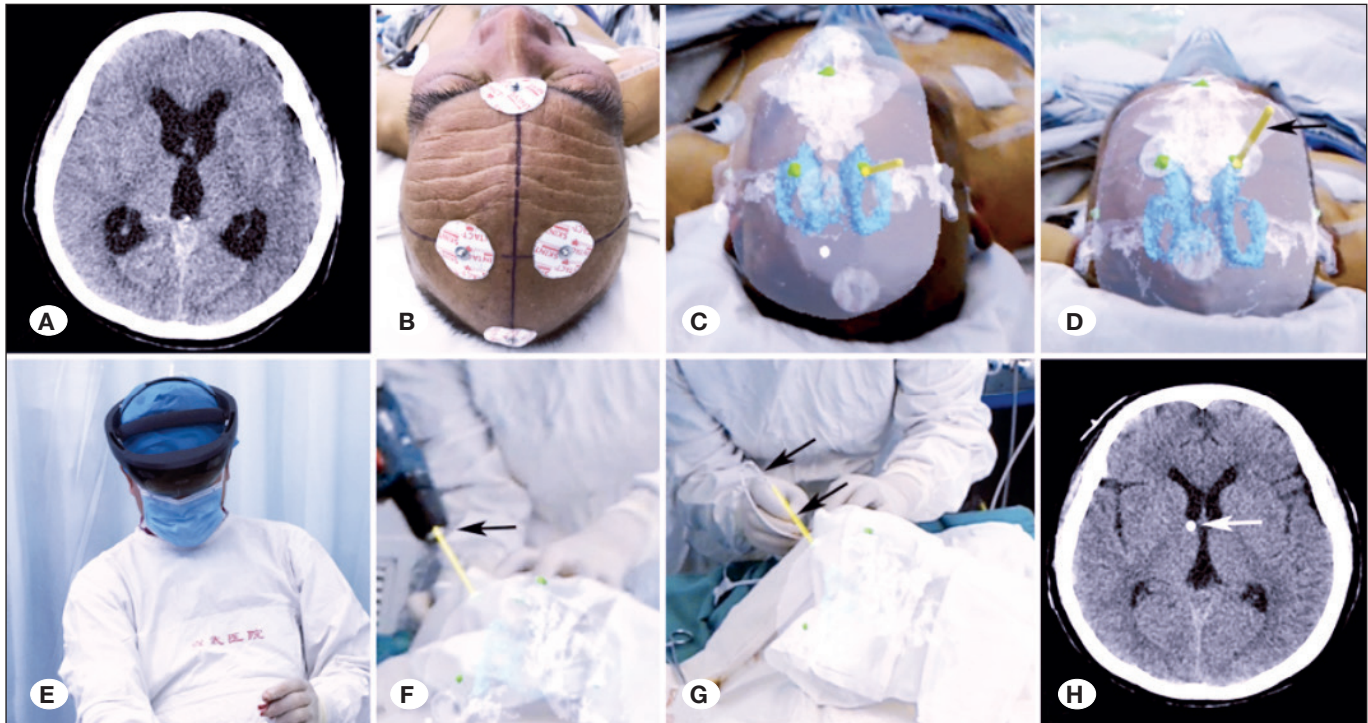
İntrakranial tümör cerrahisi AR nöronavigasyon ile ilgili en çok çalışmanın bulunduğu alandır. Serebral korteks ve beyaz maddede bulunan yolakların önemli olması bu bölgede yüksek keskinlik ile nöronavigasyonu önemli kılmaktadır. Tümör sınırlarını belirlemek, bu cerrahilerde benign ve malign

özellikli olanlarda oldukça zordur. Özellikle düşük dereceli glial tümörlerde, normal kortikal yapılardan tümörü ayırmak, cerrahi mikroskop ile zor olabilmektedir. Görüş alanının oldukça küçük olması, kompleks sinirler ile komşuluk ve diğer faktörler, bu bölgede en küçük normal doku kaybını hastada nörolojik kayıp olarak etkilemektedir. AR nöronavigasyonun bu anlamda, cerrahi prosedürleri kolaylaştırarak, intraoperatif planlamayı ve hedef patolojiye cerrahi kılavuz etme sayesinde minimal invazif ve ek defisit oluşturmadan yapılan cerrahiye katkısı olabilecektir. Literatürde AR nöronavigasyon çalışmaları üçe ayrılmaktadır (18);

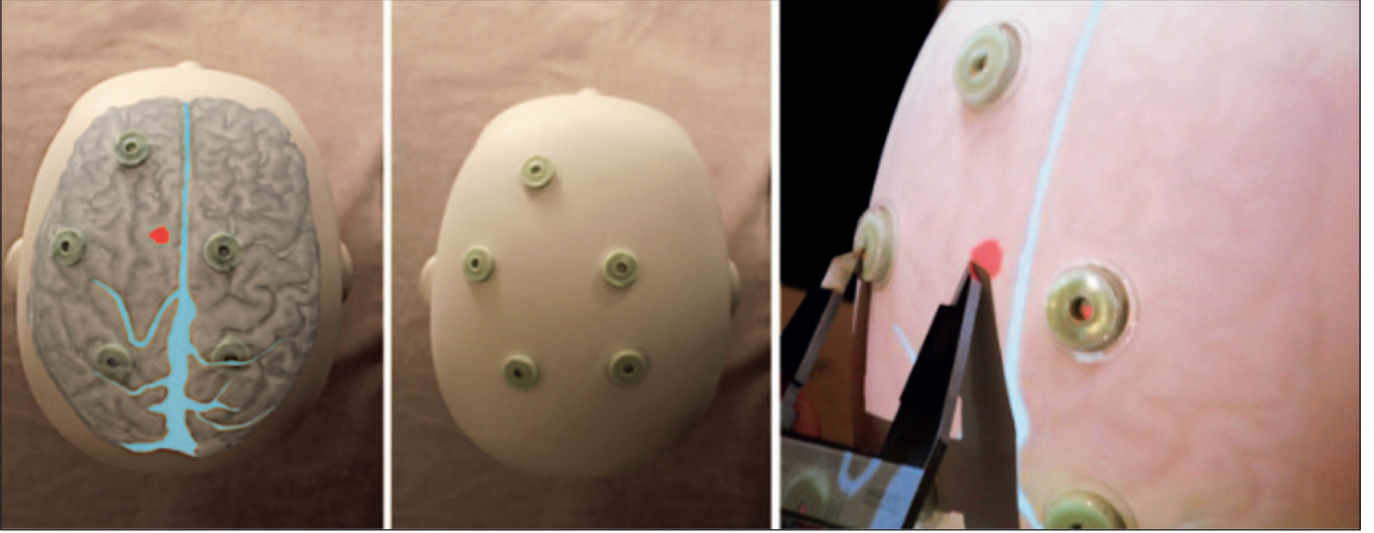
- 1) Nokta eşleştirilmesi ile nöronavigasyon
- 2) Volümetrik nöronavigasyon
- 3) Mobil cihaz tabanlı nöronavigasyon teknikleri

1) Nokta Eşleştirilmesi ile Nöronavigasyon

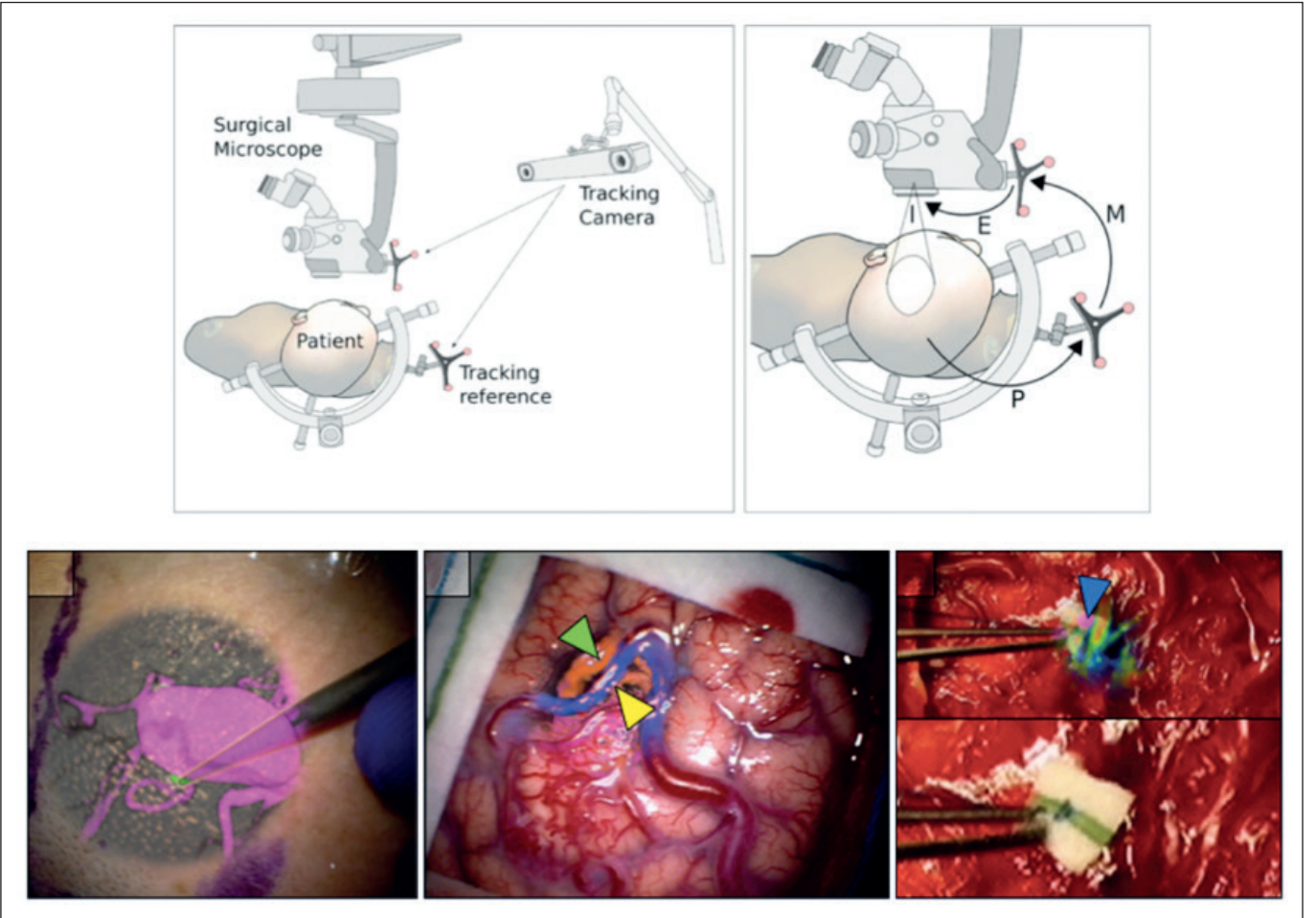
2B nokta eşleştirilmesi, cihazın koordinatları ile görüntünün koordinatlarının eşleştirilmesi ile yapılır. Besharati Tabrizi ve ark. yaptığı AR tabanlı projeksiyon ile hastanın başının üzerine tümör dokusu yansıtılabildiği. Bu çalışmada projeksiyon hatası $1,2 \pm 0,54$ mm. olarak bulunmuştur. Ancak bu çalışmada beyin ve başın yer değişimi ile bu nöronavigasyon sapma gösterir (Şekil 4) (1). Kersten-Oertel ve Gerard yaptıkları çalışmada intraoperatif USG ile AR'ı birleştirerek MR görüntüleri ile nöronavigasyonun doğruluğunu artırmıştır. Bu çalışmada IBIS isiminde spesifik optik tabanlı kızılötesi kameralı nöronavigasyon sistemi kullanılmıştır (Şekil 5). Yine bu çalışmada cilt insizyonunun ve kraniotominin belirlenmesi ile enfeksiyon oranında azalma ve iyileşme zamanında artış olduğu görülmüştür (7).



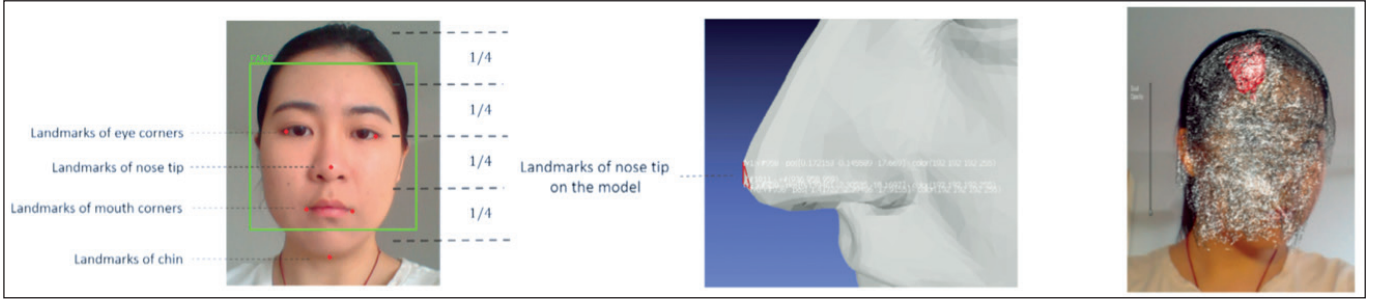
Şekil 3: AR ve Microsoft HoloLens ile ventrikül segmentasyonu sonrasında EVD takılması.



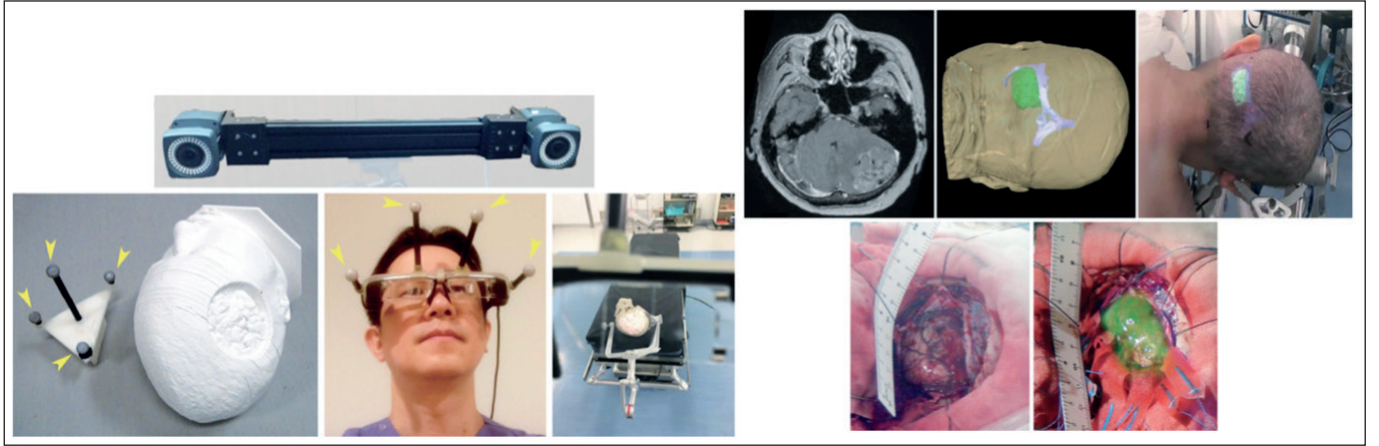
Şekil 4: Besharati Tabrizi ve ark. yaptığı çalışmada, işaretleyiciler ile eşleştirilen ve projeksiyon yöntemiyle yapılan nöronavigasyon (1).



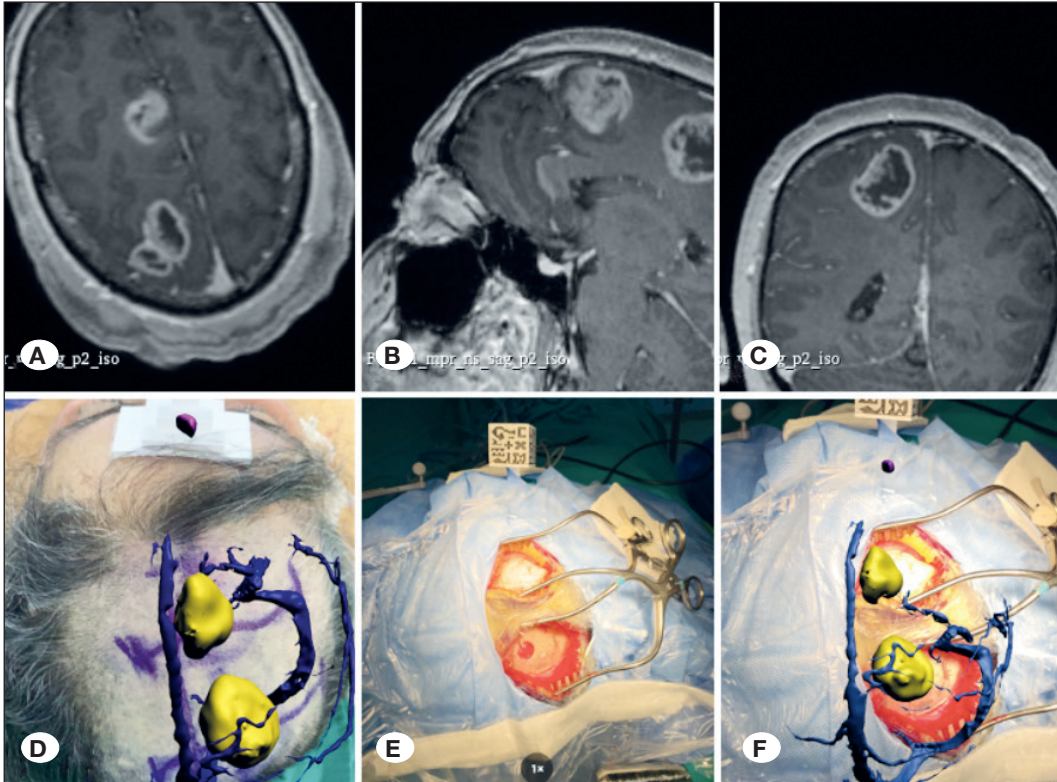
Şekil 5: Optik tabanlı kızılötesi kamera ile beraber cerrahi mikroskopta intrakranial patolojiye ait AR görüntülerin görülmesi.



Şekil 7: Mobil cihaz ile yüz landmarkları 3B segmentasyonların eşleştirilmesi ve intrakranial patolojinin gösterilmesi.



Şekil 8: Akıllı gözlükler ve geleneksel optik tabanlı nöronavigasyon kullanılarak gözlük üzerinde intrakranial patolojinin yerinin gösterilmesi.



Şekil 9: İntrakranial tümör vakasında birden fazla tümörün ve sinüslerin mobil cihazda görüntülenmesi.

Tablo I: Sanal (VR), Artırılmış (AR) ve Karma Gerçeklik (MR) Teknolojilerinin Özellikleri

	Faydaları	Eksiklikleri
VR	<ul style="list-style-type: none"> Cerrahi eğitimde zaman ve maliyet kazancı Cerrahi simülasyon Kadavra ihtiyacında azalma Cerrahi süresinde ve başarısında artış 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek maliyet İntraoperatif kullanımı mümkün değil
AR	<ul style="list-style-type: none"> Preoperatif planlama İntraoperatif görüntülerin zenginleştirilmesi Yüksek kullanım kolaylığı 	<ul style="list-style-type: none"> Zaman gecikmesi Görsel hata ve üst üste gelmesi Derinlik algısı eksikliği
MR	<ul style="list-style-type: none"> Klinik nöroşirürjide kullanımı Yüksek navigasyon kolaylığı 	<ul style="list-style-type: none"> Bu teknolojinin keskinliği zayıf Ekipman ulaşılabilirliğinin az olması Yüksek zaman gecikmesi

Tablo II: Artırılmış Gerçeklik Sistemlerinin ve Cihazlarının Karşılaştırılması

Sistem	Faydalar	Eksiklikler
Giyilebilir AR teknolojileri	<ul style="list-style-type: none"> Baş hareketlerinde azalma Yüksek çözünürlüklü görüntü 	<ul style="list-style-type: none"> El ve göz koordinasyonu eksikliği Küçük ekran alanı Pil ömrünün az olması Düşük konfor
Tablet/telefon tabanlı AR teknolojileri	<ul style="list-style-type: none"> Düz ekranda görüntünün daha anlaşılır olması Kör noktanın olmaması Yüksek kullanım kolaylığı 	<ul style="list-style-type: none"> Ekran hareketi ile görüntü arasında zaman gecikmesi
Projektör tabanlı AR teknolojileri	<ul style="list-style-type: none"> Kullanım kolaylığı Yüksek keskinlik 	<ul style="list-style-type: none"> Görsel hata oranının yüksek olması Derin ve büyük lezyonlarda kullanım zorluğu

sistemleri, intrakranial patolojinin yerleşimini göstermekte ve cerrahi rezeksiyonda oldukça faydalıdır. Ancak bu sistemlerin bazı kısıtlamaları vardır;

- 1) Optik küre veya diyotlara en az 1 metre uzaklıkta kamera yerleşimi
- 2) Ayrı bir kameraya ihtiyaç duyulması, bunun ise sistemin büyüklüğünü ve hareketini kısıtlaması
- 3) Nöronavigasyon doğruluğunun küre veya diyotların hareketi hâlinde ciddi derecede bozulması
- 4) Küre veya diyotların kamera tarafından görülmesine engel olduğu durumlarda sistemin durması (mikroskop, hastanın örtülmesi vb.)
- 5) Yer kaplayan diyot veya kürelerin cerrahi steriliteye ve cerrahi alanda kısıtlamalara neden olması
- 6) Değişken cerrahi ekipmanlarda kullanılmasının zorluğu
- 7) Hastanın başının başlıkta sabitlenmesi gerekliliği

İntraoperatif artırılmış gerçeklik, cerrahi planlamada 3B intrakranial patolojinin gösterilmesi, cerrah tarafından analitik olarak anlaşılması, ayrı bir ekrana bakmak zorunda kalmamak nedeniyle dikkat dağınıklığı yaratması açısından rutinde kullanılan nöronavigasyon sistemlerine göre üstün bulunmuştur. Nöronavigasyon sistemlerinin maliyetleri düşündüğünde

AR ile nöronavigasyon düşük maliyetli olup, bu teknikte çivili başlık gibi stabilizasyon sistemlerine ihtiyaç yoktur. Ancak bu artırılmış gerçeklik ile nöronavigasyon sistemlerinin zaman senkronizasyonu, zamansal gecikme, gösterilen 3 boyutlu intrakranial patolojinin gerçek görüntünün önüne geçmesi ve görülmesini engellemesi gibi bazı kısıtlamaları mevcuttur (Tablo I). Sanal gerçeklik preoperatif olarak cerrahi planlamada, cerrahi eğitimde ve cerrahi simülasyonlarda kullanılabilir; ancak sanal gerçeklikte gerçek ortamın görüntülenmemesi nedeniyle intraoperatif olarak kullanılması uygun değildir. Artırılmış gerçeklikte, gerçek görüntü üzerine (cerrahi saha) sanal görüntülerin, patolojinin 3 boyutlu olarak gösterilmesi mümkündür (Tablo II), ayrıca bunlara ek olarak intraoperatif olarak hastaya ait verilerin görüntülenmesi de mümkündür (hastanın vital bulguları, 3 boyutlu segmentasyon ile hastaya ait anatomik yapılar vb.).

Genişletilmiş gerçeklik (VR, AR ve MR) teknolojileri son 20 yıldır hızla ilerlemekte ve umut vadetmektedir. Günlük yaşamımızda kullanıma giren bu teknolojiler, telefon ve tablet gibi mobil cihazlarda kolaylıkla kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar AR teknolojisinin yüksek doğrulukla, düşük maliyetli, kullanımı kolay ve cerrahın 3B olarak patolojiyi görerek nöronavigasyon yapılmasının uygun olduğunu göstermiştir. Mevcut optik izleme tabanlı nöronavigasyon sistemlerinin eksikliklerini AR nöronavigasyon sistemleri ile aşmak mümkündür. Son yıllarda genişletilmiş gerçeklik üzerinde artan ilgi, ilerleme ve

yatırımlar ile bu teknolojiler günlük yaşantımızın bir parçası hâline gelebilecek, geleceğin ameliyathanelerinde rutin olarak kullanılabilir. Giyilebilir AR teknolojileri ile bu çalışmaların daha ileriye taşınması mümkündür.

■ KAYNAKLAR

- Besharati Tabrizi L, Mahvash M: Augmented reality-guided neurosurgery: Accuracy and intraoperative application of an image projection technique. *J Neurosurg* 123(1):206-211, 2015
- Cabrilo I, Sarrafzadeh A, Bijlenga P, Landis BN, Schaller K: Augmented reality-assisted skull base surgery. *Neurochirurgie* 60(6):304-306, 2014
- Carl B, Bopp M, Voellger B, Saß B, Nimsky C: Augmented reality in transsphenoidal surgery. *World Neurosurg* 125:e873-e883, 2019
- Chen JG, Han KW, Zhang DF, Li ZX, Li YM, Hou LJ: Presurgical planning for supratentorial lesions with free slicer software and sina app. *World Neurosurg* 106:193-197, 2017
- Cho J, Rahimpour S, Cutler A, Goodwin CR, Lad SP, Codd P: Enhancing reality: A systematic review of augmented reality in neuronavigation and education. *World Neurosurg* 139:186-195, 2020
- Cutolo F, Meola A, Carbone M, Sinceri S, Cagnazzo F, Denaro E, Esposito N, Ferrari M, Ferrari V: A new head-mounted display-based augmented reality system in neurosurgical oncology: A study on phantom. *Comput Assist Surg (Abingdon)* 22(1):39-53, 2017
- Drouin S, Kochanowska A, Kersten-Oertel M, Gerard IJ, Zelmann R, De Nigris D, Bériault S, Arbel T, Sirhan D, Sadikot AF, Hall JA, Sinclair DS, Petrecca K, DelMaestro RF, Collins DL: IBIS: An OR ready open-source platform for image-guided neurosurgery. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 12(3):363-378, 2017
- Eftekhari B: A smartphone app to assist scalp localization of superficial supratentorial lesions-technical note. *World Neurosurg* 85:359-363, 2016
- Eftekhari B: App-assisted external ventricular drain insertion. *J Neurosurg* 125(3):754-758, 2016
- Han W, Yang X, Wu S, Fan S, Chen X, Aung ZM, Liu T, Zhang Y, Gu S, Chai G: A new method for cranial vault reconstruction: Augmented reality in synostotic plagiocephaly surgery. *J Craniomaxillofac Surg* 47(8):1280-1284, 2019
- Heilig ML: Sensorama simulator. Google Patents, 1962
- Hou Y, Ma L, Zhu R, Chen X, Zhang J: A low-cost iphone-assisted augmented reality solution for the localization of intracranial lesions. *PLoS One* 11(7):e0159185, 2016
- Incekara F, Smits M, Dirven C, Vincent A: Clinical feasibility of a wearable mixed-reality device in neurosurgery. *World Neurosurg* 118:e422-e427, 2018
- Kantelhardt SR, Gutenberg A, Neulen A, Keric N, Renovanz M, Giese A: Video-assisted navigation for adjustment of image-guidance accuracy to slight brain shift. *Oper Neurosurg (Hagerstown)* 11(4):504-511, 2015
- Karmonik C, Elias SN, Zhang JY, Diaz O, Klucznik RP, Grossman RG, Britz GW: Augmented reality with virtual cerebral aneurysms: A feasibility study. *World Neurosurg* 119:e617-e622, 2018
- Kenwright B: Virtual reality: Where have we been? Where are we now? and Where are we going?. Preprints 2019, 2019070130 (doi: 10.20944/preprints201907.0130.v1)
- Li Y, Chen X, Wang N, Zhang W, Li D, Zhang L, Qu X, Cheng W, Xu Y, Chen W, Yang Q: A wearable mixed-reality holographic computer for guiding external ventricular drain insertion at the bedside. *J Neurosurg*, 2018 (Online ahead of print)
- Liu T, Tai Y, Zhao C, Wei L, Zhang J, Pan J, Shi J: Augmented reality in neurosurgical navigation: A survey. *Int J Med Robot*, 2020 (Online ahead of print)
- Maruyama K, Watanabe E, Kin T, Saito K, Kumakiri A, Noguchi A, Nagane M, Shiokawa Y: Smart glasses for neurosurgical navigation by augmented reality. *Oper Neurosurg (Hagerstown)* 15(5):551-556, 2018
- Mascitelli JR, Schlachter L, Chartrain AG, Oemke H, Gilligan J, Costa AB, Shrivastava RK, Bederson JB: Navigation-linked heads-up display in intracranial surgery: Early experience. *Oper Neurosurg (Hagerstown)* 15(2):184-193, 2018
- Myers B: A brief history of human computer interaction technology. *Interactions* 5:44-54, 1998
- Rychen J, Goldberg J, Raabe A, Bervini D: Augmented reality in superficial temporal artery to middle cerebral artery bypass surgery: Technical note. *Oper Neurosurg (Hagerstown)* 18(4):444-450, 2020
- Satoh M, Nakajima T, Yamaguchi T, Watanabe E, Kawai K: Application of augmented reality to stereotactic biopsy. *Neurol Med Chir (Tokyo)* 59(11):444-447, 2019
- Shan Q, Doyle TE, Samavi R, Al-Rei M: Augmented reality based brain tumor 3D visualization. *Procedia Computer Science* 113:400-407, 2017
- Sutherland IE: Sketchpad a man-machine graphical communication system. *Simulation* 2(5):R-3-R-20, 1964
- Watanabe E, Satoh M, Konno T, Hirai M, Yamaguchi T: The trans-visible navigator: A see-through neuronavigation system using augmented reality. *World Neurosurg* 87:399-405, 2016
- Yavas G, Caliskan KE, Cagli MS: Three-dimensional-printed marker-based augmented reality neuronavigation: A new neuronavigation technique. *Neurosurg Focus* 51(2):E20, 2021
- Zhang ZY, Duan WC, Chen RK, Zhang FJ, Yu B, Zhan YB, Li K, Zhao HB, Sun T, Ji YC, Bai YH, Wang YM, Zhou JQ, Liu XZ: Preliminary application of mixed reality in neurosurgery: Development and evaluation of a new intraoperative procedure. *J Clin Neurosci* 67:234-238, 2019