**Kemunculan Aplikasi Virtual Reality di Kedokteran Kardiovaskular**

**Ringkasan:**

Baru-baru ini, perkembangan pesat dalam arena komputasi seluler telah memungkinkan teknologi realitas yang diperluas untuk mencapai tingkat kinerja yang menghilangkan hambatan jangka panjang terhadap adopsi medis. Yang penting, display yang dipasang di kepala telah menjadi tidak terpasang dan cukup ringan untuk dipakai untuk waktu yang lama, tampilan tembus memungkinkan pengguna untuk tetap berada di lingkungannya saat berinteraksi dengan konten digital, dan kekuatan pemrosesan telah memungkinkan layar untuk tetap dengan persepsi manusia untuk mencegah mabuk perjalanan. Di seluruh kardiologi, banyak kelompok memanfaatkan kemajuan ini untuk pendidikan, perencanaan pra-prosedural, visualisasi intraprocedural, dan rehabilitasi pasien. Di sini, kami merinci aplikasi ini dan kemajuan yang memungkinkannya. (J Am Coll Cardiol Basic Trans Science 2018; 3: 420–30) © 2018 Para Penulis. Diterbitkan oleh Elsevier atas nama American College of Cardiology Foundation. Ini adalah artikel akses terbuka di bawah lisensi CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Selama bertahun-tahun, teknologi realitas yang diperluas telah menjanjikan dokter kemampuan untuk bergerak melampaui layar 2 dimensi (2D), yang memungkinkan mereka untuk memahami anatomi organ dalam 3 dimensi (3D) secara noninvasif. Namun, janji ini telah dihalangi oleh peralatan besar yang tidak mampu menampilkan gambar virtual berkualitas tinggi cukup koheren untuk mencegah mabuk perjalanan pengguna. Kemajuan terbaru dalam teknologi layar resolusi tinggi, peningkatan eksponensial dalam daya komputasi, dan miniaturisasi komponen yang dipimpin oleh produsen perangkat seluler telah memungkinkan kelas baru perangkat kepala-mount display (HMD) (1). Alat-alat yang murah dan nyaman dipakai ini dapat menampilkan data klinis berkualitas tinggi pada waktu respons yang cukup cepat untuk digunakan untuk jangka waktu yang lama, mengatasi hambatan lama untuk diadopsi di komunitas medis.

Kemajuan dalam proyeksi cahaya digital, dioda pemancar cahaya organik, dan manufaktur optik telah menghasilkan sistem tampilan yang lebih tipis, lebih rendah daya, dan lebih terang (2). Pengenalan ucapan dan kemajuan generasi membawa bentuk paling awal dari augmented reality aural; asisten digital online sekarang dikenal sebagai Siri (Apple, Cupertino, California) atau asisten Google (Google, Mountain View, California) digunakan setiap hari, bersama dengan sistem transkripsi otomatis. Kemajuan teknologi sensor dalam penentuan posisi dan sistem navigasi yang awalnya dirancang untuk berfungsi dengan sistem pemosisian global telah diperluas untuk menyertakan navigasi dalam ruangan tanpa satelit, melacak posisi pengguna melalui perangkat selular pewaris dengan memanfaatkan perangkat lunak dan perangkat keras seperti Project Tango dan ARCore (Google) atau ARKit (Apple). Pelacakan mata dan tangan memberikan kemampuan input mesin manusia baru untuk memahami maksud alami dengan sedikit beban pada pengguna untuk memahami bahasa dari produsen tertentu. Kombinasi inovasi perangkat keras dan perangkat lunak ini telah memungkinkan kelas baru dari platform 3D.

Berdasarkan kemajuan ini dalam platform 3D, jumlah aplikasi klinis telah tumbuh secara eksponensial di bidang pendidikan, perencanaan pra-prosedural, rehabilitasi, dan bahkan visualisasi intraprocedural. Di sini, kami fokus pada penerapan virtual reality (VR) dan teknologi terkait untuk praktik jantung klinis, berfokus pada apa yang mungkin berdasarkan pada teknologi saat ini dan hambatan apa yang masih ada untuk diadopsi secara luas.

**Menjelaskan Realitas**

Realitas yang diperluas menggambarkan spektrum, atau "kontinum virtualitas" (3) dari pengalaman digital yang sepenuhnya imersif, yang dikurasi dalam VR, hingga anotasi yang tidak mengganggu dalam akses yang mudah dari operator dalam augmented reality (AR) (Tabel 1). Ini mencakup penjelasan 2D pada video real-time, model 3D, dan hologram interferencebased true, seperti versi animasi yang terlihat pada kartu bisbol. Meskipun sebagian besar headset mengacu pada model mereka sebagai "hologram," HMD biasanya menciptakan persepsi kedalaman untuk model 3D melalui stereoscopy, simulasi kedalaman tanpa menghasilkan hologram sejati.

VR menyediakan kontrol penuh atas pengalaman visual dan pendengaran saat mereka berinteraksi dalam lingkungan yang benar-benar sintetis. Kontrol atas lingkungan ini dapat memberikan pengalaman virtual dari versi realitas yang tenang atau diperkuat. Platform VR yang tersedia secara komersial dari Oculus, HTC, dan Sony, antara lain, menggunakan layar resolusi tinggi untuk sepenuhnya menggantikan bidang visual pemakai. Tampilan imersif ini telah diterapkan pada manajemen nyeri (4), terapi pemaparan (5), rehabilitasi stroke (6), pendidikan, dan perencanaan bedah (Surgical Theater).

Sebaliknya, AR memungkinkan pemakai untuk melihat lingkungan asli mereka sambil menempatkan gambar 2D atau 3D di dalamnya melalui "window-on-the-world" (3). Jendela-dunia yang beranotasi ini dapat ditampilkan pada HMD yang tidak mengganggu atau di perangkat seluler, menggunakan kamera onboard untuk memberikan tampilan langsung lingkungan. Mungkin aplikasi konsumen teknologi AR yang paling sukses adalah Pokémon Go (7) di mana umpan kamera ponsel diberi anotasi dengan avatar dan data permainan kontekstual. Aplikasi AR ini minimal mengganggu bidang penglihatan normal, memberikan informasi yang berguna hanya ketika dipanggil oleh pengguna. Dalam pengaturan medis, grafik yang relevan secara kontekstual, referensi data, atau informasi penting disajikan bersama (bukan di tempat) lingkungan fisik. Platform komersial pertama yang paling dipublikasikan, Google Glass misalnya, ditunjukkan untuk menampilkan tanda-tanda vital pasien, riwayat yang relevan, dan informasi resep dari rekam medis elektronik pasien selama kunjungan (8). Baru-baru ini, platform lain telah dikembangkan untuk pendidikan, titik perawatan pasien (Evena [9]), tanggap darurat, dan telemedicine (AMA Xperteye [10]).

VR dan AR menunjukkan 2 bookends dari kontinum pengalaman, dan ketika industri telah berkembang, 2 kelas pengalaman baru telah muncul: gabungan realitas (MeR) dan realitas campuran (MxR). Kedua pendekatan mencapai pengalaman serupa: untuk memungkinkan interaksi dengan objek digital sambil mempertahankan rasa kehadiran dalam lingkungan fisik yang sebenarnya. MeR menangkap lingkungan pengguna dan memproyeksikan ulang mereka ke pada HMD kelas VR, yang dapat memediasi lingkungan ke atas atau bawah seperti yang diinginkan. Hal ini memungkinkan transisi yang lebih mulus antara virtualitas dan realitas bermediasi dan tanpa perantara. Untuk konsumen, ini digambarkan sebagai kemampuan untuk mengangkut pengguna ke ruang yang sama sekali berbeda dan kembali ke ruang tamu mereka dengan perangkat yang sama (Intel Alloy [11]), yang juga bisa diterapkan untuk pasien di kamar rumah sakit. MxR menyelesaikan pengalaman serupa dengan memproyeksikan objek digital ke tampilan semitransparan. Dengan demikian, platform MxR tidak mengaburkan, atau memediasi, lingkungan fisik, memungkinkan pemakai untuk menjaga kesadaran situasional dari lingkungan mereka serta menjaga interaksi normal dengan mereka yang tidak berpartisipasi dalam pengalaman MXR. Kemajuan ini telah membuka jendela peluang untuk jenis teknologi ini untuk penggunaan intraprocedural, memungkinkan dokter untuk tetap berada di lingkungan mereka saat melihat gambar virtual (Ilustrasi Tengah). Saat ini, MxR menampilkan dikomersialisasikan oleh Microsoft dan DAQRI (Los Angeles, California) telah dibuktikan dalam pendidikan kedokteran dan pencitraan medis (12).

Beberapa tambahan platform tampilan 3D yang menonjol telah dikembangkan tanpa menggunakan HMD, termasuk tampilan panel datar 3D, dan holografi buatan komputer berbasis interferensi. Layar 3D panel datar, pertama kali diperkenalkan pada 2010 (13), hanya menampilkan hanya dan tidak memiliki perangkat input untuk memanipulasi data 3D. Perangkat tampilan dan input 3D Zvr 3D Hewlett Packard (Palo Alto, California) digunakan bersama dengan perangkat lunak EchoPixel (Mountain View, California) untuk memberikan gambar berkualitas diagnostik (14). Contoh kedua, holografi berbasis nterferensi komputer, menghasilkan gambar 3D yang realistis dengan membentuk gelombang cahaya menggunakan kombinasi pemrosesan yang rumit, sumber cahaya yang dikendalikan komputer khusus, dan optik. Meskipun tampilan hologram real-time pertama kali ditunjukkan pada tahun 1992 (15), kemajuan terbaru oleh pencitraan RealView telah memungkinkan penggunaan praktis mereka, dan mereka telah mengeksplorasi beberapa aplikasi klinis menggunakan teknologi ini, termasuk kardiologi (16,17).

**Aplikasi Cardiac pada Virtual Reality**

**PENDIDIKAN.**

Realitas yang diperluas menyediakan berbagai kemungkinan untuk aplikasi pendidikan dan pelatihan. Beberapa aplikasi memanfaatkan imersi yang memungkinkan VR untuk mensimulasikan seluruh lingkungan operasi bersama dengan materi pendidikan. Kelas aplikasi lain membawa simulasi medis yang sudah ada untuk tablet dan ponsel ke VR sebagai platform berikutnya yang akan diakses oleh para peserta. Kasus penggunaan VR ini umumnya tersedia di sebagian besar platform VR konsumen. Aplikasi lain memanfaatkan kehadiran MxR untuk memungkinkan beberapa pengguna untuk berinteraksi dan berdiskusi satu sama lain saat melihat materi pendidikan yang sama dalam lingkungan alam. Aplikasi ini bergantung pada pandangan melalui sifat MxR, dikombinasikan dengan kebebasan headset yang tidak terpasang untuk berjalan-jalan dan berkomunikasi secara alami.

**Jantung maya Stanford.** The Stanford Virtual Heart Project (18), bekerja dengan Lighthaus, Inc., menggunakan headset VR imersif untuk tujuan pendidikan. Proyek ini memiliki beberapa senjata yang berbeda. Yang pertama diarahkan pada pendidikan pasien dan keluarga untuk membantu keluarga lebih memahami anatomi jantung anak mereka, yang saat ini terbatas pada gambar dan model plastik. Peningkatan pemahaman yang mendalam ini seharusnya membantu orang tua lebih baik berpartisipasi dalam perawatan medis anak mereka yang rumit. Aplikasi ini telah diperluas ke mahasiswa kedokteran Stanford dan peserta pelatihan, yang dapat memvisualisasikan anatomi normal dan abnormal dan memahami bagaimana anomali kongenital mempengaruhi fisiologi. Menggunakan headset VR yang sepenuhnya imersif, para siswa dapat memeriksa, memanipulasi, dan berjalan melalui model, memberikan pemahaman yang lebih lengkap tentang anatomi dan fisiologi. Perpustakaan sekitar 2 lusin lesi kongenital umum tersedia untuk peserta pelatihan. Tujuan dari pengalaman ini adalah untuk memberikan pemahaman anatomis yang lebih dalam dari lesi ini, meningkatkan pemahaman dan kecepatan belajar dari fisiologi abnormal yang kompleks dan sekuel hemodinamik ini.

Aplikasi terakhir adalah penggunaan monitor 3D, Echopixel (seperti yang dibahas kemudian di bagian "Perencanaan Pra-Prosedural"), di ruang operasi kardiotoraks. Sebuah workstation 3D di ruang bedah memungkinkan untuk penilaian akurat anatomi intrakardiak dan geometri, yang mungkin sulit untuk dilihat setelah pasien ditempatkan ke bypass cardiopulmonary dan jantung didekompresi.

**HoloAnatomy.** Di Case Western Reserve University, peneliti menggunakan HoloLens (Microsoft) untuk mengubah pendidikan siswa kedokteran, khususnya anatomi (19). Kemampuan untuk lebih memahami hubungan anatomis 3D tidak hanya memudahkan kurva belajar, tetapi juga mendorong siswa untuk "berpikir seperti dokter." Dalam hubungannya dengan Klinik Cleveland, tim di Case Western Reserve University sedang mengembangkan kurikulum, HoloAnatomy, yang akan memungkinkan mahasiswa kedokteran untuk melakukan pembedahan holografik untuk lebih memvisualisasikan dan memahami organ dan sistem tubuh. Versi pratinjau dari perangkat lunak ini tersedia secara gratis untuk diunduh.

**PROSES PROSEDURAL.**

**EchoPixel.** Salah satu tampilan 3D pertama untuk mendapatkan persetujuan dari Administrasi Makanan dan Obat AS adalah sistem True 3D yang telah dikembangkan oleh Echopixel, yang diintegrasikan ke dalam workstation DICOM tingkat diagnostik. Sistem ini menyediakan visualisasi 3D menggunakan teknik yang mirip dengan yang digunakan dalam bioskop film 3D dan televisi konsumen 3D awal: dengan menyediakan gambar yang berbeda untuk setiap mata menggunakan kacamata khusus. Pengguna Echopixel yang memakai kacamata terpolarisasi dapat memanipulasi gambar pada layar menggunakan tongkat genggam. Studi kardiologi awal termasuk menggunakan sistem Echopixel untuk memvisualisasikan arteri pada pasien dengan atresia paru dengan arteri aortopulmoner kolateral mayor. Dalam penelitian ini (20), ahli jantung mengevaluasi pasien yang telah menjalani computed tomography angiography baik dengan menggunakan tampilan 3D atau pembacaan tradisional. Kardiolog menggunakan layar True 3D memiliki waktu interpretasi 13 menit dibandingkan dengan 22 menit bagi mereka yang menggunakan tampilan tradisional. Kedua kelompok itu sama akurat dalam interpretasi mereka ketika dibandingkan dengan kateter angiografi. Layar 3D Sejati juga digunakan sebagai bagian dari Proyek Jantung Maya Stanford (lihat bagian sebelumnya, "Pendidikan").

**VISUALISASI INTRAPROCEDURAL.**

**Peningkatan sistem visualisasi dan interaksi elektrofisiologi (Proyek ELVIS).** Saat ini, visualisasi dalam Laboratorium elektrofisiologi bergantung pada kombinasi fluoroskopi, sistem pemetaan elektroanatomik (EAMS), dan ekokardiografi (intracardiac  
echocardiography dan echocardiography transesophageal), dengan sebagian besar laboratorium menggunakan EAMS ditambah alat lainnya. Meskipun perbaikan dalam visualisasi telah menjadi sumber penelitian dan pengembangan selama bertahun-tahun, belum ada peningkatan yang sama dalam peningkatan interaksi. Prototipe kami, Enhanced ELectrophysiology and Interaction System (ELVIS), tidak hanya memberdayakan elektrofisiolog intervensional untuk memvisualisasikan geometri jantung 3D pasien tertentu dengan lokasi kateter real-time, tetapi juga memungkinkan kontrol langsung dari layar tanpa merusak sterilitas, yang merupakan kunci muka (21).

ELVIS dapat menampilkan data yang diekspor dari EAMS atau yang diperoleh secara pra-prosedural melalui computed tomography atau pencitraan resonansi magnetik jantung. Sampai saat ini, kami telah menghubungkan ELVIS ke EnSite Velocity EAMS (Abbott, Abbott Park, Illinois) melalui modul CoHesion untuk menampilkan data electroanatomic, termasuk geometri jantung, data lokalisasi kateter, dan peta electroanatomic, termasuk waktu aktivasi lokal dan peta tegangan. Baru-baru ini, kami telah menunjukkan kemampuan untuk menampilkan kasus historis untuk ditinjau, serta kasus langsung yang diamati secara real-time dari ruang kontrol. Selain kemampuan untuk meningkatkan visualisasi, sistem memungkinkan pengguna untuk menggunakan gesture, tatapan, atau kontrol suara untuk kontrol tampilan yang steril. Interaksi yang ditingkatkan ini memungkinkan intervensionis untuk mengendalikan secara langsung model kohesif tunggal ini dengan cara yang optimal untuk prosedur yang diberikan.

Fungsionalitas berbagi menyediakan satu model holografik jantung bersama sebanyak 5 pengguna dengan model tetap di dalam ruangan, memungkinkan semua pengguna untuk memvisualisasikan model dari titik pandang mereka. Menggunakan sistem berbagi, ada satu orang yang mengendalikan sistem pada waktu tertentu dengan kemampuan untuk memberikan hak pengontrol kepada pengguna lain. Video Tambahan 1 menunjukkan fungsionalitas saat ini dari prototipe, termasuk berbagi, kontrol gerakan, dan tampilan geometri intrakardiak dan gerakan kateter yang diperoleh dari sistem EnSite.

**Realview.** Pada tahun 2016, kelompok kardiologi pediatrik di Pusat Medis Anak-Anak di Schneider bermitra dengan Realview Medical Imaging (Yokneam, Israel) untuk menilai kelayakan menciptakan hologram digital 3D waktu nyata di laboratorium kateterisasi jantung standar (16). Holografi buatan-komputer Realview (CGH) dibuat menggunakan angiografi rotasi 3D yang digabungkan dengan 3D transesophageal echocardiography. Sebanyak 8 pasien yang terdaftar dalam penelitian ini, termasuk pasien dengan penyakit jantung struktural dan pasien jantung pasca operasi. Pada semua pasien, tim menghasilkan hologram 3D waktu nyata dengan akurasi tinggi (yang diukur dengan menginstruksikan 4 pengamat independen untuk mengidentifikasi penanda anatomi dalam hologram dan pencitraan jantung khas) dengan interaksi “sangat mudah” termasuk menandai gambar, memotong, zoom, rotasi , gerakan hologram, dan mengiris. Ini adalah studi pertama dari jenisnya untuk menunjukkan kelayakan dalam laboratorium kateterisasi jantung.

**REHABILITASI.**

**MindMaze.** MindMaze (San Francisco, California) menciptakan perangkat keras dan perangkat lunak di ruang VR dengan aplikasi medis saat ini  
di neurorehabilitasi. Solusi mereka saat ini, MindMotion PRO, dihapus oleh Administrasi Makanan dan Obat AS untuk digunakan pada pasien pasca stroke, menggabungkan realitas virtual, pencitraan otak, dan teknologi game untuk melatih otak untuk meningkatkan mobilitas ekstremitas atas. Pada pasien pasca stroke akut, studi klinis telah mendaftarkan pasien yang terlibat dalam sesi 20 hingga 30 menit sesegera 4 hari setelah perawatan tanpa pengawasan terus menerus, dengan peningkatan intensitas pelatihan dari waktu ke waktu (22). Semua pasien memiliki pengalaman pengguna yang positif menggunakan MindMotion PRO, dengan 90% melaporkan peningkatan kapasitas gerakan (22).

**Perangkat Kerja Realitas yang Diperpanjang**

Kemajuan signifikan dalam perangkat realitas yang diperluas telah memungkinkan aplikasi yang disebutkan sebelumnya, namun teknologi terus berkembang dengan cepat. Dalam teks berikut, kami menggambarkan sistem yang tersedia saat ini dan perangkat masa depan yang tentunya akan memperluas jumlah peluang untuk realitas yang diperluas untuk meningkatkan perawatan pasien.

**DISPLAY.**

Proyek display yang khas baik gambar koheren tunggal untuk 1 atau kedua mata sebagai tampilan dekat mata, atau dalam pasangan stereoskopik untuk simulasi 3D. Sistem-sistem monokular tidak tembus pandang atau pandangan tembus pandang, dan menghindari gangguan penglihatan normal dengan menempatkan suatu tampilan kecil di luar bidang visual kerja yang normal. Hal ini memungkinkan pengguna untuk mengakses informasi yang terdapat pada layar "sekilas." Kemampuan yang setara dapat dicapai dengan menggunakan tampilan biokular, atau layar dapat memberikan 2 gambar berbeda untuk memberikan pasangan gambar stereoskopik. Kebanyakan platform HMD menghasilkan pasangan gambar dengan menggunakan layar panel atau proyektor kecil dan serangkaian optik untuk memperbesar gambar dan menyimulasikan proyeksi pada jarak untuk memudahkan pemfokusan, seperti yang diilustrasikan untuk beberapa sistem umum pada Gambar 2. Untuk jarak proyeksi dan resolusi yang ditentukan, karena tampilan yang jelas dan bidang pandang (FOV) meningkat, ukuran piksel nyata juga meningkat.

**Display 3D.** Kebanyakan tampilan 3D menggunakan jendela aktif atau pasif untuk mensimulasikan 3D stereoskopik tanpa tampilan dekat mata. Tampilan ini mensimulasikan kedalaman yang sama dengan display yang dipasang di kepala, dengan memproyeksikan gambar yang dipindahkan ke setiap mata, yang dikendalikan oleh jendela atau polarisasi dalam kacamata untuk memberikan persepsi kedalaman. Tampilan ini dapat digunakan untuk menavigasi dan berinteraksi dengan gambar medis dalam pengaturan kantor konvensional menggunakan stylus untuk interaksi (EchoPixel, Zvr Hewlett Packard). Display saat ini sudah tersedia dan dapat diintegrasikan ke dalam alur kerja rumah sakit; namun, kerugian termasuk penggunaan kacamata yang diperlukan, kapasitas untuk mendukung hanya satu pengguna pada satu waktu, dan volume kedalaman terbatas untuk pelacakan dan tampilan.

**Tampilan bidang cahaya.** Tampilan medan cahaya menggunakan proyeksi cahaya langsung ke retina. Keuntungan utama dari teknik ini adalah bahwa mereka mengkodekan posisi cahaya dan sudut, menyediakan gambar yang lebih realistis dengan menciptakan kedalaman. Tampilan medan cahaya yang sebenarnya membutuhkan kapasitas komputasi yang jauh lebih banyak untuk membuat titik di ruang dan menghasilkan berkas cahaya yang diperlukan. Tampilan Bidang Cahaya Avegant (Belmont, California) belum tersedia secara komersial dan bukan tampilan bidang terang, penuh, terang, tetapi mengeliminasi kerumitan ini dengan mengakomodasi sejumlah kedalaman fokus tetap terbatas. Tampilan jenis ini secara fundamental memperdagangkan resolusi spasial atau temporal dalam bidang tampilan untuk resolusi di kedalaman pesawat selain FOV HMD stereo tradisional.

**Holografi berbasis interferensi.** Tampilan holografik mengacu pada holografi berbasis interferensi, yang dihasilkan menggunakan modulator cahaya spasial (SLM) untuk menciptakan hologram dalam ruang, pada framerata video. SLM membentuk cahaya referensi yang masuk untuk mereplikasi gelombang depan yang akan berasal dari objek nyata pada posisi yang sesuai dalam ruang 3D, menciptakan hologram 3D yang nyata, multifokal,. Pendekatan ini digunakan oleh Realview untuk menampilkan gambar 3D hati (dijelaskan dalam teks sebelumnya). Proses menghasilkan pola interferensi untuk model 3D yang diberikan dan menghasilkan instruksi untuk SLM adalah komputasi kompleks, tetapi hologram yang dihasilkan terbaik memenuhi persyaratan sistem visual manusia. Secara umum, CGH, bagaimanapun, dibatasi oleh render volume, sudut pandang, dan kecerahan.

**Waveguides.** Ada banyak varian tampilan berbasis waveguide yang berbeda (23), tetapi semuanya secara fundamental bergantung pada pemantulan keluaran layar melalui refleksi ke tampilan tampilan di depan mata pengguna. Pengorbanan mendasar dari display ini adalah biaya dan kompleksitas desain yang diberikan meningkat saat FOV meningkat. Desain yang relatif tidak rumit dari cermin setengah reflektif, yang digunakan oleh perangkat seperti ODG R-9 (San Francisco, California), menggunakan cermin setengah reflektif tunggal dan reflektor / combiner, yang pertama kali dikembangkan untuk display head-up pesawat. Perbaikan pada desain ini bergantung pada miniaturisasi cermin menggunakan reflektor polarisasi tertanam (Lumus, Rechovot, Israel), susunan cermin mikro (Optinvent, Monte Sereno, California), dan permukaan tergores difraktif (HoloLens, Microsoft; Vuzix, Rochester, New York) atau grating holografik (Digilens, Sunnyvale, California; WaveOptics, Oxfordshire, Inggris). Cermin mikro memberikan tampilan tampilan yang ringkas dan hemat biaya, sedangkan pemandu gelombang difraktif, meskipun saat ini lebih mahal untuk diproduksi, dapat mencapai sistem optik yang kompleks dalam paket yang relatif tipis. Tampilan view-through ini memungkinkan seorang klinisi untuk memvisualisasikan data dalam 2D ​​atau stereo 3D tanpa menghalangi bidang visual normal.

**INTERAKSI VIRTUAL.**

Luas dan kedalaman interaksi dengan platform tampilan yang berbeda ini telah berkembang sebagai kemampuan sensor dan pemrosesan  
telah meningkat, mulai dari pelacakan bebas penanda ke input saraf dan suara. Bentuk interaksi paling sederhana yang umum untuk sebagian besar HMD adalah melalui gerakan kepala, diukur dengan akselerometer di layar. Gerakan sudut ini memperbarui tampilan berdasarkan arah yang ditunjuk oleh kepala, dan kursor display mewakili pusat fokus pengguna yang dirender dalam posisi tetap relatif terhadap tampilan. Kursor pandangan ini biasanya diberikan pada garis tengah vertikal layar, meskipun tidak harus di tengah FOV tergantung pada pabrikan dan ergonomi. Jika kursor kursor berada pada elemen interaktif, seperti tombol, biasanya ada 2 metode interaksi dengannya. Interaksi berbasis pandangan pertama disebut sebagai tatapan-tatapan, dan dipicu dengan memegang kursor kursor pada elemen interaktif untuk waktu yang ditentukan oleh aplikasi. Jika HMD dilengkapi dengan perangkat keras pelacakan tangan internal atau eksternal, pengguna juga dapat memulai aktivasi elemen interaktif menggunakan gerakan tangan yang diakui, yang dalam kombinasi dengan pandangan disebut sebagai perintah tatapan-gerakan.

Selain perintah berbasis pandangan ini, beberapa layar dapat mengenali gerakan tangan yang lebih kompleks atau perintah gestur pengendali dengan melacak tangan atau pengontrol di tangan. Pengendali memiliki manfaat tambahan mendukung tombol fisik di tempat untuk lebih meningkatkan interaksi. Akhirnya, sebagian besar platform mendukung mikrofon untuk mendukung berbagai tingkat otomatisasi perintah suara. Meskipun interaksi gerakan menawarkan cara yang kaya dan efisien untuk berinteraksi dengan suara lingkungan, suara dan pandangan-diam memiliki keuntungan menjadi hands-free, dan pengendali kehilangan keuntungan karena sentuhan bebas.

**SENSOR.**

Unit pengukuran inersial ringkas (IMU), pelacakan optik, kamera penginderaan kedalaman (Intel Real Sense, Microsoft Time of Flight) dan suara Pengenalan (Asisten Google, Microsoft Cortana) menyediakan dasar untuk navigasi dan kontrol untuk sebagian besar platform. Sebagian besar tampilan VR komersial menggunakan pelacakan optik terpasang headset atau eksternal-tetap (Optitrack, Corvallis, Oregon; Polaris, Madinah, Minnesota; Scopis, Cambridge, Massachusetts) untuk menyediakan pemosisian dan pelacakan akurat dalam volume, yang dikenal sebagai pelacakan "luar-dalam" ( Gambar 3, kiri). Platform AR dapat mengandalkan pelacakan optik yang sama, atau menggunakan kamera onboard untuk melacak penanda fidusia dalam lingkungan. IMU menyediakan sudut resolusi tinggi dan informasi laju untuk memperbarui tampilan di layar, yang digabungkan dengan informasi pelacakan optik untuk memberikan pembaruan koreksi ke sistem pelacakan, yang dikenal sebagai pelacakan "keluar-keluar" (Gambar 3, kanan). Komunikasi jaringan dapat memberikan akses ke algoritme pengenalan suara yang sangat terlatih, atau model lokal yang lebih sederhana dapat digunakan untuk perintah tertentu. Pelacak mata dekat mata (Pupil Labs, Berlin, Jerman) kamera tersedia untuk pelacakan sederhana sebagai perangkat input atau sebagai tambahan untuk masukan gerakan. Ultrasound array (Ultrahaptics, Bristol, Inggris) dapat memberikan umpan balik haptic steril melalui udara bebas dengan menggunakan speaker ultrasonik untuk menimbulkan sensasi pada kulit. Ini dapat membantu mengatasi kurangnya umpan balik saat berinteraksi dengan objek digital.

**Tantangan**

Penerapan modalitas yang berbeda dari kenyataan yang diperluas untuk pendidikan, perencanaan pra-prosedural, bimbingan intraprocedural, dan penggunaan terapeutik tergantung pada keuntungan dan keterbatasan yang melekat, khususnya sehubungan dengan isolasi dari lingkungan fisik alam. VR dan MeR benar-benar menutup bidang visual normal, sedangkan AR dan MxR meningkatkan bidang visual. Ini paling jelas ketika daya dihilangkan dari layar; VR dan MeR benar-benar buram dan harus dihapus agar dapat dilihat, sedangkan AR dan MxR transparan dan hanya tambahan digital yang dihapus. VR, misalnya, dapat memungkinkan seorang siswa untuk berinteraksi dalam simulasi yang sepenuhnya imersif, terisolasi dari gangguan luar. Namun, AR, MeR, dan MxR akan memungkinkan interventionalists untuk mempertahankan kehadiran di ruang fisik untuk melakukan prosedur serta mempertahankan kemampuan untuk berinteraksi dengan pasien dan bekerja sama dengan personil pendukung mereka. Platform MeR, bagaimanapun, menyajikan risiko keamanan potensial selama prosedur dalam hal kehilangan daya, yang akan menyebabkan obstruksi lengkap dari bidang visual normal.

Platform realitas yang diperluas dibatasi terutama oleh biaya, ukuran, berat, dan kekuatan untuk mencapai kualitas visual tertinggi, mobilitas, kecepatan pemrosesan, dan interaktivitas. Kualitas visual tergantung pada resolusi, kecerahan, kedalaman fokus, dan FOV. Teknologi tampilan adalah aspek yang paling menuntut dari realitas yang diperluas, dan umumnya merupakan desain terbesar dan kendala biaya (23). Untuk sistem 3D, ini diperparah dengan membutuhkan pasangan stereoskopik gambar untuk menghasilkan persepsi kedalaman melalui vergence, atau perbedaan sudut antara 2 display (Gambar 4, kiri). Sistem tampilan harus mengorbankan ukuran dan biaya dengan menyediakan kualitas visual maksimum untuk menyesuaikan kemampuan sistem visual manusia (HVS). Batas bawah ketajaman visual manusia normal (kira-kira 20/20 atau 6/6) adalah 1 arc min / pixel dengan sekitar 150o hingga 170o oleh 135o hingga 150o FOV elips (24-26). Sistem tampilan yang mencapai resolusi sudut ini mengandung piksel yang dianggap tidak dapat dibedakan, sering disebut oleh Apple sebagai Tampilan Retina. Ini setara dengan sekitar 9.000 oleh 8.100 piksel / mata persyaratan untuk sepenuhnya meniru dan membenamkan sistem visual manusia. Sebagai perbandingan, tampilan 4K HMD mengandung 3.840? 2,160 piksel dan umumnya membutuhkan grafik kelas workstation untuk diproses. Maklum, resolusi ini dan FOV saat ini tidak layak secara ekonomi dengan optik dan teknologi tampilan saat ini. Akibatnya, produsen perangkat berkompromi FOV, kerapatan piksel, dan kecerahan layar untuk mencapai kemampuan optimal untuk aplikasi tertentu (Tabel 2). Biaya, ukuran, berat, dan daya hanya akan berkurang seiring kemajuan teknologi, seperti yang ditunjukkan oleh rilis terbaru Apple iPhone X (27), yang berisi miniatur, versi lebih rendah dari sensor kedalaman, IMU, dan pemrosesan yang diperlukan untuk perangkat canggih, perangkat genggam AR.

Kedalaman pada jarak dekat juga dirasakan melalui akomodasi (Gambar 4, kanan), atau persepsi kedalaman karena perbedaan dalam kedalaman fokus, yang merupakan tantangan yang dihadapi semua tampilan stereoskopik konvensional. Akomodasi diperlukan untuk memungkinkan pengguna untuk fokus pada instrumen dan objek digital pada jarak simulasi yang sama (28) (misalnya, sorotan bimbingan bedah, dalam "ruang pribadi" dan "ruang tindakan"). Disparitas antara kedalaman vergence ditampilkan oleh HMD dan akomodasi yang diharapkan oleh HVS mengacu pada konflik vergence dan akomodasi (VAC) dan bertanggung jawab atas ketidaknyamanan pada jarak kerja yang dekat ini (29). Kebanyakan sistem tampilan hanya mendukung satu, bidang fokus tetap untuk semua elemen digital (Gambar 4), meskipun beberapa teknologi yang muncul dapat menyediakan beberapa pesawat fokus tetap dengan menggunakan optik adaptif.

**Diferensiasi Platform**

Setiap keputusan desain untuk mengurangi tantangan ini mempengaruhi penerapan untuk digunakan dalam setiap lingkungan prosedural. Tampilan AR dan MxR memberikan kompromi terbaik antara anotasi digital dan FOV yang jelas. Kepadatan piksel yang tinggi, perangkat FOV yang besar yang dirancang untuk penggunaan desktop atau kantor, membutuhkan sebuah umbilical ke workstation bertenaga tinggi untuk mendukung pemrosesan yang diperlukan untuk display mereka. Perangkat ini memberikan tampilan digital yang lebih besar dan tampilan resolusi yang lebih tinggi, tetapi dengan mengorbankan pengaturan rumit sebelum prosedur dan kemampuan manuver yang terbatas selama prosedur. Platform yang tidak terpasang umumnya memiliki FOV yang berkurang dan memerlukan daya baterai, tetapi memungkinkan gerakan tidak terbatas.  
Platform CGH menyediakan hologram nyata yang paling realistis dalam jarak kerja yang dekat, tetapi masih membutuhkan sistem pendukung besar yang tertambat ke layar, dan memiliki volume kerja yang terbatas. Tampilan CGH ini dan lainnya yang mengkompensasi VAC sangat cocok ketika interaksi medan dekat antara digital dan fisik sangat penting (misalnya, proyeksi citra pra-prosedural ke bidang bedah). Sistem yang tidak dapat mensimulasikan akomodasi dapat menghindari ketidaknyamanan dengan menempatkan objek digital lebih jauh, di mana HVS kurang sensitif terhadap disparitas akomodasi. Platform yang memanfaatkan pelacakan optik eksternal mencapai volume pelacakan konsisten tetapi memerlukan peralatan tambahan dan garis pandang yang jelas antara kamera dan perangkat, yang meningkatkan instalasi awal dan kompleksitas pemeliharaan. Platform AR Mobile dengan pelacakan keluar dari posisi dan gerakan menyediakan platform paling fleksibel untuk penggunaan intraprocedural, dan dapat mengurangi VAC melalui penempatan objek digital secara hati-hati.

**Kesimpulan**

Kemajuan perangkat keras yang cepat didorong oleh revolusi dalam komputasi bergerak akhirnya membawa perangkat yang dapat dikerjakan untuk aplikasi medis. Perangkat ini memiliki potensi untuk menyediakan dokter dengan antarmuka steril yang memungkinkan mereka untuk mengontrol gambar 3D. Data awal menunjukkan bahwa peningkatan visualisasi ini akan memungkinkan dokter untuk belajar lebih cepat, menafsirkan gambar lebih akurat, dan menyelesaikan intervensi dalam waktu yang lebih singkat. Perbaikan dalam kinerja dokter berdasarkan informasi yang lebih baik kemungkinan besar akan diterjemahkan ke dalam prosedur biaya rendah dan hasil yang lebih baik untuk pasien.