

Realitatea Virtuală în Medicină- Realizări, Probleme și Tendințe

Oana Bălan, Alin Moldoveanu, Florica Moldoveanu, Anca Morar

Facultatea de Automatică și Calculatoare, Universitatea "Politehnica" București

Splaiul Independenței, nr. 313, București, 060032, Romania

oanab_2005@yahoo.com, alin.moldoveanu@cs.pub.ro, florica.moldoveanu@cs.pub.ro,
anca.morar@cs.pub.ro

REZUMAT

Realitatea virtuală este o tehnologie inovatoare, cu o mare varietate de potențiale beneficii în mai multe domenii medicale. Scopul principal al realității virtuale este de a furniza simțurilor umane o scenă simulată a realității, ce este identică cu corespondenta sa naturală. Avantajele utilizării mediilor virtuale în sănătate sunt descrise ca fiind nu doar revoluționare, dar, de asemenea, extrem de utile, atât pentru medici, cât și pentru pacienți. Această lucrare prezintă stadiul actual al cercetărilor în domeniul realității virtuale, tehnologia utilizată pentru a oferi servicii de încredere pacienților, precum și unele dintre aplicațiile cele mai interesante în domeniul imagisticii computerizate, telemedicinii, educației medicale, sau planificării și formării chirurgicale.

Cuvinte cheie

realitate virtuală, mediu virtual, simulare, educație medicală, reabilitare.

Clasificare ACM

H.5.1 Multimedia Information Systems.

INTRODUCERE

Acest articol are ca scop prezentarea principalelor tehnologii ce utilizează realitatea virtuală în medicină, stadiul actual al cercetărilor în acest domeniu, precum și unele dintre cele mai atractive aplicații realizate până în prezent.

REALITATEA VIRTUALĂ

Realitatea virtuală (RV) este un concept folosit în general pentru a descrie o interfață om-calculator ce înlesnește comunicarea cu mașina, într-un mod diferit de formele clasice. Simțul de prezență într-un mediu virtual (imersiunea) este principala caracteristică ce definește RV. Ivan Sutherland afirmă că "ecranul calculatorului este o fereastră prin care se vede o lume virtuală ce pare reală, se comportă real, sună real, în care se simte real" [1].

Termenul de "realitate virtuală" a fost folosit pentru prima dată de Jaron Lanier, inițiatorul proiectului de cercetare VPL, la sfârșitul anilor 1980, și a fost descris ca o interfață om-calculator ce imită un cadru realist în care participanții interacționează într-o lume virtuală 3D ce simulează realitatea [2].

Realitatea augmentată (Augmented Reality) este o extindere a realității virtuale, în care elementele lumii

reale sunt completate prin intrări furnizate de către calculator – sunet, video, elemente de grafică.

Un sistem de realitate augmentată generează o perspectivă compusă pentru utilizator, ce rezultă din îmbinarea unei scene reale și a uneia generate pe calculator, ce augmentează scena reală cu alte elemente care au ca scop îmbunătățirea percepției senzoriale asupra lumii simulate.

Scopul realității augmentate este de a crea un sistem perfect, în care utilizatorul să nu poată sesiza nicio diferență între lumea reală și cea virtuală.

Simularea

Realitatea virtuală nu poate fi pe deplin înțeleasă fără definirea conceptului de simulare. Simularea este un exercițiu care permite utilizatorului sau participantului în mediul virtual să reproducă evenimente care sunt posibil a se materializa numai în condiții reale. De aceea, o simulare eficientă poate fi realizată numai într-un cadru generat de calculator.

Mediul generat de calculator este un model 3D, organizat ca o bază de date orientată-obiect, în cadrul căreia fiecare obiect are un corespondent virtual. Interacțiunea om-calculator se realizează într-un mod natural și are loc din punctul de vedere al participantului la experiența virtuală. Simularea legilor fizicii în dinamica mediului virtual, cum ar fi gravitația, ofera o perspectivă mai intuitivă mediului virtual.

Interacțiunea în mediul virtual

Modalitățile uzuale de interacțiune cu calculatorul (mouse-ul, tastatura), au evoluat la o paradigmă mai complexă, care este adecvată pentru lumea virtuală multi-dimensională. Interfața hardware este compusă din două categorii de dispozitive: senzori care controlează lumea virtuală și efectori, care oferă feedback-ul utilizatorului [1]. Dispozitivele de interacțiune om-calculator care combină principiile de senzori și efectori sunt: îmbrăcămintea specială (DataGlove și DataSuit), display-urile montate pe cap (HMDS- Head Mounted Displays) și sistemele de sunet 3D [7].

Pentru a crea o impresie cât mai realistă a spațiului virtual, sunt necesare două componente principale: algoritmi care produc imagini fotorealiste ale scenei virtuale și dispozitive care afișează imaginile rezultate. Dacă la începutul erei graficii pe calculator, rezultatele algoritmilor de rendering erau imagini statice sau secvențe animate, sub forma unor filme scurte, în prezent producerea și afișarea imaginilor poate fi efectuată "în

timp real”, condiție necesară pentru o imersiune reală a utilizatorului în spațiul virtual. Redarea în timp real a mediilor virtuale complexe este posibilă în prezent datorită unităților de prelucrare grafică din dotarea calculatoarelor personale. Viteza de procesare este asigurată prin procesoare specializate și grad înalt de paralelism.

Dispozitive de interacțiune

DataGlove și DataSuit utilizează senzori ce monitorizează mișcările umane în timp real. Ei determină poziția și orientarea în spațiu și calculează coordonatele tridimensionale dinamic, după cum se mișcă utilizatorul. Aceste dispozitive de urmărire oferă poziția de reper, determină gesturile utilizatorului și se atașează pentru a se potrivi structurilor anatomice ale acestuia [7]. HMD-urile oferă câte o imagine pentru fiecare ochi, generând o perspectivă stereoscopică asupra realității [1]. Ivan Sutherland a pus bazele HMD-urilor la mijlocul anilor 1960, atunci când acest dispozitiv inovator a început prin a spori sentimentul de imersiune în mediul virtual creat. Senzația de imersiune în lumea virtuală este amplificată prin folosirea sunetului 3D spațializat. Integrarea sunetului în mediul virtual medical sporește cantitatea de informații obținute în timpul interacțiunii și înlesnește calcularea distanțelor dintre punctele date.

Senzația de mișcare poate fi recreată prin folosirea unei platforme de mișcare, utilizată mai ales în simulatoarele de zbor. Haptica, concept care se referă senzațiile tactile și de mișcare (kinestezie), generează percepția de atingere și de rezistență în lumea virtuală. Simularea tactilă este oferită de actuatori care produc senzații termice, mecanice sau vibrații. Feedback-ul de forță este generat de roboți, care, în loc să producă o mișcare activă, contrabalansează mișcările utilizatorului. Dispozitivele curente variază, de la dispozitive simple, la dispozitive exoskeletale tridimensionale cu un anumit număr de grade de libertate, care oferă un feedback de forță maximă de aproximativ 10 newtoni.

În afară de aceasta, s-au realizat cercetări pentru a induce senzația de temperatură (căldură și frig) în aplicațiile din realitatea virtuală sau simularea și integrarea de dispozitive olfactive.

ASPECTE GENERALE PRIVIND RV IN MEDICINA

În prezent, RV în medicină evoluează în mod semnificativ, datorită tehnologiei ieftine și a soluțiilor terapeutice accesibile.

Istoric

Primele aplicații ale RV în sănătate datează de la începutul anilor 1990, atunci când medicii au avut nevoie de o tehnologie avansată pentru a vizualiza datele medicale complexe, mai ales în timpul planificării chirurgicale și a intervențiilor. Acestea au fost inspirate de folosirea simulatoarelor de zbor în timpul antrenamentelor piloților. Câțiva ani mai târziu, aplicațiile RV s-au extins și în alte domenii, cum ar fi psihologia și tehnicile de reabilitare, imagistica și diagnoza medicală, chirurgia la distanță sau medicina de urgență. Astăzi, tehnologia bazată pe realitatea virtuală a evoluat, costurile s-au redus, iar dispozitivele de intervenție au devenit din ce în ce mai variate ca funcții și ca performanță.

Aspecte tehnologice

Dezvoltarea de aplicații de realitate virtuală se bazează, la nivelul software, pe motoare 3D și pe diferite pachete de instrumente, de la "high-end" (seturi de instrumente de creație care au nevoie de abilități avansate de programare), la pachete pentru dezvoltare mai simple. Aceste tehnologii de implementare reunesc caracteristici comune, cum ar fi crearea și importul de obiecte 3D sau interacțiunea cu utilizatorul prin evenimente vizuale sau auditive. Limbajul de programare cel mai des folosit pentru construirea de aplicații virtuale este C++. Alte instrumente software care permit dezvoltarea de medii virtuale sunt: VRML, 3D Studio, Pro Engineer, Unigraphics EDS sau Multigen [4].

În ceea ce privește interfața de comunicare cu pacientul, reprezentarea realității virtuale se bazează pe cei "trei I" - intensitatea imersiunii, interactivitatea și informația. Eficiența RV poate fi îmbunătățită prin furnizarea unei experiențe mai "realiste" și prin creșterea rezoluției grafice, a nivelului de interactivitate și a libertății de interacțiune, a capacității utilizatorului de a manipula, naviga și selecta mai multe obiecte în mod natural. În afară de acestea, "simțul prezenței", descris ca fiind "sentimentul de a fi acolo", este un element cheie pentru dezvoltarea unui sistem de RV competent, care se bazează pe implicarea activă a utilizatorilor [4].

Avantaje ale utilizării RV în medicină

Principalele beneficii aduse de realitatea virtuală în medicină sunt:

- Imersiunea crescută;
- Interacțiunea informațională și senzorială complexă;
- Reprezentarea și simularea avansată, bazată pe imitarea formei, aspectului și comportamentului unui obiect din lumea reală; senzații percepute la nivel tactil (texturi, temperaturi), sau provocate de forțe de rezistență, reacțiune sau vibrații;
- Posibilitatea de a modifica realitatea prezentată, pentru a scoate în evidență anumite evenimente, sau a introduce informații suplimentare;

Probleme de siguranță

O preocupare comună în dezvoltarea de tehnologie bazată pe RV este problema de securitate, asociată cu experiența simulată în mediul virtual. RV poate induce probleme fizice și psihice, cum ar fi: răul de mișcare, lipsa de control, reacțiile nepotrivite în lumea reală, un sentiment diminuat de prezență. În general, consecințele negative ale folosirii RV sunt rare, ușoare și pasagere.

IMAGISTICA ȘI DIAGNOZA MEDICALĂ

Aplicațiile de diagnoză în realitatea virtuală includ CT (Tomografia Computerizată), MRI (Rezonanța Magnetică), razele X și radiografia computerizată. Imaginile medicale obținute de la toate aceste tipuri de imagini sunt transferate prin sistemele PACS (Picture Archiving and Communication System). Segmentarea unei imagini volumetrice, fie RMN sau CT, este un proces structural, proiectat pentru a selecta zonele care vor fi utilizate în alte scopuri: vizualizare, măsurarea structurilor, planificarea intervențiilor chirurgicale, simulări, selectarea regiunilor de interes. Dispozitivele de

intrare care au fost introduse pentru a lucra cu datele sunt mouse-ul 3D sau sistemele haptice care oferă o abordare intuitivă față de imersiunea în spațiul virtual. Datele obținute din aceste dispozitive sunt prezentate pe un monitor 2D sau ca proiecție 3D.

Testele efectuate pe imagini radiografice la nivelul soldului au servit la extragerea unor parametri importanți pentru operația de artroplastie, utilizând implementări ale algoritmului Canny și a transformatei Hough. O direcție de cercetare viitoare ar fi utilizarea arhitecturii CUDA pentru accelerarea algoritmilor de analiză, procesare și vizualizare în 2D și pentru imagini medicale 3D [11].

De asemenea, aplicația Notes poate fi folosită ca o metodă alternativă pentru stagnarea evoluției tumorii în cazul pacienților ce suferă de carcinomatoză peritoneală și ar putea avea rezultate mai bune în comparație cu tehnicile de imagistica actuale. Cu toate acestea, Notes este într-un stadiu incipient de dezvoltare, iar punerea sa în aplicare în chirurgia oncologică ar trebui să se facă foarte prudent, și numai după o evaluare atentă [12].

EDUCAȚIA MEDICALĂ

Primul domeniu din medicină care a fost atins de influența realității virtuale a fost educația medicală. Îmbunătățirile în ceea ce privește stocarea imaginilor medicale au condus la dezvoltarea unui proiect inovator, numit Biblioteca Națională Umană (august 1991, Universitatea din Colorado), o bază de date digitală ce conține mii de imagini provenite din scanarea anatomiei cadavrelor, sub forma unor felii transversale milimetrice (intervale de 0,33 mm și o capacitate volumetrică de aproximativ 39 Gb pentru reprezentarea femeilor, iar pentru datele de sex masculine, imaginile axiale stabilite sunt preluate la intervale de 1mm, cu o capacitate totală de 15 Gb) [4].

Reprezentările tridimensionale extind metoda tradițională de predare, bazată pe manuale, permițând astfel studenților să exploreze corpul uman virtual dintr-o gamă largă de unghiuri și de poziții – să navigheze în jurul și în spatele organelor, să examineze în detaliu, să analizeze din interior [1]. Paradigma de studiu interactivă 3D permite o înțelegere mai profundă a conexiunilor și a relațiilor dintre structurile anatomice, lucru ce nu poate fi obținut prin alte mijloace.

CHIRURGIA

Practică și formare

Utilizarea realității virtuale în practica chirurgicală datează încă de la începutul anilor 1980. Printre realizările remarcabile din acest domeniu, se numără: dispozitivele robotice pentru intervenții și asistență la distanță, sau echipamentele hardware și software de simulare, care vin în sprijinul asigurării și dobândirii aptitudinilor psihomotorii necesare pentru a efectua proceduri invazive [6]. Formele intuitive de comunicare cu sistemul permit medicilor sau studenților să exerseze sute de intervenții înainte de a realiza procedurile chirurgicale reale. Aceasta este o practică fără risc, care reduce efectele negative ale operațiilor: lipsa de experiență a medicilor, erorile umane, complicațiile, sau alte scenarii frecvente care pot fi evitate. În ceea ce privește exersarea aptitudinilor chirurgicale,

organele virtuale acționează ca cele reale, fiind reprezentate cu fidelitate ridicată și fiind capabile să răspundă la mișcările instrumentelor de simulare. În afară de aceasta, studenții simt un feedback de forță și de rezistență din partea organelor operate și pot vizualiza pe ecran rezultatele procedurilor pe pacientul virtual [4].

Planificarea chirurgicală

Dispozitivele chirurgicale de planificare sunt similare cu sistemele de antrenare, dar cu o diferență: un sistem de planificare chirurgicală preia datele reale ale pacientului și le combină în timp real, printr-o interacțiune grafică pe calculator ce reproduce anatomia pacientului. RV oferă șansa de a repeta o intervenție chirurgicală de un număr mare de ori înainte de procedura reală, în scopul de a îmbunătăți actul medical [1].

Planificarea chirurgicală este pusă în aplicare în Uniunea Europeană printr-un proiect numit IERAPSI (Integrated Environment for Rehearsal and Planning of Surgical Interventions), care se bazează pe vederea stereoscopică virtuală [6].

În cadrul unui proiect realizat de cercetătorii de la NASA, numit Virtual Collaborative Clinic Project, cercetătorii au dezvoltat Cybercalpel, un sistem de simulare pentru planificarea chirurgicală. Acest sistem reconstituie un organ uman preluat de la un dispozitiv CT și proiectează un model virtual pentru procedura practică. De exemplu, endoscopia virtuală rezolvă problemele întâlnite în intervențiile endoscopice clasice, cum ar fi complicațiile (perforațiile, hemoragiile), sau costurile ridicate. Endoscopia virtuală îmbină tomografia cu tehnicile tridimensionale pentru a reproduce un organ similar cu cel original. Modelul virtual 3D permite chirurgului să navigheze în jurul organului simulat. Acest tip de endoscopie este non-invazivă și mai puțin costisitoare, neînregistrându-se complicații raportate până în prezent.

În unele discipline clinice, cum ar fi neurochirurgia, proiectarea diverselor tehnici și anticiparea rezultatului procedurii duc la dezvoltarea un tratament individualizat personalizat, cu un impact mare asupra rezultatelor intervenției [9]. Reconstituirea 3D sunt extrem de utile în planificarea intervențiilor neurochirurgicale invazive. Principiile stereotacticii - capacitatea de a localiza un anumit punct folosind poziții geometrice relative, sunt îndeplinite prin punerea în aplicare a RV în planificarea chirurgicală. Un robot ghidat, proiectat de LeValee et al și Shahidi et al [2], navighează printr-un set de date tridimensionale și integrează informațiile primite de la un scanner RMN pentru a afișa modificările anatomice ale țesutului cerebral.

Chirurgia minim invazivă

O formă de simulare chirurgicală este chirurgia minim invazivă (MIS- Minimally Invasive Surgery). Aceasta presupune ca medicul să opereze pe un monitor unde se afișează un model al organelor și o reprezentare vizuală a interiorului corpului uman. Instrumentele de lucru oferă o simulare a atingerii și a rezistenței, iar organele virtuale se comportă ca cele naturale, prin furnizarea unui efect de acțiune-reacțiune și prin schimbarea reflecției luminii atunci când sunt atinse sau tăiate.

MIST este un sistem de formare și de evaluare a procedurilor laparoscopice, dezvoltat în Marea Britanie. Sistemul MIST oferă posibilitatea de a programa o sarcină, de a o înregistra și de a o relua mai târziu, de a analiza informațiile, de a atinge și separa țesuturile și vasele de sânge, de a determina performanța, precizia, erorile, de a calcula economia de mișcări atunci când sunt utilizate instrumentele medicale virtuale.

Progresele în chirurgia minim invazivă și în procedurile endoscopice includ: camere video laparoscopice, simulatoare bazate pe feedback-ul de rezistență la atingere, reprezentare în timp real, realizarea de intervenții abdominale deschise, proceduri neurochirurgicale, retiniene sau artroscopice [10].

RECUPERARE ȘI REABILITARE

Realitatea virtuală pentru recuperarea și tratamentul tulburărilor fizice și psihice a suferit schimbări dramatice în ultimul deceniu. Aplicațiile importante includ mediile simulate, tehnicile de reabilitare după accidente vasculare cerebrale, dispozitivele eye-tracker pentru terapia fobiilor-acrofobia (frica de înălțime), frica de păianjeni, atacurile de panică, problemele de imagine și de stimă de sine, tulburările de alimentație sau frica de a zbura cu avionul [8].

Paradigma utilizării RV în reabilitare oferă posibilitatea de a concepe scenarii dinamice în medicina sportivă, în neurologie, fizioterapie, ortopedie și boli degenerative, cum ar fi Parkinson sau scleroza multiplă. Pacienții sunt testați într-un mediu controlat, care nu poate fi reprodus prin orice alte mijloace. Timpul de recuperare poate fi redus în mod semnificativ în cazul anumitor deficiențe neuromusculare și scheletice. Sisteme de RV pentru reabilitare utilizează echipamente speciale, cum ar fi DataGlove, DataSuit, HMD-uri, dispozitive de urmărire, sisteme de sunet 3D, dispozitive haptice.

Un exemplu de sistem de reabilitare care oferă feedback de forță este o mână ce simulează deformarea obiectelor. Pacientul, în timp ce poartă mânușile, încearcă să aducă degetele împreună, ca și cum ar avea un obiect în mână. Ca răspuns, mânușa opune rezistență aceastei mișcări. Forța exercitată de către pacient este transferată computerului, care ajustează semnalele de reabilitare [1].

Sistemul ART [13], și în mod special extensia acestuia, TheraMem sunt fezabile pentru a fi utilizate în reabilitarea mișcării membrilor superioare după un accident vascular cerebral. S-au înregistrat mici îmbunătățiri în cazul participanților la experiment, iar rezultatul măsurătorilor clinice a fost pe măsura așteptărilor.

Există numeroase beneficii ale implicării RV în terapie de reabilitare. În primul rând, experiența de a fi cufundat într-un mediu ce se aseamănă cu viața reală oferă posibilitatea pacienților de a se comporta natural. În afară de aceasta, controlul complet al terapeutului asupra managementului răspunsului permite modificarea unor caracteristici cum ar fi viteza, numărul și ordinea stimulilor, pentru ca acestea să fie prezentate în așa fel încât să se potrivească nevoilor pacientului.

DEZAVANTAJE ȘI LIMITĂRI ALE REALITĂȚII VIRTUALE

Una dintre limitările utilizării realității virtuale în medicină este reprezentată de tehnologia necesară pentru a realiza o experiență imersivă cât mai naturală. Dispozitivele haptice care furnizează un feedback fizic sunt mai puțin dezvoltate și pot cauza probleme în timpul utilizării.

Totodată, componentele simple, cum ar fi HMD-urile, firele și căștile, se pot transforma într-un obstacol pentru mișcarea și deplasarea pacientului în timpul experimentului.

Un alt dezavantaj îl reprezintă costul sistemelor de realitate virtuală, lucru dovedit de faptul că foarte puține persoane dețin cunoștințele tehnice necesare pentru a repara și întreține aceste dispozitive. De asemenea, multe dintre sistemele VR nu sunt compatibile cu majoritatea componentelor hardware, fapt ce sporește costul acestora și reduce valoarea pe termen lung a unei investiții într-un astfel de sistem.

CONCLUZII

Tehnicile de realitate virtuală sunt în curs de dezvoltare în domeniul științifice actuale, cum ar fi medicina sau ingineria. Posibilitățile, abordările și soluțiile în aplicațiile bazate pe realitatea virtuală sunt imense. Terapia medicală avansează, datorită RV și a sistemelor de simulare. Inovațiile în tehnologia informației, împreună cu costurile reduse ale produselor hardware și software vor rafina și vor spori eficiența, expertiza și competența actului medical, în scopul de a asigura confort pentru pacient și o abordare terapeutică adecvată și sigură [5].

Eficacitatea experienței realității virtuale poate fi îmbunătățită prin munca de colaborare a echipelor multidisciplinare de specialiști din domeniile: inginerie, software, medicină, hardware.

În prezent, datorită miniaturizării și creșterii performanțelor echipamentelor, limitările RV se estompează, esențiale fiind imaginația, creativitatea și talentul dezvoltatorilor. După cum a declarat Col. Satava, "acum nu mai este vorba doar de sânge și curaj, este vorba despre biți și bytes" [3].

REFERINȚE

1. Bronzino, J.D., The Biomedical Engineering Handbook, Second Edition, Volume I, Crc Press
2. Gorman P.J., Meier A.H., Krummel T., Simulation And Virtual Reality In Surgical Education, Arch Surg/Vol 134, Nov. 1999
3. Lippincott W., Surgical Simulation and Virtual Reality: The Coming Revolution, Annals of Surgery, Vol. 228, No. 5, 635-637, 1998
4. Riva G., Applications of Virtual Environments in Medicine, Methods Inf Med 5/2003, 2003
5. Schultheis M., Rizzo A., The Application of Virtual Reality Technology and Rehabilitation, Rehabilitation Psychology, 2001, Vol. 46, No. 3, 296-311, 2001
6. Stone R., McCloy R., Virtual Reality in Surgery, BMJ. 2001 October 20; 323(7318): 912-915, 2001
7. Szekeley G., Satava R., Virtual Reality in Medicine, BMJ VOLUME 319, 1999

8. Zajtchuk R., Satava R., Medical Applications of Virtual Reality, Communications of the ACM, September 1997/Vol. 40, No. 9
9. Furtado H., Studeli T., Sette M., Samset E., Gersak B., A system for visualization and automatic placement of the endoclamo balloon catheter, Proc. of SPIE Vol. 7625 76250C-8
10. Heldmann S., Beuthien B., Olesch J., Papenberg N., Fischer B., Improved Minimal-Invasive Laparoscopic Liver Surgery by Registration of 3D CT and 2D Ultrasound Slices
11. Morar A., Moldoveanu F., Asavei V., Moldoveanu A., Egner A., Multi-GPGPU Based Medical Image Processing in Hip Replacement, CEAI, Vol.14, No.3, pp. 25-34, 2012
12. Beuran M., Negoii I., Paun S., Lobontiu A., Filipoiu F., Moldoveanu A., Negoii R., Hostiuc S., Natural orifice transluminal endoscopic surgery (NOTES) second-look peritoneoscopy for staging of limited peritoneal carcinomatosis, Medical Hypotheses, 2013
13. Hoermann S., Hale L., Winsler S., Regenbrecht H., Augmented Reflection Technology for Stroke Rehabilitation – A clinical feasibility study, Proc. 9th Intl Conf. Disability, Virtual Reality & Associated Technologies, Laval, France, 10–12 Sept. 2012
14. Barratt D., Penney G., Chan C., Carter T., Edwards P., Hawkes D., Self-Calibrating 3D-Ultrasound-Based Bone Registration for Minimally Invasive Orthopedic Surgery, IEEE TRANSACTIONS ON MEDICAL IMAGING, VOL. 25, NO. 3, MARCH 2006
15. Bobric I.-C., Virtual Reality and Brain-Computer Interfaces
16. <http://www.vrphobia.com/>
17. <http://mediclaugmentedreality.com/>
18. <http://www.columbia.edu/cu/21stC/issue-1.4/doctor.html>
19. <http://www.vrs.org.uk/>
20. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14651858.CD008349.pub2/pdf/abstract>