

Strokovni prispevek/Professional article

RAČUNALNIŠKO PODPRTO PREDOPERATIVNO INTERAKTIVNO 3-D NAČRTOVANJE OPERATIVNEGA POSEGA V NEVROKIRURGIJI

COMPUTER ASSISTED PRE-OPERATIVE INTERACTIVE 3-D PLANNING OF SURGICAL PROCEDURES IN NEUROSURGERY

Tilen Žele¹, Boštjan Matos², Borut Prestor², Jernej Knific³, Fajko F. Bajrovič^{1, 4}

¹ Inštitut za patološko fiziologijo, Medicinska fakulteta, Zaloška 4, 1000 Ljubljana

² Klinični oddelek za nevrokirurgijo, Klinični center, Zaloška 7, 1525 Ljubljana

³ Klinični inštitut za radiologijo, Klinični center, Zaloška 7, 1525 Ljubljana

⁴ Klinični oddelek za nevrologijo, Klinični center, Zaloška 7, 1525 Ljubljana

Prispelo 2006-07-21, sprejeto 2006-08-31; ZDRAV VESTN 2006; 75: 703–11

Ključne besede *nevronavigacija; računalniška obdelava slik; 3D rekonstrukcija; intrakranialni tumorji; medicinske slike*

Izvleček

Izhodišča *Prispevek opisuje naše izkušnje z uporabo računalniško podprte predoperativne tri-dimenzionalne (3D) rekonstrukcije medicinskih slik za načrtovanje in medoperativno vodenje operativnega posega v nevrokirurgiji intrakranialnih tumorjev.*

Metode *Pred operativnim posegom smo iz slik magnetne resonance in v izbranih primerih funkcionalne magnetne resonance s pomočjo računalniškega programa »3D Slicer« rekonstruirali 3D modele tumorja, okolne normalne možganovine in kortikalnih ven pri 10 bolnikih s kortikalnimi oz. subkortikalnimi tumorji. Na podlagi teh modelov smo v 3D računalniškem okolju načrtovali kožni rez, trepanacijsko odprtino in vstop skozi možganovino do tumorja. Slednje smo iz 3D modelov na operacijsko polje bolnika prenesli s pomočjo meritev razdalj do orientacijskih točk na površini skalpa oz. skorje možganov.*

Rezultati *Računalniško podprta 3D rekonstrukcija je v primerjavi z običajno miselno rekonstrukcijo 2D medicinskih slik kirurgu omogočila bolj natančno prostorsko umestitev tumorja. Pri vseh bolnikih so se položaj, velikost in oblika kožnega reza in trepanacije ter položaj in odnos tumorja do kortikalnih ven in možganskih vijug v 3D računalniškem okolju pred operacijo ujemali z enakimi kvalitetami na operacijskem polju pri bolniku. Čeprav se je po iztekanju likvorja možganovina nekoliko premaknila, se relativna lokacija in odnos možganskih vijug, žilja in patoloških sprememb ni spremenil. Pri vseh bolnikih smo z minimalno invazivnim posegom lahko natančno dosegli in makroskopsko odstranili tumor v celoti.*

Zaključki *Predoperativna računalniško podprta 3D rekonstrukcija nudi kirurgu dodatno informacijo o prostorski umestitvi kortikalnih in subkortikalnih tumorjev v primerjavi z miselno rekonstrukcijo 2D medicinskih slik. Zato omogoča večjo natančnost pri načrtovanju kirurškega pristopa in manjšo invazivnost ter tveganje operativnega posega.*

Avtor za dopisovanje / Corresponding author:

Tilen Žele, dr. med., Inštitut za patološko fiziologijo, Medicinska fakulteta, Zaloška 4, 1525 Ljubljana, tel.: 01 / 543 70 63 e-mail: tzele@mf.uni-lj.si

Key words *neuronavigation; computer image processing; 3D reconstruction; intracranial tumors; medical images*

Abstract

Background *Present paper describes our experiences with the use of three-dimensional (3D) reconstruction of medical images for pre-operative planning and intra-operative navigation in neurosurgery of cortical and sub-cortical tumors.*

Methods *In 10 patients with cortical and sub-cortical tumors, before surgery 3D models of tumor, normal nearby brain tissue and cortical veins were reconstructed from magnetic resonance images and in selected cases functional magnetic resonance images using the computer program »3D Slicer«. Based on these models, the skin incision, trepanation opening and trans-cortical approach to the tumor were planned in virtual 3D computer space. Collected positional data were transferred from the 3D computer space to the operation field using distances from the artificial and typical anatomical landmarks on skin and cortical surface.*

Results *Computer assisted 3D reconstruction provided a surgeon with more accurate localization of tumor than conventional mental reconstruction of the 2D medical images. In all cases the position, size and shape of skin incision, trepanation opening, cortical veins, sulci and gyri visualized on computer screen before surgery matched the actual anatomy observed during surgical procedure. In all patients the lesion was precisely found and macroscopically totally resected with minimal injury to the adjacent normal structures.*

Conclusions *Pre-operative computer assisted 3D reconstruction provides important additional information about spatial localization of cortical and sub-cortical tumors in comparison to mental reconstruction of 2D medical images. Therefore, it improves the accuracy of planning the surgical procedure and makes it less invasive and less risky.*

Uvod

Predoperativna anatomska umestitev intrakranialnega patološkega procesa in njegov odnos do normalnih možganskih struktur imata v nevrokirurgiji velik pomen za diagnostiko, odločanje o operativnem zdravljenju, načrtovanje in obseg operativnega posega ter ne nazadnje napoved izida (1–3).

Dolgo časa je predoperativna anatomska umestitev intrakranialnih patoloških procesov temeljila na klinični sliki in prikazu s pomočjo nativne rentgenske slike, pnevmoenkefalografije, ventrikulografije in angiografije (1). Neposredno prikaz intrakranialnih patoloških procesov sta močno izboljšala računalniška tomografija (CT) in magnetna resonanca (MR), ki sta v klinični rabi šele zadnja 4 desetletja (4). Nekatere sodobne slikovne preiskave, kot so funkcionalna, perfuzijska in difuzijska MR, enofotonska emisijska tomografija ter pozitronska emisijska tomografija, poleg anatomske umestitve omogočajo tudi analizo funkcije in metabolizma možganov v fizioloških in patoloških razmerah (3).

Vizualna interpretacija konvencionalnih medicinskih slik običajno zadostuje za diagnostiko. Za načrtovanje in izvedbo operativnega posega pa je potrebno te dvodimenzionalne (2D) podatke prevesti v tridimenzionalni (3D) intrakranialni prostor, kar opravljata nevrokirurg in nevroradiolog običajno »mentalno« (v mislih). Slednje je v razmerah kompleksne anatomije zelo težko ali celo nemogoče (5). V primerih, ko spremembe ne dosežajo možganske skorje je po kraniotomiji in odprtju dure težko natančno določiti me-

sto vstopa skozi možgansko skorjo. V primerih, ko so spremembe oddaljene od anatomskih orientacijskih točk na lobanji, je težko določiti celo mesto kraniotomije pri kortikalnih spremembah.

K reševanju tega problema je v zadnjem desetletju precej prispeval razvoj računalniških sistemov, ki omogočajo 3D rekonstrukcijo intrakranialnih struktur iz 2D medicinskih slik. Opisani so številni računalniški sistemi za 3D rekonstrukcijo medicinskih slik, ki se med seboj razlikujejo v možnostih in avtomatizaciji obdelave in/ali manipulacije slik ter pri tem uporabljenih matematičnih algoritmih (5–13). Na Kliničnem oddelku za nevrokirurgijo v Ljubljani smo v klinični praksi uporabili računalniški program »3D Slicer« za obdelavo in interakiven prikaz medicinskih slik v 3D računalniškem okolju. V tem prispevku predstavljamo možnosti, ki jih ta tehnologija omogoča, ter na podlagi naših dosedanjih izkušenj njen prispevek pri načrtovanju in izvedbi nekaterih zahtevnejših nevrokirurških operacij kortikalnih in subkortikalnih tumorjev.

Bolniki in metode

Bolniki

Od novembra 2005 do junija 2006 smo na Kliničnem oddelku za nevrokirurgijo v Ljubljani uporabili računalniško podprto 3D rekonstrukcijo medicinskih slik pri načrtovanju in izvedbi operativnega posega pri 10 bolnikih z intrakranialnimi tumorji (6 žensk, 4 moški), starih od 43 do 79 let (Razpr. 1).

Razpr. 1. *Prednost 3D rekonstrukcije pri načrtovanju kirurgije kortikalnih in subkortikalnih intrakranialnih tumorjev v primerjavi z mentalno rekonstrukcijo 2D medicinskih slik.*

Table 1. *Advantages of 3D reconstruction for planning of surgery of cortical and subcortical intracranial tumors in comparison to mental reconstruction from 2D medical images.*

Bolnik	Starost/Spol	Lega možganskega tumorja / makroskopski izgled / histološka diagnoza	Dodatna informacija na podlagi 3D rekonstrukcije v primerjavi z 2D rezinami medicinskih slik
Patient	Age/Sex	Location of brain tumor / macroscopic view / histological diagnosis	Additional information provided by 3D reconstruction as compared to 2D cross-sectional medical images
MP	43/M	Frontalno levo, subkortikalno / cistično soliden / Ependimom	Položaj in velikost trepanacije / odnos tumorja do centralnega sulkusa, motorične in premotorične skorje / prikaz drenažnih ven / določitev mesta kortikotomije
MP	43/M	Left frontal, subcortical / cistic-solid / Ependimoma	Position and size of trepanation / tumor relationship to central sulcus, motor and premotoric cortex / visualization of draining veins / position of corticectomy
MM	44/Ž	Parieto-okcipitalno levo, subkortikalno / cistično soliden / Anaplastični astrocitom	Položaj in velikost trepanacije / odnos tumorskih cist do motorične skorje na edematskem področju možganov in kortikalnih ven (Sl. 2)
MM	44/F	Left parieto-occipital, subcortical / cistic-solid / Anaplastic astrocitoma	Position and size of trepanation / tumor cists relationship to motor cortex on edematous brain area and cortical veins (Figure 2)
FU	73/M	Intraventricularni tumor – levi trigonum, soliden, čvrst / Fibroblastni meningeom	Položaj in velikost trepanacije / odnos tumorja do angularnega girusa leve parietalne regije in ventrikularnega sistema / določitev mesta transsulkusnega pristopa do tumorja
FU	73/M	Intraventricular tumor – left trigonum / solid-firm / Fibroblastic meningeoma	Position and size of trepanation / tumor relationship to left angular gyrus and ventricular system / position and direction of trans-sulcal approach to the tumor
BT	76/Ž	Tentorij in lateralni del transverznega sinusa levo / soliden, čvrst / Fibroblastni meningeom	Položaj in velikost trepanacije / odnos tumorja do vene Labbe (Sl. 4)
BT	76/F	Left tentorium and lateral part of transversal sinus / solid-firm / Fibroblastic meningeoma	Position and size of trepanation / tumor relationship to vein of Labbe (Figure 4)
JG	77/M	Srednji temporalni girus desno, subkortikalno / soliden, mehak / Metastaza planocelularnega karcinoma	Položaj in velikost trepanacije / odnos tumorja do temporalnih vijug / določitev mesta kortikotomije / ohranitev sulkusne drenažne vene
JG	77/M	Right middle temporal gyrus, subcortical / solid-soft / Metastasis of planocellular carcinoma	Position and size of trepanation / tumor relationship to temporal gyri / position of corticectomy / perservation of sulcal draining vein
VŠM	52/Ž	Intraventricularno, telo levega stranskega ventrikla / soliden, čvrst / Atipični meningeom	Položaj in velikost trepanacije / odnos tumorja in ventrikularnega sistema / položaj površinskih in globokih ven / določitev najkrajše transkortikalne poti do tumorja
VŠM	52/F	Intraventricular – body of left temporal ventricle / solid-firm / Atypical meningeoma	Position and size of trepanation / tumor relationship to ventricular system / position of superficial and deep veins / optimal position and direction of corticectomy
LR	49/M	Parietalni operkulum z inzulo desno / soliden, mehak / Metastaza adenokarcinoma	Položaj trepanacije, odnos tumorja glede na položaj in potek Silvijeve brazde in njenih ven (Sl. 3)
LR	49/M	Right parietal operculum and insula / solid-soft / Metastasis of adenocarcinoma	Position and size of trepanation / tumor relationship to Sylvian fissure and cortical veins (Figure 3)
RA	79/Ž	Sprednji del Silvijeve brazde desno / soliden, čvrst / Fibroblastni meningeom	Položaj trepanacije / odnos tumorja glede na položaj in potek Silvijeve brazde in njenih ven / ohranitev sfenoidnega krila
RA	79/F	Right frontal part of Sylvian fissure / solid-firm / Fibroblastic meningeoma	Position and size of trepanation / tumor relationship to Sylvian fissure and cortical veins / perservation of sphenoid wing
VL	58/Ž	Inzula in okcipitalno parasagitalno levo / soliden, mehak / Metastaza slabo diferenciranega karcinoma	Položaj in velikost obeh trepanacij / odnos tumorja do Silvijeve brazde in njenih ven / prikaz distalnega dela zgornjega sagitalnega sinusa in drenažnih ven na površini možganov
VL	58/F	Left insula and occipital parasagital / solid-soft / Metastasis of poorly differentiated carcinoma	Position and size of both trepanations / tumor relationship to Sylvian fissure and cortical veins / visualization of distal part of superior sagittal sinus and draining veins
UM	54/Ž	Parietalno levo / subkortikalno / cistično soliden / Metastaza duktalnega karcinoma dojke	Položaj in velikost trepanacije / odnos tumorja do angularnega girusa leve parietalne regije / določitev mesta transsulkusnega pristopa do tumorja
UM	54/F	Left parietal / subcortical / cistic-solid / Metastasis of ductal breast carcinoma	Position and size of trepanation / tumor relationship to left angular gyrus / optimal position and direction of trans-sulcal approach

Zajem in prenos medicinskih slik

Za prikaz tumorjev, možganovine s pripadajočimi strukturami in lobanje smo uporabili slikanje z MR in CT, za prikaz možganovine z motorično funkcijo pa funkcionalno MR.

MR medicinske slike smo zajemali z MR aparatom z zmogljivostjo 1,5 tesla (Signa, GE Medical Systems, Milwaukee, WI). Strukturne slike celotnih možganov smo naredili s sekvenco FSPGR (angl. fast spoiled gradient recalled) (124 sagitalnih rezin debeline 1,4 mm, z

matrico 256 × 192 pri velikosti polja 240 × 240 mm). V večini primerov smo zajeli MR T1 obtežene slike, v nekaterih primerih pa smo zajeli tudi dodatne sekvence: fast SE T2, FLAIR. Takšno zaporedje slik iste modalnosti, ki pokriva celoten slikani objekt, imenujemo set (angl. volume).

Za zajem funkcionalnih slik smo uporabili sekvenco EPI (echo planar imaging) z naslednjimi parametri: čas ponavljanja (TR) 3 s, čas odmeva (TE) 40 ms, kot nagiba (FA) 90°, polje pogleda (field of view) 20 cm (število sekcij 16, matrica 64 × 64, debelina rezin 7 mm

brez presledkov). Med preiskavo je bolnik opravljal motorično nalogo (ponavljajoče stikanje palca z ostalimi prsti). Funkcijske slike smo analizirali z računalniškim programom za statistično planimetrično kartografiranje (SPM 2).

CT medicinske slike smo zajemali s spiralnim CT aparatom (Somatom Sensation 16, Siemens, Medical Solutions, Erlangen, Nemčija). Slike lobanje smo zajeli pri kulminaciji $16 \times 0,7$ mm.

Sete slik različnih slikovnih preiskav smo nato shranili v digitalnem formatu DICOM (angl. The Digital Imaging and Communications in Medicine) in jih preko CD medija prenesli na osebni računalnik za nadaljnjo obdelavo.

Obdelava slik

Medicinske slike smo obdelali na osebni računalniku (Pentium 4™ 2.66 GHz, 512 Mb RAM, grafična kartica ATI Radeon 7500™ 64 Mb VRAM) z računalniškim programom »3D Slicer«, različica 2.5 (Massachusetts Institute of Technology). Gre za prosto dostopen odprtokoden program za obdelavo medicinskih slik v akademski in raziskovalni nameni (6, 2, 14).

Obdelava medicinskih slik je vključevala poravnavo (angl. registration), razgradnjo (angl. segmentation) ter rekonstrukcijo 3D modelov izbranih struktur. Obdelava slik je v posameznih primerih trajala od 15 minut do 2 uri, kar je bilo odvisno od kompleksnosti primera. Temu je sledilo predoperativno načrtovanje s kvalitativno in kvantitativno analizo slik in modelov.

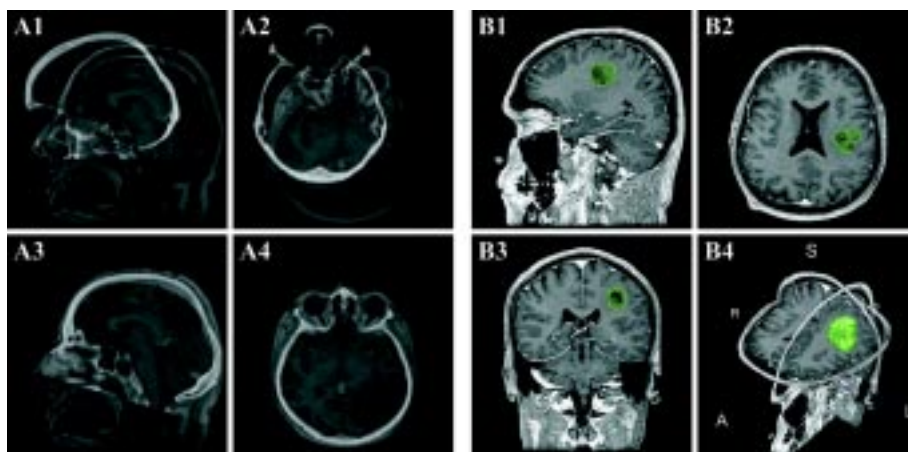
Sete slik različnih slikovnih preiskav smo najprej poravnali v isti koordinatni sistem. V ta namen smo na vsakem od dveh setov slik, ki smo ju želeli poravnati, označili izbrane iste strukture s 3 pari točk. Računalniški program je nato samodejno premaknil enega od setov tako, da so se ustrezni pari točk, ki so označevali iste strukture, poravnali (pokrili) v prostoru. Po potrebi smo nato ročno s pomočjo miške in tipkovnice lahko dodatno premikali enega izmed setov slik, dokler s poravnavo nismo bili zadovoljni (Sl. 1A).

Poravnane sete slik smo razgradili tako, da smo na vseh rezinah orisali strukture, ki so nas posebej zanimale (npr. kožo, možgane, tumor in žile) (Sl. 1B). Pri tem smo si pomagali z različnimi samodejnimi orodji programa. Najprej smo na slikah določili svetlostno območje (angl. threshold), ki je bilo za določeno struk-

turo najbolj značilno. Program je nato samodejno označil na setu slik vse točke v izbranem svetlostnem območju. Z drugimi orodji, ki temeljijo npr. na zveznosti objektov, in/ali po potrebi ročno smo določene strukture orisali še bolj natančno. Iz orisov izbranih struktur na 2D rezinah je program samodejno izdelal njihove 3D modele.

Načrtovanje in vodenje kirurškega posega

Predoperativno načrtovanje se je začelo s pregledom 2D diagnostičnih slik, na podlagi katerih smo pri konkretnem bolniku ocenili patološki proces in določili najverjetnejši operativni pristop ter predvideli mesto trepanacije. V okolici predvidene trepanacije smo na bolnikov skalp pritrdili maščobne tablete, ki so vidne na slikah MR, in njihova ležišča označili s permanentnim flomastrom. Nato smo opravili dodatna slikanja z MR modalnostmi, ki bi najbolj kontrastno predstavile patološki proces ter njegov odnos do sosednjih struktur v intrakranialnem prostoru.



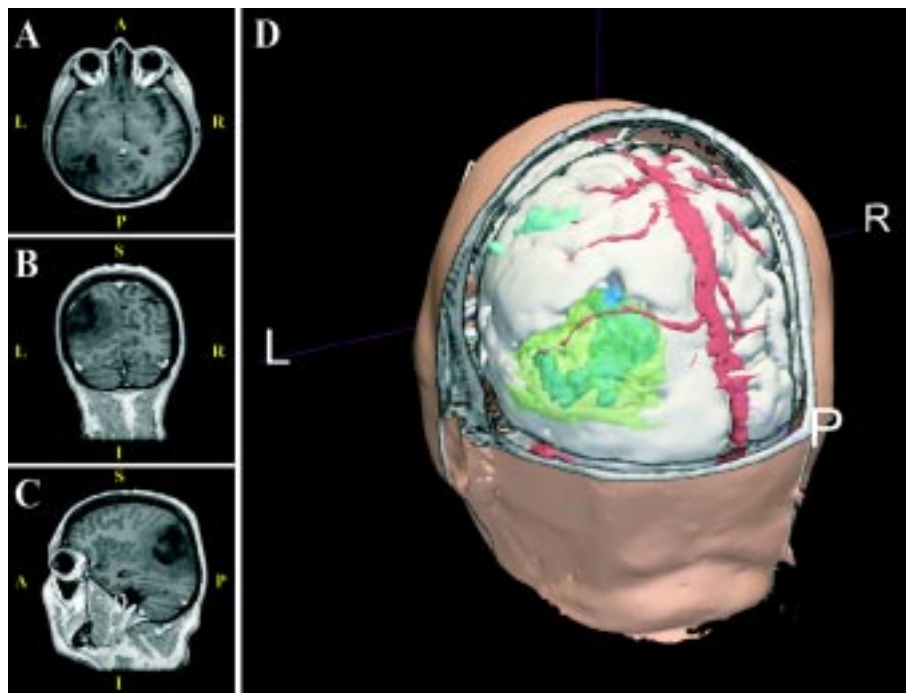
Sl. 1. Prikaz računalniško podprte obdelave 2D medicinskih slik za rekonstrukcijo 3D modelov izbranih struktur. A – Poravnava. Sagitalni (A1) in aksialni (A2) rezini setov slik spiralnega CT glave (lobanja) in T1 obtežene FSPGR sekvence MR glave (mehka tkiva) v istem koordinatnem sistemu pred poravnavo. Po poravnavi se iste strukture na posameznih rezinah obeh setov slik prekrivajo (A3, A4). B – Razgradnja. Oris tumorja na posameznih rezinah razgradi le-te na področje tumorja (zelena barva) in okolico (neobarvano) (B1, B2, B3). Na podlagi razgradnje vseh rezin računalniški program samodejno rekonstruira 3D model orisane strukture v navideznem prostoru (B4). (Oznake: A – anterioro, P – posteriorno, L – levo, R – desno, S – superiorno)

Figure 1. Demonstration of computer assisted processing of 2D medical images for reconstruction of 3D models of selected structures. A – Registration. Sagittal (A1) and axial (A2) cross-sections of head spiral CT (cranium) and T1 weighted FSPGR sequence of head MR (soft tissue) in common coordinate system before registration. After registration the same structures on individual slices from each volume are aligned over each other (A3, A4). B – Segmentation. Tumor outlining segments individual slices in the area belonging to tumor (green color) and surrounding area (uncolored) (B1, B2, B3). On the basis of segmentation of all slices in volume, computer program automatically reconstructs 3D model of outlined structure in virtual space (B4). (Legend: A – anterior, P – posterior, L – left, R – right, S – superior)

Sledila je računalniška obdelava slik in 3D rekonstrukcija modelov izbranih struktur (tumorja, možganov, možganskih brazd in vijug, ventrikularnega sistema, možganskih žil, kože, lobanje in maščobnih tablet) (Sl. 2). S pomočjo različnih orodij programa, ki omogočajo prikaz in manipulacijo različne kombinacije slik različnih slikovnih metod, modelov ter oznak smo si pred operativnim posegom natančno ogledali morfološke značilnosti, prostorsko umestili želene strukture in opravili nekatere kvantitativne meritve (volumen spremembe, njene premere v različnih smereh, razdaljo do skorje in anatomskih orientacijskih točk). Pri tem smo si pomagali tudi tako, da smo v 3D računalniškem okolju določali dodatne orientacijske točke (angl. fiducials). S primerjavo površinske anatomije možganske skorje, njenih vijug, brazd in ven na obeh polovicah možganov smo lažje in natančneje določili funkcionalno pomembne predele (npr. senzomotorična skorja in centralni sulcus).

Na podlagi zbranih kvalitativnih in kvantitativnih podatkov smo določili najugodnejši trajektorij ali smer operacije in skozi katero možgansko brazdo, cisterne ali vijugo je tumor najlažje dosegljiv ob najmanjši poškodbi funkcionalno jasno določljive možganovine (Sl. 3). Nato smo neposredno nad točko vstopa v možganovino na 3D modelu kože načrtovali trepanacijsko odprtino in kožni rez glede na izmerjeno razdaljo od orientacijskih točk, kot so zgornji rob ušesa, nasium, lateralni kantus in promontorij, v primerih trepanacije višje na lobanji pa od maščobnih tablet. Pri enem bolniku smo trepanacijsko odprtino načrtovali neposredno na lobanji glede na sliko spiralnega CT glave.

Neposredno pred operacijskim posegom smo izmerjene razdalje od orientacijskih točk iz 3D modela prenesli na skalp bolnika in tako natančno zarisali dolžino in potek reza kože ter lego in velikost trepanacije (Sl. 4). Enako smo ravnali med operativnim posegom pri oblikovanju kostnega pokrova nad mestom vsto-



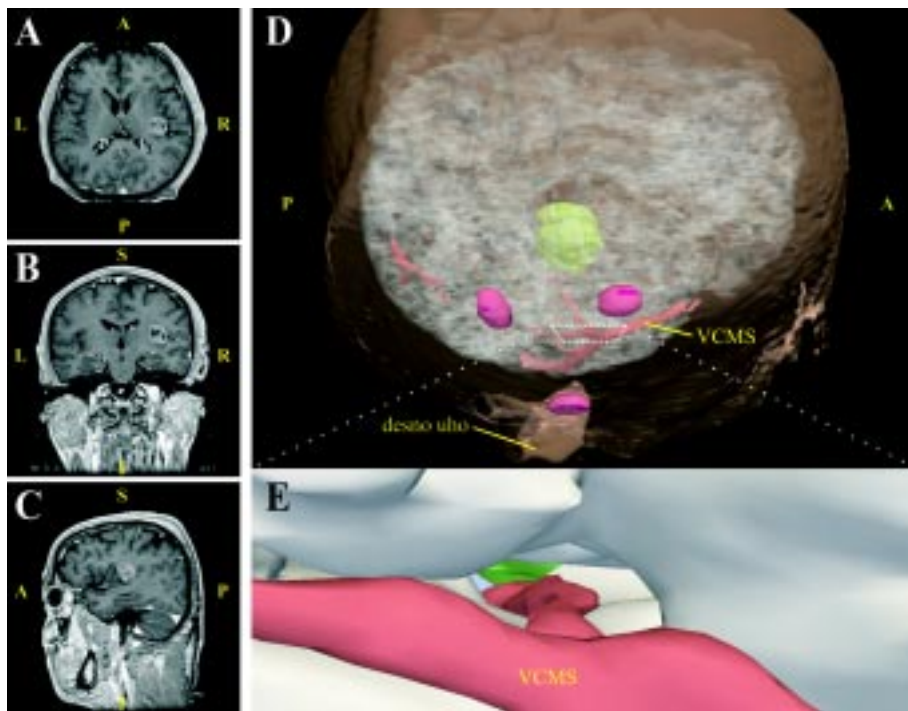
Sl. 2. Prikaz prostorske umestitve ekspanzivne spremembe z 2D medicinskimi slikami v aksialni (A), koronarni (B) in sagitalni (C) ravnini v primerjavi z rekonstruiranimi 3D modeli izbranih struktur v navideznem 3D računalniškem okolju (D). V 3D okolju so prikazani modeli kože (oranžna barva), možganovine (bela barva), venskih sinusov z večjimi kortikalnimi venami (rdeča barva), cističnega dela ekspanzivnega procesa (temno modra barva), patološko spremenjene možganovine (polprosojna zelena barva) in področja aktivacije motorične skorje med opravljanjem motorične naloge (fMR preiskava; svetlo modra barva). Zaradi izrazitega edema v okolici tumorja je anatomija vijug in brazd leve hemisfere nerazpoznavna. (Oznake: A – anteriorno, P – posteriorno, L – levo, R – desno, S – superiorno, I – inferiorno)

Figure 2. Visualization of expansive process and its spatial position with 2D medical images in axial (A), coronal (B) and sagittal (C) plane in comparison to reconstructed 3D models of chosen structures in virtual 3D computer space (D). In 3D computer space models of skin (orange color), brain (white color), venous sinuses with larger cortical veins (red color), cistic part of expansive process (dark blue color), pathologically changed brain tissue (semi-transparent green color) and areas of motor cortex activation during performing the motor task (fMR results; light blue color) are shown. Due to edema of the brain tissue surrounding the tumor the cortical anatomy of left hemisphere (gyri and sulci) is unrecognizable. (Legend: A – anterior, P – posterior, L – left, R – right, S – superior, I – inferior)

pa skozi možgansko skorjo oz. nad mestom tumorja. Pri prenosu mesta vstopa skozi možgansko skorjo (kortikotomija) smo se orientirali glede na možganske brazde, vijuge in kortikalne vene, ki smo jih izbrali v procesu 3D predoperativnega načrtovanja. 3D model posameznih struktur je med operacijo služil kot vodilo, ključne odločitve pa je sprejemal operater.

Ocena 3D rekonstrukcije

Prispevek računalniško podprte 3D rekonstrukcije v primerjavi z mentalno rekonstrukcijo 2D medicinskih slik pri načrtovanju in vodenju operativnega posega pri posameznem pacientu je ocenil nevrokirurg (Razpr. 1).



Sl. 3. Prikaz načrtovanja operativnega pristopa do subkortikalnega tumorja v globini Silvične brazde na podlagi 2D rezin medicinskih slik (A – aksialna, B – koronarna, C – sagitalna) in računalniško podprte 3D rekonstrukcije (D, E). Pogled iz smeri desno zgoraj na 3D rekonstrukcijo tumorja (zelenе barve) in njegov odnos do bližnjih ven (rdeče barve) preko polprosojnega modela kože (oranžne barve) in možganovine (bele barve) (D). Približan lateralni pogled (E) v globino Silvične brazde razkrije možnost neposrednega dostopa do tumorja ob minimalni poškodbi možganovine ter prikladno lego ven za vodenje pristopa med posegom. Za natančnejšo orientacijo na ravni kože skalpa bolnika služijo modeli treh maščobnih tablet (vijolične barve). (Oznake: VCMS – vena cerebri media superficialis, A – anteriorno, P – posteriorno, L – levo, R – desno, S – superiorno, I – inferiorno)

Figure 3. Planning of operative approach to subcortical tumor located deep in the Sylvian fissure on the basis of 2D medical images (A – axial, B – coronal, C – sagittal) and computer assisted 3D reconstruction (D, E). View from superior-right position on 3D reconstructed models of tumor (green color) and his relationship to models of surrounding cortical veins (red color) through semi-transparent model of skin (orange color) and brain (white color) (D). Zoomed lateral view (E) into the Sylvian fissure reveals the possibility of direct approach to the tumor with minimal injury to the brain tissue and favorable position of veins for guiding the approach during operation procedure. For more precise orientation on the scalp of the patient are used models of three fat tablets (violet color). (Legend: VCMS – vena cerebri media superficialis, A – anterior, P – posterior, L – left, R – right, S – superior, I – inferior)

Rezultati

Bolniki so bili operirani v splošni anesteziji. Bolnikovo glavo smo namestili v trižebljati nastavek tako, da je bilo načrtovano mesto trepanacije na vrhu operativnega polja, kar je omogočalo kirurgu optimalen položaj ves čas operativnega posega.

Rez kože in trepanacijo smo naredili na mestu in v velikosti, določenim med predoperativnim načrtovanjem z računalniško podprto 3D rekonstrukcijo. Po prerezanju dure se je v vseh primerih razkrila anatomija možganske skorje s pripadajočimi venami tako,

kot smo pričakovali glede na rekonstruirane modele struktur (Sl. 4c, 4d). Kljub opaznemu premiku možganovine (v povprečju 5 mm) po iztoku likvorja se anatomija površine možganov ni bistveno spremenila glede na trepanacijsko odprtino (s povprečnim premeroma 3 cm). Kortikalna anatomija in relati ven položaj kortikalnih ven pa sta se ohranila tudi med potekom operacije. Zato smo v primerih, ko smo do tumorja izbrali transkortikalni pristop, lahko vstopili skozi skorjo možganov v točki, ki smo jo določili med predoperativnim načrtovanjem posega. Pri globlje ležečih tumorjih smo sondirali z vodilom, začeniši na definirani točki in pod kotom, izmerjenim med načrtovanjem. V vseh primerih smo tumor našli v pričakovani smeri. Izmerjena globlina je odstopala od meritev med načrtovanjem v povprečju manj kot 5 mm. V enem primeru tumorja med operacijo ni bilo mogoče prepoznati. Histološka analiza (zmrzli rez) vzorca, ki smo ga odvzeli iz lokacije, kjer smo glede na predoperativno načrtovanje tumor pričakovali, pa je potrdila tumorsko tkivo – multiformni glioblastom. Potem ko smo tumor našli, smo ga odstranjevali po klasičnih načelih mikrokirurških tehnik. Med odstranjevanjem tumorja je njegov volumen, izmerjen na 3D modelu pri načrtovanju, služil za grobo oceno obsega odstranitve, kot upora-

ben se je izkazal predvsem pri solidnih tumorjih.

Pri vseh bolnikih smo makroskopsko tumor odstranili v celoti. Novih nevroloških izpadov po operativnem posegu nismo opazili, razen pri enem bolniku z meningiomom v trigonomu levega lateralnega ventrikla, kjer se je klinična slika nominalne disfazije poglobila.

Ilustrativni primer

76-letna desnoročna bolnica je imela 6 mesecev trajajoče konstantne glavobole in občasne motnje ravnotežja.

Ob sprejemu v nevrološkem statusu ni bilo drugih odstopanj od normale. Diagnostična MR glave je prikazala 3 cm veliko, dobro omejeno spremembo v posteriornem delu levega tentorija, rastočo pod in nad tentorijem. S kontrastom dobro obarvana sprememba, podobna meningeomu, je zajemala distalno tretjino levega transversalnega sinusa proti sigmoidnemu sinusu. Digitalna subtractijska angiografija je pokazala zaporo distalnega dela sinusa in poudarjene vene v okolici tumorja.

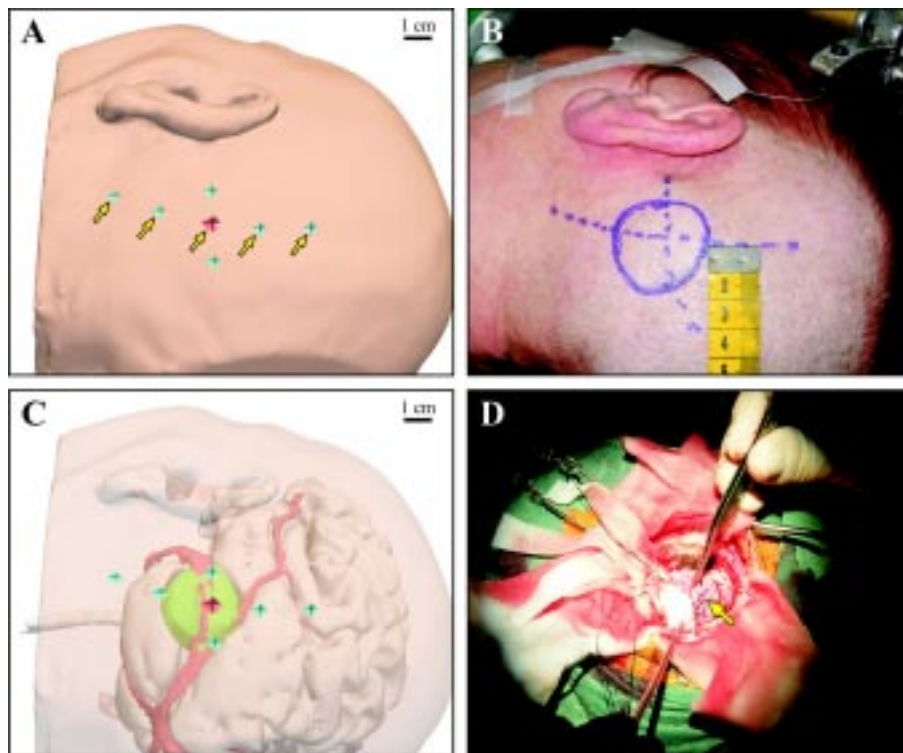
Za 3D rekonstrukcijo smo uporabili slike FSPGR T1 preiskave. Pri obdelavi slikovnih podatkov smo izdelali 3D modele kože, sosednje normalne možganovine, tumorja in venskih sinusov ter ven v okolici lezije (Sl. 4). Meritve so pokazale tumor s premerom 33 mm v anteroposteriorni smeri, 30 mm v mediolateralni smeri, 32 mm v rostrokavdalni smeri s prostornino 16,4 cm³. Tumor je bil v globini 13–16 mm pod kožo in ni bil prekrit z možganovino. Nad tumorjem je navzdol in medialno proti srednji tretjini transversalnega sinusa potekala večja vena, ki je po velikosti in legi ustrezala Labbejevi veni (Sl. 4c). Odločili smo se za odstranjevanje tumorja iz zgornje strani med Labbejevo veno in transversalnim sinusom. Točko vstopa preko kože smo določili neposredno nad transversalnim sinusom 36 mm za zadnjim robom levega ušesa.

Po trepanaciji in prerezanju dure na načrtovanih mestih se je po pričakovanjih razkrila Labbejeva vena (Sl. 4d). Resekcija je potekala iz zgornje strani vene. Tumor z makroskopskimi značilnostmi meningeoma smo v celoti odstranili skozi 30 mm v premeru veliko trepanacijsko odprtino natančno nad mestom tumorja in nad transversalnim sinusom. Zaradi natančnega predoperativnega 3D načrtovanja smo uspeli najti, umakniti in ohraniti zelo pomembno Labbejevo veno.

Končna patohistološka diagnoza odvzetega tumorja je potrdila meningeom. Nevrološki status po operaciji je bil brez posebnosti. Bolnica je v začetku poročala o lažjih slabostih, ki so med okrevanjem na oddelku povsem izzvenele.

Razpravljanje

Na podlagi lastnih izkušenj menimo, da 3D rekonstrukcija s pomočjo računalniškega sistema »3D Sli-



Sl. 4. Prikaz prenosa načrtovanega kožnega reza in trepanacijske odprtine iz modelov predoperativne 3D rekonstrukcije (A, C) na operativno polje bolnika (B, D). Na slikah A in C rdeča točka (fiducial) označuje središče načrtovane trepanacijske odprtine. Puščice na sliki A označujejo načrtovan rez kože. Po prenosu načrtovanega reza kože in trepanacijske odprtine na podlagi izmerjenih razdalj iz 3D modela na skalp bolnika (B) se med operativnim posegom v zgornjem delu trepanacijske odprtine po pričakovanju razkrije Labbejeva vena (puščica) z inferiorno ležečim tumorskim tkivom (D).

Figure 4. Translation of planned skin incision and trepanation opening from pre-operative 3D models (A, C) to the operation field of the patient (B, D). In pictures A and C, red point (fiducial) labels the center of planned trepanation. Arrows on picture A point to the path of planned skin incision. After the translation of skin incision and trepanation opening using the distances measured on 3D models (B), vein of Labbe (arrow) and inferiorly lying tumorous tissue (D) were revealed according to expectations.

cer» omogoča bolj natančno prostorsko umestitev kortikalnih in subkortikalnih tumorjev v primerjavi z mentalno rekonstrukcijo 2D medicinskih slik, kar je v skladu z ugotovitvami drugih (5, 6, 15). V opisanih primerih operacij intrakranialnih tumorjev smo z 3D rekonstrukcijo izboljšali natančnost pri načrtovanju in izvedbi operativnega posega. Zato smo uspeli zmanjšati invazivnost klasičnih operacij intrakranialnih tumorjev tako na ravni reza kože in trepanacijske odprtine kot tudi na ravni možganske skorje.

3-D modeli, ki smo jih izdelali s pomočjo računalniškega programa »3D Slicer« iz 2D medicinskih slik, so prikazali intrakranialne tumorje in relevantne normalne intrakranialne strukture ter kožo in lobanjo razmeroma natančno. Kakovost posameznih modelov je bila odvisna predvsem od natančnosti orisa izbrane strukture med razgradnjo 2D medicinskih slik. Razumljivo je, da je bila slednja odvisna od kontrastno-

sti prikazane strukture na 2D slikah. Normalne možganske vijuge in brazde so bile dobro prepoznavne. Zaradi pritiska tumorjev na skorjo možganov in njihove okolne otekline pa so bile možganske vijuge in brazde pogosto sploščene tako, da so postale anatomsko neprepoznavne (Sl. 2). Nasprotno temu so bile na 3D modelih večje vene na površini možganov dobro vidne tudi v takšnih razmerah in so se zato izkazale za dobre orientacijske točke tako med načrtovanjem kot tudi med izvedbo operativnega posega. Interaktivni prikaz različne kombinacije slik različnih slikovnih metod, 3D modelov ter orientacijskih točk v računalniškem 3D okolju je omogočal simulacijo in načrtovanje različnih kirurških trajektorijev ter pristopov pred operativnim posegom neprimerno bolj natančno kot običajna mentalna rekonstrukcija 2D medicinskih slik. S kvantitativno analizo 3D modelov smo lahko natančno prenesli načrtovani rez kože, trepanacijske odprtine in kortikotomije na operativno polje konkretnega bolnika. Poleg tega se je računalniško podprta 3D rekonstrukcija izkazala za bolj uporabno kot mentalna rekonstrukcija 2D slik tudi pri izobraževanju.

Pri prenosu načrtovanega reza kože in trepanacijske odprtine iz 3D modela na operativno polje konkretnega bolnika so se kot zanesljive anatomske orientacijske točke izkazali rob ušesa, nasium, lateralni kanthus in promontorij. V primerih trepanacije višje na lobanji pa je bila nujna orientacija glede na označbe na mestih, kjer so bile pred slikanjem nameščene maščobne tablete. Napaka pri prerinovanju kožnega reza in trepanacijske luknje je bila v povprečju manjša kot 5 mm. Napake so bile predvsem posledica natančnosti pri meritvah razdalj na glavi bolnika potem, ko so se v nekaterih primerih oznake, kjer so bile med slikanjem nameščene maščobne tablete, delno izbrišale. Natančnost pri prenosu reza kože in trepanacijske odprtine iz 3D modela na bolnika bi lahko izboljšali z bolj obstojnimi oznakami (šiv) na skalpu bolnika. Zanimivo pa so tudi v študijah, kjer so kožni rez in trepanacijsko luknjo iz 3D modelov na bolnika prenašali z video projekcijo, ugotovili podobna odstopanja, kar kaže, da je del napake tudi načelen in je posledica prevajanja izmerjenih razdalj iz 3D prostora na 2D ravnino (16). Pri enem bolniku smo trepanacijsko odprtino načrtovali neposredno na lobanji glede na sliko spiralnega CT glave, kar pa glede na ostale primere ni povečalo natančnosti posega. Zato menimo, da je načrtovanje kožnega reza in kraniotomije za operativni pristop s pomočjo računalniško podprte 3D rekonstrukcije dovolj natančno na ravni skalpa. Pri prenosu načrtovanega vstopa skozi možganovino iz 3D modela na operativno polje konkretnega bolnika so se izkazale kot dobre orientacijske točke možganske vijuge in brazde, predvsem pa velike kortikalne vene in njihova razcepišča, kar je v skladu z ugotovitvami drugih (16). Premik možganovine, ki je po prerezanju dure in arahnoidae zaradi učinka mase oziroma iztoka likvorja neizbežen, predstavlja velik problem pri uporabi nevronavigacijskih sistemov, ki temeljijo na relativnem odnosu možganovine in lobanje oz. skalpa na predoperativnih medicinskih slikah (1, 17, 18). Zato so za prilagajanje novim anatom-

skim razmeram pri takšni nevronavigaciji potrebne medoperativne slikovne metode (19–21). Kljub premiku možganovine pa se relativna lokacija in odnos možganskih vijug, žilja in patoloških lezij ne spremeni (glej tudi 15, 16). Zato v naših primerih pri načrtovanju in izvedbi posega s pomočjo predoperativne 3D rekonstrukcije, ki temelji na relativnem odnosu možganskih vijug in kortikalnih ven, premik možganovine ni predstavljal posebeja problema, kar je omogočilo kortikotomijo prav na mestu in v smeri, kot smo jo načrtovali pred operacijo. Nekaj težav pri lokalizaciji bi pričakovali v primerih, ko v bližini manjših tumorjev na 3D modelih ne bi bilo videti večjih kortikalnih ven. V takšnih primerih bi bile zato potrebne dodatne predoperativne slike fazno kontrastne MRA (magnetnoresonančna angiografija), na katerih so vidne tudi manjše kortikalne žile. Nakajima in sod. so z uporabo teh slik pri 3D rekonstrukciji zmanjšali napako pri vstopu skozi možgansko skorjo na 1–1,7 mm (16).

Pri vstopu skozi možganovino bi lahko dodatno zmanjšali invazivnost in možnost pooperativnih zapletov z medoperativnim zajemanjem funkcionalnih podatkov. Neinvazivni medoperativni metodi za zajem funkcionalnih podatkov, kot sta intraoperativna fMR in infrardeča kamera, sta v zgodnjih fazah razvoja (22, 23). Tako je edina uveljavljena metoda za medoperativno ugotavljanje funkcionalno pomembnih področij elektrostimulacija korteksa (24). Ta metoda zahteva budnega bolnika, je invazivna metoda in ni uporabna med predoperativnim načrtovanjem. Ker se rezultati medoperativne elektrostimulacije korteksa dobro ujemajo z rezultati predoperativne fMR preiskav, je slednja primerna za predoperativno načrtovanje (25, 26).

Večja omejitev uporabe računalniško podprte 3D rekonstrukcije medicinskih slik pri načrtovanju in izvedbi operativnega posega je po našem mnenju odsotnost sledenja deformacijam možganovine zaradi odstranitve tumorja, edema ali krvavitev med operacijo. Deformacija možganovine v primerih tumorjev, večjih od 30 cm³, lahko vpliva na uspeh resekcije (27). Zato je v teh primerih za natančno vodenje operativnega posega in popolno odstranitev tumorja priporočljivo sledenje spreminjanju anatomije možganovine z medoperativnimi slikovnimi metodami (20, 28). Med temi sistemi se največ pričakuje od medoperativnega slikanja z MR, ki pa zaenkrat zaradi fizične velikosti, velikih stroškov in predvsem neopredeljenega izboljšanja preživetja bolnikov (cost/benefit) zaenkrat ni v širši klinični uporabi (19, 29). Podobne podatke nudi tudi intraoperativni UZ, ki je zaradi večje praktičnosti in manjših stroškov bolj dostopen (21). V razvojni fazi so tudi sistemi, ki pred ali med operacijo na podlagi zapletenih matematičnih modeliranj predoperativnih slik in 3D modelov simulirajo medoperativno deformacijo možganovine (30, 31).

Zaključki

Računalniško podprta 3D rekonstrukcija s programom »3D Slicer« omogoča bolj natančno umestitev

tumorja v intrakranialni prostor in opredelitev njegovega odnosa do sosednjih normalnih struktur v primerjavi z mentalno rekonstrukcijo 2D medicinskih slik. Zato kirurgu omogoča bolj natančno načrtovanje in izvedbo nevrokirurškega pristopa, kar zmanjša invazivnost in zaplete pri operativnem posegu. Računalniško podprta 3D vizualizacija je tudi osnova za različne medoperativne slikovne in nevronavigacijske sisteme. Natančnost načrtovanja in izvedbe operativnega posega z računalniško podprto 3D rekonstrukcijo medicinskih slik je moč izboljšati predvsem z izpopolnjevanjem zajemanja predoperativnih slikovnih podatkov oziroma z uporabo metod za medoperativno sledenje deformacijam možganovine.

Literatura

- Peters TM. Image-guided surgery: from X-rays to virtual reality. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 2000; 4: 27–57.
- Nabavi A, Kacher DF, Gering DT, Pergolizzi RS, Wells WM III, Wong TZ, et al. Neurosurgical procedures in a 0.5 tesla, open-configuration intraoperative MRI: planning, visualization, and navigation. *Automedica* 2001; 00: 1–35. Dosegljivo na: splweb.bwh.harvard.edu:8000/pages/papers/arya/automedica2001/automedica2001.pdf
- Jacobs AH, Kracht LW, Gossman A, Ruger MA, Thomas AV, Thiel A, Herholz K. Imaging in neurooncology. *NeuroRx* 2005; 2: 333–47.
- American society of neuroimaging. History of neuroimaging. Dosegljivo na: snap.asnweb.org/index.php?src=gendocs&link=NeuroImagingHistory&category=History
- Kikinis R, Gleason PL, Moriarty TM, Moore MR, Alexander E 3rd, Stieg PE, et al. Computer-assisted interactive three-dimensional planning for neurosurgical procedures. *Neurosurgery* 1996; 38: 640–9.
- Gering DT, Nabavi A, Kikinis R, Hata N, O'Donnell LJ, Grimson WE, et al. An integrated visualization system for surgical planning and guidance using image fusion and an open MR. *J Magn Reson Imaging* 2001; 13: 967–75.
- ANALYZE Program. Dosegljivo na: www.mayo.edu/bir/Software/Analyze/Analyze.html
- MEDx Software. Dosegljivo na: www.medicalnumerics.com
- MNI Software. Dosegljivo na: www.bic.mni.mcgill.ca/software/
- BrainLAB. Dosegljivo na: www.brainlab.com
- Colchester AC, Zhao J, Holton-Tainter KS, Henri CJ, Maitland N, Roberts PT, et al. Development and preliminary evaluation of VISLAN, a surgical planning and guidance system using intraoperative video imaging. *Med Image Anal* 1996; 1: 73–90.
- Jannin P, Fleig OJ, Seigneuret E, Grova C, Morandi X, Scarabin JM. A data fusion environment for multimodal and multi-informational neuronavigation. *Comput Aided Surg* 2000; 5: 1–10.
- Zamorano L, Jiang Z, Kadi AM. Computer-assisted neurosurgery system: Wayne State University hardware and software configuration. *Comput Med Imaging Graph* 1994; 18: 257–71.
- 3D Slicer. Dosegljivo na: www.slicer.org
- Chabrierie A, Nabavi A, Ozlen F, Leventon ME, Chatsidakis E, Nakajima S, et al. Three-dimensional reconstruction for cortical surgery: The Brigham and Women's hospital experience. *Techniques in Neurosurgery* 2001; 7: 61–9.
- Nakajima S, Atsumi H, Kikinis R, Moriarty TM, Metcalf DC, Jolesz FA, Black PM. Use of cortical surface vessel registration for image-guided Neurosurgery. *Neurosurgery* 1997; 40: 1201–8.
- Ganslandt O, Behari S, Gralla J, Fahlbusch R, Nimsky C. Neuro-navigation: concept, techniques and applications. *Neurol India* 2002; 50: 244–55.
- Ravnik J, Lipovšek M, Milojković V, Strojnik T, Šeruga T, Vinter M, Bunc G. Uporaba nevronavigacijskega sistema na Oddelku za nevrokirurgijo Splošne bolnišnice Maribor. *Zdrav Vestn* 2004; 73: 657–62.
- Keles GE. Intracranial neuronavigation with intraoperative magnetic resonance imaging. *Curr Opin Neurol* 2004; 17: 497–500.
- Albayrak B, Samdani AF, Black PM. Intra-operative magnetic resonance imaging in neurosurgery. *Acta Neurochir (Wien)* 2004; 146: 543–56.
- Unsgaard G, Rygh OM, Selbekk T, Muller TB, Kolstad F, Lindseth F, Hernes TA. Intra-operative 3D ultrasound in neurosurgery. *Acta Neurochir (Wien)* 2006; 148: 235–53.
- Gasser T, Ganslandt O, Sandalcioğlu E, Stolke D, Fahlbusch R, Nimsky C. Intraoperative functional MRI: implementation and preliminary experience. *Neuroimage* 2005; 26: 685–93.
- Ecker RD, Goerss SJ, Meyer FB, Cohen-Gadol AA, Britton JW, Levine JA. Vision of the future: initial experience with intraoperative real-time high-resolution dynamic infrared imaging. *Technical note. J Neurosurg* 2002; 97: 1460–71.
- Black P, Jaaskelainen J, Chabrierie A, Golby A, Gugino L. Minimalist approach: functional mapping. *Clin Neurosurg* 2002; 49: 90–102.
- Yetkin FZ, Mueller WM, Morris GL, McAuliffe TL, Ulmer JL, Cox RW, et al. Functional MR activation correlated with intraoperative cortical mapping. *AJNR Am J Neuroradiol* 1997; 18: 1311–5.
- Lee CC, Ward HA, Sharbrough FW, Meyer FB, Marsh WR, Raffel C, et al. Assessment of functional MR imaging in neurosurgical planning. *AJNR Am J Neuroradiol* 1999; 20: 1511–9.
- Benveniste RJ, Germano IM. Correlation of factors predicting intraoperative brain shift with successful resection of malignant brain tumors using image-guided techniques. *Surg Neurol* 2005; 63: 542–8.
- Nabavi A, Gering DT, Kacher DF, Talos IF, Wells WM, Kikinis R, et al. Surgical navigation in the open MRI. *Acta Neurochir Suppl* 2003; 85: 121–5.
- Seifert V. Intraoperative MRI in neurosurgery: technical overkill or the future of brain surgery? *Neurol India* 2003; 51: 329–32.
- Warfield SK, Haker SJ, Talos IF, Kemper CA, Weisenfeld N, Mewes AU, et al. Capturing intraoperative deformations: research experience at Brigham and Women's Hospital. *Med Image Anal* 2005; 9: 145–62.
- Carter TJ, Sermesant M, Cash DM, Barratt DC, Tanner C, Hawkes DJ. Application of soft tissue modelling to image-guided surgery. *Med Eng Phys* 2005; 27: 893–909.