

Strokovni prispevek/Professional article

# UPORABA NEVRONAVIGACIJSKEGA SISTEMA NA ODDELKU ZA NEVROKIRURGIJO SPLOŠNE BOLNIŠNICE MARIBOR

USE OF THE NEURONAVIGATIONAL SYSTEM AT THE DEPARTMENT OF  
NEUROSURGERY IN THE GENERAL HOSPITAL MARIBOR

Janez Ravnik<sup>1</sup>, Matej Lipovšek<sup>1</sup>, Vojin Milojković<sup>1</sup>, Tadej Strojnik<sup>1</sup>, Tomaž Šeruga<sup>2</sup>, Marko Vinter<sup>2</sup>, Gorazd Bunc<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Oddelek za nevrokirurgijo, Splošna bolnišnica Maribor, Ljubljanska 5, 2000 Maribor

<sup>2</sup> Oddelek za radiologijo, Splošna bolnišnica Maribor, Ljubljanska 5, 2000 Maribor

Prispelo 2003-06-12, sprejeto 2004-06-24; ZDRAV VESTN 2004; 73: 657-62

**Ključne besede:** nevrokirurgija; nevronavigacija; možganski tumorji

**Izvleček** – Izhodišča. Neuronavigacijski sistem je računalniško podprt sistem za medoperativno načrtovanje in vodenje nevrokirurških postopkov z interaktivnim slikovnim prikazom. Številni nevronavigacijski sistemi uporabljajo različne tehnične rešitve za medoperativno spremljanje. Uporabo takega sistema imenujemo nevronavigacija.

**Metode.** Od junija 2002 do aprila 2003 smo na oddelku za nevrokirurgijo Splošne bolnišnice Maribor z nevronavigacijsko operirali 14 bolnikov (povprečna starost 52 let). Uporabljali smo nevronavigacijski sistem, ki temelji na zaznavanju infrardečih odbojev in medoperativnem spremljanju s pomočjo računalniškotomografskega slikovnega prikaza v treh ravninah.

**Rezultati.** Neuronavigacijski sistem smo uporabili v štirih primerih biopsije, štirih primerih redukcije spremembe ter v šestih primerih popolne odstranitve spremembe. 11 možganskih sprememb je ležalo subkortikalno ali globlje, dve sta bili kortikalni možganski spremembi, ena pa osteolitična sprememba v možganski kosti. Povprečni premer je znašal 3,5 cm. Izračunana natančnost interaktivnega slikovnega prikaza je bila dobra pri vseh 14 bolnikih.

**Zaključki.** Neuronavigacijski sistem, ki ga uporabljamo, je enostaven in dokaj natančen. Poveča hitrost, varnost in zanesljivost pri večini posegov na možganih.

## Uvod

Poglavitno vodilo v nevrokirurgiji je čim bolj natančna umestitev bolezenske spremembe, ki je kirurško čim lažje, enostavnejše in varneje dostopna, odstraniti pa jo je treba ob čim manjši poškodbi zdravih struktur. Poleg hitrega razvoja in izpopolnjevanja slikovnih diagnostičnih metod so se v zadnjem desetletju tudi izredno hitro razvili računalniško podprti sistemi za medoperativno načrtovanje in vodenje nevrokirurških postopkov z interaktivnim slikovnim prikazom (1). Taki

**Key words:** neurosurgery; neuronavigation; brain tumors

**Abstract** – Background. Neuronavigational system is a computerised system for intraoperative planning and guidance of neurosurgical procedures using interactive image presentation. The application of such system is denoted as neuronavigation. There are many neuronavigational systems with different technical solutions for intraoperative guidance.

**Methods.** From June 2002 till April 2003 fourteen patients (mean age 52 years) were operated using of neuronavigational system on department of neurosurgery in Maribor General Hospital. We used neuronavigational system based on infrared light detection and intraoperative guidance with the help CT imaging in three-planes.

**Results.** The system was used in four cases of biopsy, four cases of lesion reduction and six cases of total lesion removal. 11 brain lesion were situated subcortically or deeper, two were cortical and one was osteolytic lesion of the skull bone. Lesions mean diameter was 3.5 cm. Calculated accuracy of interactive image-guidance was good in all 14 cases.

**Conclusions.** Neuronavigational system which we used is simple and quite accurate. Its usage improves speed, safety and accuracy of most neurosurgical procedures.

sistemi se imenujejo nevronavigacijski sistemi, njihova uporaba pa nevronavigacija.

Nevronavigacija korenini v tehnikah stereotaktične kirurgije, ki se uporablja za izračunavanje umestitve tarče znotraj tridimenzionalnega prostora. Stereotaksija je stara metoda. O njeni uporabi pri operacijah na živalih prvič poročata Horsley in Clark že leta 1908 (3). V klinično prakso so jo uvedli Spiegel in sod. štiri desetletja kasneje (3), razcvet pa je doživela z razvojem sodobnih slikovnih preiskav. Glavni pripomoček stereotaksije je stereotaktični okvir, pritrjen na bolnikovo glavo,

zato te tehnike imenujemo tudi »na okviru temelječe« tehnike (angl. frame-based). Te tehnike so izredno natančne tudi za zelo globoko ležeče spremembe. Njihova slaba stran je, da na glavo nameščen stereotaktični okvir lahko moti kirurški dostop. Ne omogočajo pa tudi medoperativne slikovne povratne informacije. To je botrovalo razvoju nevronavigacijskih sistemov brez uporabe okvirja (angl. frameless), ki so se pričeli razvijati konec osemdesetih let. Prednosti nevronavigacije so optimalna določitev mesta kraniotomije, boljše načrtovanje kirurškega pristopa, dostop do globokih možganskih sprememb z minimalno poškodbo možganovine in boljša anatomska orientacija (4). Trenutno obstaja več sistemov, ki uporabljajo različna tehnična načela za zaznavo položaja kirurških instrumentov glede na anatomske razmere in računalniškotomografsko (CT) oz. magnetnoresonančno (MR) sliko v različnih projekcijah: ultrazvočna zaznava impulzov (5), gibljive mehanične roke (6), optična zaznava odbojev infrardečih žarkov (7) in zaznava elektromagnetnega valovanja (8). Večina sistemov uporablja fiksne (nespremenljive) CT ali MR slike glave. To pomeni, da so slike narejene pred samo operacijo, med operacijo pa se več ne spreminjajo. To je ena glavnih težav teh metod, saj se ob odstranitvi večje patološke mase, odstranitvi možganske tekočine ipd. premaknejo možganske mase in spremenjene anatomske razmere, ki pa jim tak nevronavigacijski sistem ne sledi (9). To je vodilo v razvoj tehnologij za medoperativno spremljanje anatomske spremembe (10), ki nato vodijo nevronavigacijski sistem. Nekateri sistemi pri tem kombinirajo različne slikovne metode, npr. MR in ultrazvok (11, 12).

Na tehnologiji zaznave odbojev infrardečih žarkov temelji tudi nevronavigacijski sistem VectorVision firme BrainLab (BrainLab AG, München, Nemčija). Gre za sistem, kjer se ne uporablja niti stereotaktični okvir niti mehanična roka (angl. frameless armless). Preizkušen je bil že na večjem številu bolnikov in se je izkazal za natančnega in zanesljivega (13). Od leta 2002 ga uporabljamo tudi na Oddelku za nevrokirurgijo Splošne bolnišnice Maribor. V sestavku želimo prikazati naše dosedanje izkušnje pri uporabi tega sistema.

## Metoda

### Bolniki

Od junija 2002 do aprila 2003 smo na Oddelku za nevrokirurgijo Splošne bolnišnice Maribor uspešno uporabili nevronavigacijski postopek pri 14 bolnikih (8 moških in 6 žensk). Bolniki so bili stari od 18 do 75 let (povprečno 52 let). Pri enem bolniku sistem ni ustrezno deloval.

### Opis nevronavigacijskega postopka

#### Predoperativna priprava bolnika

Pred operacijo pritrdimo bolniku na glavo s samolepilnim trakom 6 referenčnih označevalcev, ki so dobro vidni na CT slikah (sl. 1). S pritrjenimi označevalci bolnik opravi CT slikanje glave, običajno z intravensko uvedenim kontrastnim sredstvom. CT slikanje glave običajno opravimo zjutraj tik pred operacijo, tako da se do operacije izognemo večjim premikom označevalcev. Po slikanju sledi računalniška rekonstrukcija, ki omogoča prikaz slikovnih rezov v treh ravninah: aksialni, koronarni in sagitalni. Označevalci so dobro prikazani na slikah v vseh treh ravninah in služijo kot referenčne točke. Računalniški program, kjer sočasno shranjene slikovne rekonstrukcije, samodejno zazna lego označevalcev. Preveriti moramo pravilnost izbire ter lege označevalcev, kar lahko tudi ročno popravimo. Podatke o bolniku z rekonstrukcijami slik in označenimi položaji označevalcev nato posnamemo na posebno disketo z zgoščenim zapisom (zip), ki jo dostavimo v operacijsko dvorano.



Sl. 1. Na glavi pritrjeni označevalci, s katerimi bolnik opravi CT slikanje glave.

Figure 1. Patient ready for a head CT with markers mounted on his head.

#### Opis nevronavigacijskega sistema

Dve kameri, meter oddaljeni ena od druge, sta pritrjeni na nosilec, ki mu lahko nastavljamo višino, oddaljenost od operativnega polja, lahko pa spreminjamo tudi pozicijski kot obeh kamer. Nosilec je pritrjen na poseben premični voziček, na katerem stoji tudi računalnik in monitor (sl. 2).

Oddaljenost kamer od operativnega polja je en meter do dva. Okrog kamer so nameščene diode, ki oddajajo infrardečo svetlobo, kameri pa zaznavata infrardeče odboje. Kameri sta povezani s pod njima stoječim računalnikom, z računalnikom pa je povezan tudi monitor, s katerim spremljamo celotni postopek nevronavigacije.



Sl. 2. Prikaz posameznih komponent nevronavigacijskega sistema med njegovim umerjanjem.

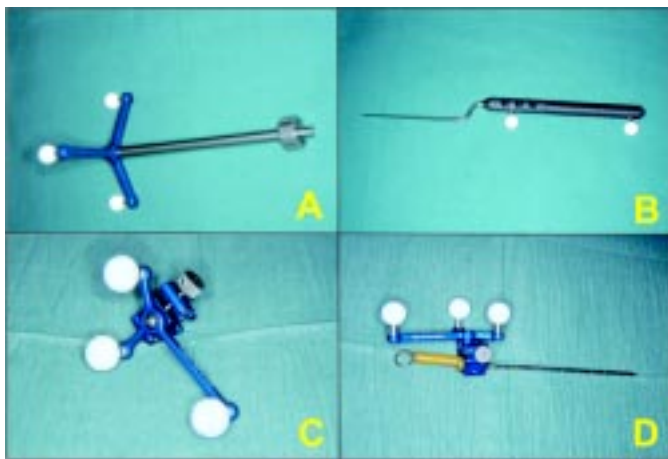
Figure 2. Different components of neuronavigational system during its calibration.

#### Kalibriranje sistema

V operacijski dvorani bolnikove podatke iz diskete prenese mo v računalnik, ki je povezan z infrardečimi kamerami ter detektorji odbojev. Programska oprema na računalniku usmerja potek nevronavigacije, pri čemer nas po korakih vodi po celotnem postopku.

Bolniku v splošni anesteziji glavo vpne v Mayfieldov okvir. Nanj pritrdimo tudi nosilec, v katerega vpne tritočkovni nastavek v obliki zvezde (sl. 2, sl. 3A). Na vsaki od treh točk zvezde je pričvrščena odbojna kroglica, prevlečena s posebno snovjo, ki odbija infrardečo svetlobo. Nosilec in vanj vpeta tritočkovna zvezda ostaneta ves čas operacije v enakem fiksnem odnosu do vpete glave.

Za umerjanje uporabimo poseben kazalnik (angl. pointer – sl. 2, sl. 3B), ki ima na koncu prav tako pritrjeni dve odbojni kroglici. S konico kazalnika se dotaknemo na glavi pritrjenih označevalcev in s tem označimo njihov položaj na glavi. Kameri namreč zaznata odboje infrardeče svetlobe tako obeh odbojnih kroglic na kazalniku kot tudi odboje odbojnih kroglic tritočkovne zvezde. Računalniški sistem, ki zbira podatke o infrardečih odbojih, lahko tako izračuna položaj posameznega na koži pritrjenega označevalca relativno na fiksno referenčno točko (tritočkovno zvezdo), kot tudi glede na CT slike glave v treh ravninah, kjer je položaj označevalcev na glavi že določen. Umerjanje je tako v bistvu potrditev položaja označevalcev na glavi bolnika glede na položaj označevalcev na CT slikah glave.



Sl. 3. Pripomočki pri nevronavigaciji: A – tritočkovna zvezda, B – kazalnik, C – nastavek z odbojnimi kroglicami, ki se lahko pritrdi na druge kirurške instrumente, D – Dandyjeva kanula s pričvrščenim nastavkom.

Figure 3. Tools for neuronavigation: A – three-point star, B – pointer, C – adapter with reflective spheres which can be mounted on other surgical instruments, D – Dandy's cannula with the adapter mounted on it.

#### Uporaba nevronavigacije med operacijo

Iz nosilca odvijemo tritočkovno zvezdo, z glave pa odstranimo pritrjene označevalce. Nosilec za zvezdo ostane pritrjen v enakem položaju. Po čiščenju in pokrivanju operativnega polja na nosilec pritrdimo novo, sterilizirano tritočkovno zvezdo z odbojnimi kroglicami. Za označevanje mesta na glavi glede na CT slike glave v treh projekcijah med operacijo uporabljamo steriliziran kazalnik (sl. 4). Računalniški sistem glede na odboje infrardeče svetlobe od odbojnih kroglic, pritrjenih na kazalni instrument in tritočkovno zvezdo, izračunava položaj konice kazalnika, ki je prikazan na CT slikah glave na monitorju v treh ravninah. Pri premikanju označevalca se sproti spreminja tudi prikaz položaja na CT slikah na monitorju. Bistvo navigacije je torej sproti določanje položaja instrumentov na CT slikah glave v treh projekcijah (primer na sl. 5). Z omenjenim kazalnikom tako na kosti natančno določimo mesto, pod katerim se nahaja neka bolezenska sprememba možganovine, kar nam omogoča natančno načrtovanje kra-

niotomije (primer na sl. 6), ki je tudi temu primerno manjša. Nevronavigacija je posebno uporabna pri določanju mesta sprememb možganovine pod korteksom, kjer spremembo prekriva normalni korteks. S kazalnikom pa na korteksu zlahka določimo mesto, pod katerim se sprememba nahaja, tako da je le-ta kirurško odstranljiva s čim manjšo poškodbo zdrave možganovine.

Odbojne kroglice, ki odbijajo infrardečo svetlobo, se lahko v obliki posebne manjše zvezde pritrdijo tudi na ostale kirurške instrumente (sl. 3C). S posebno kaseto označimo še oddaljenost konice instrumenta od kroglic, pritrjenih na instrument. Na monitorju lahko nadalje spremljamo natančen položaj instrumenta glede na CT slike. Odbojne kroglice tako lahko pritrdimo na ustrezne biopsijske kanile (sl. 3D), kar nam omogoča natančen odvzem biopsijskega materiala. To je uporabno predvsem pri globljih spremembah, kjer ob spremljanju na monitorju natančno vemo, kdaj smo dosegli spremembo, od koder bomo odvzeli biopsijski vzorec (primer na sl. 5). Odbojne kroglice lahko namestimo tudi na druge kirurške instrumente, npr. na mandren ventrikularnega katetra, tako da pri uvajanju točno vemo, kdaj smo s konico prišli v ventrikularni sistem. To nam pomaga pri uvajanju katetra v ozke ventrikle (14).



Sl. 4. Uporaba nevronavigacije med operacijo.

Figure 4. Neuronavigation usage during operation.

## Rezultati

Zaradi učenja povsem novega postopka smo se v tem začetnem obdobju srečevali s posameznimi napakami in pomanjkljivostmi. Pred dejanskim pričetkom uporabe navigacije med operacijo namreč lahko pride do številnih napak: npr. premiki označevalcev na glavi med CT slikanjem, med prevozom bolnika ter med vpenjanjem glave, nenatančna potrditev mesta označevalcev med kalibriranjem sistema ipd. Vse te napake povzročajo določeno nenatančnost, ki vodi v odstopanje med dejanskim položajem, kot ga prikazuje navigacijski sistem, in resničnim položajem na/v glavi. Po vsaki kalibraciji računalniški sistem avtomatično izračuna to odstopanje. Običajno znaša en do dva milimetra. Pri enem bolniku sistem tako ni dobro deloval zaradi premajhne natančnosti pri postop-



Razpr. 1. Podatki o bolnikih, operiranih z nevronavigacijo.  
Table 1. Data of the patients, operated with neuronavigation.

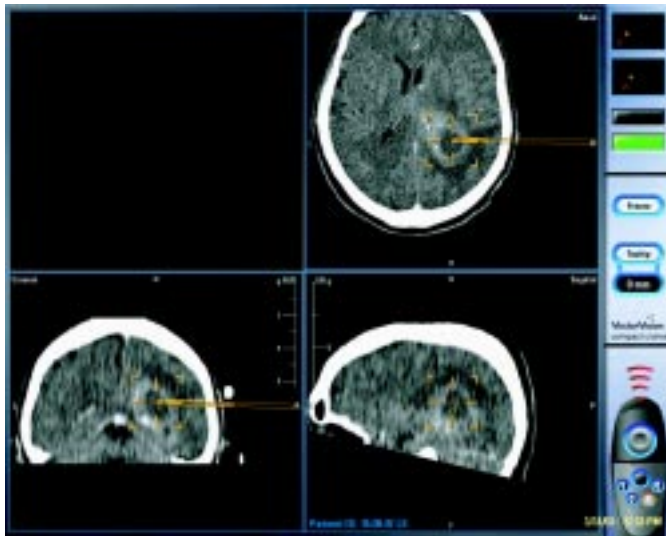
Št. No.	Starost Age	Umestitev Location	Globlina Depth	Poseg Procedure	Histološka diagnoza Histological diagnosis	Premer (cm) Diameter (cm)
1	48	l. parietalno left parietal	subk. ali globlje subc. or deeper	redukcija reduction	oligodendrogliom oligodendroglioma	3,8
2	58	l. frontobazalno left frontobasal	kortikalno cortical	odstranitev removal	meningeom meningeoma	5,2
3	62	l. temporalno left temporal	subk. ali globlje subc. or deeper	redukcija reduction	ksantoastrocitom xantoastrocitoma	3,3
4	75	l. parietalno left parietal	subk. ali globlje subc. or deeper	redukcija reduction	anaplastični astrocitom anaplastic astrocitoma	3,0
5	49	l. okcipitalno left occipital	subk. ali globlje subc. or deeper	odstranitev removal	metast. malign. melan. metastasis of malignant melanoma	2,8
6	50	l. okcipitalno left occipital	subk. ali globlje subc. or deeper	odstranitev removal	metastaza svetlocel. karcinoma metastasis of clearcell carcinoma	2,0
7	61	l. temporalno left temporal	subk. ali globlje subc. or deeper	biopsija biopsy	anaplastični astrocitom anaplastic astrocitoma	4,8
8	71	l. frontalno left frontal	subk. ali globlje subc. or deeper	redukcija reduction	anaplastični astrocitom anaplastic astrocitoma	3,3
9	43	l. frontalno left frontal	subk. ali globlje subc. or deeper	biopsija biopsy	astrocitom astrocitoma	4,7
10	18	v kosti d. parietal. osteolit. sprem. in bone r. parietal	osteolitic lesion	odstranitev removal	bone dysplasia	1,5
11	60	l. frontoparietalno left frontoparietal	subk. ali globlje subc. or deeper	biopsija biopsy	oligodendrogliom oligodendroglioma	7,0
12	55	d. temporo-okcipitalno right temporo-occipital	subk. ali globlje subc. or deeper	biopsija biopsy	astrocitom astrocitoma	2,5
13	28	d. frontalno right frontal	subk. ali globlje subc. or deeper	odstranitev removal	demielinizacijski plak plaque of demyelination	2,3
14	53	l. parietalno left parietal	kortikalno cortical	odstranitev removal	meningeom meningeoma	2,6

Premer – največji premer spremembe na aksialnih CT slikah glave; subk. – subkortikalno  
Diameter – the largest diameter on axial head CT scans

merih biopsije, štirih primerih redukcije ter v šestih primerih popolne odstranitve spremembe. V enem primeru je bila kostna osteolitična sprememba znotraj lobanjske kosti, a sicer na glavi netipljiva (sl. 7). V vseh preostalih primerih je šlo za možganske spremembe – 11 sprememb se je nahajalo subkortikalno ali globlje, 2 pa sta bili kortikalni. Povprečni premer je znašal 3,5 cm. Za ilustracijo sledi še slikovni prikaz uporabe nevronavigacije pri treh bolnikih.

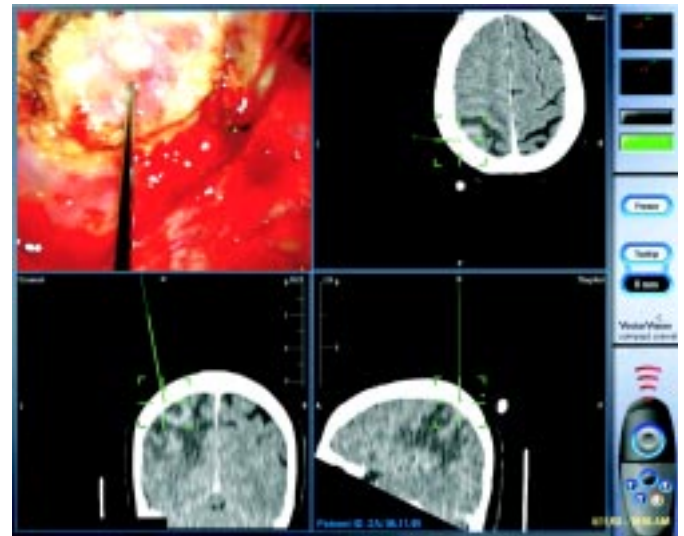
## Razpravljanje

Nevronavigacijski sistem, prikazan v tem prispevku, se je kljub začetni neizkušeni izkazal za zelo uporabnega. To velja zlasti za pristop do subkortikalnih ali še globlje ležečih sprememb možganovine blizu elokventnih področij. Večina sprememb pri naših bolnikih je bila subkortikalnih ali še globlje ležečih. Pri takih spremembah je po kraniotomiji in odprtju dure težavno natančno določiti njihovo mesto, saj ne segajo do površine možganov. Z nevronavigacijo pa smo najprej natančno določili mesto kraniotomije, nato pa dokaj enostavno in z minimalno poškodbo zdrave možganovine dosegli spremembo. Tudi sama kraniotomija je iz istega razloga manjša, celotna operacija pa poteka krajši čas.



Sl. 5. Primer biopsije možganske spremembe z nevronavigacijo.

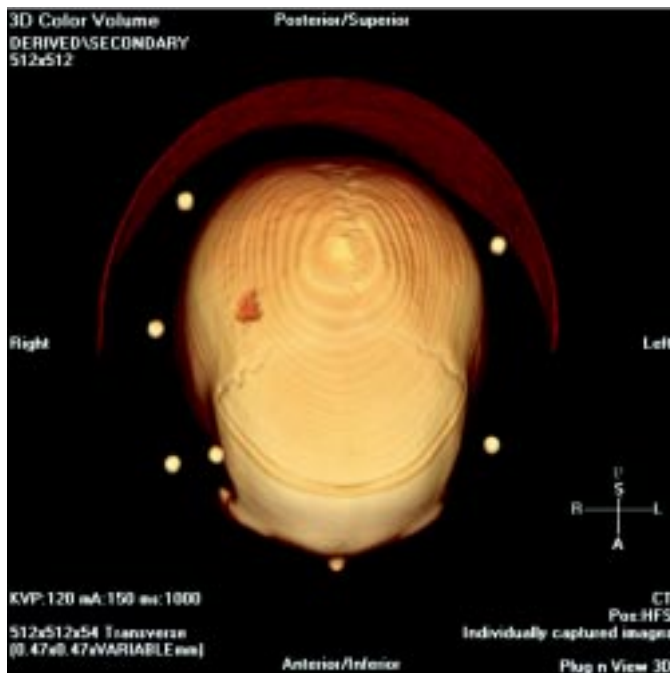
Figure 5. Example of biopsy of the brain lesion with the help on neuronavigation.



Sl. 6. Uporaba nevronavigacije pri načrtovanju mesta kraniotomije pri operaciji možganske metastaze. Slika je posneta po opravljeni kraniotomiji. Mesto kazalnega inštrumenta nad metastazo je prikazano na CT posnetkih v treh ravninah. V zgornjem levem kvadrantu je prikazana slika, kot jo vidimo pod kirurškim mikroskopom.

Figure 6. Neuronavigation usage for craniotomy planning for operation of the brain metastase. The picture is filmed after craniotomy was done. The pointer position over metastase is shown on CT images in three planes. In the upper left quadrant is a picture as seen under surgical microscope.

ku kalibriranja. Pri ostalih 14 bolnikih je sistem deloval dobro, izračunano odstopanje v slikovnem prikazu je bilo manj kot 2 mm, razen pri enem bolniku (odstopanje 4,3 mm). Podatki o bolnikih in vrste posegov so prikazane v razpredelnici 1. Nevronavigacijski sistem smo uporabili v štirih pri-



Sl. 7. Tridimenzionalna kostna rekonstrukcija pri bolnici, pri kateri smo opravili biopsijo osteolitične spremembe kosti. Poleg položaja osteolitične spremembe so prikazani tudi na glavi pritrjeni označevalci.

Figure 7. Three-dimensional bone reconstruction for patient where biopsy of the osteolytic skull bone lesion was performed. In addition to osteolytic lesion the position of markers mounted on the head is also shown.

Pri štirih bolnikih smo opravili le biopsijo lezije skozi vrtino v kosti. V vseh primerih biopsij je bilo mesto sprememb subkortikalno ali globlje in pri vseh štirih biopsijah smo odvzeli vzorec patološkega tkiva. Ne glede na vrsto posega smo spremembe možganovine vedno dosegli. Z nevronavigacijo ni bilo nobenega negativnega posega v možganovino ali pa negativne biopsijske punkcije. V enem primeru smo nevronavigacijo uporabili tudi za natančno določitev osteolitične spremembe v kosti, ki na glavi ni bila tipljiva. Izkazalo se je, da gre zgolj za kostno displazijo in ne za patološko spremembo v kosti. Pri enem bolniku je prišlo po posegu do poslabšanja nevrološke simptomatike. Poslabšanje je nastopilo takoj po biopsiji. Vzrok je bila krvavitev v samem tumorju, ki smo jo povzročili z biopsijo.

Z načrtovanjem dostopa do spremembe s pomočjo nevronavigacije smo se tudi skušali čim bolj izogniti področjem možganov, za katera smo domnevali, da so elokventna. Nevronavigacija nam je tako planiranje nekoliko olajšala, saj nam je z interaktivnim CT prikazom omogočila dober nadzor nad pravilno usmerjenostjo kirurškega pristopa. Potrebno pa je poudariti, da bi za bolj natančno določitev elokventnosti možganske skorje za posamezne funkcije potrebovali predoperativno oceno s pomočjo funkcionalnega magnetnoresonančnega slikanja (fMRI), ki pa nam žal še ni na voljo za rutinsko uporabo. Elokventnim področjem se je sicer možno še natančneje izogniti s kombinirano uporabo nevronavigacijske tehnike ter katere od tehnik kortikalnega »mappinga« (14, 15).

Po umerjanju sistema se samodejno izračunava tudi največje odstopanje v natančnosti, kot je to opisano v rezultatih. Izračunano odstopanje je znašalo pri vseh bolnikih z izjemo ene ga pod 2 mm. Povprečni premer lezij je bil 3,5 cm. Šlo je torej za dokaj majhne spremembe, pri katerih smo potrebovali pre-

cejšnje natančnost sistema. Kljub temu pa bi bila vsaj za biopsijo še manjših oz. zelo globoko ležečih sprememb, kjer je potrebna še večja natančnost, ustrežnejša uporaba stereotaktičnega okvirja (13, 16).

Drugi problem pri uporabi tovrstnega nevronavigacijskega sistema je t.i. možganski premik (angl. brain shift). Po različnih posegih in manipulacijah možganovine (npr. odstranitev lezije, sprostitve likvorskih prostorov, uporaba vleka, nastanek možganskega edema ali krvavitve) pride do premikov možganovine in sprememb v anatomskih odnosih. Novih anatomskih odnosov pa sistem ne upošteva. Manjka namreč povratna informacija o novi anatomski situaciji, tako da se sistem še vedno opira na predoperativne slike glave. Položaj, ki ga sistem prikazuje, torej ni več realen, saj deluje na podlagi starih slik, anatomska situacija pa je lahko bistveno spremenjena. Različni premiki možganovine pri sistemih, ki ne omogočajo povratne informacije, so ena večjih pomanjkljivosti, ki bistveno zmanjšuje njihovo uporabnost. Možno rešitev predstavlja ponovno medoperativno CT oz. še bolje MR slikanje, kar prikaže nove anatomske odnose (17, 18). Žal pa se ta rešitev glede na trenutno finančno in tehnično situacijo ne zdi stvarna. Problem možganskega premika dobro rešujejo tudi sistemi, ki za prikaz novih anatomskih odnosov uporabljajo medoperativni ultrazvok (12).

Nevronavigacijski sistem bi bil uporaben tudi pri nekaterih drugih posegih, npr. pri uvajanju ventrikularnega katetra pri zelo ozkih ventriklih ali pa pri posegih endoskopske nevrokirurgije (13, 19, 20). V naši ustanovi ga pri tovrstnih posegih še nismo preizkusili.

V enem primeru nevronavigacija ni ustrezno delovala. Šlo je za veliko izračunano odstopanje v natančnosti, za kar je možnih več vzrokov: premik označevalcev na glavi med predoperativnim CT slikanjem, med prevozom, med vpenjanjem glave ali pa med umerjanjem sistema, neustrezna računalniška zaznava označevalcev na glavi ipd. Možno, da je prav registracija položaja označevalcev na glavi (umerjanje) tisti del nevronavigacijskega postopka, ki najbolj vpliva na natančnost nevronavigacije (21).

Slaba ločljivost večine možganskih sprememb na CT slikah je trenutno ena glavnih pomanjkljivosti sistema, zaradi katere nevronavigacije ne uporabljamo pogosteje. Bistveno lažje in natančneje bi bilo uporabljati nevronavigacijo v povezavi z (MR) slikanjem glave. MR ima bistveno prednost pred CT slikanjem predvsem zaradi veliko bolj natančnega prikaza mehkih tkiv. Zaradi boljšega prikaza možganskih struktur ter razsežnosti nekoga patološkega procesa je z MR podprta nevronavigacija lahko bistveno boljša in natančnejša za načrtovanje operacije. Za navigacijo, podprto z MR, pa je pri sistemu, ki ga uporabljamo, potrebna dodatna oprema za prenos in rekonstrukcijo slik. Te zaenkrat še nimamo, njen nakup in uporabo pa že načrtujemo. Še boljše rešitev predstavlja funkcionalno magnetnoresonančno slikanje, zlasti pri spremembah blizu elokventnih področij (22). Dodatna programska oprema (je še nimamo) omogoča tudi sprotno tridimenzionalno rekonstrukcijo ter prikaz položaja kirurških instrumentov v tridimenzionalnem prostoru (13). Na sliki 7 je sicer prikazan primer takšne tridimenzionalne rekonstrukcije, vendar je bil ta opravljen kasneje in ne med samo operacijo. Nekaj težav predstavlja tudi nekoliko nerodno prenašanje CT slik glave bolnikov na t. i. zip disketi v operacijsko dvorano. Težavo nameravamo premestiti z ustreznim kabelsko povezavo med računalnikom, kjer se opravlja CT slikanje glave, ter računalnikom v operacijski dvorani.

Z delovanjem nevronavigacijskega sistema smo zadovoljni. Manjše nerodnosti in napake so bile večinoma posledica naše začetne neizkušenosti pa tudi nekaterih tehničnih pomanjkljivosti, ki smo jih oz. jih še bomo odpravili. Glavne pomanjkljivosti so odstopanje v prikazu zaradi nenatančnosti v kalibraciji sistema, neupoštevanje možganskih premikov med operacijo ter nenatančen prikaz mehko tkivnih struk-

tur zaradi uporabe navigacije, podprte zgolj s CT slikanjem. Predvsem uporaba navigacije, podprte z MR, bi bistveno pripomogla k večji natančnosti in uporabnosti sistema. V večini primerov pa sistem dobro deluje, je dovolj natančen ter enostaven za uporabo. Njegova uporaba poveča varnost in zanesljivost pri večini posegov na možganih, tako da smo prepričani, da bo delež nevronavigacijsko vodenih operacij s časom vse večji.

## Literatura

- Liu CY, Apuzzo MJ. The genesis of neurosurgery and the evolution of the neurosurgical operative environment: Part I - Prehistory to 2003. *Neurosurgery* 2003; 52: 3-19.
- Horsley V, Clarke RH. The structure and the function of the cerebellum examined by a new method. *Brain* 1908; 31: 45-124.
- Spiegel EA, Wycis HT, Marks M, Lee AJ. Stereotactic apparatus for operations on the human brain. *Science* 1947; 106: 349-50.
- Sore U, Alberti O, Petermeyer M, Becker R, Bertalanffy H. Advanced image-guided skull base surgery. *Surg Neurol* 2000; 53: 563-72.
- Roberts DW, Strohbein JW, Hatch JF, Murray W, Kettenberger H. A frameless stereotactic integration of computerized tomographic imaging and the operating microscope. *J Neurosurg* 1986; 65: 545-9.
- Watanabe E, Mayanagi Y, Kosugi Y, Manaka S, Takatura K. Open surgery assisted by the Navigator, a stereotactic articulated, sensitive arm. *Neurosurgery* 1991; 28: 792-800.
- Spetzger U, Laborde G, Gilsbach JM. Frameless neuronavigation in modern neurosurgery. *Minim Invasive Neurosurg* 1995; 38: 163-6.
- Suess O, Kombos T, Kurth R, Suess S, Mularski S, Hammersen S, Brock M. Intracranial image-guided neurosurgery: Experience with a new electromagnetic navigation system. *Acta Neurochir (Wien)* 2001; 143: 927-34.
- Dornward NL, Alberti O, Velani B, Gerritsen FA, Harkness WFJ, Kitchen ND, Thomas DGT. Postimaging brain distortion: Magnitude, correlates and impact on neuronavigation. *J Neurosurg* 1998; 88: 656-62.
- Sutherland GR, Kaibara T, Louw D, Hoult DI, Tomanek B, Saunders J. A mobile high-field magnetic resonance system for neurosurgery. *J Neurosurg* 1999; 91: 804-13.
- Bonsanto MM, Staubert A, Wirtz CR, Tronnier V, Kunze S. Initial experience with an ultrasound-integrated single-rack neuronavigation system. *Acta Neurochir (Wien)* 2001; 143: 1127-32.
- Unsgaard G, Ommedal S, Muller T, Gronningsaeter A, Nagelhus-Hernes TA. Neuronavigation by intraoperative three-dimensional ultrasound: Initial experience during brain tumor resection. *Neurosurgery* 2002; 50: 804-12.
- Gumprecht HK, Widenka D, Lumenta C. BrainLab Vector Vision neuronavigation system: Technology and clinical experiences in 131 cases. *Neurosurgery* 1999; 44: 97-105.
- Jannin P, Morandi X, Fleig OJ, Le Rumeur E, Toulouse P, Gibaud B, Scarabin JM. Integration of sulcal and functional information for multimodal neuronavigation. *J Neurosurg* 2002; 96: 713-23.
- Eisner W, Burtscher J, Bale R et al. Use of neuronavigation and electrophysiology in surgery of subcortically located lesions in the sensorimotor strip. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2002; 72: 378-81.
- Grunert P, Espinosa J, Busert C, Gunthner M, Filippi R, Farag S, Hopf N. Stereotactic biopsies guided by an optical navigation system: technique and clinical experience. *Minim Invasive Neurosurg* 2002; 45: 11-5.
- Broggi G, Ferroli P, Franzini A, Dones L, Marras C, Marchetti M, Maccagnano E. CT-guided neurosurgery: preliminary experience. *Acta Neurochir* 2003; 85: 101-4.
- Nimsky C, Ganslandt O, Hastreiter P, Fahlbusch R. Intraoperative compensation for brain shift. *Surg Neurol* 2001; 56: 354-7.
- Gil Z, Siomin V, Bani-Adani L, Sira B, Constantini S. Ventricular catheter placement in children with hydrocephalus and small ventricles: the use of a frameless neuronavigation system. *Childs Nerv Syst* 2002; 18: 26-9.
- Alberti O, Riegel T, Hellwig D, Bertalanffy H. Frameless navigation and endoscopy. *J Neurosurg* 2001; 95: 541-3.
- Steinmeier R, Rachinger J, Kaus M, Ganslandt O, Huk W, Fahlbusch R. Factors influencing the application accuracy of neuronavigation systems. *Stereotact Funct Neurosurg* 2000; 75: 188-202.
- Gumprecht H, Ebel GK, Auer DP, Lumenta CB. Neuronavigation and functional MRI for surgery in patients with lesion in eloquent areas. *Minim Invasive Neurosurg* 2002; 45: 151-3.