

開頭手術用定位脳手術装置の開発

奥 寺 敬

信州大学医学部脳神経外科学教室

Development of Stereotactic Guide System for Open Neurosurgery

Hiroshi OKUDERA

Department of Neurosurgery, Shinshu University School of Medicine

The development of an intraoperative stereotactic guide system for use in open neurosurgery is described.

The system design is based on the multipurpose head frame (Sugita) and maintains its isocentric movement. The system consists of stereotactic localization markers and a stereotactic guide arm with two Argon laser pointers for intraoperative use. The stereotactic guide system presented in this paper enables us to achieve intraoperative three-dimensional localization of the target during open neurosurgery. *Shinshu Med J* 41: 571-578, 1993

(Received for publication July 20, 1993)

Key words: neurosurgery, stereotaxis, image-guided surgery, instrumentation

脳神経外科, 定位脳手術, 画像誘導手術, 手術装置

I はじめに

定位脳手術は、機能的脳神経外科の手術手技として考案、開発されたもので、当初は、定位脳手術装置を用いた気脳室撮影により座標を求め局所麻酔下の穿頭術を行う視床破壊術が主流であった¹⁾²⁾。その後、X線CTスキャナー（以下、CT）の開発³⁾に伴い、CT用定位脳手術装置が開発され、座標計算をCTのコンピューターで行うCT誘導定位脳手術が考案された⁴⁾⁷⁾。このCTを用いた定位脳手術はCTの普及とともに脳内血腫除去⁸⁾や脳腫瘍の生検⁹⁾¹⁰⁾、摘出¹¹⁾¹³⁾などに応用範囲が広がり、現在では脳神経外科の基本的手術手技の1つとなっている。本研究では、従来の穿頭術による定位脳手術装置の原理を応用して新たに開頭手術用の定位脳手術装置を開発したので、装置の詳細と臨床応用の可能性について述べる。

II 方 法

開頭手術中用の頭蓋固定装置 (Fig. 1) にCT誘導

定位脳手術装置と同等の座標定位性を与えるために、開頭術用頭蓋固定装置用の座標マーカーを試作した。この座標マーカーは、直径0.5mmのアルミ線をZ字型に埋め込んだ1対の亚克力板からなり、これを多目的頭蓋固定枠の頭部固定装置の半円形の可動部分の両端に互いに並行に取り付けた。試作にあたって従来の開頭手術操作や、多目的頭蓋固定枠の特徴である術中の固定状態での頭部の回旋¹⁴⁾の妨げにならないよう形状を工夫した (Fig. 2)。

座標の演算は従来のCT誘導定位脳手術⁹⁾¹⁰⁾¹⁵⁾と同様に、平行な1対の「Z」字型マーカーのアルミ線の角度、長さがあらかじめ既知であることを用いてCT画像上で行う。演算の実際の手順は、①CT画像上のアルミ製マーカーの断面が形成する左右3点ずつ、計6点の位置のうち任意の1側の3点と対側の任意の1点の位置座標を求める、②これより撮影面と定位脳手術装置の座標系との相対的位置関係を求める、③これを基準として撮影面と同一平面上の関心点の定位座標系での位置座標を決定するもので、CT誘導定位脳手

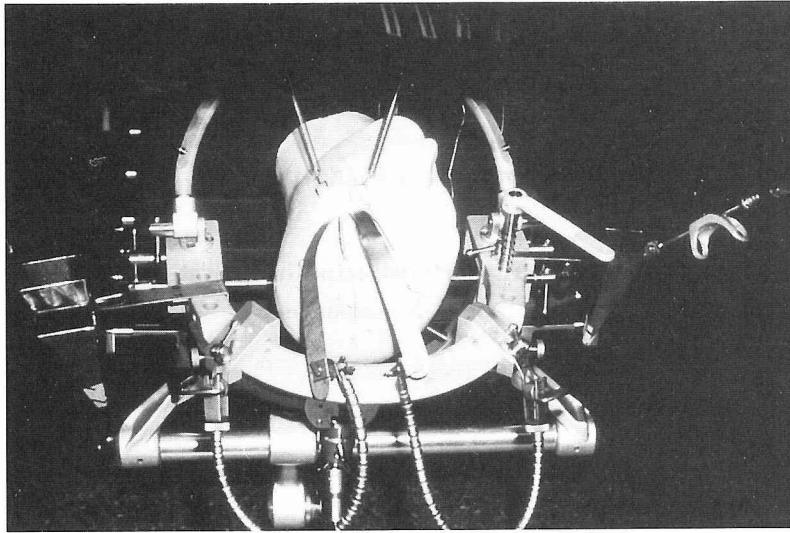
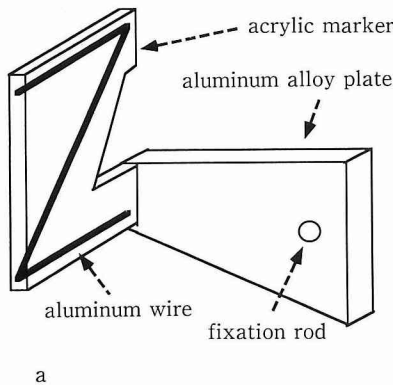
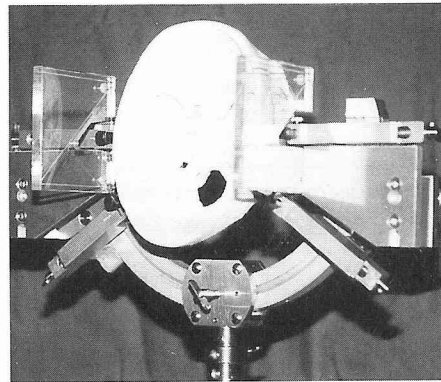


Fig. 1 Head fixation system for open neurosurgery (Multipurpose head frame: Sugita et al¹⁴⁾).



a



b

Fig. 2 Localization marker for open stereotactic surgery.

a: Schematic drawing of the marker.

b: Localization markers attached to the modified head holder.

術の座標計算に汎用されている Coordinate Software¹⁵⁾を使用した。

次に、この定位的座標系を術野に導入するためにアルゴンレーザー光を用いた術中定位誘導アームを考案した。これは、従来の定位脳手術装置の穿頭術用の座標誘導装置に対応するもので、前述した開頭手術用の頭蓋固定装置ならびに多目的頭蓋固定枠と併用することができるように逆L字型のアーム様の構造とした (Fig. 3)。この術中定位誘導アームの操作は従来の穿頭術用の誘導装置と同じく、前述した計算でもとめた (X, Y, Z) 座標を手動で入力することによる。

今回試作した術中定位誘導アームでは、関心部位を2つのアルゴンレーザー光の交点として術野に示すことが出来るように設計した。操作は、Fig. 3に示すようにX, Y, Zの各方向にウォームギアによる微動機構を取り付け座標設定を行うことが出来る。各座標系とも計算上の基準点を原点とした座標目盛りを取り付けてこれに基づき座標入力を行うこととした。また、この定位誘導アームが手術操作の妨げにならないように、アルゴンレーザー光の交点の空間的位置を保った状態でアームを等中心的に動かすことが可能なように可動部位を作成した (Fig. 3, white arrow)。

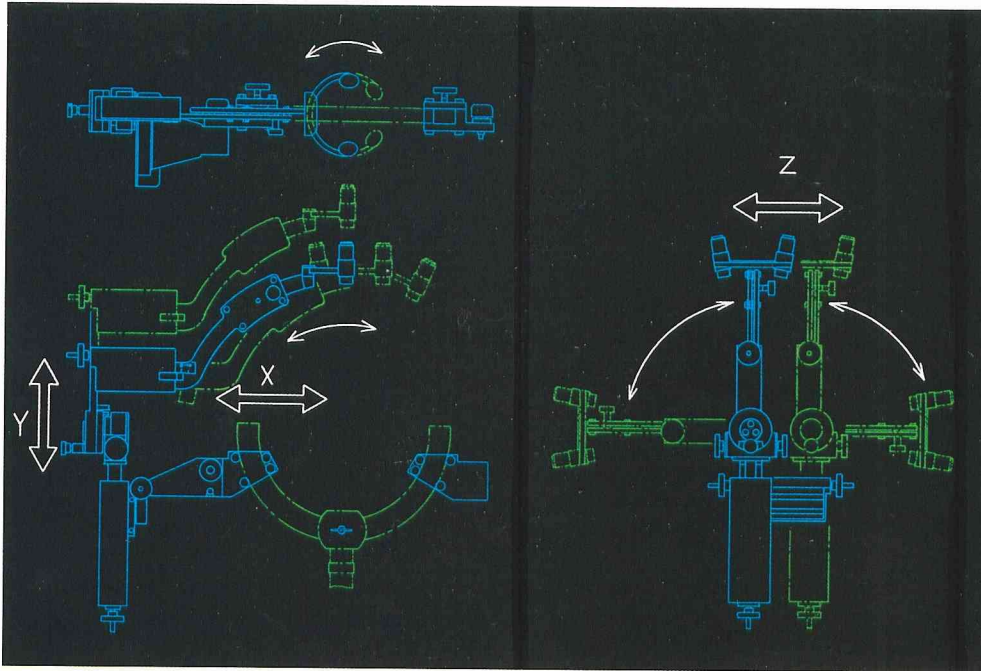


Fig. 3 Schematic drawings of the intraoperative stereotactic guide arm for open neurosurgery. White curved arrows shows the isocentric movement of the guide arm.

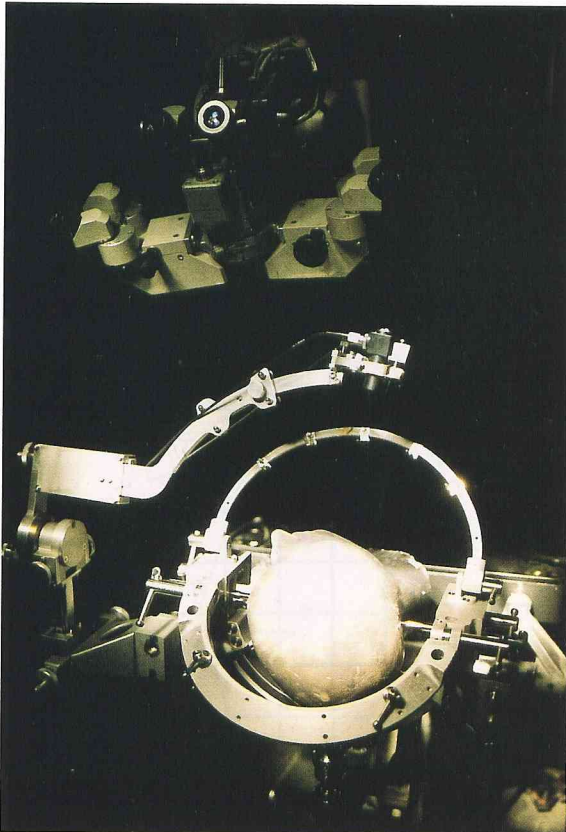


Fig. 4 Surgical simulation with the stereotactic guide system and the operating microscope.

次に、座標マーカ－と術中定位誘導アームの組み合わせからなる術中定位誘導装置の精度を調べるため、これまでの定位脳手術装置にならって動作誤差の測定を行った。測定は多目的頭蓋固定枠に座標マーカ－と定位誘導アームを取り付け、通常の開頭手術と同じ条件で行い (Fig. 4)、動作誤差について検討を行った。誤差は計算上の原点と実際の操作により表示された原点との誤差を X, Y, Z 各座標で10回連続計測し求めた。計測は手術顕微鏡を用いて行い、単位は0.5mmとした。計測は X-Y, X-Z, Y-Z 平面ごとに実際に投影されたレーザー光の交点をプロットしこれを計測した。計測値の上では、各座標系とも正の値と負の値をもつことになるため、各座標ごとの評価は計測値で行い、さらに原点との距離を各座標系の値の二乗の総和の平方根でもとめこれを絶対距離とした。

III 結 果

開頭術用の頭蓋固定枠に座標マーカ－を取り付けることにより、開頭手術に従来の定位脳手術と同等の座標系を導入することができた。さらに、術中定位誘導アームを頭蓋固定枠に取り付けることで定位的座標系の任意の点を術野に定位的に表示することが可能となった。また、今回試作した術中定位誘導アームは、三次元的関心部位を2つのアルゴンレーザー光の交点として表示するため、位置情報のほかに交点の幅により深さも判断できることがわかった (Fig. 5)。

本装置の誤差は、実際の手術と同じ状態、すなわち多目的頭蓋固定枠、座標マーカ－、定位誘導アームを取り付けた状態で求めた。各座標軸ごとの結果は

Table 1 に示す。計測値を各座標系にプロットしたものが Fig. 6 である。各座標軸ごとの平均値および標準偏差は、X 座標 $-0.25 \pm 1.11\text{mm}$, Y 座標 $-0.25 \pm 1.14\text{mm}$, Z 座標 $0.30 \pm 0.92\text{mm}$ で、計算上の原点と操作による表示点との実際の距離である絶対距離の値は、0.87mm から 2.35mm となり平均値 1.64mm, 標準偏差 0.43 であった (Fig. 7)。

IV 考 察

定位脳手術は、1947年、Spiegel ら¹⁾により始められたもので当初はパーキンソン氏病の難治性の振戦を抑制するために行われた。当時の手術の手順²⁾はほぼ一定であった。すなわち、①頭蓋に定位脳手術用の枠型の装置を固定し気脳室写を行う、②気脳写上の第三脳室の位置を計測し、これと脳アトラス¹⁰⁾と対比し第三脳室の両側に位置する視床の目標点の座標を求める、③定位脳手術誘導装置を用い穿頭術を行う、④穿頭孔より電極、鉗子を挿入し手術操作を行うものであり、穿頭術を基本とした手術手技であった。

定位脳手術の開発とほぼ同時に双眼立体視による手術用顕微鏡が開頭手術に導入され¹⁷⁾、従来の肉眼視による脳手術は顕微鏡下微小手術に移行し、手術成績の大幅な向上と手術機器、手術手技の開発をもたらした¹⁸⁾¹⁹⁾。この顕微鏡下の微小操作を行うために、頭部の確実な固定が必要とされ頭部固定装置が考案された¹⁴⁾。また、顕微鏡下の微小手術操作をより円滑に行うためにさまざまな微小手術装置が考案された²⁰⁾²¹⁾。この微小手術の進歩は、より手術侵襲の少ない安全な手術を目指すものとなり、結果として定位脳手術の発

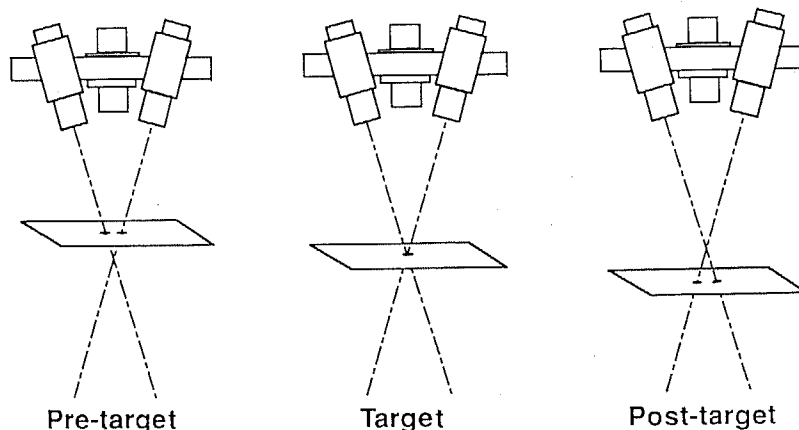


Fig. 5 Relationships of the target point and the surgical field.

Table 1 Motion errors of the stereotactic guide system in surgical simulation. (measured by 0.5mm)

| | X axis | Y axis | Z axis | Distance |
|--------------------|--------|--------|--------|----------|
| 1 | 1.5 | -1 | 1 | 2.06 |
| 2 | 0 | 0.5 | -1.5 | 1.58 |
| 3 | -1 | -1 | 0.5 | 1.50 |
| 4 | 0.5 | 0.5 | 1 | 1.22 |
| 5 | 0.5 | 0.5 | -0.5 | 0.87 |
| 6 | 1 | 1 | 0 | 1.41 |
| 7 | -1.5 | 1.5 | 1 | 2.35 |
| 8 | -1.5 | -1 | 0.5 | 1.87 |
| 9 | -1.5 | 1 | -0.5 | 1.87 |
| 10 | -0.5 | -0.5 | 1.5 | 1.65 |
| Mean value | -0.25 | -0.25 | 0.30 | 1.64 |
| Standard deviation | 1.112 | 1.137 | 0.919 | 0.426 |

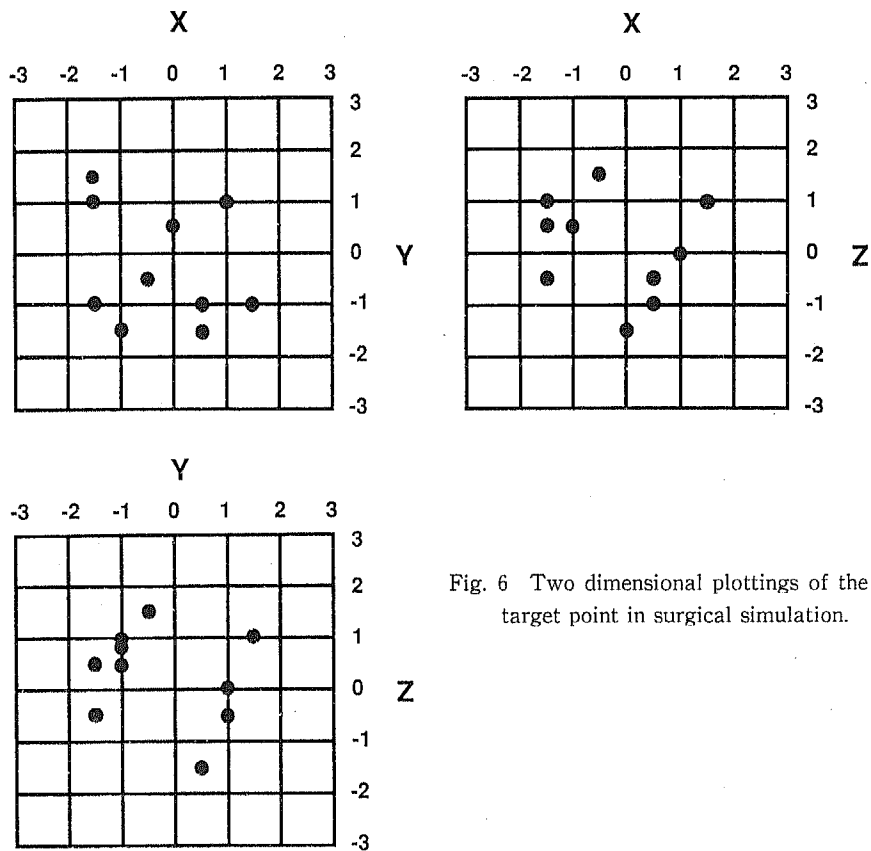


Fig. 6 Two dimensional plottings of the target point in surgical simulation.

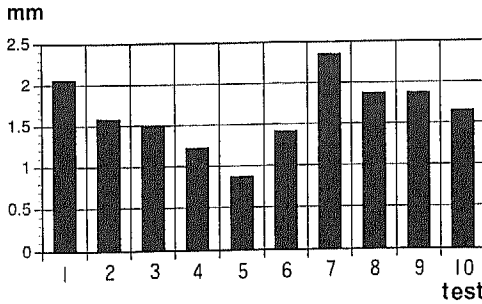


Fig. 7 Distance of motion errors of the stereotactic guide system in surgical simulation.

想にきわめて近いものとなった。特に多目的頭蓋固定 (Sugita ら¹⁴⁾) は、頭蓋固定装置と手術操作用の多目的フレームからなっており術中に術野の中心点を保持しながら頭部の回旋を行うことができる特徴を持つもので、概念的には定位脳手術に要求される isocenter ときわめて近い機能を持つ固定システムである。

1973年、Hunsfield⁹⁾により開発されたX線CT スキャナーは、脳神経外科の診断・治療の全ての面で大幅な進歩をもたらした。定位脳手術においてもCT用定位脳手術装置の開発により画像上で座標計算を行うことが可能となり¹⁵⁾、従来の合併症の多い気脳室写は不要となった。また、CT誘導下で定位脳手術を行うことにより術中の穿刺方向、深さの確認が連続した二次元画像上で可能となり手術の客観的評価を容易とし、手術手技そのものの簡略化をもたらした。これに伴いCT誘導定位脳手術は急速に普及し、対象疾患も脳内血腫⁶⁾、深部脳腫瘍の生検⁹⁾¹⁰⁾、摘出¹¹⁾⁻¹³⁾などに拡大され、手術例数の飛躍的増加とともに脳神経外科の基本的手術手技の1つとなった。しかしこれらのCT誘導下の定位脳手術はいずれも頭蓋に burrhole を穿つ穿頭術によるもので開頭術への応用の試みはない。

一方、開頭術においては、近年になり開頭術中に定位的位置情報を導入し手術の支援を行う手技が開発され、手術ナビゲーションと総称されている。Watanabe ら²²⁾の Neuronavigator は、Mayfield 式頭蓋固定装置にとりつける多関節型のアーム型誘導装置で各関節の potentiometer により三次元的位置を計測し座標を求める機械的計測法を用いた装置である。他にもコンピューター計測用に開発された三次元センサーを用いた誘導法が報告されており、超音波レーザーにより空間的位置計測を行うもの²³⁾²⁴⁾、三次元磁気センサーと定位的磁場発生装置により三次元的座標を

計測するもの²⁵⁾、生体を透過する近赤外光と検出装置を組み合わせ定位的計測を行う方法²⁶⁾などが考案され報告されている。また、手術用顕微鏡を用いた三次元計測法により定位的誘導を行う Neuro Sat 法²⁷⁾も開頭術中の定位的誘導法として開発されたものである。

これらの方法は、①頭蓋固定装置とし Mayfield 型頭部固定装置を用いていること、②位置計測用に何らかの三次元センサーを用いることを共通点としている。この Mayfield 型頭部固定装置は、広く普及している固定装置であるが、患者の頭部を固定した状態で頭部の回旋を行うことができないため、術中の定位的誘導の使用範囲が限られる可能性が想定される。

本研究にて試作した開頭手術用の定位脳手術装置は、前述した多目的頭蓋固定枠の開頭術における定位性に従来の穿頭術用の定位脳手術の発想を導入し発展させたものである。本法は頭部固定に多目的頭蓋固定枠を用いたため、頭位を変換した状態でも定位性を維持する isocenter の概念を達成しており、Mayfield 型頭部固定装置と三次元センサーを用いた手術ナビゲーション法とくらべ原理的に定位性にすぐれるものと考えられる。

今回試作した開頭術用定位脳手術装置の動作誤差は、X座標 $-0.25 \pm 1.11\text{mm}$ 、Y座標 $-0.25 \pm 1.14\text{mm}$ 、Z座標 $0.30 \pm 0.92\text{mm}$ で、各方向に約1mmの動作誤差をもつ。これは、ガイドアームの各座標方向の微動装置の持つ機械的誤差を示すものと考えられた。また、計算上の原点と操作による表示点との実際の距離として求めた絶対距離の計算値は、0.87mmから2.35mmとなり平均値1.64mm(標準偏差0.43mm)であった。この誤差の原因は、おもにガイドアームの微動機構の動作誤差が各座標軸方向に加算されたことによると推測された。この誤差の値は、現在最も精度の優れた Barnet ら²⁴⁾の超音波デジタイザー方式の誤差平均値 $1.5 \pm 0.7\text{mm}$ (標準偏差)と比べやや劣るものの、従来の開頭術用の手術機器との併用が可能で使用方法も簡便であること、術野への表示に手術操作の妨げにならないレーザー光を用いている、などの特徴を持っており、近年開発されている手術ナビゲーション法と比べ応用範囲が広くより実用的な手術装置と考えられた。

V 結 語

- 1 多目的頭蓋固定枠に定位脳手術の原理を導入した開頭術用の定位脳手術装置を開発した。

- 2 本手術装置は、多目的頭蓋固定枠の等中心的操作性を応用、発展させたもので容易に通常の脳神経外科開頭手術に導入することができる。
- 3 本手術装置は動作の精度も優れており、脳内血腫や脳腫瘍などの脳実質内病変に対する開頭手術の精度の向上に有用であると考えられる。

本論文の要旨は、第9回国際脳神経外科学会総会(1989年10月、ニューデリー)シンポジウム、第8回

欧州脳神経外科学会総会(1991年6月、モスクワ)、および第51回日本脳神経外科学会総会(1992年10月、鹿児島)シンポジウムにおいて発表した。

謝 辞

最後に、本研究にご指導をいただいた杉田虔一郎前信州大学医学部脳神経外科学教室教授(現名古屋大学医学部脳神経外科学教室教授)ならびに小林茂昭信州大学医学部脳神経外科学教室教授に深謝いたします。

文 献

- 1) Spiegel EA, Wycis HT, Marks M, Lee AJ: Stereotaxic apparatus for operation on the human brain. *Science* 106: 349-350, 1947
- 2) Spiegel EA, Wycis HT: Stereoencephalotomy (thalamotomy and related procedures). Part 1. Methods and stereotaxic atlas of the human brain. New York, Grune and Stratton, 1952
- 3) Hunsfield GN: Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1. Description of system. *Br J Radiol* 46: 1016-1022, 1973
- 4) Mundinger F, Birg W, Klar M: Computer assisted stereotactic brain operations by means including computerized axial tomography. *Appl Neurophysiol* 41: 169-182, 1978
- 5) Brown RA, Roberts T, Osborn AG: Stereotaxic frame and computer software for CT-directed neurosurgical localization. *Invest Radiol* 15: 308-312, 1980
- 6) Perry JH, Rosenbaum AE, Lunsford LD, Swink CA, Zorub DS: Computed tomography guided stereotactic surgery: Conception and development of a new stereotactic methodology. *Neurosurgery* 7: 376-381, 1980
- 7) Leksell L, Jernberg B: Stereotaxis and tomography: A technical note. *Acta Neurochir (Wien)* 52: 1-7, 1980
- 8) Tanizaki Y: Improvement of cerebral blood flow following stereotactic surgery in patients with putaminal hemorrhage. *Acta Neurochir (Wien)* 90: 103-110, 1988
- 9) Maroon JC, Bank WO, Drayer BP, Rosenbaum AE: Intracranial biopsy assisted by computerized tomography. *J Neurosurg* 46: 740-744, 1977
- 10) Osterberg CB, Mennel HD, Kiessling M: Stereotactic biopsy of brain tumors. *Surg Neurol* 14: 275-283, 1980
- 11) Shelden CH, McCann G, Jacques S, Lutes HR, Frazier RE, Katz R, Kuki R: Development of a computerized microstereotaxic method for localization and removal of minute CNS lesions under direct 3-D vision: Technical report. *J Neurosurg* 52: 21-27, 1980
- 12) Kelly PJ, Alker GJJr: A method for stereotactic laser microsurgery in the treatment of deep-seated CNS neoplasms. *Appl Neurophysiol* 43: 210-215, 1980
- 13) Apuzzo ML, Sabshin JK: Computed tomographic guidance stereotaxis in the management of intracranial mass lesions. *Neurosurgery* 12: 277-284, 1983
- 14) Sugita K, Hirota T, Mizutani T, Mutsuga N, Shibuya M, Tsugane R: A newly designed multipurpose microneurosurgical head frame. Technical note. *J Neurosurg* 48: 656-657, 1978
- 15) Gildenberg PL, Kaufman HH, Murthy KSK: Calculation of stereotactic coordinates from the computed tomographic scan. *Neurosurgery* 10: 580-586, 1982
- 16) Schaltenbrand G, Bailey P: Introduction to stereotaxis with an atlas of the human brain. Stuttgart,

Gerog Thime Verlag, 1959

- 17) Rand RW, Jannetta PJ: Microneurosurgery: application of the biocular surgical microscope in brain tumors, intracranial aneurysms, spinal cord disease, and nerve reconstruction. *Clin Neurosurg* 15: 319-342, 1968
- 18) Sugita K, Tsugane R: Triplescope for neurosurgery (Nagashima II), In: Koos W(ed), *Clinical microneurosurgery*, pp. 5-6, Thieme, Stuttgart, 1976
- 19) Krampe C: Zeiss operating microscope for neurosurgery. *Neurosurg Rev* 7: 89-97, 1984
- 20) Yasargil MG, Vise WM, Bader DC: Technical adjuncts in neurosurgery. *Surg Neurol* 8: 331-336, 1977
- 21) Kobayashi S, Sugita K, Matsuo K: An improved neurosurgical system: new operating table, chair, microscope and other instrumentation. *Neurosurg Rev* 7: 75-80, 1984
- 22) Watanabe E, Watanabe T, Manaka S, Mayanagi Y, Takakura K: Three-dimensional digitizer (neuro-navigator): A new equipment for CT guided stereotaxic surgery. *Surg Neurol* 27: 543-547, 1987
- 23) Roberts DW, Strohbehm JW, Hatch JF, Muttay W, Kettenberger H: A frameless stereotaxic integration of computerized tomographic imaging and the operating microscope. *J Neurosurg* 65: 545-549, 1986
- 24) Barnet GH, Kormos DW, Steiner CP, Weisenberger J: Intraoperative localization using an armless, frameless stereotactic wand. Technical note. *J Neurosurg* 78: 510-514, 1993
- 25) Kato A, Yoshimine T, Hayakawa T, Tomita Y, Ikeda T, Mitomo M, Harada K, Mogami H: A frameless armless navigation system for computer-assisted neurosurgery. *J Neurosurg* 74: 845-849, 1991
- 26) Zamorano L, Kadi AM, Ding A: Computer assisted neurosurgery: simulation and automation. *Stereotact Funct Neurosurg* 59: 115-122, 1992
- 27) Takizawa T: Isocentric stereotactic three-dimensional digitizer for neurosurgery. *Stereotact Funct Neurosurg* 60: 175-193, 1993

(5. 7. 20 受稿)