

Entwicklung eines Hochpräzisions-Manipulators für die stereotaktische Neurochirurgie

Werner Korb¹, Simone Barthold¹, Rolf Bendl¹, Gernot Echner¹, Karl-Heinz Grosse¹,
Otto Pasty¹, Harald Treuer², Volker Sturm² und Wolfgang Schlegel¹

¹Deutsches Krebsforschungszentrum (Abteilung für Medizinische Physik); Leiter:
Prof. Dr. W. Schlegel; Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg.
w.korb@dkfz.de

²Klinik für Stereotaxie und Funktionelle Neurochirurgie der Universität zu Köln;
Direktor: Professor Dr. med. V. Sturm; Joseph - Stelzmann - Straße 9, 50924 Köln.

Abstract: Die stereotaktische Neurochirurgie ist eine minimal-invasive Operationsmethode, die durch höchste Präzision ausgezeichnet ist. Um Genauigkeiten von 0.5 mm oder besser zu erreichen, werden stereotaktische Zielgeräte verwendet. Heute sind verschiedene kommerzielle Systeme verfügbar, die aber meist auf den Schädelbereich beschränkt sind und deren Einsatzmöglichkeiten nicht flexibel genug sind.

Um solche Einschränkungen zu beseitigen, sehen neuere Entwicklungen den Einsatz eines Roboters vor, der das Instrument führt. Solche Systeme wurden weltweit von verschiedenen Gruppen erprobt, haben sich aber bisher aus Komplexitäts- und Kostengründen nicht durchsetzen können. Eine Neuentwicklung am Krebsforschungszentrum (DKFZ) sieht die Verwendung eines hochpräzisen Messmanipulators aus dem Maschinenbau vor (ähnlich den armbasierten Neuronavigationssystemen). Diese wird für die medizinischen Anforderungen, insbesondere für jene der Stereotaxie umgerüstet. Die Genauigkeitsanforderungen der Stereotaxie können durch das System gewährleistet werden. Ziel ist die Entwicklung eines Prototyps, der im Klinikum der Universität Köln klinisch eingesetzt und getestet werden soll. Die wichtigsten Vorteile des neuen Systems sind leichtere Marktfähigkeit (gegenüber den kostenintensiven Robotersystemen), Anwendung in Stereotaxie und Navigation, Verwendung in der Ganzkörperstereotaxie und hohe Präzision.

Die geplanten Entwicklungen beinhalten einerseits die Umrüstung der Hardware, wie Ausrüstung des Systems mit Bremsen, Motoren, stereotaktischen Instrumente, etc., sowie die Optimierung der mechanischen Eigenschaften. Andererseits soll Planungs- und Steuerungssoftware (weiter)entwickelt werden, um den chirurgischen Eingriff zu unterstützen und zu optimieren.

1 Hintergrund und Entwicklung

Zum Standard-Repertoire der stereotaktischen Neurochirurgie gehören vor allem Biopsien sowie funktionelle Eingriffe wie z.B. Schmerzbehandlungen,

psychochirurgische Eingriffe, Behandlung von Dyskinesien etc., aber auch in zunehmenden Maße Tumorbehandlungen mit ionisierender Strahlung, laser-induzierter Thermotheapie oder Kurzpuls-Laserstrahlen [Su96]. All diese Eingriffe können heute minimal-invasiv und höchst präzise durchgeführt werden - die erreichbaren Genauigkeiten liegen bei 0.5 mm [RM55]

1.1 Stand der Technik (Konventionelle stereotaktische Geräte)

Stand der Technik im Bereich der stereotaktischen Neurochirurgie ist die Verwendung *stereotaktischer Zielgeräte*. Dazu wird der Schädel des Patienten in einem sogenannten *stereotaktischen Grundring* fixiert. Der Grundring trägt den Zielbügel, der eine präzise mechanische Führung des chirurgischen Instruments gestattet. Der Trepanationspunkt und der Zielpunkt werden vor der Operation aufgrund von Röntgenbildern, CT- oder MR-Aufnahmen berechnet, und mit Hilfe eines Planungs-Computerprogrammes werden daraus die Einstellaten für das stereotaktische Zielsystem abgeleitet. Seit etwa Anfang der fünfziger Jahre sind verschiedene kommerzielle stereotaktische Systeme verfügbar, die im wesentlichen alle nach dem gleichen Prinzip arbeiten. Allen Systemen ist ebenfalls gemeinsam, dass sie hinsichtlich der potentiellen Zugangsmöglichkeiten im Schädelbereich nicht flexibel genug sind, um universell einsetzbar zu sein. Die Zugangsmöglichkeiten sind auf den oberen Schädelbereich beschränkt.

1.2 Roboter-Stereotaxie

Um derartige Einschränkungen zu beseitigen, sehen neuere Entwicklungen den Einsatz eines Roboters vor, der das Instrument führt. Solche Systeme wurden weltweit von verschiedenen Gruppen (meist auf der Grundlage von Industrierobotern) erprobt [LT96, Be91, Do87, Gl95, Kw88, Ma95], haben sich aber wegen ihrer Komplexität, mangelnden absoluten Genauigkeit (bei einigen Systemen), der fraglichen Betriebssicherheit und vor allem auch wegen der hohen Kosten bisher nicht durchsetzen können. Der Kostenfaktor ist umso gravierender, da die Systeme nur für die Instrumentenführung verwendet werden (können). Dies gilt im Allgemeinen für Robotersysteme in der Medizin [LB99].

2 Ziele einer Neuentwicklung am Krebsforschungszentrum

Wie oben beschrieben sollen die Zugangsmöglichkeiten für den stereotaktischen Eingriff erweitert werden, da mit konventionellen Systemen nicht alle Einstellungen realisierbar sind. Als Grundlage für ein neues stereotaktisches System wird ein hochpräziser Messmanipulator verwendet (siehe Abb. 1). Dieser wird in der Maschinenbau-Industrie zum manuellen Anfahren und Messen von Punkten im dreidimensionalen Arbeitsraum verwendet¹. Durch die antropomorphe Kinematik (Knickarm) des Manipulators ergeben sich mehr Freiheitsgrade als mit klassischen Zielgeräten. Zunächst sind sechs

¹ in der Funktionsweise also ähnlich wie die Manipulatorarme in der Neuronavigation

Freiheitsgrade am System selbst gegeben, weitere Freiheiten können durch die Beweglichkeit des Manipulators selbst auf einem Stativ erreicht werden. Fünf Freiheitsgrade des Systems werden ermöglicht durch die fünf Achsen des Messarmes (siehe Abb. 1), die die Positionierung und die Richtungseinstellung des chirurgischen Instrumentes ermöglichen. Der sechste Freiheitsgrad ist durch einen Schlitten gegeben, der einen Vorschub des Instrumentes ermöglicht. Erstere werden halbautomatisch unterstützt, letzteres wird in konventioneller Weise manuell durch den Chirurgen ausgeführt.

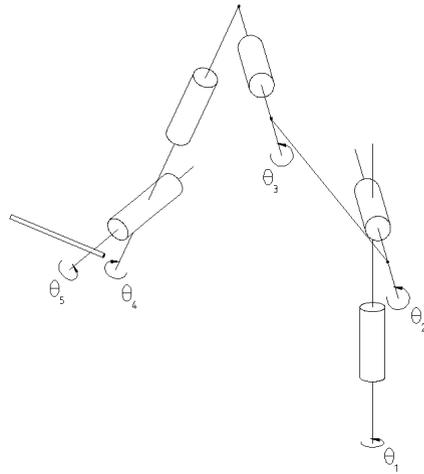
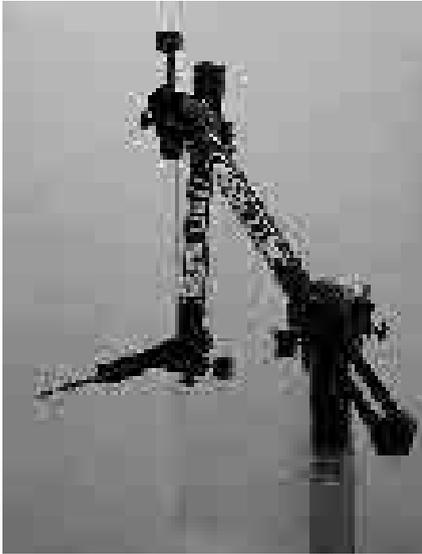


Abbildung 1: Hochpräziser Messmanipulator aus dem Maschinenbau. Zur Anwendung in der Stereotaxie wurde er bereits mit Bremsen und Schneckenräder ausgestattet. (links: Foto, rechts: Schema)

Auch die Genauigkeitsanforderungen der Stereotaxie können durch das System gewährleistet (oder sogar verbessert) werden.

Es bestehen Kooperationen mit industriellen Partnern, die innerhalb eines Jahres zur Entwicklung eines Prototypen führen sollen, der auch klinisch eingesetzt und getestet werden soll (Klinik für Stereotaxie und Funktionelle Neurochirurgie der Universität zu Köln).

Die Vorteile des neuen Systems sind im Einzelnen:

- Kostengünstig und daher leichter marktfähig.
- Ein System für stereotaktische Eingriffe und Neuronavigation.
- Verwendung in der *Ganzkörperstereotaxie*: ein System für mehrere Körperteile (Spinal- und Schädelbereich, sowie mögliche andere Bereiche)
- Hohe Präzision.

2.1 Überblick über den stereotaktischen Eingriff mit dem neuen System

Zunächst erfolgt in konventioneller Weise die Fixierung des stereotaktischen Grundrings am Patienten, die Aufnahme des diagnostischen Bildmaterials und die Registrierung der stereotaktischen Koordinaten. Anschließend wird der chirurgische Eingriff Software-unterstützt geplant. Dazu beginnt man mit der herkömmlichen Therapieplanungssoftware (z.B. STP von *Leibinger*) um den Trepanations- und Zielpunkt zu erhalten. Darauf folgend wird mit entsprechender Visualisierungssoftware der gesamte für den Eingriff notwendige Operationsbereich dargestellt und der Eingriff simuliert.

Danach folgt der Eingriff im Operationssaal. Dabei werden zunächst die errechneten Einstellungen am Hardware-Phantom überprüft, bevor der Eingriff am Patienten durchgeführt wird. Sowohl am Phantom, als auch am Patienten wird einem analogen dreistufigen Aufbau gefolgt (siehe Abb. 2):

1. Zunächst muss der Messarm auf seinem Rollstativ im Operationsraum relativ zum Patienten (oder Phantom) sinnvoll platziert werden. Dies soll mittels eines Rasters oder Lichtstrahls erfolgen, der die ungefähren Daten aus der Simulation in die realen Koordinaten überträgt.
2. Anschließend erfolgt die *Referenzierung* (oder: Kalibrierung), d.h. die stereotaktischen Koordinaten und die Roboterkoordinaten werden in ein gemeinsames Koordinatensystem übertragen.
3. Die letzte Stufe ist die Einstellung der Gelenkwinkelkonfiguration, welche halbautomatisch erfolgt. Dazu wird zunächst der Arm gebremst und anschließend mittels Motoransteuerung entsprechend der Position und Orientierung der Trajektorie Trepanationspunkt-Zielpunkt eingestellt.

Zum Schluß wird der Arm komplett arretiert und der Vorschub der Instrumente (Bohrer, Biopsienadel, Katheter, etc.) erfolgt in konventioneller Weise durch den Chirurgen.

3 Teilaufgaben des Projektes

3.1 Grundsätzliche mechanische Konstruktion

Es wird ein 5-Achsen-Messarm mit einer antropomorphen Kinematik (Knickarm) verwendet. Wie oben beschrieben sind damit alle nötigen Freiheitsgrade vorhanden. Es wurden Schneckenräder mit einer Arretierschraube und einer Einstellschraube pro Achse angebracht, womit das System arretierbar (bzw. bremsbar) gemacht wurde. Die Arretierung muss aber auch lösbar sein, da sonst die Referenzierung (Kalibrierung) der Roboter- und Patientenkoordinatensysteme schwierig wäre.

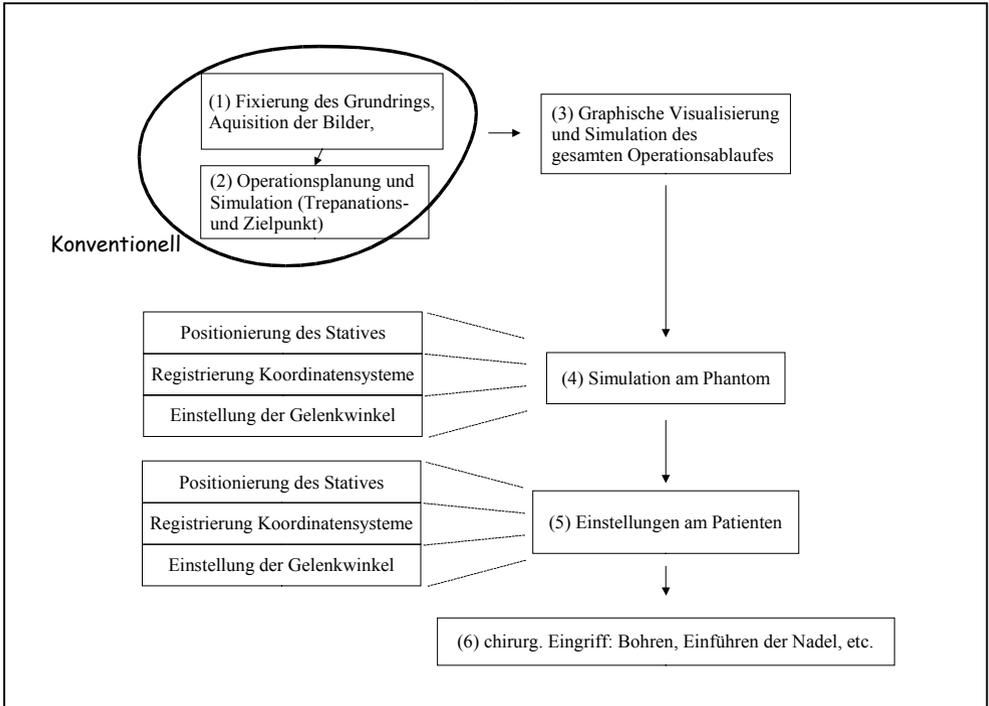


Abbildung 2: Schema des chirurgischen Eingriffes mit dem neuen stereotaktischen Manipulatorsystem.

Somit ergeben sich drei mechanische Zustände, die getrennt zu behandeln sind:

- **Frei beweglich:** Alle Arretierschrauben sind gelöst, und damit der Manipulator frei beweglich. In diesem Zustand sind beliebige Raumpunkte (im Arbeitsbereich) anzufahren und zu „messen“. Durch Messung von drei² Punkten auf dem stereotaktischen Grundring, kann man somit das Roboter- und Patientenkoordinatensystem auf *ein* Referenzsystem zurückführen (Referenzierung).
- **Arretiert beweglich:** In diesem Zustand ist der Manipulator arretiert, allerdings nur so weit, dass die Einstellschrauben die Bewegung der einzelnen Achsen des Systems bewirken. Das ist der Zustand, in dem der Chirurg das Instrument (halb-) automatisch in die Arbeitsposition bringt. Dazu ist die Motorisierung des Manipulators (siehe unten) und entsprechende unterstützende Software notwendig, die auch am DKFZ entwickelt wird.
- **Fixiert:** Die Bewegung des Instrumentenhalters, der auf dem letzten Glied des Manipulators angebracht ist, wird ausgeschlossen. Dies wird nicht durch entsprechende Blockierung in den Motoren, sondern durch die mechanische Fixierung (Arretierschraube und Schneckenrad) erreicht. Letzteres erhöht die Sicherheit im Operationsraum.

² Es können auch mehrere Punkte gemessen werden, womit Fehlererkennung beim Referenzieren möglich ist.

3.2 Motorisierung

Die Ausstattung des Armes mit Motoren ist aus zwei Gründen wichtig:

1. Erstens kann damit die Sterilität gewährleistet werden, da das ganze System komplett verhüllt werden kann.
2. Außerdem ist die Bedienung für den Chirurgen einfacher.

Natürlich bringt der Einbau von Motoren auch die Notwendigkeit einer Robotersteuerung mit sich. Diese umfasst neben der Bahn- bzw. Trajektorienplanung, auch die Steuerung der Motoren. Dabei müssen auch Elastizitäten in den Gelenken (Backlash) beachtet werden, die durch die Getriebe, etc. auftreten. Auch andere Nebenbedingungen, wie Sicherheitsaspekte und andere medizinische Rahmenbedingungen müssen beachtet werden.

3.3 Weitere Bedingungen an das System

Es müssen die Richtlinien des *Medizinproduktegesetzes* eingehalten werden. Das betrifft insbesondere Sterilisierbarkeit und Sicherheitskonzept. Weiters ist für viele Neurochirurgen die Simulation an einem Phantom unumgänglich. Als langfristiges Ziel soll das System zur MR-Kompatibilität geführt werden. Das bedeutet, dass damit in der Umgebung des Kernspintomographen Eingriffe durchgeführt werden können. Damit ist intraoperative Bildgebung möglich.

Alle diese Überlegungen müssen von Anfang an in die Konzeption des Systems miteinfließen, um eine zielstrebige Implementierung als klinischen Prototypen zu gewährleisten.

3.4 Software

Der chirurgische Eingriff muss von einer Planungs- und Steuerungssoftware unterstützt werden. Dazu soll vorhandene Planungssoftware [Be97] in eine neue Benutzeroberfläche integriert werden.

Für die Visualisierung der gesamten Operationsumgebung ist es notwendig, dass sowohl die Patientendaten als auch die Daten und Geometrien des mechanischen Systems dargestellt werden können. Auch soll in der Darstellung zu erkennen sein, wo sich Patient und Stereotaxiesystem relativ zu einander und zur zusätzlichen Ausstattung befinden. Der Patient läßt sich meist nur über *Voxelgrafiken* darstellen, Roboter und Manipulatoren werden aber meist durch CSG³- oder B-Rep-Darstellungen⁴ angegeben. Es gibt nur wenige Visualisierungssysteme, die beides integrieren [St00, HK96].

Zur Steuerung des Stereotaxiesystems muß außerdem eine den Sicherheitsaspekten und der einfachen Bedienbarkeit entsprechendes Softwarekonzept erstellt werden. Dieses orientiert sich im wesentlichen an dem in Abb. 2 dargestellten Ablauf.

³ = computer solved geometry models

⁴ =boundary representation models

3.5 Mathematische und mechanische Modellierung

Aus obigen Entwicklungszielen ergeben sich auch Aufgaben für eine mathematische Modellbildung und Simulation. Ziel ist die Modellierung der geometrischen Zusammenhänge des mechanischen Systems. Dies erfolgt mittels der gängigen Denavit-Hartenberg-Notation [Cr99]. Dabei sind geometrische und elastische Modellfehler zu erwarten, was durch entsprechende Kalibrierung ausgeglichen werden muß. Ziel der Modellierung ist einerseits die Entwicklung von Modulen, die für die Steuerungssoftware notwendig sind. Dazu gehört die Berechnung der Instrumentenposition und -richtung aus den Gelenkwinkelkoordinaten und umgekehrt (*direkte Kinematik* und *inverse Kinematik*), sowie die Berechnung der Bewegungsbahnen und Geschwindigkeitsprofile für den motorisierten Arm.

Andererseits kann aufgrund von solchen Modellen das System (Länge der einzelnen Glieder des Messarmes) und auch der chirurgische Eingriff optimiert werden. Letzteres dient wiederum dazu die Steuerungssoftware, die den Chirurgen während der Operation unterstützt, einfacher und intuitiver und dem optimalen Ablauf entsprechend zu gestalten. Das bedeutet insbesondere, dass der Chirurg durch entsprechende Vorschläge der Software bei der Positionierung des Manipulatorarmes und der Einstellung der Gelenke unterstützt wird.

4 Ausblick

Der Wunsch nach mehr Genauigkeit, Verlässlichkeit und Freiheiten im Operationssaal, gepaart mit der Erkenntnis, dass die menschliche Hand zittert und der menschliche Operateur nicht in all seinen Bewegungen und Handlungen vorhersagbar und dokumentierbar ist, führt zu dem Ruf nach Robotern auch für chirurgische Anwendungen [LB99].

Wie oben beschrieben verhindern allerlei Nachteile das rasante Fortschreiten solcher Innovationen. Aus diesem Grund entstand der Gedanke ein Projekt zu starten, das den Mittelweg geht und dessen Aufgaben ausführlich im Beitrag beschrieben sind. Die interdisziplinäre Zusammensetzung des Projektteams aus Medizinern, Ingenieuren und Naturwissenschaftler unterschiedlicher Richtungen eignen sich gut für die Lösung der angegebenen Aufgabenpakete. Dabei werden die technisch-mechanischen Probleme gemeinsam mit einem Industriepartner gelöst, die algorithmisch-geometrischen Aufgaben im Rahmen einer mathematischen Doktorarbeit untersucht und die klinischen Tests im Umfeld des Klinikums der Universität Köln durchgeführt. Ziel ist die Überführung in ein dem Medizinproduktegesetz entsprechendes Produkt, das marktfähig ist.

Literaturverzeichnis

- [Be91] A.L. Benabid, D. Hoffmann, S. Lavallée, P.Cinquin, J. Demongeot, J.F. Le Bas, F. Daniel : Is there any Future for Robots in Neurosurgery? In: Advances and technical standards in Neurosurgery, Berlin: Springer. Vol. 18, pp. 3-40, 1991.

- [Be97] R. Bendl, J. Dams, N. Suhm, A.Lorenz, J.F. Bille. A Planning System for Stereotactic Laser-Neurosurgery. In: Proc. 11th International Symposium and Exhibition CARS '97 Editors: H.U. Lemke, M.W. Vannier, K. Inamura. Berlin, Germany, 1997.
- [Cr89] J.J. Craig: Introduction to robotics: mechanics and control. Addison-Wesley. Reading, Mass. 1989.
- [Do87] J. Doll, W. Schlegel, O. Pasty, V. Sturm, and W. Maier-Borst. The use of an industrial robot as a stereotactic guidance system. International Symposium and Exhibition CAR 1987, 1987.
- [Gl95] D. Glauser, H. Fankhauser, M. Epitoux, J.L. Hefti, and A. Jaccottet. Neurosurgical robot minerva: First results and current developments. Journal of Image Guided Surgery, 1:266 - 272,1995.
- [HK96] M. Hübner, U. Kühnapfel: Real-Time Volume Visualization of Medical Image Data for Diagnostic and Navigational Purposes in Computer Aided Surgery. 10th International Symposium and Exhibition CAR '96, Paris, France, June 26-29, pages 751-756, 1996.
- [Kw88] Y.S. Kwoh, J. Hou, E. Jonckheere, and S. Hayati. A robot with improved absolute positioning accuracy for ct guided stereotactic surgery. IEEE Trans on Biomed Eng, 35(2):153 - 161, 1988.
- [LT96] S. Lavallée, J. Troccaz, et al: Image-Guided Operating Robot: A Clinical Application in Stereotactic Neurosurgery, In: Comp. Integrated Surgery, ed. R.H. Taylor, S. Lavallée, etal, 1996.
- [LB99] T.C. Lueth and J. Bier. Robot assisted intervention in surgery. In: J.M. Gilsbach and H.S. Stiehl, editors, Neuronavigation - Neurosurgical and Computer Scientific Aspects. Springer, 1999.
- [Ma95] K. Masamune, E. Kobayashi, Y. Masutani, M. Suzuki, T. Dohi, H. Iseki, and K. Takakura. Development of an mri-compatible needle insertion manipulator for stereotactic neurosurgery. Journal of Image Guided Surgery, 1:242 - 248, 1995.
- [RM55] T. Riechart and F. Munding. Beschreibung und Anwendung eines Zielgerätes für stereotaktische Hirnoperationen (II. modell). Acta Neurochir Suppl, 3:308-337, 1955.
- [St00] M. Stien, T. Schubert, D. Szymanski, T.C. Lueth: A system for monitoring robot-assisted surgical interventions. In: Advanced Robotics and its Applications, Shangai, China, 5./6.10.2000, pp 6-11, 2000
- [Su96] N. Suhm, M.H. Götz, J.F. Fischer, F. Loesel, W. Schlegel, V. Sturm, J.F. Bille, R. Schröder: Ablation of Neural Tissue by Short-pulsed Lasers - A Technical Report. Acta Neurochirurgica 138, pp. 346-349, 1996.