

Ausblicke der Computer- und Roboter-assistierten Chirurgie:

Medizinische Fakultät
Universität Leipzig

Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Bildgestützte Chirurgische Navigation (IGSN) an der Medizinischen Fakultät der Universität Leipzig

Zusammenfassung

Die Computer-Assistierte Chirurgie hat mit den Teilbereichen präoperative Planung/Simulation, chirurgische Intervention und medizinische Robotik in den letzten 15 Jahren eine beachtenswerte Veränderung in den chirurgischen Fächern bewirkt. Ebenso stehen die angrenzenden Fächer wie Radiologie aber auch technische Disziplinen vor neuen Herausforderungen. Dabei steht diese Entwicklung erst in den Anfängen und wird mit zunehmender Leistungsfähigkeit der einzelnen Komponenten mehr und mehr die Medizin beeinflussen. Die Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Bildgestützte Chirurgische Navigation IGSN an der Universität Leipzig beschäftigt sich seit Jahren mit der wissenschaftlichen Evaluierung und Weiterentwicklung aller Aspekte der computer-unterstützten Therapie. Dabei sind in den letzten Jah-

ren Systeme zur Integration präoperativer Navigationsinformationen in das interventionelle MRT mit der Möglichkeit einer intraoperativen Datensatzaktualisierung realisiert worden. Weitere Forschungsschwerpunkte liegen in der virtuellen Realität, der Simulation chirurgischer Eingriffe und telemanipulatorischer Robotik. Die CAS wird die chirurgischen Fächer weit mehr als die Einführung des OP-Mikroskops oder des Lasers verändern. Sie wird eine neue Zusammenarbeit zwischen Chirurgie, Radiologie, Anatomie und Informatiker, Ingenieurwissenschaftlern etc. hervorbringen. Es gilt, diese Herausforderung als Chance zu erkennen und aktiv die weitere Entwicklung zu gestalten.

Schlüsselwörter:

Computer-assistierte Chirurgie

Computer- und Roboter-assistierte Chirurgie (Information-Guided Therapy)

Strauss G; Trantakis Chr; Meixensberger J, Bootz F

Der erste bedeutende Einsatz der Mikroelektronik, Elektrotechnik und damit des Computers in der Medizin fand im Bereich der Radiologie bei der Entwicklung der Computertomographie in den 70er Jahren, der digitalen Bearbeitung konventioneller Röntgenaufnahmen (Digitale Substraktionsangiographie) und schließlich in der Entwicklung der Kernspintomographie statt. Genau gesehen war dies bereits der Beginn der Computer-Assistierten-Chirurgie (CAS). Heute werden darunter im wesentlichen vier Teilgebiete mit teilweise sehr unterschiedlichen Zielsetzungen subsummiert. Allen Anwendungen ist gemeinsam, dass sie

- die Verbesserungen des operativen Eingriffes als Zielsetzung haben,
- digitale oder digitalisierbare Datensätze des Patienten nutzen,
- eine hochgenaue Re-Registrierung des Patienten und des OP-Situs voraussetzen,
- zur Aufarbeitung, Verbindung und Koordination der Daten mit der OP-Situation die Rechenleistung eines Computers benötigen.

In logischer Reihenfolge unterteilt man die CAS in den Bereich der **1. präoperativen Planung und 2. Simulation**. Darin finden Methoden der präoperativen Zugangsplanung bei komplizierten Eingriffen, die Gestaltung von OP-Szenarien im Sinne einer Computersimulation des Eingriffes und das Training von Ausbildungsassistenten ihre Bedeutung. Schwerpunkt der CAS und oft als einzige Anwendung gedeutet ist **3. der Bereich der computer-assistierten chirurgischen Intervention**. Es existieren eine Vielzahl von Synonymen wie bildgestützte Chirurgie (IGS) oder Navigationschirurgie. Die CAS hat das Ziel, mit Hilfe von Datensätzen den chirurgischen Eingriff selbst zu

verbessern: die Indikation von chirurgischen Zugängen dadurch zu erweitern oder überhaupt erst zu ermöglichen, die Sicherheit klassischer Eingriffe zu erhöhen, die OP-Zeit zu verkürzen sowie nicht zuletzt einen Wissenszuwachs bei den beteiligten Ärzten zu erreichen. Das Prinzip der CAS beruht auf der Darstellung der jeweiligen Position des Instruments im präoperativen Datensatz in beliebigen Schnittebenen. Zusätzlich können zuvor segmentierte Strukturen, etwa ein Hirntumor, als Kontur in das Operationsmikroskop eingeblendet werden. Damit ist dem Chirurgen eine zusätzliche intraoperative Orientierungsmöglichkeit gegeben. Eng daran knüpft **4. das Gebiet der medi-**

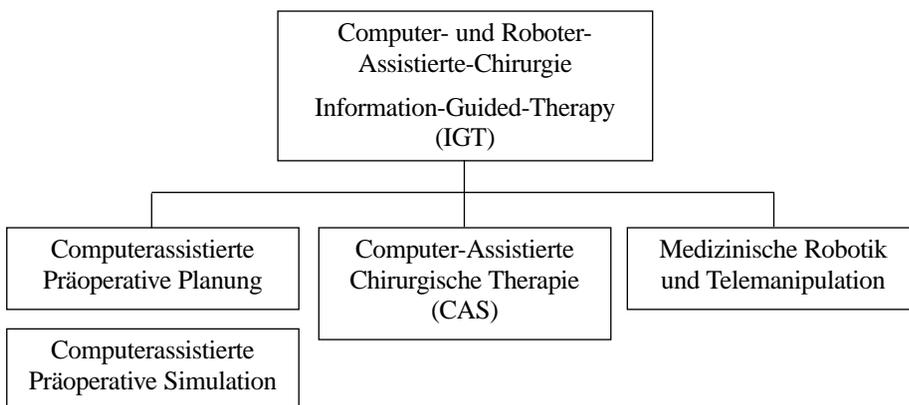


Abbildung 1: Übersicht über die Anwendungsgebiete der Computertechnik in der Chirurgie

zinnischen Robotik an. Durch semiautomatische oder automatische Systeme sollen ausgewählte chirurgische Prozeduren mit höherer Genauigkeit durchführbar sein, Telemanipulationssysteme können eine ergonomisch günstige räumliche Trennung Operateur-Patient erreichen und die Präzision kleinster Bewegungen verbessern.

In den letzten Jahren hat die Definition einer Informations-Geführten-Therapie (Information Guided Therapy, IGT) zunehmend an Inhalt gewonnen. Sie beschränkt das Gebiet der CAS nicht auf den eigentlichen chirurgischen Eingriff. Durch die Bereitstellung multimodaler Informationen und die Verarbeitung auf einem Computer wird in Zukunft die Planung und die Durchführung einer Therapie ganz entscheidend beeinflusst werden. Die Informationen zur OP werden nicht nur radiologische Daten sondern beispielsweise auch elektrophysiologische Parameter oder elastodynamische Eigenschaften umfassen.

Computer-assistierte chirurgische Intervention

Die CAS im eigentlichen Sinne begann vor etwa 15 Jahren parallel in Europa (Schlondorff, Aachen; Reinhardt, Basel), den USA (Kelly) und Japan (Watanabe) mit der computer-assistierte chirurgischen Intervention. Es dominierten naturgemäß die chirurgischen Fächer mit kleindimensionierten, schwer zugänglichen OP-Regionen wie Neurochirurgie, HNO-Chirurgie, MKG-, Wirbelsäulen- und Gelenkchirurgie. Die Entwicklung führte über eine Vielzahl von Registrierungsverfahren (mechanisch, elektromechanisch, elektromagnetisch, optisch), zur Integration einer zunehmenden Anzahl von Geräten (OP-Instrumente, Mikroskop, Endoskop) und verschiedener Bildmodalitäten (CT, MRT, konventionelles Röntgen, PET). Allen gemeinsam ist der Zeitpunkt der Datensatzerstellung: es handelt sich in der konventionellen CAS (cCAS) ausschließlich um präoperative Daten. Auf Grundlage dieser Daten und der Registrierung des Patienten (OP-Situs), der Datensätze

und der Instrumente in ein gemeinsames 3-D-Koordinatensystem entsteht ein bildgestütztes Navigationsinstrument. Die konzeptionellen Defizite der konventionellen CAS liegen in der fehlenden Darstellung der Operationsdynamik und (meist) in der Singularität der Bildinformationen. In der heutigen klinischen Anwendung des Computers in der Chirurgie dominiert diese Form des "Zeigeinstruments", der computer-assistierte chirurgischen Intervention - berechtigt, da erst darauf aufbauend die anderen CAS-Aspekte Anwendung finden können. Zur Veranschaulichung sind nachfolgend aktuelle klinische Anwendungen skizziert.

Computer-assistierte chirurgische Intervention in der Neurochirurgie

Trantakis Chr, Winkler D, Hund-Georgiadis M, Meixensberger J

In der Neurochirurgie haben seit den 60er Jahren das Operationsmikroskop und die mikrochirurgische Operationstechnik zu einer wesentlichen Verbesserung der operativen Ergebnisse und zu einer Erweiterung des Indikationsspektrums geführt. Die Komplexität der anatomischen Verhältnisse im intrakraniellen Raum erfordert eine exakte Operationsplanung, zumal eine Orientierung anhand anatomischer Landmarken im praenchymatösen Organ Gehirn nahezu unmöglich ist. Ausgehend von dieser Überlegung wurden präoperative computertomographische und später magnetresonanztomographische Daten in Verbindung mit geeigneten Computersystemen sowohl für die präoperative OP-Planung als auch für die intraoperative Orientierung (rahmenlose Neuronavigation) benutzt (Roberts DW 1986, Barnett GH 1993; Germano IM 1995 Kato A 1991. Durch Verwendung von geeigneten, auf die Kopfhaut aufgeklebten Markern, die sich in der Bildgebung darstellen, wurde es möglich, den 3-dimensionalen CT-bzw.MRT-Datensatz mit dem 3-dimensionalen Raum des Operationssitus zu verbinden (Registrierung). Darüber hinaus können chirurgische Instrumente und

Operationsmikroskop registriert werden. Während des operativen Eingriffes kann auf diese Weise auf einer Workstation die Position des Instrumentes in Projektion auf die korrespondierende Schicht im CT oder MRT dargestellt werden (**Abbildung 1**).

Eine neue Qualität erreichten diese Sys-

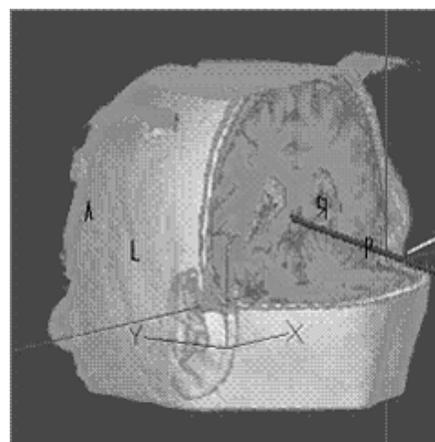


Abbildung 1: Darstellung des Zugangsweges (gelb) zur Pinealisregion am Beispiel eines Pinealoblastoms, 3-D-Rekonstruktion

teme durch die Möglichkeit, Pathologie (Tumor) und anatomische Strukturen (zum Beispiel Art. karotis, Chiasma optikum usw.) selektiv zu markieren (Segmentierung) und zum Beispiel als Kontur in das Mikroskop einzuspiegeln bzw. auf der Workstation darzustellen (**Abbildung 10**). Die Operation tiefliegender Tumoren, visuell nicht oder nur ungenügend abgrenzbarer Gliome und die Resektion von Tumoren in anatomisch sehr komplexen Are-



Abbildung 10: mikroskopischen Visualisierung präoperativ definierter Tumorgrenzen oder beliebiger anatomischer Landmarken

alen wie z.B. der Schädelbasis können durch solche computerassistierte Techniken exakt geplant und mit verringerter operativer Morbidität durchgeführt werden. Für Biopsien konnten entsprechende rahmenlose Zielsysteme entwickelt werden. Ein grundlegender Nachteil dieser CAS-Techniken ist die Tatsache, dass die für die Navigation verwandten Daten präoperativ akquiriert werden. Eine Änderung des Operationsfeldes, etwa durch Liquorverlust während des Eingriffes, Tumorsektion, Zystenentleerung oder Eintritt von Luft in den Subarachnoidspalt, die nachfolgend zu einer der Schwerkraft folgenden Verlagerung von Hirngewebe führen (Brainshift), resultieren in einer Inkongruenz zwischen präoperativ akquirierten Datensätzen und aktuellem Operationssitus. Die Daten des CAS-Systems sind folgerichtig nicht mehr valid und Abweichungen um mehrere Millimeter können zu einer Gefährdung des Patienten führen.

Eine Lösung besteht in der Akquisition aktueller Datensätze, die während des Eingriffes gewonnen werden. Für die dazu notwendige intraoperative Bildgebung hat sich aufgrund der exzellenten Weichteilvisualisierung die intraoperative Magnetresonanztomographie (iMRI) gegenwärtig als überlegen erwiesen. Die enormen Kosten des Verfahrens verhinderten bisher die weite Verbreitung geeigneter Systeme. Prinzipiell ermöglicht die Ultraschallbildgebung ebenfalls die Generierung intraoperativer Bilddatensätze, jedoch sind die Koregistrierung dieser Datensätze und die Einbindung in die Navigation noch nicht zufriedenstellend gelöst.

In der Klinik für Neurochirurgie der Universität Leipzig gehört die spinale und Neuronavigation mittels Mikroskopnavigators SMN (Fa. Carl Zeiss) zu einer seit 1997 für die Hirn- und Wirbelsäulenchirurgie etablierten Methode. Ziel der Anwendung ist die nichtinvasive dreidimensionale Visualisierung intrakranieller bzw. spinaler Prozesse sowie die Nutzung sekundär bearbeiteter Bilddaten als prä- und intraoperative Orientierungs- und Navigationshilfe. Entscheidender Vorteil

gegenüber bisheriger konventioneller OP-Verfahren ist die Möglichkeit einer sekundären Bearbeitung präoperativ acquirierter Bilddaten (CT, MRT), die eine exakte, dem Auflösungsvermögens der erstellten Bilddaten entsprechende detaillierte Contourierung interessierender Strukturen und Regionen, als auch eine virtuelle Zugangsplanung mit Definition von Ziel- und Eintrittskordinaten erlaubt. Eine dreidimensionale und multiplanare Wiedergabe dieser Daten dient der Visualisierung des geplanten operativen Zugangsweges sowie als intraoperative Orientierungs- und Navigationshilfe. Das Funktionsprinzip der Neuronavigation besteht darin, dass sich der Fokuspunkt des Operationsmikroskops, des OPMI ES (Fa. Carl Zeiss), als virtueller Zeiger auf dem Bildschirm der Workstation abbildet. Er markiert in der jeweilig operierten Ebene die Position des Operationsmikroskops und somit das Sicht- und Aktionsfeld des Operateurs. Ein „DRF-System“ (Dynamik Reference Frame) erkennt jede intraoperative Lageänderung des Patienten und berücksichtigt diese bei jeder nachfolgenden Wiedergabe des OP-Situation. Im Fall der spinalen Navigation gestattet das Navigationssystem über die einzelnen Optionen der Datenbearbeitung eine genaue dreidimensionale Darstellung insbesondere knöcherner Strukturen, wobei darauf aufbauend die Platzierung von Schrauben, einschließlich Ein- und Austrittspunkt, Länge und Durchmesser präoperativ simuliert und intraoperativ kontrolliert werden kann. Im Rahmen der spinalen und Neuronavigation gewährleistet eine Infrarot-Sendeeinheit eine entsprechende räumliche Kompatibilität zwischen Patienten, Orientierungs- und Navigationshilfen bzw. der aktuellen Position des Operationsmikroskops.

Im Verlauf der 4-jährigen Anwendung des Systems wurden insgesamt 147 Patienten neuronavigiert, 16 Patienten spinale computergestützt operative versorgt. Die Zusammenarbeit mit dem Institut für Neuropsychologische Forschung des Max-Planck Instituts, Leipzig, ermöglichte über

die präoperative Fusion präoperativ acquirierter funktioneller Bilddaten (fMRT) die sichere operative Versorgung von 27 Patienten mit Läsionen im Motorcortex bzw. Sprachcortex. Basierend auf der Verknüpfung aus Navigation und Stereotaxie (29 Patienten) konnte das bioptische Verfahren hinsichtlich der Planung von Eintritts- und Zielpunkt entscheidend optimiert werden. Entsprechend unserer Erfahrungen und Kenntnissen ergibt sich gegenwärtig eine sinnvollen Anwendung der CAS für die Versorgung von Hirntumoren (Resektion, Biopsie), für die Lokalisation und Versorgung von cerebrovasculären Erkrankungen (AVM, Angiome), für die Neuroendoskopie, optional für die funktionellen Neurochirurgie als auch für die C-Bogen gestützte spinalen Navigation.

Intraoperative Bildgebung in der computer-assitierten Neurochirurgie

Trantakis Chr, Winkler D, Moche M, Strauss G, Kahn T, Meixensberger J

An der Universität Leipzig wurde bereits 1996 ein interventioneller Kernspintomograph Signa SPi (GEMS, USA) installiert. Dieser vertikal offenen 0,5T Scanner ermöglicht die Durchführung neurochirurgischer Eingriffe im Kernspintomographen. Nach Entwicklung MR-kompatibler Systeme (mikrochirurgische Instrumente, Operationsmikroskop, Sauger, Elektrokoagulation) wurde sowohl die Durchführung von Biopsien und interstitiellen thermoablativen Verfahren (LITT, Kryoablation) als auch komplexer Hirntumorsektionen mit intraoperativer MR-Bildgebung möglich. Seit 1996 wurden 182 operative Eingriffe durchgeführt (80 Hirntumorbiopsien, 103 Kraniotomien).

Hirntumorbiopsie

Die Kombination der intraoperativen MR-Tomographie mit einem im System integrierten, LED-basierten Navigationssystem (IGT) erlaubt eine gezielte rahmenlose hochpräzise Gewebeentnahme ohne aufwendige präoperative Planung. Nach

Lagerung des Patienten im Scanner und steriler Abdeckung können mit near real-time Bildgebung Entry, Target und geeignete Trajektorie bestimmt werden. Ein in das Bohrloch fest eingeschraubtes Nadelführungssystem (Neurogate®, DAUM, Germany) gewährleistet, dass die Biopsienadel exakt entlang der vorgewählten Trajektorie zur Läsion vorgeführt wird (BILD). Durch kontinuierliche Bildgebung während des Vorführens der Biopsienadel werden intraoperative Veränderungen berücksichtigt und die exakte Position kontrolliert. Dabei konnte in 77 von 80 Fällen eine sichere Klärung der Tumorart erreicht werden. In 3 Fällen konnte keine sichere Klassifizierung erfolgen.

Tabelle 1: Biopsien

Histologischer Befund	WHO Grad	Anzahl
Meningiom	I	1
Astrozytom	II	22
Astrozytom	III	12
GBM	IV	19
Metastase		10
Lymphom		7
Entzündungsherd		6
Tumorausschluss nicht klassifizierbar		2
		3
Σ		82

Kraniotomien

Das integrierte Navigationssystem ermöglicht ohne präoperative Planung die Wahl eines optimalen Zuganges. Die Kraniotomie kann präzise lokalisiert und so umschrieben wie möglich erfolgen (Abbildung 2).

Die Tumoresektion erfolgt nach mikro-neurochirurgischen Standards. Nach Resektion des Tumorteils, der beim Blick durch das Operationsmikroskop sicher identifiziert werden kann, zeigt die intraoperative MR-Bildgebung mit hoher Sensitivität residuale Tumorteile, die unter Nutzung des integrierten Navigationssystems sicher lokalisiert und entfernt werden können.

Tabelle 2: Histologische Befunde bei 103 im interventionellen MRT durchgeführten Kraniotomien

Histologie	WHO Grad	Anzahl
Meningiom	I	8
Meningiom	II	2
Meningiom	III	1
Subependymom	I	2
Dysembryoblastom	I	1
pilozytisches Astrozytom	I	1
Astrozytom	II	15
Astrozytom	III	9
Oligodendrogliom	II	5
Oligodendrogliom	III	3
Ependymom	III	1
Glioblastoma multiforme	IV	35
Metastase		14
Kavernom		4
Blutung		1
Abszeß		1
Σ		103

Die exzellente Weichteilvisualisierung der MRT erlaubt darüber hinaus die Identifizierung wichtiger anatomischer Landmarken (Gyrus präzentralis, Sulcus zentralis, Fissura sylvii etc.). Eine Infiltrationszone im Bereich dieser Areale durch einen Hirntumor, insbesondere ein Gliom, kann so intraoperativ dargestellt und lokalisiert werden. Damit kann die Radikalität der Resektion im Interesse eines Funktionserhaltes und eines Erhaltes der Lebensqualität gezielt limitiert werden.

Fortsetzung des Artikels erfolgt im „Ärzteblatt Sachsen“, Heft 2/2002

Literatur beim Verfasser

Kontaktadressen:

Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Bildgestützte
Chirurgische Navigation
c/o Liebigstrasse 18a, 04103 Leipzig, Germany
Telefon: (03 41) 9 72 17 00, Fax: 9 72 17 09
e-mail: navigate@medizin.uni-leipzig.de

Klinik und Poliklinik für HNO-Heilkunde/
Plastische Operationen;
Klinik und Poliklinik für Neurochirurgie;
Klinik und Poliklinik für Mund-Kiefer und
Plastische Gesichtschirurgie;
Klinik für Herzchirurgie; Chirurgische Klinik III;
Klinik für Diagnostische Radiologie;
Institut für Anatomie