Ein modulares Assistenzsystem zur intraoperativen Lokalisation des Sulcus Centralis bei Tumorresektionen nahe des Motorkortex

Daniel-Paolo Streitbürger, Stefan Franke
Michael Gessat, Oliver Burgert, Rafael Mayoral

Innovation Center Computer Assisted Surgery
Universität Leipzig
Semmelweisstraße 14
D-04103 Leipzig
{daniel.streitbuerger, stefan.franke, michael.gessat, oliver.burgert, rafael.mayoral}
@medizin.uni-leipzig.de

Abstract:
Elektrische Stimulation zur intraoperativen Identifikation eloquenter Areale ist eine etablierte Methodik. Vor allem bei der Detektion des Sulcus Centralis wird ein bekanntes elektrisches Messverfahren verwendet. Dabei muss der Chirurg ein gesamtes Modell aus den intraoperativ, an mehreren Punkten, durchgeführten Messungen mental erstellen und bei späteren intraoperativen Entscheidungen einsetzen. Es existiert derzeit kein Assistenzsystem zur unterstützung dieser komplexen Aufgabe.
Am ICCAS wurde ein solches Assistenzsystem durch die Verknüpfung verschiedener Softwarekomponenten zur Erstellung einer dreidimensionalen Karte des Verlaufs des Sulcus Centralis implementiert. Das Assistenzsystem besteht aus mehreren Software- und Hardwaremodulen, welche basierend auf der TIMMS-Metaarchitektur unter Verwendung standardisierter Protokolle und Verfahren integriert werden.

1 Einleitung

Operationen am Gehirn zur Entfernung von tumorösen Gewebe stellen den Chirurgen vor eine Vielzahl von Herausforderungen. Eine davon ist die sichere Identifikation wichtiger Areale der Hirnrinde (Kortex). Eine gewollte oder ungewollte Beschädigung der Hirnregion, welche die motorischen Fähigkeiten steuert (Motorkortex), würde für den Patienten potentiell irreversible Beeinträchtigungen der Mobilität bedeuten. Um ungewollten Beschädigungen vorzubeugen existiert ein bekanntes und etabliertes Messverfahren, welches sich der elektro-chemischen Signalübertragung des Nervensystems bedient (Elektrophysiologie) [WEG79, GG84, KS87, WSA+88, CTS+96, KSF+00, Eis01, RFG+02]. Eine besonders wichtige Landmarke stellt die Zentralfurche des Gehirns (Sulcus Centralis, Abbildung 1) dar, welcher zwei wichtige Kortexareale trennt: Der Bereich unmittelbar vor dem Sulcus Centralis, der präzentrale Gyrus oder Motorkortex, ist für die Steuerung

willkürlicher Muskelbewegungen zuständig. Der Bereich unmittelbar hinter dem Sulcus Centralis, am postcentralen Gyrus oder Somatosensorischen Kortex, laufen die haptischen Sinneswahrnehmungen der Tastzellen der Haut zusammen.

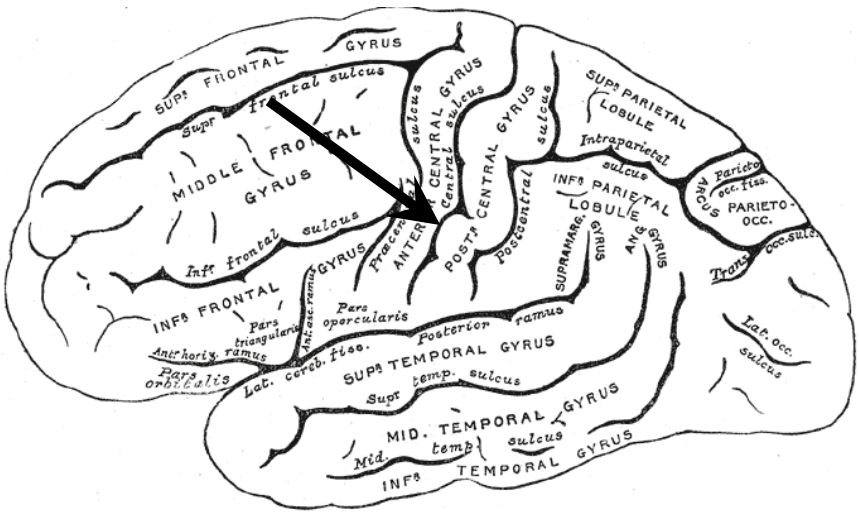
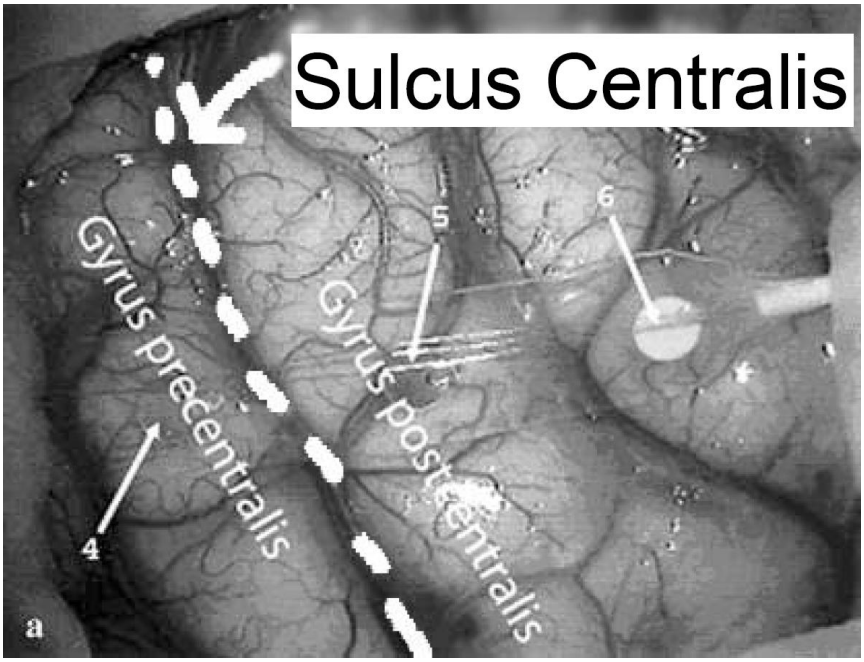


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Gehirns. Der Sulcus Centralis (*Pfeilspitze*) verläuft zwischen dem präzentralen und dem postzentralen Gyrus

Nach Öffnung des Schädels und Entfernung der Hirnhaut, ist die visuelle Identifikation des Sulcus Centralis im Operationsgebiet nicht einfach: die Zentralfurche ist nicht von den anderen sichtbaren Furchen zu unterscheiden. Abbildung 2(a) zeigt den Blick auf ein typisches Operationsgebiet. Zur Lokalisation des Sulcus Centralis wird der Effekt der Phasenumkehr zwischen sensorischem und motorischem Kortex genutzt: Ein an den Extremitäten induzierter Potentialübergang wird durch die motorischen und sensorischen Nervenbahnen ins Gehirn übertragen und kann an der Hirnrinde mit einer Sonde abgegriffen werden. Abbildung 2(b) zeigt eine Grid-Elektrode die als Sonde für die Detektion der Phasenumkehr benutzt wird. Dabei wird der induzierte Potentialübergang im sensorischen Kortex nichtnegiert und im motorischen Kortex negiert empfangen. In Abbildung 2(a) kann die Sonde auf der Hirnoberfläche auch gesehen werden: die Elektroden sind mit weißen Pfeilen markiert. Dieser Effekt erlaubt eine eindeutige Ortsbestimmung des Sulcus Centralis. Die Interpretation der einzelnen Messungen verlangt jedoch vom OP-Team ein hohes Maß an räumlicher Vorstellungskraft und Konzentration.

Zur Erleichterung der Identifikation können während der Operation präoperativ aufgenommene MRT-Aufnahmen herangezogen werden. Hierbei ergeben sich jedoch besondere Probleme der Hirnchirurgie: Das in der Literatur als Brain Shift bezeichnete Phänomen der Verschiebung der Hirnmasse nach Öffnung der Schädeldecke sowie das *Absacken* der Hirnmasse aufgrund des Abflusses des Hirnwassers (Liquor) nach Öffnung der Hirnhaut führen dazu, dass die Geometrie der präoperativ aufgenommenen Bilder nicht mehr exakt mit der Wahrnehmung im Operationsfeld übereinstimmt. Eine direkte oder indirekte intra-



(a)

(b)

Abbildung 2: (a) Intraoperativer Blick auf den Sulcus Centralis durch die Schädelöffnung. (b) Grid-Elektrode, wie in (a) angewandt, zur Aufnahme der Stimulationsantwort

operative Messmethode zur Lokalisierung des Sulcus Centralis direkt im Operationsfeld ist daher ein wichtiger Baustein, zur Vermeidung von Verletzungen kritischer Areale der Hirnrinde.

Hinzu kommt, dass den operierenden Chirurgen gegenwärtig keine Methode zur Verfügung steht, welche die an mehreren Punkten durchgeführte Lokalisation des Sulcus Centralis zu einem Gesamtverlauf zusammenführt, visualisert und für spätere intraoperative Entscheidungen jederzeit abrufbar festhält. Ohne ein solches System obliegen diese Aufgaben dem Chirurgen.

Zur Erleichterung der intraoperativen Indentifikation und Lokalisation des Sulcus Centralis wird eine Software vorgestellt, welche präoprativ gewonnene Bilddaten aufbereitet und mit intraoperativ aufgenommenen Sensormessungen und Navigationsdaten kom-

biniert. Die Software erzeugt eine räumliche Karte des Verlaufs des Sulcus Centralis, welche auf einem Oberflächenmodell des Kortex visualisiert wird.

2 Stand der Forschung

2.1 Elektrophysiologie und Lokalisation

In [All87] hat Allison einen umfassenden Artikel zur Sulcus Centralis Detektion verfasst und dabei verschiedene Regeln bezüglich der gemessenen Amplitude und Wellenformmustern festgehalten. Besonders den Wellenformmustern *(orig. waveform patterns)* und den veränderten Ableitungsergebnissen, bedingt durch die angrenzenden Tumore, haben sich Romstock et al. in [RFG+02] gewidmet. Sie machten deutlich, dass Tumore die Ableitungsergebnisse verfälschen. Ähnliche Ergebnisse konnten Štetkárová et al. in [ŠSK06] festhalten. Romstock et al. merkten an, dass mit einer Umplatzierung der Sonde oder einer Rotation der selbigen in fast allen Fällen nach mehreren Versuchen der Sulcus Centralis detektiert werden konnte [RFG+02]. Ähnliche Ergebnisse haben Kombos et al. in einer Studie mit 70 Patienten bestimmen können [KSF+00]. In der Studie konnte bei 68 (97.14%) der 70 Patienten den Sulcus Centralis detektieren werden.

Eine computergestützte intraoperative Lokalisation des Sulcus Centralis wurde bis jetzt nicht angestrebt. Sie könnte jedoch die Sicherheit der Operation erhöhen, da der ohnehin stark belastete Chirurg sich die einzelnen Messergebnisse nicht mehr merken müsste. Es wäre ihm durch eine visuelle Unterstützung möglich Lage, Orientierung und Abstand des Sulcus Centralis zum Operationsgebiet bei Bedarf wieder in Gedächtnis zu rufen.

Unterstützende Maßnahmen mit dem Ziel, die Anforderungen hinsichtlich der geistigen Integration von Messergebnissen auf Seiten des Chirurgen zu minimieren, werden in anderen Bereichen der Neurochirurgie heute schon rudimentär angewandt. Beispielsweise haben Matz et al. in [MCB99] und Roux et al. in [RBD+08] beim kortikalen Mapping von Sprach- bzw. Mathematikzentrum kleine, direkt an der Hirnoberfläche angebrachte, Marker verwendet, um die stimulierten Orte zu kennzeichen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass diese Unterstützung ungenügend und sehr ungenau sein kann. Zum Beispiel können Marker verruschten, ungenau platziert sein oder den Operateur im weiteren Verlauf stören.

2.2 Modulare Assistenzsysteme

Chirurgische Assistenzsysteme erfüllen eine Vielzahl von Funktionen, die von einzelnen Soft- und Hardwarekomponenten in der Gesamtheit nicht mehr oder nur noch schwer zu erfüllen sind. Die kooperative Nutzung einzelner Komponenten zur Lösung von Teilproblemen scheitert oft an einem Mangel an Systemintegration und Möglichkeiten zum Austausch von Daten, Zuständen und Kommandos zwischen einzelnen Geräten. Konzepte für modulare Systemarchitekturen sind seit einigen Jahren Gegenstand der Forschung verschiedener Zentren und Konsortien. Unter den bekannteren und erfolgreicheren sind die

Projekte FUSION und orthoMIT aus dem Förderprogramm SOMIT zu nennen, welche sich mit der Integration von Datenquellen und datenverarbeitenden Systemen für die Leberchirurgie, respektive die Gelenk- und Wirbelsäulenchirurgie beschäftigen [IKZ+07].

Das Therapy Imaging and Model Management System (TIMMS) wurde von [LB07] als Metaarchitektur für den Aufbau modularer multimodaler chirurgischer Assistenzsysteme eingeführt. Es beschreibt eine allgemeine Infrastruktur für die modellgestützte Therapie.

3 Methoden

In den folgenden Abschnitten werden die für die Entwicklung des Assistenzsystems verwendeten Techniken und Methoden beschrieben.

3.1 DICOM Standard

Der Standard *Digital Imaging and Communications in Medicine* (DICOM) [DIC08] ist der meistverbreitete Standard für die Archivierung radiologischer Bilder und den Austausch solcher Bilder über Speichermedien sowie Netzwerke. DICOM spezifiziert Datenformate für alle in der Radiologie gängigen Bilder, wie Röntgenbilder, Computertomographien, Ultraschallbilder oder Magnetresonanztomographien. Darüber hinaus existieren DICOM-Datenformate für aus Bildern gewonnene Daten, wie etwa Oberflächenmodelle in den Bildern enthaltener Strukturen.

Der DICOM Standard enthält neben Datenformaten Dienste für den Austausch von Datenobjekten zwischen Applikationen. Der Austausch kann über eine TCP/IP-basierte Netzwerkinfrastruktur oder mobile Datenträger realisiert werden. Zur Steuerung von Abläufen, welche in mehreren Schritten mit Hilfe verschiedener Geräte verschiedener Hersteller bearbeitet werden, enthält DICOM ein Protokoll zum Austausch von Nachrichten, sogenannter *Event Reports*.

Innerhalb von Kliniken werden Bildquellen, Arbeitsplätze für die Betrachtung und Befundung sowie zentrale Bildarchive zu so genannten *Picture Archiving and Communication Systems* (PACS) verbunden, welche die in DICOM spezifizierten Datenformate und Dienste nutzen.

Ursprünglich für die Radiologie entwickelt, wird der DICOM Standard mittlerweile auch in anderen klinischen Fachbereichen eingesetzt, um Bilddaten und neben diesen auch Planungsdaten auszutauschen und zu archivieren.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Softwaresysteme verarbeiten bzw. erzeugen MRT-Bilder und Oberflächensegmentierungen im DICOM-Format und nutzen zum Teil DICOM *Event Reports* zur Kommunikation.

3.2 OpenIGTLink

OpenIGTLink ist ein Protokoll der Anwendungsschicht zum Austausch von Nachrichten. Es basiert auf der TCP/IP Transportschicht. Das Protokoll wurde von der National Alliance for Biomedical Image Computing (NA-MIC) zum Austausch unterschiedlicher Datentypen in der bildgestützen Therapie entwickelt. Definiert sind unter anderen Status-, Bild-, und Transformationsnachrichten.

Es steht eine BSD-lizensierte C++-Klassenbibliothek für Windows, Linux und MAC zur Verfügung, die außerdem Methoden für die Serialisierung von Daten zur Verwendung im Datenblock einer Nachricht bereit stellt. OpenIGTLink wird in verschiedenen Softwareprojekten im medizinischen Umfeld verwendet, so zum Beispiel bei 3D Slicer [PHK04] und der igstk Bibliothek [OYC+09].

3.3 RTP

Das Real-Time Transport Protocol (RTP) wurde als Netzwerkstandard für die kontinuierliche Datenübertragung zwischen zwei Netzwerkteilnehmern entwickelt. Als Protokoll in der Anwendungsschicht nutzt es das User Datagram Protocol (UDP) als Transportschicht-Protokoll und realisert den Datenaustausch über Pakete. Die Steuerung der Datenverbindung erfolgt dabei über das RTP Control Protocol (RTCP). Das Protokoll erfordert außerdem ein Verbindungsmanagement, das den Verbindungsaufbau und den Austausch der Verbindungsparameter regelt. Dafür kann das Real Time Streaming Protocol (RTSP) verwendet werden.

3.4 Brain Extraction Tool

Die Segmentierungen der Kortexoberfläche aus MRT-Daten werden, im präoperativen Bereich des entwickelten Assistenzsystemes, vom Brain Extraction Tool (BET) des FMRIB Centre der University of Oxford [JPS05] generiert. Das Tool segmentiert das Hirngewebe vollautomatisch. Die MRT-Daten müssen als Eingabe im NIfTI-1 Format vorliegen. Dieses Dateiformat wurde von der Neuroimaging Informatics Technology Initiative entwickelt als Datenformat um die Interoperabilität von Softwaresystemen zur Datenanalyse von funktionellen MRT-Daten zu ermöglichen. Die Ausgabe erfolgt in dem vom Visualization Toolkit (VTK) definierten Dateiformat.

Der Segmentierungsalgorithmus basiert auf iterativer Anpassung einer initial aus Grauwertverteilung geschätzten Hirnsegmentierung. Zur Bestimmung der Kortexoberfläche wird dabei ein Dreiecksnetz iterativ lokal verändert. Die Ergebnisse der Segmentierung wurden mit Handsegmentierungen von Experten verglichen und BET erwies sich als stabile, vollautomatische Segmentierungsmethode mit akzeptabler Genauigkeit. Das Brain Extraction Tool wird unter anderem auch als Vorverarbeitung für die Messung von Hirngewebeschwund in SIENA und SIENAX eingesetzt [JPS05].

3.5 OpenMAF

Das Multimod Application Framework (OpenMAF) ist ein OpenSource-Framework zur Entwicklung von wissenschaftlichen Anwendungen deren Schwerpunkt auf der Verarbeitung und Visualisierung von Daten beruht [VAL+04]. OpenMAF nutzt intern verschiedene OpenSouce Bibliotheken. Zur Datenrepräsentation und -visualisierung wird das VTK verwendet. Daneben stellt OpenMAF eine graphische Benutzerschnittstelle basierend auf wxWidgets zur Verfügung. Die schnelle Entwicklung wissenschaftlicher Software wird außerdem durch OpenMAF Komponenten zur Daten- und Applikationsverwaltung unterstützt.

4 Ergebnisse

Es wurden Systeme für die präoperative Datenvorverarbeitung und intraoperative Datenverarbeitung entwickelt, welche über einen zentralen Patientendatenserver Bilder und 3D-Modelle austauschen. Die einzelnen Softwaresysteme und der Datenaustausch zwischen den Systemen werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

4.1 Präoperative Datenvorverarbeitung

Zur intraoperativen Nutzung der Patientendaten für die Bestimmung und Darstellung des Verlaufs des Sulcus Centralis wird ein Modell der Kortexoberfläche benötigt. Eine Software, zur Berechnung eines solchen Modells stand zur Verfügung (siehe 3.4). Es handelt sich um eine Kommandozeilenanwendung, welche Daten in einem bestimmten Format von einem Datenträger einliest, ein Modell errechnet und dieses in einem anderen Format auf einen Datenträger exportiert. Die Software verfügt über keinerlei Schnittstellen zur Integration in ein Gesamtsystem. Es wurde ein Serviceportal (Brain Extraction Service Provider, BESP) entwickelt, welches Segmentierungsaufträge aus dem Netzwerk empfangen und verwalten kann, den Zugriff auf die benötigten Patientendaten aus dem PACS realisiert und Segmentierungsergebnisse in das PACS zurück gibt. Das Serviceportal greift intern auf ein weiteres Servermodul (BETServer) zu, welches die Konvertierung in das NIfTI-1 Format vornimmt, das Brain Extraction Tool ausführt und die Ergebnisse an das Serviceportal sendet (siehe Abbildung 3).

Die BESP Software kann sowohl OpenIGTLink Nachrichten senden und empfangen als auch DICOM *Event Reports* empfangen. Der BETServer kommuniziert ausschließlich über das OpenIGTLink Protokoll. Abbildung 4 zeigt den Ablauf der Kommunikation zwischen den Modulen als UML Sequence Diagram.

- Der BESP erhält zunächst von einer Planungsstation (*Scheduler*) Namen und ID der Patienten, für welche Segmentierungen benötigt werden (1).

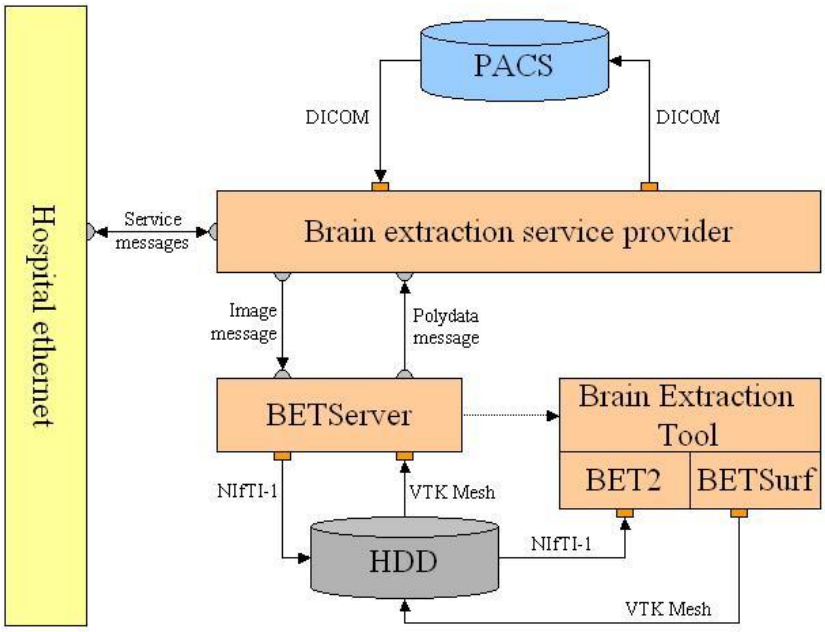


Abbildung 3: Aufbau des präoperativen Systems zur Segmentierung der Kortex-Oberfläche aus MRT-Daten

- Die verschiedenen bildgebenden Systeme (*ImageSource*) speichern Patientenbilder auf dem PACS Server (2), der PACS Server sendet nach Erhalt einer neuen Serie eine entsprechende DICOM-Nachricht (*InstanceAvailable*) an den BESP (2,3).
- Der BESP prüft, ob die neue Serie zu einem der zu segmentierenden Patienten gehört und ob es MRT Bilder sind (4) und bezieht die Bilder ggf. vom PACS Server (5,6).
- Der BESP konvertiert die Bilder und sendet sie als OpenIGTLink Message an den BETServer (7,8).
- Der BETServer empfängt die Bilder, speichert sie im NIfTI-1 Format in den Eingabeordner des BET und startet das BET. Dabei stellt er sicher, dass zu keinem Zeitpunkt mehr als eine Instanz des Tools ausgeführt wird (9.10).
- Nach Abschluss der Segmentierung speichert das BET das Oberflächenmodell ab, der BETServer importiert das Oberflächenmodell und sendet das Oberflächenmodell als OpenIGTLink Message an den BESP (11,12,13).
- Der BESP konvertiert das Oberflächenmodell und erzeugt ein vollständiges DICOM Objekt und sendet es an den PACS Server (14,15).

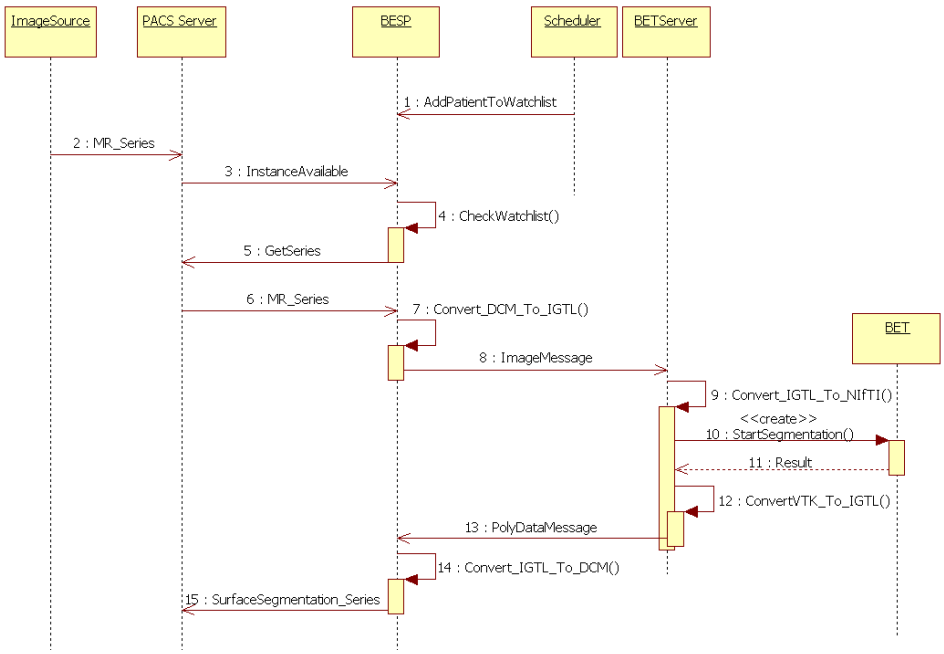


Abbildung 4: Ablauf der präoperativen Datenaufbereitung als UML Sequenzdiagramm

4.2 Intraoperatives Mapping des Sulcus Centralis

Es wird intraoperativ eine 3D-Karte der Lage des Sulcus Centralis erstellt. Dafür wurde eine auf dem OpenMAF-Framework basierende Anwendung, der *SulcusMapper*, entwickelt, welche die präoperativen MRT-Bilder und die daraus segmentierte Kortexoberfläche mit der getrackten Position der Stimulationssonde und der Stimulationsantwort der Phasenumkehr kombiniert. Hierfür wird der Patient mit einem standardisierten Verfahren, unter zu hilfe nahme eines am Schädel fixierten Registriersterns, registriert, so dass es möglich ist den Patienten nach einer Umpositionierung weiterhin korrekt zu verfolgen. Intraoperativ auftretende Deformationen wie z.B. BrainShift oder Absacken der Hirnmasse werden nicht kompensiert. Daraus resultierend wäre es möglich anhand der intraoperativen Messungen die Verschiebung des Gehirns zu quantifizieren und dem Chirurgen zusätzlich anzugeben. Die Projizierung der intraoperativ gemessenen Punkte auf die Kortexoberfläche kann durch die Position der Sonde und vorberechneter Krümmung am selbigen Ort errechnet werden. Im speziellen wird es durch die bekannte Sondenform möglich mit lediglich zwei getrackten Elektroden den Ort der verbleibenden Elektroden zu bestimmen, selbst wenn die Messung in einem nicht sichtbaren Bereich erfolgt. Abbildung 5 zeigt den Aufbau des intraoperativen Systems.

Der *SulcusMapper* bildet den Kern des Assistenzsystems. Er besteht aus vier Hauptkomponenten:

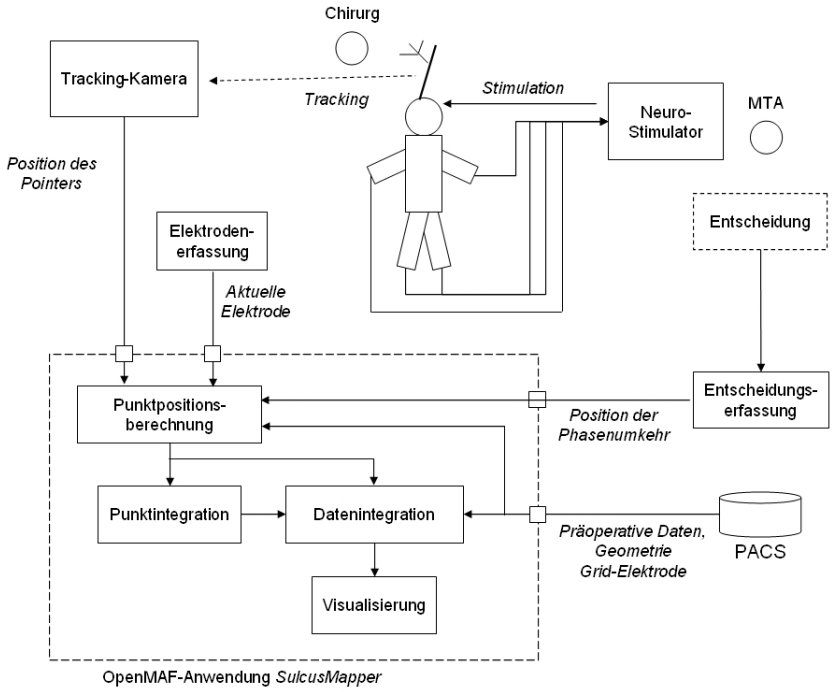


Abbildung 5: Aufbau des intropeativen Systems zur Lokalisation des Sulcus Centralis

- Punktpositionsberechnung: berechnet die Position eines Punktes des Sulcus Centralis.
- Punktintegration: verbindet mehrere berechnete Punkte und bildet daraus ein Modell des gesamten Zentralfurchenverlaufs.
- Datenintegration: integriert präoperative und intraoperative Daten.
- Visualisierung: visualisiert die Ergebnisse.

Nach Öffnung der Schädeldecke und Entfernung der Hirnhaut, wird mit Hilfe von dem in Abbildung 5 gezeigten Systemaufbau, der Sulcus Centralis folgendermaßen lokalisiert:

1. Die Grid-Elektrode (Abbildung 2 b) wird auf der zu testenden Furche plaziert und ein Potentialübergang wird an den Extremitäten induziert.
2. Die Stimulationsantwort auf der Hirnoberfläche wird vom Neurostimulator aufgenommen und vom verantwortlichen MTA interpretiert. Es muss entschieden werden ob und ggf. zwischen welchen Elektroden die Phasenumkehr stattgefunden hat. Konnte kein Phasenumkehr detektiert werden, kann geschlossen werden, dass der Sulcus Centralis jenseits der Elektroden liegt.

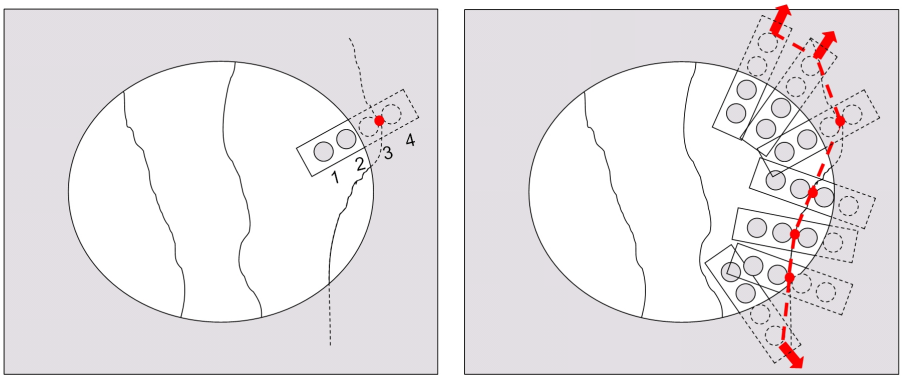
3. Falls die Phasenumkehr stattfand, werden die sichtbaren Elektroden vom Chirurg mit einem getrackten Pointer angefahren und lokalisiert.

4. Aus der Information über das Elektrodenpaar, an dem die Phasenumkehr beobachtet wurde, der Position der mit dem Pointer angefahrenen Elektroden und der bekannten Geometrie der Grid-Elektrode, kann das Modul *Punktpositionsberechnung* eine approximierte Punktposition des Sulcus Centralis berechnen.

5. Die Positionsinformation wird erfasst und visualisiert.

Dieser Prozess wird schematisch in Abbildung 6(a) dargestellt. In diesem Fall, befindet sich die vermutete Zentralfurche teilweise außerhalb der Schädelöffnung. Die Grid-Elektrode wird daher unter der Öffnung geschoben wodurch nur Elektroden eins und zwei sichtbar bleiben. In dieser Position der Grid-Elektrode verläuft der Sulcus Centralis zwischen Elektroden drei und vier. Dieses Ergebnis würde man durch Interpretation der Stimulationsantwort treffen können. Durch das Anfahren, mit dem getrackten Pointer, der Elektroden eins und zwei und Dank der bekannten Geometrie der Grid-Elektrode, kann die Position des Sulcus Centralis zwischen den Elektroden drei und vier extrapoliert werden. Um eine korrekte und präzise Position des Punktes bestimmen zu können, berücksichtigt das Modul ebenfalls die Krümmung der Gehirnoberfläche, welche aus den präoperativ segmentierten Kortex entnommen wird.

Abbildung 6(b) zeigt, wie durch Wiederholung des in Abbildung 6(a) erläuterten Prozesses, der Verlauf des gesamten Sulcus Centralis geschätzt werden kann. Das Modul Punktintegration kann aus der Menge der individuell bestimmten Punkte ein gesamtes Modell des Verlaufs der Zentralfurche erstellen. Dieses Modell kann dann auf den präoperativen Daten mit den einzeln berechneten Punkten visualisiert werden.



(a) (b)

Abbildung 6: Schematische Darstellung der Lokalisation des Sulcus Centralis. Das linke Bild zeigt eine erste mögliche Messung, das rechte Bild zeigt alle Messungen. Durch die Verbindung (rote Linie) zeichnet sich der Verlauf des Sulcus Centralis ab, auch wenn dieser ausserhalb der Kraniotomie liegt und somit nicht direkt gesehen werden kann.

Die Abbildung 7 zeigt die aus dem Brain Extraction Tool segmentierte Hirnoberfläche als dreidimensionales Oberflächenmodell. Auf dieser ist das Trepanationsloch (Öffnung der Schädeldecke) als weißer Kranz eingezeichnet. Die weißen halbtransparenten Kugeln sind Repräsentanten für jeweils eine geschätzte Lokalisierung des Sulcus Centralis, basierend auf einer elektrophysiologischen Messung. Zusätzlich ist der approximierte Verlauf des Sulcus Centralis zu erkennen. Im Hintergrund sind die präoperativ aufgenommenen patientenspezifischen MRT-Bilder dargestellt.

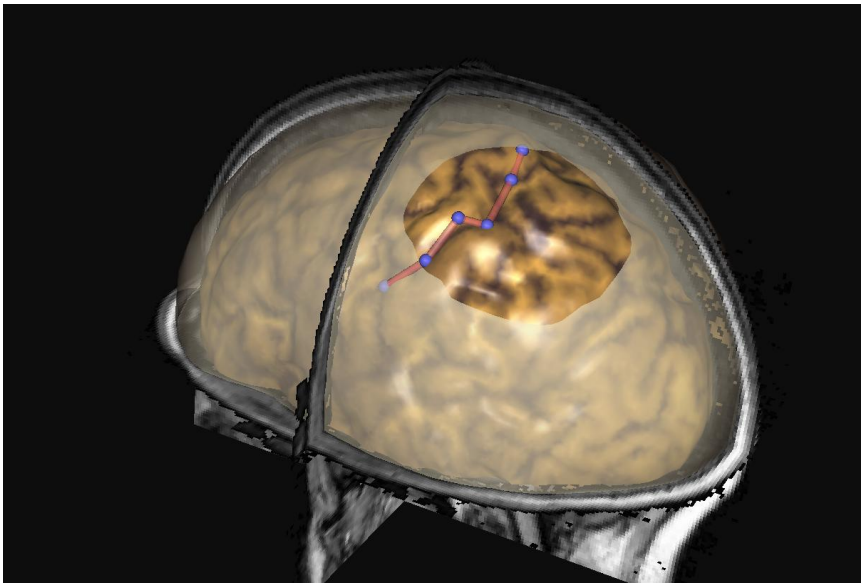


Abbildung 7: Visualisierung des Sulcus Centralis Verlaufs im *SulcusMapper* wie sie dem Chirurgen präsentiert wird. Die weißlich halbtransparente Hülle stellt den Schädel dar mit ausgefräßter Kraniotomie, die blauen Punkte die extrapolierten Messpunkte. Die Verbindungslinie gibt den approximierten Verlauf des Sulcus Centralis wieder. Dies ist auf einem präoperativ errechneten 3D-Hirnmodell projeziert. Im Hintergrund kann man die dazugehörigen MRT-Aufnahmen erkennen.

4.2.1 Systemintegration

Der *SulcusMapper* bearbeitet Daten, die von externen Komponenten zu Verfügung gestellt werden. Erst durch Verknüpfung mit diesen Komponenten entsteht das modulare Assistenzsystem (Siehe Abbildung 5). Die Applikation enthält eine DICOM-Netzwerkschnittstelle zum Datenaustausch mit dem PACS-Server. Intraoperativ wird das RTP-Protokoll genutzt, um die Positionsdaten vom Trackermodul zur Anwendung zu übertragen. Als dritten Kanal nutzt das Programm den Nachrichtenaustausch über OpenIGTLink zum Empfang der Klassifizierungsergebnisse. Durch die Nutzung offener Kommunikationstechnologien ist das Gesamtsystem sehr flexibel. So kann z.B. das Trackingsystem ausgetauscht werden oder ein automatisches Klassifizierungssystem eingebracht wer-

den, ohne dass Änderungen an der Mapping-Applikation nötig würden. Dies macht den wesentlichen Unterschied zu anderen etablierten Neuronavigationssystemen deutlich. Auf Grund der verwendeten Architektur ist es möglich mit einem Minimalaufwand Änderungen durchzuführen oder gesamte Bausteine zu entfernen ohne Änderungen am Restsystem vornehmen zu müssen. Die jetzigen Navigationssysteme sind hier deutlich eingeschränkter und können nur als geschlossene *Blackbox* ähnliche Systeme genutzt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ein Assistenzsystem für die intraoperative Unterstützung des Chirurgs bei der Lokalisation des Sulcus Centralis wurde präsentiert. Das System erstellt ein Modell des Verlaufs des Sulcus Centralis aufgrund von intraoperativ auf der Hirnoberfläche durchgeführten Messungen. Dieses Modell wird mit den präoperativen Daten integriert und dem Chirurg präsentiert und kann jederzeit für intraoperative klinische Entscheidungen abgerufen werden. Besonders durch die an die Operation angepasste Anordnung der Geräte als auch die für den Operationssaal optimierte Darstellung der Ergebnisse auf die vorhandenen, gut sichtbaren Monitore unterstützen den Chirurgen. Es handelt sich um ein modulares Assistenzsystem, das als Realisierung der TIMMS-Metaarchitektur entwickelt wurde. Eine Reihe von Standards werden eingesetzt um vorhandene und neu am ICCAS entwickelte Soft- und Hardware Komponenten zu integrieren um die benötigte klinische Funktionalität zu erhalten. Der modulare Ansatz ermöglicht die besten vorhandenen Komponenten wirksam einzusetzen und gewährleistet die Flexibilität und künftige einfache Erweiterbarkeit des Systems. Zu beachten ist, dass anderweitige Trackingsysteme wie z.B. magnetisch, optisch oder ein Infrarottracken ohne Pointer nicht geeignet wären. Ein optisches Trackingverfahren würde Marker auf der Elektrode verlangen welche nicht verdeckt sein dürften, so dass Messungen, wie sie in Abbildung 6 dargestellt werden, unmöglich sind. Ein Trackingsystem ohne Pointer würde einen Trackingstern am Ende der Gridelektrode verlangen, jedoch das zusätzliche Gewicht unnötig vergrößern und die Handhabbarkeit der Elektrode deutlich einschränken. Zuletzt ist nicht bekannt inwiefern ein magnetisches Verfahren Auswirkungen auf neurochirurgische Eingriffe hat. Es ist nicht bekannt ob das magnetische Feld die Stimulationsmessungen verzerren würden oder andere Interferenzen auftreten könnten, da magnetischbasierte Systeme z.Z. nicht in der Neurochirurgie eingesetzt werden.

Zum jetzigen Zeitpunkt wird eine Studie geplant, welche die Software unter Realbedingungen am Universitätsklinikum Leipzig prüft. Weiterführend sind Messfehler aufgrund der Ungenauigkeit der Trackingkamera noch nicht hinreichend genau untersucht worden. Zusätzlich werden Workflowaufnahmen solcher neurochirurgischer Operationen aufgezeichnet, um den aktuellen zeitlichen Verlauf festzuhalten und um zeitliche Veränderungen im Ablauf durch das neue System zu einem späteren Zeitpunkt quantifizieren zu können.

Dank der Flexibilität und erweiterbarkeit des entwickelten Systems, planen wir ihren weiteren Einsatz bei der intraoperativen Bestimmung des Abstandes zu den Pyramidenbahnen während der subkortikalen Resektion. Eine Studie hat eine Verbindung zwischen der Nähe von Nervenbahnen bei der Tumorresektionen mit zeitlich abhängigen mo-

torischen Defiziten aufgestellt [MCB99]. Es wurde ebenfalls gezeigt, dass zur Verhinderung von Beschädigungen der Pyramidenbahnen, elektrische Stimulationen zur Absicherung schon ab einem Abstand von 1 cm zur Resektionshöhle vorgenommen werden sollten [MOE+07]. Zum jetzigen Zeitpunkt existiert kein Assistenzsystem, das dem Chirurg eine zuverlässige Einschätzung gibt welche Nervenbahnen in welchem Abstand sich zur Resektionshöhle befinden. Selbiges gilt auch für eine adäquate Visualisierung der Messwerte für den Chirurgen.

Danksagung

Die Autoren möchten sich bei Dr. med. Christos Trantakis, Dr. med. Jochen Helm und Prof. Dr. med. Jürgen Meixensberger vom Universitätsklinikum Leipzig bedanken für Ihre entscheidende Unterstützung bei dieser Arbeit.

Das Innovation Center Computer Assisted Surgery (ICCAS) an der Medizinischen Fakultät der Universität Leipzig wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und vom Sächsischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst im Rahmen des Förderprogramms „Unternehmen Region“ finanziert.

Literaturverzeichnis

[All87] T. Allison. Localization of sensorimotor cortex in neurosurgery by recording of somatosensory evoked potentials. *The Yale J. of Biology and Medicine*, 60(2):143, 1987.

[CTS+96] C. Cedzich, M. Taniguchi, S. Schäfer, C. Med, and J. Schramm. Somatosensory evoked potential phase reversal and direct motor cortex stimulation during surgery in and around the central region. *Neurosurgery*, 38(5):962, 1996.

[DIC08] Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM), 2008.

[Eis01] W. Eisner. Elektrophysiologisches Neuromonitoring in der Neurochirurgie. *Journal für Neurologie, Neurochirurgie und Psychiatrie*, 2(3):38–55, 2001.

[GG84] EM Gregorie and S. Goldring. Localization of function in the excision of lesions from the sensorimotor region. *Journal of neurosurgery*, 61(6):1047–1054, 1984.

[IKZ+07] B. Ibach, A. Kanert, A. Zimolong, F. Portheine, and K. Radermacher. Konzept einer Service-Orientierten Integrationsarchitektur für den orthopädischen OP der Zukunft. *Biomedizinische Technik*, 52, 2007.

[JPS05] M. Jenkinson, M. Pechaud, and S.M. Smith. BET2: MR-based estimation of brain, skull and scalp surfaces. *Eleventh Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping*, 2005.

[KS87] RB King and GR Schell. Cortical localization and monitoring during cerebral operations. *Journal of neurosurgery*, 67(2):210, 1987.

[KSF+00] T. Kombos, O. Suess, T. Funk, BC Kern, and M. Brock. Intra-operative mapping of the motor cortex during surgery in and around the motor cortex. *Acta Neurochirurgica*, 142(3):263–268, 2000.

[LB07] Heinz U. Lemke and Leonard Berliner. Specification and design of a Therapy Imaging and Model Management System (TIMMS). In Steven C. Horii and Katherine P. Andriole, editors, *SPIE Medical Imaging: PACS and Imaging Informatics*, volume 6516 of *Presented at the SPIE Conference*, page 651602, 2007.

[MCB99] P.G. Matz, C. Cobbs, and M.S. Berger. Intraoperative cortical mapping as a guide to the surgical resection of gliomas. *Journal of neuro-oncology*, 42(3):233–245, 1999.

[MOE+07] N. Mikuni, T. Okada, R. Enatsu, Y. Miki, T. Hanakawa, S. Urayama, K. Kikuta, J.A. Takahashi, K. Nozaki, H. Fukuyama, et al. Clinical impact of integrated functional neuronavigation and subcortical electrical stimulation to preserve motor function during resection of brain tumors. *Journal of Neurosurgery*, 106(4):593–598, 2007.

[OYC+09] Sebástián Ordas, Ziv Yaniv, Patrick Cheng, Junichi Tokuda, Haying Liu, Nobuhiko Hata, and Kevin Cleary. Interfacing proprietary hardware with the image-guided surgery toolkit (IGSTK): a case for the OpenIGTLink protocol. In *SPIE Medical Imaging: PACS and Imaging Informatics*, volume 7264, pages 7264–14, 2009.

[PHK04] S. Pieper, M. Halle, and R. Kikinis. 3D Slicer. In *IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: Nano to Macro*, pages 632,635, 2004.

[RBD+08] F.E. Roux, L. Boukhatem, L. Draper, O. Sacko, and J.F. Demonet. Cortical calculation localization using electrostimulation. *Journal of Neurosurgery*, pages 1–9, 2008.

[RFG+02] J. Romstock, R. Fahlbusch, O. Ganslandt, C. Nimsky, and C. Strauss. Localisation of the sensorimotor cortex during surgery for brain tumours: feasibility and waveform patterns of somatosensory evoked potentials. *BMJ*, 72(2):221–229, 2002.

[ŠSK06] I. Štetkárová, L. Stejskal, and M. Kofler. Tumors localized near the central sulcus may cause increased somatosensory evoked potentials. *Clinical Neurophysiology*, 117(6):1359–1366, 2006.

[VAL+04] M. Viceconti, L. Astolfi, A. Leardini, S. Imboden, M. Petrone, P. Quadrani, F. Taddei, D. Testi, and C. Zannoni. The Multimod Application Framework. In *Proceedings of the 8th Conference On Information Visualisation*, pages 15–20, 2004.

[WEG79] CN Woolsey, TC Erickson, and WE Gilson. Localization in somatic sensory and motor areas of human cerebral cortex as determined by direct recording of evoked potentials and electrical stimulation. *Journal of neurosurgery*, 51(4):476, 1979.

[WSA+88] CC Wood, DD Spencer, R. Allison, G. McCarthy, PD Williamson, and WR Goff. Localization of human sensorimotor cortex during surgery by cortical surface recording of somatosensory evoked potentials. *Journal of neurosurgery*, 68(1):99–111, 1988.