

**Proseminar „Informatik in der Medizin“**  
Navigation

Christian Koch  
Betreuer: Carsten Kübler

Universität Karlsruhe  
WS 00/01

# 1 Übersicht

Diese Ausarbeitung zum Proseminar „Informatik in der Medizin“ beschäftigt sich mit dem Teilbereich der Navigation.

Zunächst wird die Frage diskutiert, welche Vor- und Nachteile der Einsatz von Navigationssystemen in der Medizin mit sich bringt und in welchen Bereichen daher der Einsatz sinnvoll ist. Anschließend werden die theoretischen Grundlagen für derartige Systeme sowie einige technische Umsetzungen vorgestellt und auf die wichtigsten Verfahren genauer eingegangen. Abschließend wird eine kurze Zusammenfassung und ein Ausblick auf mögliche Entwicklungen gegeben.

## 2 Einführung/Anwendungsgebiete

Navigationssysteme sind die Grundlage für zahlreiche Anwendungen im medizinischen Bereich. Sie werden sowohl im praktischen Betrieb im OP eingesetzt als auch zur Simulation von chirurgischen Eingriffen verwendet.

Mit Hilfe von Navigationssystemen ist es möglich, die Lage (Translation) und Ausrichtung (Rotation) von Objekten zu bestimmen. Dieses können z.B. medizinische Geräte und Teile des Patienten sein. Gerade bei endoskopischen Eingriffen wird dem Arzt somit eine wichtige Orientierungshilfe gegeben.



Abbildung 1: *Projektion des Gehirns auf den Patientenkopf*

Beim praktischen Einsatz im OP kommen Navigationssysteme sowohl zur Steuerung von medizinischen Robotern als auch bei der Realisierung von Augmented Reality Systemen zur Unterstützung des Operateurs zum Einsatz.

Bei der Steuerung von Robotern ist sowohl die Position des vom Roboter eingesetzten Geräts als auch die Position des Patienten von Interesse. Nur mit Hilfe dieser Informationen lässt sich der Roboter exakt steuern.

Ist das Ziel dagegen die Erstellung eines Augmented Reality Systems, werden Informationen über die aktuelle Lage des Patienten (und dabei speziell der zu untersuchenden Regionen) sowie Informationen über die Position und den Blickwinkel des Benutzers benötigt. Bei einem solchen System werden dem Benutzer zusätzliche Informationen ins Blickfeld eingespielt oder auf einem Monitor dargestellt. Dies können wie in Abbildung 1 ganze Organe sein oder aber auch Informationen darüber, in welchen Bereichen Schnitte durchzuführen sind, oder ob der Operateur gerade Gefahr läuft in kritische Bereiche vorzudringen (z.B. in der Neurochirurgie).

Der Bereich der Simulation lässt sich grundsätzlich in zwei Gebiete unterteilen. Zum einen finden Simulationen Einsatz bei der Ausbildung von Medizinern, zum anderen dienen sie der Operationsplanung. In beiden Fällen ist es das Ziel, dem Benutzer ein möglichst reales Abbild der Wirklichkeit zu simulieren. Dabei kann sich die Simulation auf die visuelle Wahrnehmung konzentrieren oder aber die Haptik in den Vordergrund stellen. Für

die Zukunft wäre es natürlich wünschenswert, eine Kombination der beiden Zielstellungen realisieren zu können.

Steht die visuelle Komponente im Vordergrund, lässt sich dem Benutzer die virtuelle Welt z.B. mittels eines HMD's (head mounted display) simulieren.

Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 2 ein Beispiel für ein System, bei dem die mechanische Komponente im Vordergrund steht. Dem Übenden soll dabei per „force feedback“ ein Gefühl für die bei einem endoskopischen Eingriff auftretenden Kräfte vermittelt werden.

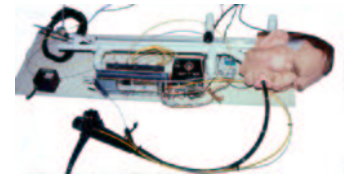


Abbildung 2: *System zur Simulation eines endoskopischen Eingriffs*

In beiden Fällen ist es jedoch unbedingt notwendig, dass dem zur Simulation verwendeten Gerät die Position des Benutzers (Beispiel HMD) bzw. die Position des Endoskops bekannt ist. Dies wird mit Hilfe von Navigationssystemen realisiert.

Navigationssysteme dienen also wie bereits erwähnt dazu, die Lage von Objekten im Raum zu vermessen. Im Bereich der Medizintechnik sind diese Objekte der Patient (oder auch nur Teile davon), die chirurgischen Werkzeuge sowie der Operateur als Benutzer.

Ziele, die sich durch den Einsatz von Navigationssystemen erreichen lassen, sind, wie oben schon angedeutet, der Einsatz von medizinischen Robotern sowie die minimal-invasive Chirurgie. Die Absicht der minimal-invasiven Chirurgie ist es, die bei einem Eingriff verbleibenden „äußeren Spuren“ am Patienten so gering wie möglich zu halten, also möglichst wenige und kurze Einschnitte zu verwenden. Die dabei u.U. verbleibenden Narben sind dementsprechend kleiner und verheilen schneller. Dieses Ziel lässt sich besonders gut durch den Einsatz von endoskopischen Operationsmethoden erreichen, die jedoch häufig erst durch die Kombination mit Augmented Reality Systemen sinnvoll verwendet werden können. Praktische Verwendung finden derartige Systeme zur Zeit vor allem im Bereich der Neurochirurgie und der HNO-Anwendungen.

### 3 Grundlagen

Ein Navigationssystem sollte in der Lage sein, alle Freiheitsgrade, die ein Objekt einnehmen kann, zu bestimmen.

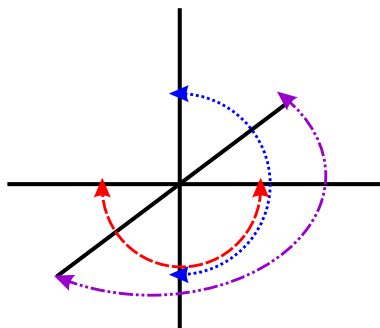


Abbildung 3: *Translations- und Rotationsfreiheitsgrade*

Die Anzahl der Freiheitsgrade setzt sich zusammen aus den Translationsfreiheitsgraden und den Rotationsfreiheitsgraden. Da sich ein Objekt im dreidimensionalen Raum in drei Richtungen bewegen kann, stehen ihm drei Translationsfreiheitsgrade zur Verfügung. Übertragen in ein Koordinatensystem entspricht dies einer Bewegung längs der x-, y- und z-Achse. Zusätzlich ist eine Drehung um jede dieser drei Achsen möglich (yaw, pitch und roll). Es bestehen also auch drei Rotationsfreiheitsgrade.

Abbildung 3 veranschaulicht dies. Es ist eine Bewegung entlang der Achsen (schwarz) sowie eine Drehung um jede der Achsen (farbig) möglich.

Um sowohl die Position als auch die Ausrichtung eines Objekts erkennen zu können, muss ein Navigationssystem also 6 Freiheitsgrade bestimmen.

Teilweise ist es in der Praxis jedoch auch ausreichend, wenn nicht alle sechs möglichen Freiheitsgrade bekannt sind. Daher sind auch Navigationssysteme auf dem Markt, die z.B. zwar drei Translations-, aber nur zwei Rotationsfreiheitsgrade erkennen können<sup>1</sup>.

## 4 Verfahren

Um die Freiheitsgrade eines Objekts zu bestimmen, können sich Navigationssysteme diverser Techniken bedienen.

Die größte Verbreitung haben dabei die optischen gefolgt von den elektromagnetischen Verfahren. Auf diese soll daher nachher noch detaillierter eingegangen werden.

Vom Prinzip her ähnlich funktionieren Systeme, die zur Positionsbestimmung Ultraschall einsetzen. Diese sind allerdings momentan noch recht empfindlich gegenüber äußeren Störungen und relativ ungenau. Sie finden daher kaum Verwendung.

Ein anderes System, welches sich allerdings noch in der Entwicklungsphase befindet, ist die Positionsbestimmung durch den Einsatz von Bilderkennung<sup>2</sup>. Die Idee dabei ist es, das Bild einer Kamera, welche sich an dem zu vermessenden Objekt befindet, aufzuzeichnen und durch den Einsatz von Bilderkennungssystemen die Bewegungen des Objekts nachzuvollziehen. Damit lässt sich z.B. die Position relativ zu bekannten „Landmarken“, die etwa Tumore oder zuvor vermessene Marker sein können, bestimmen.

Des Weiteren stehen sogenannte mechanische Systeme zur Verfügung. Mechanische Systeme messen die Position und die Ausrichtung eines Objekts mit Hilfe von Winkelsensoren in den Gelenken eines Roboterarms<sup>3</sup>. Ist die Position des Roboters bekannt, so lässt sich aus den Informationen über die Stellung aller Gelenke auch die Position des Geräts am Ende des Roboterarms berechnen.

Da bei diesem Verfahren das zu vermessende Objekt (im Allgemeinen ein chirurgisches Werkzeug) aber nicht völlig frei bewegt werden kann und zudem die eingesetzten Sensoren häufig ungenau sind,



Abbildung 4: *Einsatz eines Roboters in der Neurochirurgie*

<sup>1</sup>Dieses ist beispielsweise bei elektromagnetischen Systemen, die mit nur einer Senderspule arbeiten der Fall. Die Rotation dieser Spule um die eigene Achse ist dann nicht bestimmbar.

<sup>2</sup>entwickelt z.B. von der Universitätsklinik Bochum

<sup>3</sup>Dies gilt vor allem für den Einsatz im medizinischen Bereich, da dort eine mechanische Verbindung zum messenden Objekt bestehen kann. In anderen Bereichen kommen unter dem Begriff der mechanischen Sensoren z.B. auch Beschleunigungssensoren zum Einsatz.

kommt es lediglich als redundantes System zum Einsatz.

Um eine höhere Genauigkeit zu erzielen ließe sich auch eine Kombination aus mehreren Navigationssystemen einsetzen. Diese in der Praxis noch kaum verbreiteten Verfahren werden als hybride Systeme bezeichnet. Hierbei versucht man, die Vorteile von zwei oder mehr Verfahren zu kombinieren, um die jeweiligen Nachteile auszugleichen. Außerdem ist damit immer auch eine Redundanz vorhanden, da zur Not auf eines der verwendeten Systeme verzichtet werden kann (u.U. allerdings nur unter nicht zu vertretenden Einbußen bei der Genauigkeit).

## 5 Elektromagnetische Verfahren

Bei elektromagnetischen Verfahren werden Position und Ausrichtung eines Objekts mit Hilfe von elektromagnetischen Wellen gemessen.

Ein solches System besteht aus einem Sender, der im Allgemeinen außerhalb des zu vermessenden Objekts plaziert wird, und einem Empfänger, der auf dem Objekt angebracht ist. Es wird also die relative Position zwischen Sender und Empfänger ermittelt. Für viele Anwendungen ist dies bereits ausreichend, bei bekannter Position des Senders lässt sich aber auch die absolute Position des Empfängers berechnen.

Sender und Empfänger bestehen bei diesen Systemen im Allgemeinen aus jeweils mindestens drei Spulen. Für die Messung werden die Spulen des Senders mit einer definierten Frequenz elektrisch angeregt und senden elektromagnetische Wellen aus, die von den Spulen des Empfängers empfangen werden.

Das Ziel ist es nun, dass sich unterscheiden lässt, von welcher der Senderspulen das von den drei Empfängerspulen

aufgenommene Signal stammt. Dadurch wird erreicht, dass für die Berechnung  $3 \times 3 = 9$  Lösungsvektoren zur Verfügung stehen (drei verschiedene Signale werden von je drei Empfängern gemessen). Da aber nur sechs Freiheitsgrade zu bestimmen sind, reichen die vorhandenen Daten für eine exakte Positions- und Lagebestimmung aus.

Um nun die Signale der Senderspulen unterscheiden zu können, gibt es zwei Verfahren. Die erste Möglichkeit ist, die Senderspulen nacheinander anzuregen. Dadurch wird erreicht, dass immer nur eine Spule ein Signal abstrahlt, welches dann von allen drei Empfängerspulen gemessen wird. In diesem Fall kann für alle drei Senderspulen die gleiche Frequenz verwendet werden.

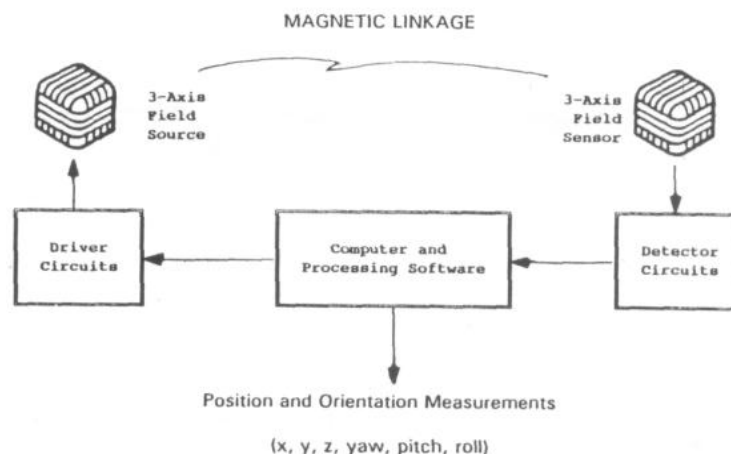


Abbildung 5: Funktionsweise eines elektromagnetischen Navigationssystems

Eine weitere Möglichkeit ist, die Senderspulen mit verschiedenen Frequenzen anzusteuern. Da dadurch ebenfalls eine exakte Unterscheidung gegeben ist, können die Spulen bei diesem Verfahren auch gleichzeitig angeregt werden.

Wie in Abbildung 5 dargestellt, wird bei einem elektromagnetischen Navigationssystem die Anregung der Senderspulen zwar von den Schaltungen des Senders gesteuert, diese erhalten die Informationen über Zeitpunkt und Frequenz jedoch von einer zentralen Kontroll- und Berechnungseinheit. Diese kann somit dafür Sorge tragen, dass die Spulen entweder nacheinander oder aber mit verschiedenen Frequenzen senden.

Die vom Sender abgestrahlten Wellen treffen nun auf die Spulen des Empfängers. Deswegen sendet die Sensoreinheit die Informationen über die empfangenen Wellen wiederum an die zentrale Kontroll- und Berechnungseinheit. Diese berechnet aus den gemessenen Daten die sechs Freiheitsgrade der Empfängerspulen (und damit des zu vermessenden Objekts).

Der Einsatz von elektromagnetischen Navigationssystemen hat vor allem beim Einsatz in der Endoskopie den Vorteil, dass keine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger bestehen muss. Dies ermöglicht auch bei biegsamen Endoskopen eine zuverlässige Navigation (bei starren Endoskopen ist eine Befestigung der Sensoren auch außerhalb des Patienten möglich). Außerdem stören Personen - wie etwa der Arzt - , die sich zwischen Sender und Empfänger aufhalten, die Verbindung nicht.

Die Funktionsweise mittels elektromagnetischer Strahlung bringt jedoch auch Nachteile mit sich. Da die verwendeten Wellen von magnetisierbaren Materialien abgelenkt werden, wird die Messung durch diese verfälscht. Es muss also darauf geachtet werden, dass sich im Messbereich nur nichtmagnetisierbare Materialien befinden. Das verursacht besonders bei den chirurgischen Werkzeugen erhebliche Kosten. Außerdem darf von den im OP verwendeten technischen Geräten keine Strahlung ausgehen, die die Messung beeinflussen könnte.

Die Genauigkeit von elektromagnetischen Navigationssystemen liegt bei etwa 1-2 mm. Dies ist in den meisten Anwendungsgebieten für den intraoperativen Einsatz gerade noch vertretbar.

## 6 Optische Verfahren

Optische Verfahren verwenden für die Positionsbestimmung Licht, welches im Allgemeinen im Infrarotbereich liegt. Grundsätzlich zu unterscheiden sind aktive und passive Systeme.

Bei aktiven Systemen werden auf dem zu vermessenden Objekt LEDs<sup>4</sup> befestigt. Das von diesen emittierte Licht wird von Kameras aufgenommen (vgl. Abbildung 6). Um diese Daten zur Navigation zu nutzen stellt sich das gleiche Problem wie bei den elektromagnetischen Navigationssystemen: Die LEDs sollten vom Aufnahmegerät eindeutig identifiziert werden können. Um diese Unterscheidung sicherstellen zu können, stehen im Prinzip die gleichen Techniken wie bei elektromagnetischen Systemen zur Verfügung.

Die erste Möglichkeit besteht darin, die LEDs zeitlich versetzt anzusteuern. Dieses Verfahren führt dazu, dass die Aufnahmegeräte immer nur das Licht von genau einer

---

<sup>4</sup>LED = light emitting diode

LED aufnehmen. Da der Navigationssoftware diese bekannt ist (vgl. dazu auch das Beispiel für elektromagnetische Verfahren, Abbildung 5), ist eine eindeutige Unterscheidung möglich. Dieses System wird bei optischen Navigationssystemen in der Praxis üblicherweise eingesetzt.

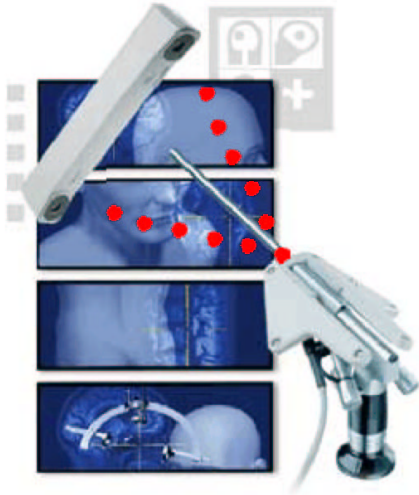


Abbildung 6: *aktives optisches System mit Sender und 2 flächigen Kameras*

der Kamera befindet, verwandt. Auf dem Objekt sind lediglich Reflektoren befestigt, die das abgestrahlte Licht zurück zur Kamera spiegeln. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass keine Stromversorgung für die LEDs am Instrument benötigt wird.

Als Nachteil ergibt sich, dass das von den Reflektoren zurückgeworfene Licht naturgemäß nicht unterschieden werden kann. Es ist also keine eindeutige Identifizierung der Reflektoren möglich. Dadurch ergeben sich Probleme bei der Navigation. Die einzige Möglichkeit, die Freiheitsgrade des Objekts trotzdem exakt bestimmen zu können, besteht darin, alle Bewegungen aufzuzeichnen. Dadurch stehen zusätzliche Informationen zur Verfügung und die Position kann somit bestimmt werden.

Da bei diesem Verfahren aber immer eine Sichtverbindung zwischen Objekt und Kamera bestehen muss, ist der maximale Arbeitsbereich automatisch auf das Blickfeld der Kamera beschränkt.

Bei beiden vorgestellten Verfahren gibt es zwei Möglichkeiten zur Aufnahme des emittierten/reflektierten Lichts.

Bei 2-Kamera-Systemen wie in Abbildung 6 kommen zwei flächige Kameras zum Einsatz. Nimmt eine Kamera das Licht einer LED auf, so ergibt sich eine Gerade, die durch Kamera und LED geht, auf der sich die Lichtquelle befinden kann. Da die gleiche LED auch von der zweiten Kamera aufgenommen wird, ergibt sich der tatsächliche Aufenthaltsort durch den Schnittpunkt von zwei Geraden.

Bei 3-Kamera-Systemen kommen Zeilenkameras zum Einsatz. Eine Zeilenkamera kann

Als Alternative dazu besteht die Möglichkeit, für die LEDs unterschiedliche Emissionsmuster zu verwenden. Dies würde bei elektromagnetischen Systemen der Anregung der Senderspulen mit verschiedenen Frequenzen entsprechen.

Da bei optischen Systemen eine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Kamera bestehen muss, werden mehr als die theoretisch benötigten drei LEDs eingesetzt. Dadurch können auch Bewegungen des Objekts, bei denen sich einige LEDs aus dem Sichtfeld der Kamera entfernen, bestimmt werden.

Die zweite Art optischer Navigationssysteme sind die passiven Systeme. Bei diesen werden keine LEDs auf dem zu vermessenden Objekt eingesetzt, sondern eine Lichtquelle, die sich im Allgemeinen in der Nähe der Kamera befindet, verwandt. Auf dem Objekt sind lediglich Reflektoren befestigt, die das abgestrahlte Licht zurück zur Kamera spiegeln. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass keine Stromversorgung für die LEDs am Instrument benötigt wird.



Abbildung 7: *Sender eines aktiven optischen Systems*

lediglich eine Ebene bestimmen, in der sich die LED befinden muss. Da der Schnitt von drei Ebenen wiederum einen Punkt ergibt, kann auch mit diesem System die Position der LED eindeutig bestimmt werden.



Abbildung 8: *Reflektoren eines passiven optischen Systems*

Im Vergleich zu elektromagnetischen Verfahren haben optische Systeme eine deutlich höhere Genauigkeit. Sie liegt bei etwa 0,1-0,2 mm. Da sich optische Systeme durch magnetisierbare Materialien nicht beeinflussen lassen, entstehen auch keine zusätzlichen Kosten für nichtmagnetisierbare Instrumente. Es

muss allerdings dafür gesorgt werden, dass keine Lichtquellen vorhanden sind, die den gleichen Frequenzbereich abstrahlen wie die verwendeten LEDs.

Wie bereits erwähnt ergibt sich als Nachteil, dass eine direkte Sichtverbindung zwischen dem zu vermessenden Objekt und der Kamera bestehen muss. Diese sollte durch das OP-Personal nicht unterbrochen werden. Außerdem ist eine Verwendung für die Navigation im Körper des Patienten naturgemäß nicht möglich.

Um auch mit optischen Systemen eine Navigation im Körper des Patienten zu ermöglichen, bietet sich der Einsatz von starren Endoskopen an. Hierbei lassen sich die Sensoren so anbringen, dass sie von den Kameras erkannt werden können. Auf Grund des starren Endoskop lässt sich trotzdem auf die Position des an der Spitze angebrachten Instruments schließen. Dies geht allerdings zu Lasten der Genauigkeit. Trotz der grundsätzlich geringeren Genauigkeit elektromagnetischer Systeme lässt sich mit diesen durch den Einsatz direkt an der Spitze des Endoskops u.U. ein besseres Ergebnis erzielen.

Die in der Endoskopie wichtige Miniaturisierung der verwendeten Instrumente ist bei optischen Systemen deutlich schwieriger als bei elektromagnetischen Verfahren, da die LEDs einen gewissen Abstand zueinander benötigen, um eine Navigation zu ermöglichen. Elektromagnetische Spulen lassen sich dagegen recht gut in kleinen Größen verwirklichen.

## 7 Hybride Verfahren

Bei den hybriden Verfahren kommen statt eines Navigationsverfahrens zwei Systeme zum Einsatz. Das Ziel ist dabei, die Schwächen beider Verfahren zu eliminieren, um so ein optimales Ergebnis zu erhalten. Ein bekanntes Beispiel dafür sind in Autos verwendete Navigationssysteme. Hier kommt sowohl ein mechanisches Verfahren in Form von Radensoren als auch das satellitengestützte GPS<sup>5</sup> zum Einsatz.

Bei hybriden Verfahren ist es die Aufgabe des Auswertungssystems zu bestimmen, welches der zur Verfügung stehenden Systeme im aktuellen Zustand die genaueren Daten liefert. Dies kann entweder anhand allgemeiner Informationen über die verwendeten Systeme oder mittels Informationen über die aktuelle Qualität der Daten geschehen.

Bei GPS ist es z.B. systembedingt, dass die Daten bei schnellen Richtungsänderungen oder kleinräumigen Bewegungen sehr ungenau werden. Abhängig vom verwendeten

---

<sup>5</sup>GPS = Global Positioning System



Verfahren<sup>6</sup> hat GPS im schlechtesten Fall eine Genauigkeit von lediglich etwa 100 m. Informationen über die aktuelle Qualität der Daten ergeben sich unter anderem aus dem Signal-Rausch-Verhältnis.

Die mechanischen Radsensoren haben dagegen den Nachteil, dass sich Fehler sehr leicht aufsummieren können. Sie sind daher für die Erfassung von größeren Entfernungen ungeeignet. Hier sollte auf das GPS-System zurückgegriffen werden.

Ein weiteres Beispiel für ein hybrides Verfahren ist die Kombination von elektromagnetischen und optischen Systemen.

Hierbei kann einerseits die hohe Genauigkeit des optischen Systems eingesetzt werden, andererseits führt ein Verlust der Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger nicht zu einem völligen Informationsverlust über die aktuelle Position. In diesem Fall kann auf das elektromagnetische System zurückgegriffen werden.

Bei einem solchen Verfahren ergeben sich allerdings zusätzliche Kosten, da sowohl nichtmagnetisierbare Materialien eingesetzt werden müssen als auch Lichtquellen, die das optische System nicht beeinflussen.

## 8 Schlussbemerkungen

Zur Navigation im medizinischen wie im nichtmedizinischen Bereich werden vor allem elektromagnetische, optische und mechanische Systeme eingesetzt. Außerdem kommen Kombinationen aus diesen sowie Ergänzungen mit hier nicht näher beschriebenen Verfahren<sup>7</sup> in Form von hybriden Systemen zum Einsatz.

Um eine höhere Genauigkeit zu erzielen, bietet es sich bei allen Systemen an, mehr als die unbedingt nötige Anzahl von Sendern und Empfängern einzusetzen. Damit wird eine Form der Redundanz erreicht.

Bei optischen Systemen bedeutet dies den Einsatz von mehr LEDs, um die Ausrichtung des Objekts exakter bestimmen zu können und die Verwendung von mehr Kameras, um die Position der LEDs besser zu vermessen.

Bei elektromagnetischen Verfahren entspricht dies einer Erhöhung der Spulenanzahl in Sender und Empfänger.

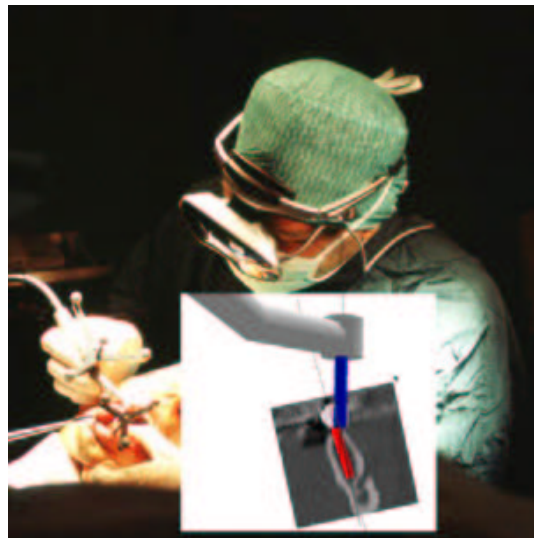


Abbildung 9: *Optisches Navigationssystem im praktischen Einsatz, aus den damit ermittelten Daten berechnete schematische Darstellung des Operationsgebiets*

<sup>6</sup>Auf Grund der vom US-Militär beabsichtigten „Selective Availability“ wurden die GPS-Daten bis ins Jahr 2000 mit einem künstlichen Fehler versehen. Verfahren wie DGPS, die diesen Fehler beheben, erreichen Genauigkeiten von bis zu 0,5 m

<sup>7</sup>Hier sind z.B. Ultraschallsysteme oder Bilderkennung zu nennen.

Die Benutzung von Navigationssystemen erschließt der Medizin völlig neue Möglichkeiten. Der Einsatz minimal-invasiver Chirurgie ist erst durch den Gebrauch solcher Systeme realisierbar. Die Belastung für den Patienten wird bei diesen Verfahren deutlich reduziert.

Auch die Verwendung von Roboterunterstützung ist nur mit Hilfe von Navigationssystemen denkbar. So kann z.B. das Einpassen von Prothesen deutlich genauer vorgenommen und damit deren spätere mechanische Belastbarkeit erhöht werden.

## Literatur

- [1] Handbuch zum Polhemus FASTRAK, Appendix B (accuracy and resolution in electromagnetic six-degree-of-freedom measurement systems)
- [2] 2. Symposium: Neue Technologien für die Medizin (Bochum, 19. und 20.5.2000); Entwicklung eines digitalen Navigationssystems für die Neurochirurgie: von der Idee bis zur klinischen Anwendung Dr. M. Scholz, Klinik für Neurochirurgie, Universitätsklinik Bochum; Shaker Verlag
- [3] HNO, Springer Verlag, Ausgabe 48/2000, S. 75-90; Computerunterstützte 3D-Navigation - Überblick und Standortbestimmung
- [4] Ohlmeyer, E. J., Pepitone, T. R., Miller, B. L., Malyevac, D. S., Bibel, J. E., Evans, A. G., GPS-Aided Navigation System Requirements for Smart Munitions and Guided Missiles, Proceedings of AIAA Guidance Navigation, and Control Conference, New Orleans, LA, 1997, pp.954-968.
- [5] The Differential Global Positioning System; Project report by Corin Gareth Pearce; [http://ion.le.ac.uk/kallisto/dgps\\_project.html](http://ion.le.ac.uk/kallisto/dgps_project.html)
- [6] Markus Kukuk, B. Geiger, „Registration of real and virtual endoscopy - a model and image based approach“, Medicine Meets Virtual Reality 2000, Newport Beach, CA, January 20-24,2000, IOS Press, pps. 168-174.
- [7] Surgical Endoscopy, Springer Verlag, 10/1996, S. 453-456; „Endoscopic surgery of the rhinobasis with a computer-assisted localizer“, G. Krückels, B. Korves, L. Klimek, R. Mösges
- [8] Jim Vallino, „Introduction to Augmented Reality“, <http://www.cs.rit.edu/~jrv/research/ar/introduction.html>
- [9] John W. Peifer, W. David Curtis, Michael J. Sinclair, „Applied Virtual Reality for Simulation of Endoscopic Retrograde Cholangio-Pancreatography (ERCP)“, <http://bitc.gatech.edu/bitcprojects/ercp/paper46.html>
- [10] BrainLAB, HNO-Anwendungen, [http://www.brainlab.com/german/topics/image\\_guided\\_surgery/ent\\_solution.html](http://www.brainlab.com/german/topics/image_guided_surgery/ent_solution.html)
- [11] Polhemus, <http://www.polhemus.com/ourprod.htm>; speziell: Polhemus-ISOTRAK II (<http://www.polhemus.com/isotrkd.htm>) & Polhemus-FASTRAK (<http://www.polhemus.com/ftrakds.htm>)
- [12] Ascension Technology Corporation, miniBIRD 800 & miniBIRD 500 (<http://www.ascension-tech.com/products/minibird/index.html> & <http://www.ascension-tech.com/products/minibird/details.html>)
- [13] Northern Digital Inc.; Optotrak (<http://www.ndigital.com/optotrak.html>), Polaris (<http://www.ndigital.com/polaris.html>), Aurora (<http://www.ndigital.com/aurora.html>)

- [14] Aesculap ([http://www.aesculap.de/d/produkte/index.htm?/d/produkte/at/spocs/at\\_spocs\\_nav/at\\_spocs\\_nav1.htm](http://www.aesculap.de/d/produkte/index.htm?/d/produkte/at/spocs/at_spocs_nav/at_spocs_nav1.htm))
- [15] Measurand Inc. (<http://www.measurand.com/pages/Technology.htm>)
- [16] mednetix (<http://www.mednetix.ch/>); (<http://www.mednetix.ch/generator.html>,  
<http://www.mednetix.ch/sensor.html>, <http://www.mednetix.ch/tuloc.html>)