Eine interaktive Robotersteuerung für chirurigsche Applikationen

Andreas Hein

Berliner Centrum für mechatronische Medizintechnik
Fraunhofer IPK / Charité - Campus Virchow, Klinik für MKG-Chirurgie

In diesem Beitrag wird die Steuerungsarchitektur eines Robotersystems für chirurgische Applikationen, ein Regelungsalgorithmus und eine Anwendung des Systems vorgestellt. Im Gegensatz zu anderen Anwendungsgebieten müssen chirurgische Robotersysteme mit einem Chirurgen kooperieren anstatt eine Aufgabe automatisch auszuführen. Die vorgestellte Architektur ermöglicht die sichere gemeinsame Ausführung von chirurgischen Eingriffen, bei denen die Erhöhung der Genauigkeit klinisch notwendig ist. Der vorgestellte Regleralgorithmus ermöglicht die neuartige interaktive Führung des Roboters. Das System wurde zum exakten Bohren am Schädel klinisch eingesetzt.

1 Stand der Technik

In den letzten Jahren wurden chirurgische Robotersysteme zur Lösung von einzelnen, klar abgegrenzten Teilaufgaben entwickelt und eingesetzt. Der erste Einsatz eines Robotersystems am Patienten erfolgte in der Neurochirurgie zur Plazierung von Biopsienadeln [Kwo88]. Der Roboter wurde dabei nur als passive Führungshilfe für den Chirurgen benutzt. Die Systeme in [TPK$^+$94] und [DHTW96] dagegen arbeiten automatisch, d.h. ohne Interaktionsmöglichkeiten mit dem Chirurgen. Diese Systeme werden zum Fräsen von Hüftknochen und zum Ausschaben der Prostata eingesetzt. Interaktiv bedienbare Systeme unterscheiden sich von anderen Systemen durch die Möglichkeit einer Kooperation zwischen Chirurg und Roboter. Kommerziell erhältliche Roboter für das (nichtinvasive) Positionieren von Mikroskopen sind das SurgiScope von Elekta und das MKM von Zeiss. In [HHCD95] ist das, neben dem System des Autors [Hei00], einzige bekannte interaktiv bedienbare und invasive Robotersystem beschrieben. Das experimentelle System aus [HHCD95] wurde für das Fräsen am Kniegelenk konzipiert.

2 Architektur

In diesem Kapitel wird die Architektur der entwickelten Robotersteuerung beschrieben. Ziel der Architektur ist es, die Vorgaben aus der präoperativen Planung einer Operation mit den intraoperativen Eingriffen des Chirurgen zu fusionieren. Von besonderer Wichtigkeit ist dabei, die sichere Ausführung von Operationen zu gewährleisten bzw. eine Ausführung nicht zuzulassen, wenn dies nicht möglich ist. Weiterhin soll die Architektur eine Interaktion bzw. Kooperation zwischen Chirurg und Robotersystem ermöglichen, um dadurch die

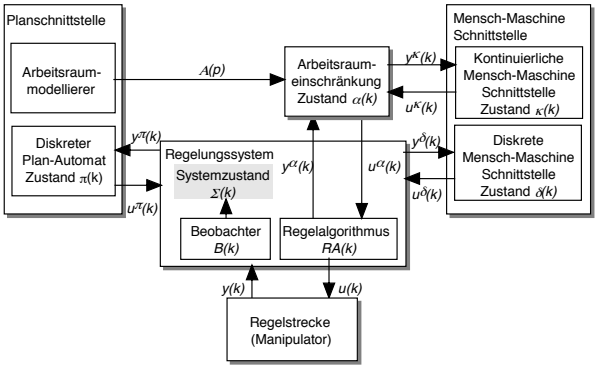

Abbildung 1: Architektur der Steuerung

Sicherheit des Eingriffes in einer komplexen Umgebung wie in einem Operationssaal zu erhöhen.
Die Architektur basiert auf einer allgemeinen Steuerungsarchitektur, die von Aigner und McCarragher [AM97] vorgestellt wurde. Diese Architektur wurde an die Anforderungen in der Chirurgie adaptiert. Dazu werden medizinische Bilddaten als erweiterte Sensorwerte interpretiert, und die Einschränkung auf diskrete Eingriffe des Bedieners zur Steuerung des Roboters wird aufgehoben. Die Steuerungsarchitektur aus [AM97] wurde um die Kontinuierliche Mensch-Maschine Schnittstelle (KMMS), den Arbeitsraummodellierer (ARM) und die Arbeitsraumeinschränkung (ARE) erweitert (Abb. 1). Durch diese Erweiterungen ist das Robotersystem in der Lage, direkt auf die Bilddaten zuzugreifen und - abhängig von dem aktuellen Zustand des Regelungssystems und der aktuellen Position in den Bilddaten - den Chirurgen entsprechend den Planvorgaben bzw. entsprechend den Einschränkungen im Arbeitsraum zu führen. Der Chirurg kann dabei aber wesentliche Parameter der Bewegungen einstellen. Insbesondere kann die Geschwindigkeit des Instruments am Roboter über die Kontinuierliche Mensch-Maschine-Schnittstelle gesteuert werden.
Die neu entwickelte Steuerungsarchitektur besteht aus den folgenden fünf Komponenten:

- *Planschnittstelle*: Diese Komponente besteht aus dem Diskreten Plan-Automaten (DPA) und dem Arbeitsraummodellierer (ARM). Durch den Diskreten Plan-Automaten wird die präoperativ festgelegte Ablaufsequenz ausgeführt und überwacht. Dieses Petri-Netz (Stellen/Transitions-Netz) wird um weitere priorisierte parallele Petri-Netze zur Behandlung von Ausnahmen erweitert. Das Petri-Netz mit der höchsten Priorität kodiert als Zustand die aktuell aktive Elementaroperation. Dazu sendet der DPA das Kommando

  $$u^{\pi}(k) = \{\mathbf{E}(k), \Sigma^*(k)\}$$

  an das Regelungssystem. Dabei ist $e_i \in \mathbf{E}(k)$ die aktivierte Elementaroperation, und $\Sigma^*(k)$ sind die präoperativ festgelegten Parameter der Elementaroperation. Ob die

Ausführung der Elementaroperation möglich ist, wird vom Regelungssystem entschieden. Das Schalten der Transitionen T in den Petri-Netzen wird durch Zustände im Systemzustand (Σ) ausgelöst. Dazu sendet das Regelsystem den Vektor der Zustandsvariablen, die als Start- und Terminalbedingungen der Elementaroperationen verwendet werden

$$y^{\pi}(k) = T|T = C^s \cap C^t \in \Sigma(k)$$

an den DPA. Im Arbeitsraummodellierer (ARM) wird aus den präoperativen medizinische Bilddaten ein Modell des Arbeitsraums abgeleitet (implizite Geometrien). Zusätzlich können in einer präoperativen Planung Geometrien als Grundlage für die Ausführung von Bewegungsoperationen des Roboters (Zielgeometrien) und künstliche Arbeitsraumeinschränkungen (explizite Geometrien) definiert werden.

- *Mensch-Maschine Schnittstelle*: Diese Komponente besteht aus der Diskreten Mensch-Maschine Schnittstelle (DMMS) und der Kontinuierlichen Mensch-Maschine Schnittstelle (KMMS). Durch die DMMS können diskrete Änderungen im Systemzustand ausgelöst werden, oder Elementaroperationen können unabhängig von der präoperativ festgelegten Ablaufsequenz aktiviert werden. Dazu liest die DMMS abhängig vom Zustand $\delta(k)$ den Vektor der aktivierbaren Elementaroperationen vom Regelungssystem

  $$y^{\delta}(k) = \mathbf{E}^*(k) = \{e_0, ..., e_m\}$$

  und schickt ein Kommando

  $$u^{\delta}(k) = \{\mathbf{E}^*(k), \Sigma^*(k)\}$$

  mit der zu aktivierenden Elementaroperation und Parametern an das Regelungssystem. Die Kontinuierliche Mensch-Maschine Schnittstelle (KMMS) wandelt die intraoperativen Eingaben des Chirurgen in Parameter von Elementaroperationen um. Abhängig vom Zustand $\kappa(k)$ der KMMS wird mit Hilfe der aktuellen Geschwindigkeit aus dem Regelsystem:

  $$y^{\kappa}(k) = {}^{tcp}\dot{\mathbf{T}}(k-1)$$

  ein Parameter für die aktivierte Elementaroperation, wie gewünschte Geschwindigkeiten und/oder Kräfte, berechnet und über das Kommando

  $$u^{\kappa}(k) = \{\mathbf{F}(k), \mathbf{M}(k), {}^{tcp}\dot{\mathbf{T}}(k)\}$$

  an die Arbeitsraumeinschränkung übergeben.

- *Arbeitsraumeinschränkung (ARE)*: Dieses Modul fusioniert die gewünschten Geschwindigkeiten aus dem KMMS mit den Geometrien zur Ausführung von Bewegungsoperationen und den impliziten und expliziten Beschränkungen des Arbeitsraumes. Die aktuelle Konfiguration im Arbeitsraum wird anhand des Arbeitsraummodells $A(\mathbf{p})$, der aktuellen Position und Geschwindigkeit gelesen vom Regelungssystem

  $$y^{\alpha}(k) = \{{}^{bcs}\mathbf{T}_{tcp}(k-1), {}^{tcp}\dot{\mathbf{T}}(k-1)\}$$

  und dem Kommando aus dem KMMS berechnet. Abhängig vom Zustand $\alpha(k)$ wird ein Regleralgorithmus $RA(k)$, eine Geometrie G und eine neue Position an das Regelungssystem weitergegeben

  $$u^{\alpha}(k) = \{RA(k), G, {}^{bcs}\mathbf{T}_{tcp}(k)\}$$

  Als zusätzliche Operation kann das Arbeitsraummodell $A(\mathbf{p})$ durch ein Werkzeug an der Position ${}^{bcs}\mathbf{T}_{tcp}(k-1)$ im Arbeitsraum modifiziert werden.

- *Regelungssystem*: Das Regelungssystem besteht aus drei Teilen - den Regelungsalgorithmen (RA), den Beobachtern (B) und dem Systemzustand (Σ). Durch ein Kommando $u^{\alpha}(k)$ von der Arbeitsraumeinschränkung können verschiedene Regelungsalgorithmen (RA) aktiviert werden. Diese Algorithmen setzen die Positions- bzw. Geschwindigkeitsvorgaben mit Hilfe von Geometrien G um. Aus diesen Vorgaben werden Kommandos an die Regelstrecke generiert

  $$u(k) = {}^{bcs}\mathbf{T}_{tcp}(k)$$

  Zusätzlich werden während der Ausführung von Elementaroperationen Beobachter (B) gestartet, die kontinuierliche Sensorinformationen von der Regelstrecke

  $$y(k) = \begin{pmatrix} {}^{bcs}\mathbf{T}_{tcp}(k-1), {}^{cam}\mathbf{T}_{tcp}(k-1), {}^{cam}\mathbf{T}_{pat}(k-1) \\ \mathbf{F}(k-1), \mathbf{M}(k-1) \end{pmatrix}$$

  in diskrete Prozesszustände umwandeln. Prozess- und Systemzustände werden in eine globale Zustandstabelle für den Systemzustand (Σ) geschrieben und zur Steuerung des Diskreten Plan-Automaten und der Diskreten Mensch-Maschine Schnittstelle benutzt.

- *Regelstrecke (Manipulator)*: Die Regelstrecke ist der Manipulator des SurgiScope-Systems von Jojumarie. Bewegungen können durch die Vorgabe von Gelenkgeschwindigkeiten oder Gelenkpositionen initiiert werden. Die Regelstrecke liefert mit einer Taktzeit von 30 ms die Daten von den Sensoren. Dazu gehören die Winkelgeberwerte und die daraus berechnete Position des TCP im Basiskoordinatensystem des Roboters, die Position des TCP im Koordinatensystem des Navigationssystems, die Position des Lokalisators am Patienten und die Kräfte und Momente am Instrument.

Die Ausführung von Aktionen der Robotersteuerung erfolgt im Rahmen von Elementaroperationen $e_k(C_k, P_k)$. Eine Elementaroperation e_i wird von dem Diskreten Plan-Automaten (DPA) oder der Diskreten Mensch-Maschine Schnittstelle (DMMS) gestartet. Die Elementaroperation überprüft selbständig die Startbedingungen ${}^kC^s$ anhand des Systemzustandes $\Sigma(k)$. Die aktivierte Elementaroperation konfiguriert über das Setzen des Zustandes der Arbeitsraumeinschränkung $\alpha(k)$ und der Kontinuierlichen Mensch-Maschine Schnittstelle $\kappa(k)$ bzw. durch Starten der Regelungsalgorithmen $RA(k)$ und der Beobachter $B(k)$ die Robotersteuerung. Diskrete Parameter der Elementaroperation ${}^kp^d$ werden aus dem Systemzustand $\Sigma(k)$ ausgelesen bzw. über die Diskrete Mensch-Maschine Schnittstelle vom Chirurgen abgefragt. Kontinuierliche Parameter ${}^kp^c$ werden von der Kontinuierlichen Mensch-Maschine Schnittstelle eingelesen und in der Arbeitsraumeinschränkung vorverarbeitet.
Eine Elementaroperation terminiert entweder planmäßig durch das Setzen einer Terminalbedingung ${}^kC^t$ oder unplanmäßig durch das Nichterfülltsein einer Startbedingung ${}^kC^s$. Im Falle der planmäßigen Terminierung schaltet eine Transition im Ausführungsplan, und die nächste Elementaroperation wird aktiviert. Im Falle einer unplanmäßigen Terminierung wird - falls vorhanden - ein Petri-Netz zur Behandlung dieser Ausnahme aktiviert. Dieses aktiviert dann Elementaroperationen, um die nicht erfüllte Bedingung wieder zu erfüllen oder um den Roboter in einen sicheren Systemzustand zu bringen.

3 Regelung

Ziel des Reglerentwurfs ist die Einbindung des Chirurgen in die Positionsreglerschleife. Dadurch ist es möglich, die Fähigkeiten und die Sensorik des Chirurgen direkt ohne Umweg über eine graphische Schnittstelle oder andere Eingabegeräte in die Steuerung des Roboters einzubinden. Für die Auslegung aller Regler wurden das Paradigma der Semi-Passivität aus Ho *et al.* [HHCD95] benutzt, d.h. der Roboter bewegt sich nicht automatisch, sondern nur nach einer initialen Aktion des Benutzers.
Ziel der Entwicklung des Reglers für die unbeschränkte Bewegung war es, dem Benutzer eine einfache und intuitive Methode zur Positionierung von chirurgischen Instrumenten zur Verfügung zu stellen. Der in diesem Abschnitt vorgestellte Regler ist die Grundlage für die Kontinuierliche Mensch-Maschine Schnittstelle und den Regler `FreeMove`.
Im Gegensatz zu den Arbeiten von Kazanzides *et al.* [KZMT95], der die interaktive Führung des Roboters nur für das Anfahren der Registrierungsmarker benutzt, soll der Roboter in dem System, das in dieser Arbeit vorgestellt wird, während des gesamten Eingriffes interaktiv geführt werden. Dazu werden im Folgenden zwei Modi unterschieden:

1. *Führungsmodus* : Der Roboter hat in diesem Modus keinen Kontakt zum Patienten, d.h. die vom Kraft-Momenten-Sensor gemessene Kraft $\mathbf{F}_r$ entspricht der vom Chirurgen aufgebrachten Führungskraft $\mathbf{F}_g$.

2. *Kontaktmodus* : In diesem Modus hat der Roboter bzw. das am Roboter montierte

chirurgische Instrument Kontakt mit dem Patienten. In diesem Fall ist die vom Kraft-Momenten-Sensor gemessene Kraft $\mathbf{F}_r$ die Summe der Führungskraft des Chirurgen $\mathbf{F}_g$ und der Kraft $\mathbf{F}_c$ die aus dem Kontakt mit dem Patienten entsteht.

Prinzipiell existieren zwei Möglichkeiten mit diesen beiden Modi umzugehen. Die erste Möglichkeit ist der Entwurf eines Regelungsalgorithmus, der beim Übergang zwischen den beiden Modi keine Instabilitäten erzeugt. Diese Anforderung erfüllt das *force damping scheme* aus [KZMT95] nicht. Die zweite Möglichkeit ist das explizite Erkennen des Überganges zwischen den beiden Modi mit einem Beobachter und dem Umschalten zwischen unterschiedlich parametrisierten Reglerprimitiven. Dies ist ausführlich in [Hei00] beschrieben.
Der entwickelte Regleralgorithmus wurde aus den Bewegungsgleichungen eines Körpers im Gravitationsfeld mit Reibung abgeleitet. Dieser Algorithmus simuliert eine innere Dynamik, bzw. die Dynamik des Roboters wird mit einer neuen Dynamik überlagert. Der Körper mit der virtuellen Masse m wird vom Chirurgen durch das Applizieren von Kraft beschleunigt bzw. gebremst. Zusätzlich wird der Körper durch Reibung μ mit der virtuellen Umgebung abgebremst. Motivation für diese Modellierung ist das Ziel, den Roboter für den Chirurgen so transparent wie möglich zu machen, d.h. im idealen Fall sollte der Chirurg das Werkzeug bzw. Instrument normal anfassen und bewegen können. Bei einem ideal gleichen Verhalten würde sich der Chirurg zum einen nicht auf die speziellen Steuerungseigenschaften bzw. Spezifika des Systems einstellen müssen und zum anderen muss keine spezielle Erkennung des Kontaktes erfolgen, da der Chirurg ein normales Instrument auch ohne Instabilitäten in einen Kontaktzustand bringen kann, bzw. der Chirurg die für einen stabilen Übergang notwendigen Anpassungen der Trajektorie selbst vornimmt.
Die Bewegung des modellierten Körpers wird durch die Gleichung der kinetischen Energie eines Körpers, die Gleichung für den Verlust von Energie durch Reibung mit der Umgebung und die Gleichung für die Beschleunigung des Körpers durch externe Kräfte definiert. Es werden die bekannten physikalischen Gleichungen benutzt:

$$E_f = -\mu \cdot m \cdot g \cdot \mid \mathbf{X}(k-2) - \mathbf{X}(k-1) \mid$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \mid \dot{\mathbf{X}}(k-1) \mid^2$$

$$\ddot{\mathbf{X}}(k) = \frac{\mathbf{F}_r(k-1)}{m}$$

wobei $X(k-n)$ die Position des TCP zum Zeitpunkt $k-n$, $\dot{\mathbf{X}}(k)$ die Geschwindigkeit des TCP zum Zeitpunkt k, $\mathbf{F}_r(k-1)$ die gemessene resultierende Kraft und $\ddot{\mathbf{X}}(k)$ die - aufgrund der gemessenen Kraft $\mathbf{F}_r(k-1)$ bestimmte - Beschleunigung ist. Auf eine Beschleunigung des modellierten Körpers durch die Erdanziehungskraft wurde aus Sicherheitsgründen verzichtet, so dass ein am Roboter montiertes Instrument nicht auf den Patienten fallen kann.
Zur Vereinfachung des Regleralgorithmus wurde die Gleichung für die kinetische Energie eines Körpers linearisiert. D.h. der Term $\mid \dot{\mathbf{X}}(k-1) \mid^2$ für die aktuelle Geschwindigkeit

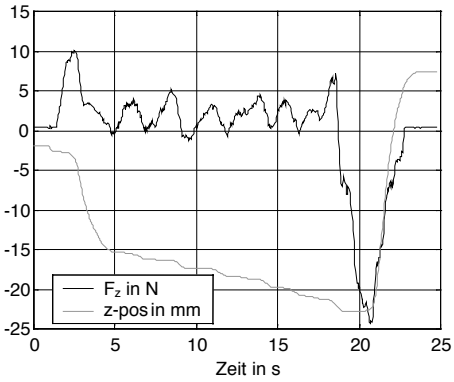

Abbildung 2: z-Komponente der Kraft und der Position des TCP während einer Bohroperation. Die obere Linie zeigt die gemessene Kraft (Führungs- plus Kontaktkraft) in N. Die untere Linie ist die Position des TCP in mm. Bei 5 s ist der Kontakt mit der Oberfläche hergestellt

wurde zu $\mid \dot{\mathbf{X}}(k-1) \mid = \mid \mathbf{X}(k-2) - \mathbf{X}(k-1) \mid$ reduziert, um das dynamische Verhalten des Körpers zu dämpfen.
Der resultierende Regleralgorithmus für die TCP-Position, die als $u^{\kappa}(k)$ an die Arbeitsraumeinschränkung übergeben wird, ergibt sich dann zu:

$$\mathbf{X}(k) = (K_f \cdot \dot{\mathbf{X}}_f(k-1) + K_F \cdot \mathbf{F}_r(k-1)) \cdot \Delta k$$

wobei K_f der von der gewählten Reibung mit der virtuellen Umgebung abhängige Koeffizient, K_F der von der gewählten virtuellen Masse abhängige Koeffizient ist.
Der Regleralgorithmus für die neue Dynamik des Roboters arbeitet als Tiefpass-Filter, der die Bewegungen des Roboters glättet. Dies in ist in Abb. 2 zu sehen. Der Algorithmus erzeugt eine gleichmäßige Bewegung im Intervall zwischen 5-20 s trotz der starken Änderungen der resultierenden Kraft $\mathbf{F}_r$. Es werden auch Störkräfte, wie z.B. Sensorrauschen oder Zittern der Hand während des Führens, unterdrückt.
In Abb. 2 ist das Verhalten des Regleralgorithmus beim Übergang zwischen Kontakt- und Nicht-Kontakt-Zuständen während einer Bohroperation gezeigt. Das Experiment besteht aus drei Phasen:

1. In der ersten Phase (0-5 s) wurde der Roboter entlang der z-Achse des TCP (bzw. des Bohrers) ohne Kontakt mit der Oberfläche bewegt. Nach der Beschleunigung durch den Chirurgen bewegt sich der TCP mit konstanter Geschwindigkeit bis zum Kontaktpunkt.

2. In der zweiten Phase (5-20 s) wird in den Phantomschädel ein Loch gebohrt. Trotz der starken Änderungen der Kraft $\mathbf{F}_r$ bleibt die Position stabil, und es kommt zu keinen Schwingungen. Die sägezahnartigen Schwankungen der Kraft entstehen aus einer Erhöhung der Kraft $\mathbf{F}_r$ durch das Drücken des Chirurgen und das gleichzeitige Verringern der Kontaktkraft $\mathbf{F}_c$ durch das Abfräsen des Materials unter dem Bohrer.

Abbildung 3: Interaktive Führung des Roboters während einer Operation und befestigte Ohrepithese

3. In der dritten Phase wird der Bohrer vom Chirurgen aus dem gebohrten Loch herausgezogen.

Der bisher vorgestellte Regleralgorithmus bezieht sich nur auf die Regelung der Position des Manipulators. Die Bewegungen zur Orientierungsänderung sind jedoch relativ langsam. Obwohl eine Regelung mit dem oben beschriebenen Algorithmus prinzipiell auch für diese Motoren möglich ist, wurde für die Orientierungsänderung das *force damping scheme* verwendet. Die Winkelgeschwindigkeit um die Achsen des TCP-Koordinatensystems $\dot{\mathbf{\Theta}}_d$ wird mit

$$\begin{pmatrix} \dot{\Theta}_x(k) \\ \dot{\Theta}_y(k) \\ \dot{\Theta}_z(k) \end{pmatrix} = \dot{\mathbf{\Theta}}_d(k) = K_f \cdot \mathbf{M}_r(k-1)$$

bestimmt. Aus den Drehungen um den TCP und den Positionsänderungen wird die Positionsänderung durch Verkettung der Rotationsmatrizen für die einzelnen Rotationen und der Positionsänderung aus dem Regler für die unbeschränkte Bewegung berechnet:

$$\begin{aligned} y^{\kappa}(k) &= {}^{tcp}\dot{\mathbf{T}}(k) \\ &= \mathbf{Rot}(x, \Theta_x(k)) \cdot \mathbf{Rot}(y, \Theta_y(k)) \cdot \mathbf{Rot}(z, \Theta_z(k)) \cdot \dot{\mathbf{X}}(k) \end{aligned}$$

Diese Geschwindigkeitsvorgabe wird in der Arbeitsraumeinschränkung und den aktivierten Regleralgorithmen als Vorgabe des Benutzers verwendet.

4 Anwendung

Das in dieser Arbeit vorgestellte Architektur- und Regelungskonzept ermöglich den Einsatz des Systems für verschiedene Assistenzaufgaben (Bohren, Haken halten, Katheter führen) während einer Operation. In umfangreichen Experimenten zur Bestimmung der Genauigkeit des Systems (Plazieren von Kathetern und Bohren von Löchern jeweils am

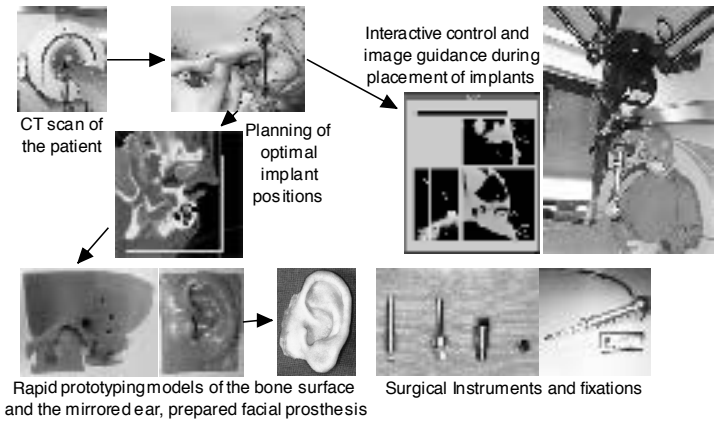

Abbildung 4: Ablauf des Eingriffes

Phantom und Kadaver) konnte gezeigt werden, dass mit dem Robotersystem eine Genauigkeit von ca. 1 mm erreicht werden kann.
Im März 2000 wurde das Robotersystem erstmals erfolgreich am Patienten eingesetzt. Mit Hilfe des Roboters wurden dabei an vorgeplanten Positionen für Implantate Löcher gebohrt, Gewinde geschnitten und das Implantat eingeschraubt (Abb. 3). Basierend auf der Vorplanung konnte ein künstliches Gesichtsteil (Ohr) vor der Operation gefertigt und nach der Operation sofort getragen werden (Abb. 4).

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde das erste interaktiv bedienbare chirurgische Robotersystem für die Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie beschrieben. Die wichtigsten Eigenschaften dieses Systems sind die Einsetzbarkeit für verschiedene Applikationen in der Chirurgie, die intuitive Führung des Systems während der gesamten Behandlung, die Überprüfung der sicheren Ausführung auf der Basis der Elementaroperationen und die Kooperation zwischen Chirurg und Robotersystem. Zur Lösung der vielschichtigen Probleme und zur Realisierung der benötigten Eigenschaften eines Unterstützungssystems für die Chirurgie wurde eine Systemarchitektur für die Robotersteuerung entwickelt. Diese Architektur berücksichtigt explizit die Einflußnahme des Chirurgen auf den Ablauf des Eingriffes und die Kooperation zwischen Robotersystem und Chirurg
Als interaktive Führung des Roboters wird die Bedienung des Roboters durch einfaches Greifen des am Manipulator befestigten Instruments und Applizieren von Kraft in die gewünschte Bewegungsrichtung verstanden. Es wurde ein Modell für die Regelung des Roboters entwickelt, das die natürliche Dynamik eines normalen chirurgischen Instrumentes nachbildet. Auf diese Weise kann die Bedienung des Systems durch einen technisch

nicht ausgebildeten Benutzer ermöglicht werden. Durch den entwickelten Regleralgorithmus ist das vorgestellte System das erste vollständig interaktiv bedienbare System für invasive Anwendungen.
Für eine Anwendung des Systems an einem Patienten wurde die Robotersteuerung als Teil eines Gesamtsystems -Intelligenter Instrumentenhalter (IIH)- entsprechend dem Medizinproduktegesetz und den Richtlinien geprüft und wurde daraufhin als CE-konform gekennzeichnet. Das System wurde bereits an 13 Patienten erfolgreich eingesetzt.

Literaturverzeichnis

[AM97] Aigner, P.; McCarragher, B.: Contrasting Potential Fields and Constraints in a Shared Control Task. In IROS IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 1997, S. 140–146.

[DHTW96] Davies, B.; Hibberd, R. D.; Timoney, A. G.; Wickham, J. E. A.: A clinically applied robot for Prostatectomies. In Computer-Integrated Surgery, Technology and clinical Applications (Taylor, R. H.; Lavallee, S.; Burdea, G. C.; Msges, R., Hg.). MIT Press, 1996, S. 593–601.

[Hei00] Hein, A.: Eine interaktive Robotersteuerung für chirurgische Applikationen. Nr. 195 in Fortschritt-Berichte Reihe 17. VDI Verlag, 2000.

[HHCD95] Ho, S.; Hibberd, R.; Cobb, J.; Davies, B.: Force control for robotic surgery. ICAR IEEE Int'l. Conf. on Advanced Robotics, 1995.

[Kwo88] Kwoh, Y.: A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic surgery. In Transactions on Biomedical Engineering, Bd. 35 (2):(1988), S. 153–161.

[KZMT95] Kazanzides, P.; Zuhars, J.; Mittelstadt, B.; Taylor, R.: Force sensing and control for a surgical robot. In ICRA IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. Nice, France, Mai 1995, S. 612–617.

[TPK+94] Taylor, R.; Paul, H.; Kazandzides, P.; Mittelstadt, B.; Hanson, W.; Zuhars, J.; Williamson, B.; Musits, B.; Glassman, E.; Bargar, W.: An Image-Directed Robotic System for Precise Orthopaedic Surgery. In IEEE Trans. on Robotics and Automation, Bd. 10 (3):(1994), S. 261–275.

Andreas Hein, Geboren am 28. Mai 1971 in Altdöbern, Abitur und Facharbeiter (Maschinist für Grossgeräte) 1989, Diplom in Technischer Informatik 1987. Promotion 2000. Seit April 2000 Gruppenleiter am Berliner Centrum für Mechatronische Medizinsysteme.