

Kombination eines navigierten Assistenzroboters mit einem ISO 3D C-Bogen

M. Schlimbach¹, S. Sahn¹, J. Wahrburg¹

¹ Universität Siegen, Zentrum für Sensorsysteme, Siegen, Deutschland

Kontakt: modicas@zess.uni-siegen.de

Abstract:

Ein aktueller Entwicklungstrend in der computerassistierten Chirurgie besteht darin, die zunehmend leistungsfähiger werdenden intraoperativen Bildgebungssysteme mit Navigationssystemen zu koppeln. In diesem Beitrag wird in einem noch weitergehenden Schritt die Kombination eines ISO 3D C-Bogens der Fa. Ziehm Imaging mit einem navigierten Assistenzroboter beschrieben. Der Assistenzroboter wird im Rahmen des modiCAS Projekts entwickelt und kann durch seinen modularen Aufbau für verschiedene chirurgische Anwendungen konfiguriert werden. Die Kombination von C-Bogen und Roboter bietet das Potenzial, die Vorteile beider Teilsysteme in einem integralen System zu bündeln.

Schlüsselworte: C-Bogen, roboterassistierte Chirurgie, Navigation

1 Problem

Im modiCAS Projekt wird ein interaktiver Assistenzroboter entwickelt, der einen Gelenkarm-Roboter und ein 3D Digitalisiersystem zu einem integrierten System vereint [1]. Der Roboter agiert als dritte Hand des Chirurgen, um Werkzeuge relativ zum Patienten auf Basis einer dreidimensionalen Planung zu platzieren. Außerdem ist der Roboter durch die Integration des Digitalisiersystems in der Lage, kleinen Patientenbewegungen online zu folgen. Die intraoperative Bildgebung erfolgt durch einen 3D C-Bogen der Firma Ziehm Imaging, der durch zwei zusätzliche Achsen ein festes ISO-Zentrum während des 3D-Scans einhält. Mit diesem System lassen sich intraoperativ zweidimensionale Aufnahmen oder eine dreidimensionale Rekonstruktion aus einer Serie zweidimensionaler Aufnahmen erstellen. Es verfügt über eine durch Ziehm definierte, als „NaviPORT“ bezeichnete Schnittstelle, mit dem sich der C-Bogen in Verbindung mit einem Navigationssystem auf ein Bezugskoordinatensystem registrieren lässt. Dadurch kann die Patientenregistrierung und das Matching der Bilddaten entfallen, da der C-Bogen die Transformation zwischen den generierten Bilddaten und dem registrierten Bezugssystem angibt. Ein wesentlicher Teil der Integration der unterschiedlichen Teilsysteme ist der Abgleich zwischen den einzelnen Koordinatensystemen von C-Bogen, 3D Digitalisiersystem und Assistenzroboter, die in Abbildung 1 dargestellt sind.

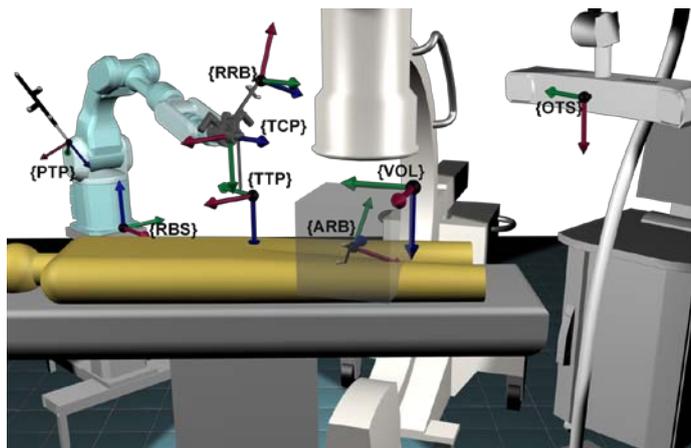


Abbildung 1: OP-Setup mit navigiertem Assistenzroboter und C-Bogen. Die Abbildung enthält die wesentlichen Koordinatensysteme und deren Bezeichnungen

2 Methoden

2.1 Struktur des integrierten Systems aus Assistenzroboter und C-Bogen

Die komplette Systemübersicht ist in Abbildung 2 dargestellt. Darin repräsentiert "modiCAS Planning & Control" die eigene Lösung der Planungs- und Bedienungssoftware, die entwickelt wird, um einerseits den Leistungsumfang und die Funktionalität des HNI (Host-Network-Interface), einer offenen Schnittstelle zur

kompletten Steuerung des Assistenzroboters, anwendungsgerecht zu konzipieren, und andererseits die komplette Unterstützung ausgewählter chirurgischer Eingriffe von der Planung bis zur robotergestützten Durchführung realisieren zu können. Sie umfasst ein „Plug-In“ – Konzept, das die einfache Integration zusätzlicher Softwaremodule ermöglicht, die weitere Planungsfunktionen umfassen, wie etwa spezielle Segmentierungsverfahren, oder auch eine Schnittstelle zu externen Systemkomponenten bereitstellen. Für die

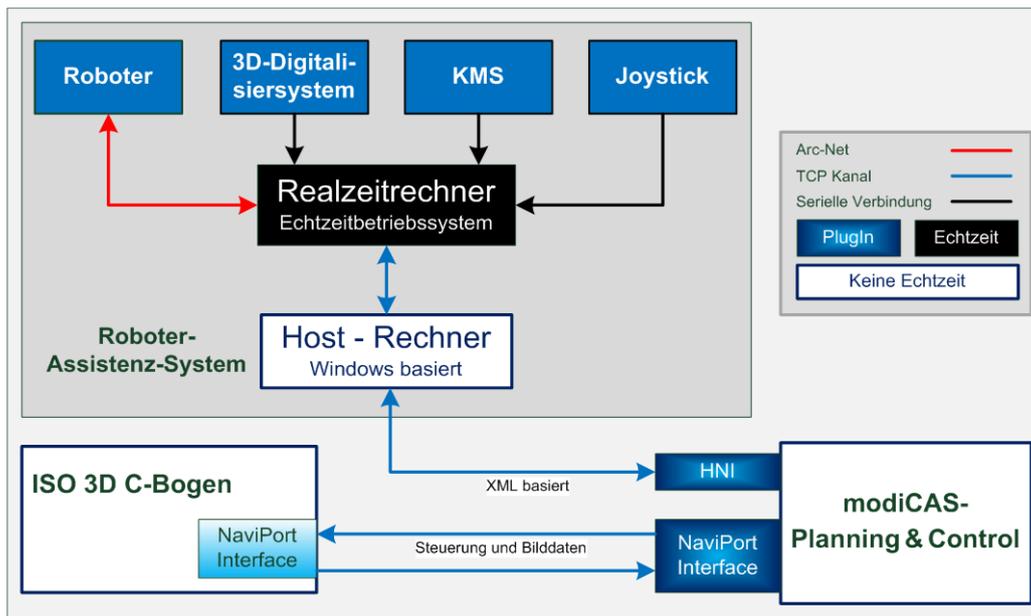


Abbildung 2: Architektur des modiCAS-Assistenzrobotersystems mit ISO 3D C-Bogen der Firma Ziehm Imaging

Anbindung des Ziehm C-Bogens an die Planungssoftware wurde ein eigenständiges Plug-In implementiert, das die Kommunikation mit dem C-Bogen Rechner durchführt. Darüber hinaus umfasst das Plug-In alle Funktionen der NaviPORT-Schnittstelle, um die Registrierung des C-Bogens mit dem navigierten Assistenzroboter durchführen zu können.

2.2 Workflow einer Muster OP

Als Musteranwendung ist zunächst „das robotergestützte Setzen einer Pedikelschraube“ ausgewählt worden. Zum einen gibt es auf diesem Gebiet bereits Arbeiten, die sich mit dem Thema C-Bogen-gestützte navigierte Implantation von Pedikelschrauben auseinander setzen (siehe z.B. [2], [3]), und zum anderen hat die Anwendung beispielhaften Charakter, d.h. der Workflow ist leicht auf andere Anwendungen übertragbar, deren Arbeitsschritte die Planung einer Zielpose, das Anfahren dieser Zielpose und gegebenenfalls die Patientennachführung umfassen.

Einrichtung des integrierten Systems

Die Systemeinrichtung besteht in erster Linie aus der Bestimmung der Relationen zwischen den Koordinatensystemen der verschiedenen Systemkomponenten (siehe auch Abbildung 1).

Im ersten Schritt wird die Transformationsmatrix zwischen dem Koordinatensystem {TCP} im Roboterflansch und dem Koordinatensystem {OTS} des 3D Digitalisiersystems durch Nutzung eines am Roboterflansch montierten Referenzgebers bestimmt. Dazu führt der Roboter eine kurze Kalibrierbewegung aus, die weniger als eine Minute dauert. Bei Kenntnis dieser Transformation können unter Einbeziehung weiterer Transformationsmatrizen die Zielposen für das chirurgische Instrument, die nach beliebigen Verfahren geplant worden sind, in Sollwerte für die Robotersteuerung umgerechnet und der Roboterarm zu diesen Zielposen bewegt werden. Die Transformation zwischen dem Roboterflansch und der Spitze des am Roboter montierten Werkzeuges kann durch Antasten mit einem Pointer des 3D-Digitalisiersystems unter Zuhilfenahme eines Adapterstücks bestimmt werden.

Im zweiten Schritt wird die Transformationsmatrix zwischen dem Koordinatensystem des C-Bogens und dem Koordinatensystem {OTS} des 3D Digitalisiersystems bestimmt. Dazu wird zunächst durch Einrichtung des C-Bogens das gewünschte ISO-Zentrum festgelegt. Dann muss der Anwender drei Kalibrierpunkte am Rand des Bildverstärkers mit Pointer des Digitalisiersystems antasten, aus deren Position die gesuchte

Transformationsmatrix berechnet werden kann. Aus den übertragenen Positionen berechnet der C-Bogen außerdem einen Wert für die Genauigkeit der Registrierung und der Operateur entscheidet, ob sie verwendet werden soll.

Bildaufnahme mit dem ISO 3D C-Bogen, Bildübertragung und Planung der Sollposition für die Pedikelschraube mit der Planungssoftware des Assistenzroboter-Systems

Nach der erfolgreichen Registrierung erfolgt die Aufnahme der Bilddaten und anschließend deren Übertragung zur modiCAS Planungssoftware. Diese generiert aus den Volumendaten ein Oberflächenmodell der knöchernen Strukturen. Außerdem werden auf dem Planungs-Bildschirm drei beliebig verschiebbare Schnittebenen durch die Volumendaten dargestellt. Die Segmentierung zwischen Weichteilen und Knochen erfolgt über eine vom Benutzer ausgewählte und parametrisierte Visualisierungsstrategie.

Die Sollposition wird festgelegt, indem das 3D Modell der ausgewählten Pedikelschraube auf dem Bildschirm in den Fenstern der drei Schnittebenen mit der Maus an die gewünschte Position geschoben wird. Auf dem Bildschirm wird in einer anderen Farbe außerdem eine weitere Pedikelschraube dargestellt, die virtuell mit dem vom Roboter geführten Bohrwerkzeug verbunden ist. Bei dessen Bewegung durch den Roboter ist auf diese Weise am Bild einfach überprüfbar, ob am Ende des Positioniervorganges die tatsächliche Position der Schraube, die sie nach Eindrehen in die angefertigte Bohrung einnehmen wird, mit der geplanten Position übereinstimmt.

Positionierung des Roboters

Im ersten Schritt erfolgt eine manuelle Vorpositionierung des Bohrwerkzeuges mittels haptischer Führung. Damit wird die Betriebsart bezeichnet, in der der Roboterarm wie ein passives System durch manuelle Kraftausübung auf den Arm bewegt werden kann. Dazu wird am Flansch des Roboters ein 6-dimensionaler Kraft-/Momentensensor montiert, der die auf ihn einwirkenden Kräfte und Momente in und um die Achsen eines räumlichen Koordinatensystems misst. Der Benutzer fasst einen am Sensor befestigten Handgriff, drückt eine Zustimmungstaste und kann den Roboter in die gewünschte Richtung bewegen, ohne genaue Kenntnisse über die Lage von Koordinatensystemen haben zu müssen. Die aktuelle Pose des Instruments wird auch während der Bewegung in den Bilddaten visualisiert. Die manuelle Vorpositionierung des Instruments hat den Vorteil, dass der Roboter nur sehr kleine Bewegungen autonom ausführt und somit ist die Gefahr einer Kollision während einer OP sehr gering.

Im zweiten Schritt erfolgt die automatische Platzierung des Instruments durch den Roboter in einer Zielposition, in der der Bohrer auf der Achse liegt, die durch die gewünschte Position der Pedikelschraube läuft, also die gewünschte Orientierung der Schraube im Wirbelkörper darstellt. Das Anbringen der Bohrung erfolgt nun im dritten Schritt durch den Operateur, indem er das auf einer Linearführung montierte Bohrwerkzeug bis zum Anschlag am Ende der Führung bewegt. Der Anschlag wird erreicht, wenn der Bohrer bei der geplanten Bohrtiefe angelangt ist. Der Operateur kann also sicher sein, nicht versehentlich zu tief zu bohren. Ein weiterer Vorteil der manuellen Bewegung des Bohrers auf einer Linearführung ist, dass der Operateur die von ihm ausgeübten Kräfte in gleicher Weise wie bei freihändiger Führung spürt, jedoch stets sicher sein kann, dass Position und Orientierung der Bohrung exakt den Vorgaben aus der präoperativen Planung entsprechen.

3 Ergebnisse

3.1 Genauigkeit des Assistenzrobotersystems

Die erzielbare Genauigkeit des Assistenzrobotersystems ist ein komplexes Zusammenspiel vieler Faktoren und hängt unter anderem ab von der Genauigkeit des 3D Digitalisiersystems und dessen Referenzgebern, des Roboters, der Kalibrierung des Assistenzrobotersystems und dem Abgleich mit dem C-Bogen. Da aufgrund dieser Komplexität theoretische Angaben zur Gesamtgenauigkeit schwierig sind, ist zur Ermittlung der Genauigkeit ein repräsentativer Versuchsaufbau zur Positionierung eines Bohrwerkzeuges durch den Roboter erstellt worden (siehe Abbildung 3). Der zugehörige Versuchsablauf umfasst alle oben beschriebenen Vorgänge zum Abgleich der Koordinatensysteme, die Anfertigung einer 3D Aufnahme des Wirbels, die Planung der Sollposition und das Anbringen der Bohrung mit dem vom Roboter geführten Bohrwerkzeug. Unsere vorläufigen Ergebnisse, die auf relativ unscharfen Aufnahmen eines Plastik-Knochenmodells beruhen, haben gezeigt, dass Genauigkeiten von etwa 1,5 ... 2 mm sicher erreichbar sind. Zur Zeit arbeiten wir an einer genaueren Spezifikation von Planungs- und Messverfahren, um hier noch exaktere Aussagen liefern zu können.

3.2 Vorteile der Kombination Assistenzroboter mit C-Bogen

Im Vergleich zu manueller Instrumentenführung, auch wenn diese durch ein Navigationssystem unterstützt wird, erfolgt die Instrumentenführung durch den modiCAS Assistenzroboters genauer und mit wesentlich höherer Reproduzierbarkeit. Es können keine Probleme durch Zittern, Abrutschen oder ungewolltes Verlaufen des Instruments auftreten. Dies trifft besonders für weniger oder minimal invasive Operationstechniken zu, wo die Einsicht des Operationsgebietes durch die kleinen Inzisionen beschränkt ist.

Wenn der Assistenzroboter mit einem ISO 3D C-Bogen kombiniert wird, kommen folgende Vorteile hinzu:

- Durch den Abgleich der Koordinatensysteme von C-Bogen und Assistenzroboter können die Bewegungen des Roboters zur Positionierung des chirurgischen Instruments in den Bilddaten geplant und anschließend unmittelbar ausgeführt werden. Damit werden die Vorteile der intraoperativen Bildgebung ausgeschöpft: Die bei Verwendung präoperativer CT- oder MR-Aufnahme notwendige Registrierung von Fiducials oder knöcherner Landmarken am Patienten mit anschließendem Matching mit den entsprechenden Punkten in der präoperativen Aufnahme entfällt. Dies führt nicht nur zu einer deutlichen Zeitersparnis, sondern auch zu einem geringeren Fehlerrisiko.
- Da an der zu operierenden Patientenstruktur ein Referenzgeber befestigt wird, dessen Position von der Kamera des 3D Digitalisiersystems fortlaufend gemessen wird, werden mögliche Bewegungen des Patienten erfasst, ohne dass hierzu neue C-Bogen Aufnahmen erforderlich sind. Der Assistenzroboter führt das chirurgische Instrument aufgrund seiner Tracking-Fähigkeit automatisch nach.
- Minimierung der Strahlenbelastung für Patient und OP-Personal, da Kontrollaufnahmen während der OP nur noch aus Redundanz- oder Sicherheitsgründen nötig sind und ihre Anzahl der im Vergleich zu Operationen ohne Roboterunterstützung entsprechend signifikant gesenkt werden kann.

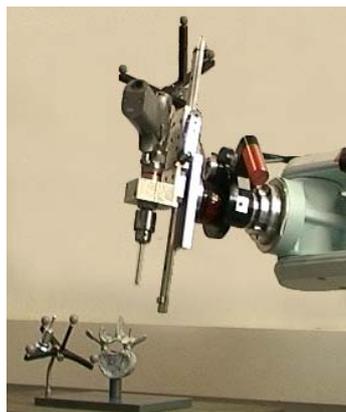
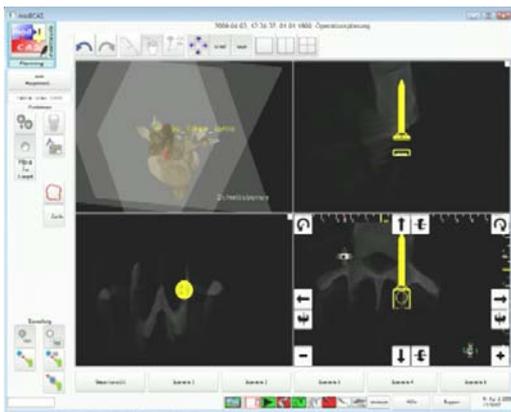


Abbildung 3: Planung der Schraubenposition und Positionierung der Linearführung mit Bohrer durch den Roboter - der kleine Metallstift markiert die Zielpose

4 Diskussion

Die bisherigen Arbeiten zeigen, dass ISO 3D C-Bogen und Assistenzroboter zu einem integralen System verbunden werden können. Die neuartige Kombination von intraoperativer 3D Bildgebung und roboterunterstützter OP-Durchführung bietet entscheidende Vorteile: Reduktion der Strahlenbelastung durch wesentlich geringere Anzahl notwendiger Kontrollaufnahmen, Genauigkeits- und Sicherheitsgewinn, da Patientenregistrierung und Matching wegfallen, zitter- und abrutschsichere Instrumentenführung durch den Assistenzroboter. Derzeit arbeiten wir daran, die ausgewählte Musteranwendung detaillierter umzusetzen und den realitätsnahen Workflow im Detail zu erarbeiten.

5 Referenzen

- [1] Wahrburg, J. (2006) Regelkonzepte für Assistenz-Roboter zur Unterstützung chirurgischer Eingriffe, Tagungsband zum VDE-Kongress, 23.-25.8.2006, Aachen, S. 349-353

- [2] Wendl K, von Recum J, Wentzensen A, Grützner PA (2003) Iso-C3D-gestützte navigierte Implantation von Pedikelschrauben an BWS und LWS. Unfallchirurg 106: 907–913
- [3] Grützner PA, Beutler T, Wendl K, et al. 2004. Navigation an der Brust- und Lendenwirbelsäule mit dem 3D-Bildwandler. Chirurg, 75:967–75.

6 Danksagung

Teile dieser Arbeit wurden im Rahmen des DFG-SPP 1124 sowie durch die Fa. Ziehm gefördert.