

Entwicklung einer Formerfassungsmethode zur Qualitätskontrolle der Navigation medizinischer Endoskope im OP-Situs

H. Pauer, C. Ledermann, H. Wörn

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Prozessrechenstechnik, Automation und Robotik, Karlsruhe, Deutschland

Kontakt: hendrikje.pauer@kit.edu

Abstract:

In der Chirurgie werden zunehmend Navigationssysteme eingesetzt, die wichtige Informationen zur Orientierungshilfe im OP-Situs liefern. Die Navigation wird laufend optimiert, um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen. In dieser Arbeit wird ein neues Konzept der Formerfassung von Endoskop-ähnlichen Instrumenten entwickelt, was eine Qualitätsbewertung von Formsensoren ermöglicht. Die betrachteten Formsensoren sind in chirurgische Instrumente integriert und erfassen den Instrumentenverlauf. Die so gewonnenen Informationen unterstützen die Navigation der Instrumente während der Operation. Eine Optimierung der Sensorik mithilfe der entwickelten Formerfassungsmethode trägt somit maßgeblich zu einer verbesserten Operationsumgebung bei. Neben der Beschreibung der neuen Methodik, den zugehörigen Konstruktionen zur Formerfassung und den entwickelten Auswertungsprinzipien wird die Verwendbarkeit der Methodik zur Sensoroptimierung und Kalibrierung besprochen. Schließlich werden weitere Arbeitsschritte in Richtung einer systematischen, semi-automatisierten Sensorausrichtung diskutiert, um die aus chirurgischer Sicht geforderte Genauigkeit zu erreichen und so die Verwendbarkeit des Formensors sicherzustellen.

Schlüsselworte: 3D Formerfassung, Formsensor, Minimal-invasive Chirurgie, flexible Instrumente

1 Problemstellung

Um operative Eingriffe in der Chirurgie möglichst schnell, effizient und insbesondere mit sehr hoher Genauigkeit durchführen zu können, werden zunehmend Navigationssysteme entwickelt und eingesetzt. Diese Systeme stellen die verwendeten Operationsinstrumente während der Operation in präoperativ erhobenen CT-Bilddaten lagerichtig dar und helfen somit bei der sicheren Orientierung im OP-Situs. Um den hohen Standards im OP zu genügen und sinnvoll eingesetzt werden zu können, werden Navigationssysteme derzeit laufend weiter entwickelt und optimiert. Ein bestehendes Problem, insbesondere bei der Navigation flexibler Endoskope, ist die Bestimmung der Instrumentenlage im Inneren des Patienten. Aktuell findet die Positionsermittlung hauptsächlich über Bildabgleiche der CT-Bilder und der Aufnahmen der Endoskop-Kamera statt, die allein auf dem anatomischen Wissen des Chirurgen basieren. Fehlende Erkennungsmerkmale auf den Endoskop-Kamerabildern sowie die variierende Anatomie, bedingt durch z.B. die Atembewegungen des Patienten, erschweren allerdings die genaue Positionierung der Operationsinstrumente. Um die Lage der Instrumente genauer erfassen zu können, muss die Form und Position der Instrumente, ergänzend zum intuitiven Bildabgleich durch den Chirurgen, mit zusätzlichen Methoden technisch rekonstruiert werden. Bisher für die Formrekonstruktion übliche Methoden sind elektromagnetische, akustische, mechanische sowie optische Messverfahren. Eine weitere, hochmoderne Formerfassungsmethode, an der aktuell am Institut für Prozessrechenstechnik, Automation und Robotik (IPR) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Rahmen der Single-Port-Chirurgie geforscht wird, stellt die Faser-Bragg-Grating(FBG)-Sensorik dar. Die Sensorik besteht aus einem Grating-Netzwerk, dass sich durch geschickte Führung von Glasfasern, in welche die Gratings eingeschrieben sind, über den Instrumentenmantel verteilt. Das so entstandene Sensornetzwerk misst diskrete Krümmungswerte, aus denen dann der Instrumentenverlauf relativ zum Instrumentenanfangspunkt über Interpolation und anschließende Integration rekursiv rekonstruiert werden kann [1]. Diese Methode der Formrekonstruktion ist speziell geeignet zum Einsatz in Navigationssystemen insbesondere in der minimal-invasiven Chirurgie, da sie, im Gegensatz zu den bisherigen Methoden, bestimmte Eigenschaften aufweist. So kann das Sensorsystem beispielsweise aufgrund der speziellen Materialeigenschaften der Fasern biokompatibel und sterilisierbar hergestellt werden. Da die Fasern keine elektronischen oder metallischen Komponenten beinhalten, sind sie elektromagnetisch verträglich und können auch in Instrumente integriert werden, die in der Umgebung von MRI-Systemen eingesetzt werden. Darüber hinaus nimmt das Sensorsystem durch den sehr kleinen Durchmesser der Fasern wenig Platz ein und ist daher für miniaturisierte medizinische Instrumente geeignet. Schließlich verspricht die extreme

Sensitivität der Sensoren von 1,2 Microstrain
 Rekonstruktionsergebnisse der Instrumentenform.

eine hohe Messgenauigkeit und somit sehr genaue Re-

Am IPR wird zurzeit an der Optimierung eines Rekonstruktionsalgorithmus geforscht, der aus den Messdaten des beschriebenen Sensornetzwerkes die Form der Instrumente berechnet. Aktuell können verschiedene Formverläufe wie beispielsweise S-Formen robust erkannt werden. Obwohl die bisherigen Ergebnisse vielversprechend sind, ist eine genaue Fehlerevaluation noch nicht möglich, da keine Referenzwerte der tatsächlich vorliegenden Form zur Verfügung stehen. Um diese Informationen zu liefern, muss eine Formerfassungsmethode entwickelt werden. In diesem Paper wird ein neues Konzept der Formerfassung vorgestellt. Dieses Konzept ist speziell an die Formerfassung der betrachteten medizinischen Instrumente über FBG-Sensoren angepasst und liefert die Grundlage für eine fundierte Qualitätsanalyse und anschließende Genauigkeitsoptimierung der Formsensoren.

2 Konzept

Um eine Qualitätsanalyse der Formrekonstruktion durchführen zu können, wird eine Formerfassungsmethode benötigt, die die tatsächlich vorliegende Form der betrachteten medizinischen Instrumente mit integriertem Sensorsystem bzw. die Form eines separat gefertigten schlauchförmigen Sensorträgers ermittelt. Ein Standardverfahren stellt hier die optische 3D-Formerfassungsmethode dar. Diese Methode fordert allerdings erheblichen Auswertungsaufwand und liefert nur ein separates Formergebnis pro Bildauswertung. Um besser auf die speziellen Gegebenheiten eingehen zu können, wurde ein effizienteres Formerfassungskonzept entwickelt. Das Prinzip dieses Konzepts ist es, die Objekte aktiv in bekannte Formen zu bringen bzw. an diskreten Punkten in bekannter Position und Ausrichtung zu fixieren. Somit ist die vorliegende Form bzw. die Position diskreter Punkte exakt vordefiniert und kann dann mit den Ergebnissen der Formsensoren bezüglich der vorgegebenen Form direkt verglichen werden. Diese Methode ist einfach durchführbar, liefert ausreichende Referenzwerte und benötigt selbst keinen Auswertungsaufwand. Zusätzlich kann die Orientierung der Instrumente insbesondere an der Instrumentenspitze genau erfasst werden. Diese Information liefert einen großen Mehrwert während einer Operation, da über die Orientierung die Manipulationsrichtung kontrolliert werden kann; bei Bohrungen durch Knochen kann beispielsweise die Richtung der Bohrung erfasst und beobachtet werden, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

Das entwickelte Formerfassungssystem besteht aus zwei Teilkonzepten mit jeweiligen speziellen Vorteilen, die separat voneinander verwendet werden können. Dabei handelt es sich zum einen um die 2D-Preform-Methode, zum anderen um die 3D-Endeffektorerfassung.

Bei der 2D-Preform-Methode werden die zu erfassenden Objekte in vorgefertigte Schablonen eingelegt und so in bestimmte ebene Formen gebracht. Diese Methode ist besonders einfach durchführbar und eignet sich zur Bewertung der grundlegenden Funktionalität der Formsensoren und für die Basis-Sensorkalibrierung. Sie erlaubt es außerdem, einzelne Teile der Instrumente gesondert zu betrachten. Da die Form über die FBG-Sensoren rekursiv berechnet wird, setzen sich Fehler in der Rekonstruktion im Instrumentenverlauf weiter fort. Diese Fehlerfortpflanzung kann für die Qualitätsanalyse herausgefiltert werden, indem nur Teilverläufe betrachtet werden. Die Fehlerquelle kann dann besser zugeordnet werden (Abb. 1).

Bei der 3D-Endeffektorerfassung ist die Position und Ausrichtung im Anfangspunkt fest vorgegeben. Die Position des Endeffektors ist über einen Einklemmmechanismus definiert, der in quasi beliebige

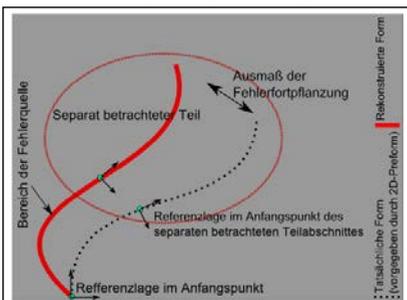


Abbildung 1: 2D-Preform. Separate Betrachtung des hinteren Teilabschnittes.

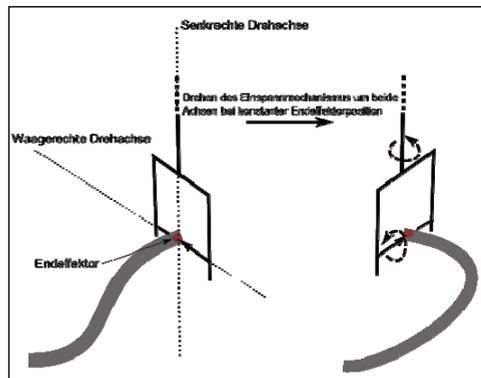


Abbildung 2: 3D-Endeffektorerfassung: Funktionalität Einspannmechanismus.

Position und Ausrichtung gebracht werden kann. Die Position und Ausrichtung am Endeffektor kann dann manuell abgelesen werden. Die Genauigkeit der Positions- und Ausrichtungswerte hängt hier lediglich von der Maßgenauigkeit des Einspannmechanismus ab und liegt im Bereich $\pm 0,05$ mm. Durch die spezielle Konstruktion des Einspannmechanismus ist es möglich, den Formverlauf des eingespannten Objektes beliebig und dynamisch zu variieren ohne die Position des Endpunktes zu verändern (Abb. 2). Dies erlaubt umfangreiche und schnelle Vergleiche von rekonstruierten Endeffektor-Positionen mit dem realen Wert durch einen gleich bleibenden Referenzwert für beliebig viele Formverläufe; eine feinere Sensorkalibrierung ist realisierbar.

3 Material und Methoden

Am IPR wurden 2D-Preformen sowie ein 3D-Erfassungskäfig zur Realisierung der beiden beschriebenen Formerfassungsmethoden entwickelt und gefertigt. Die Erfassungsmasken wurden jeweils auf die Maße eines Sensorträgers abgestimmt, der mit Fasern ausgestattet als Formsensoren in medizinische Instrumente integriert werden soll. Ziel der Forschung in der Formsensoren am IPR und daher verwendetes Maß ist hier ein Träger in Schlauchform von 20 cm Länge und einem Durchmesser von 0,1 cm.

Für den praktischen Aufbau der 2D-Preformen wurde eine Zusammenstellung von Grundformen mit jeweiliger Bogenlänge von 20 cm und einer Fugentiefe von 0.15 cm in PVC-U Platten gefräst (Abb. 3). Bei der Auswahl der verwendeten Grundformen wurde auf die Vielseitigkeit der Krümmungsradien und dessen Verteilung über den Sensorverlauf geachtet. Damit die in den Träger integrierten Fasern an die Messgeräte angeschlossen werden können, schließen die Fugen jeweils am Rand der Platten ab, sodass die Fasern frei liegen.

Der 3D-Erfassungskäfig besteht aus einer Boden- und einer Deckelplatte aus Aluminium, die über vier Stangen an den Plattenecken verbunden sind. In die Deckelplatte sind Gewinde im Abstand von 2cm gesetzt, in die eine Klemmvorrichtung eingedreht werden kann. Die horizontale Positionierung des Trägerendpunktes bestimmt sich über die Wahl des Gewindes auf der Deckelplatte. Die Höhe kann über das Eindrehen der Halterung eingestellt werden, die Ausrichtung wird über den Halterungskopf definiert. Dieser ist so konstruiert, dass sich durch Drehen um zwei Achsen jede beliebige Ausrichtung realisieren lässt, die Endeffektor-Position des eingespannten Trägers jedoch als Achsenschnittpunkt stets unverändert bleibt (Abb. 4).

Zur übersichtlichen Auswertung der Formerfassung wurde in Matlab eine GUI programmiert, über die alle Angaben über die Wahl bzw. Einstellungen der Formmaske manuell eingegeben werden können (Abb. 5).

Als Maß für die Leistung des Formrekonstruktionsalgorithmus müssen verschiedene Kriterien definiert werden. Eine übliche Messgröße zur Bewertung der Algorithmus-Qualität ist die statistische Genauigkeit. Diese gibt die maximale Abweichung der gemessenen Positionen und Ausrichtungen von Referenzpunkten vom tatsächlichen Wert an. Das grundlegende Prinzip der Auswertung der 2D-Erfassungsmethode ist die Rekonstruktionsbewertung anhand dieser statistischen Genauigkeit, um die grobe Funktionalität des Sensors zu testen sowie die elementare Kalibrierung durchzuführen. Ein weiteres beachtliches Kriterium zur Bewertung der Formrekonstruktionsmethode ist die Anzahl unabhängiger verwendeter Sensoren; im Fall des betrachteten Formsensors hängen alle Sensormesspunkte voneinander ab, was zu erheblichen Fehlerfortpflanzungen führen kann. Um auf diese Fehleranfälligkeit

gesondert einzugehen, wird in der 2D-Erfassungsmethode nicht nur die gesamte Objektform betrachtet, sondern auch Teilformen evaluiert.

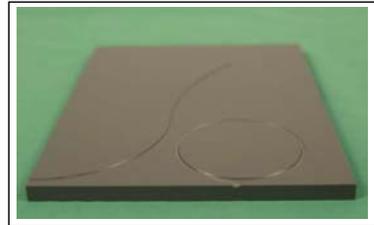


Abbildung 3: 2D-Preform Platte aus PVC-U.

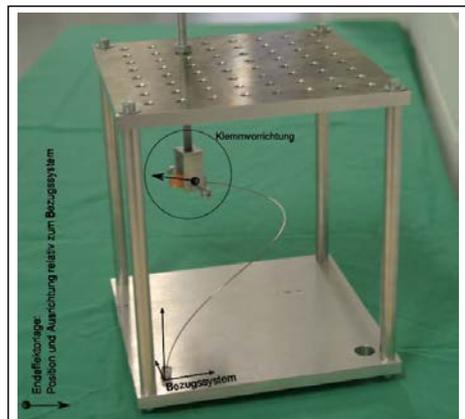


Abbildung 4: 3D-Erfassungskäfig aus Aluminium mit eingespanntem Draht von 20 cm Länge und 0.1 cm Durchmesser als Sensor-Platzhalter.

Zur umfangreicheren Fehlerbetrachtung und Optimierung des Algorithmus sowie zur feineren Kalibrierung der Sensoren wird der 3D-Erfassungskäfig verwendet. Als Leistungskriterium wird ein neues Maß definiert. Dieses Maß wird als Fehlerwolken-Volumen bezeichnet. Der Sensorträger wird in den Erfassungskäfig eingespannt und in verschiedene Formen gebracht, wobei jeweils die Messdaten verwertet werden. Die Endeffektor-Position bleibt durch die feste Einspannung am Objektende konstant. Das Fehlerwolken-Volumen beschreibt dann die räumliche Verteilung der Rekonstruktionsergebnisse der Endeffektor-

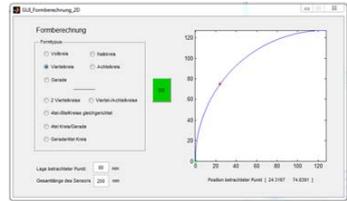


Abbildung 5: Grafische Oberfläche zur manuellen Eingabe der aktuellen Form.

Positionen um die exakte, durch den Erfassungskäfig eingestellte Position (Abb. 6). In den Volumenwert fließen sowohl die Verteilung und die Dichte der rekonstruierten Punktmenge als auch die Instrumentenlänge und Variation der realisierten Verformungen mit ein; somit stellt das Fehlerwolken-Volumen ein aussagekräftiges Bewertungsmaß dar.

4 Ergebnisse und Ausblick

Das Ergebnis des Formerfassungskonzepts ist eine fundierte Grundlage zur Qualitätsbewertung der Formsensoren und dem dieser zugrundeliegenden Rekonstruktionsalgorithmus. Die systematische Kombination der beiden Teilkonzepte kann zur gezielten Verbesserung der Ausrichtung des Sensornetzwerkes sowie zur Sensorkalibrierung genutzt werden. Über die verschiedenen flexiblen Formvorgabemöglichkeiten kann eine umfangreiche Analyse der Funktionalität der Sensoren durchgeführt werden, ohne dass Aufwand durch z.B. notwendige Bildauswertungen in der Formerfassung entsteht.

Zur effizienten Verbesserung der Sensorfunktionalität soll nun ein Optimierungsverfahren entwickelt werden, was über strukturierte Formvergleiche zu bestmöglichen Ergebnissen des Formsensors führt. Schließlich soll die teilautomatisierte Optimierung und Kalibrierung über ein Software-Framework ermöglicht werden. Abhängig von der jeweils aktuell ermittelten Qualitätsbewertung schlägt diese Software Formvorgaben vor, die manuell über die Einpassung der Objekte in die entsprechende Formmaske realisiert werden. Die Auswertung fließt dann wiederum automatisch über die Software in die Optimierung und Kalibrierung des Rekonstruktionsalgorithmus mit ein.

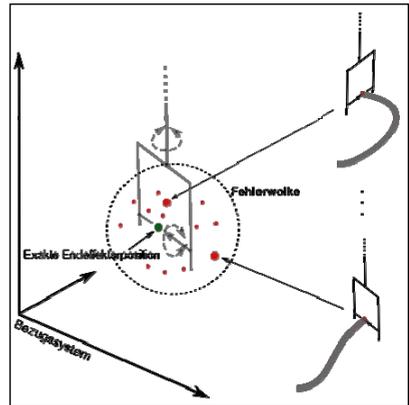


Abbildung 6: Punktmenge rekonstruierter Endeffektor-Positionen zu unterschiedlichen Instrumentenformen bei fixer Einspannung als Fehlerwolke.

5 Zusammenfassung

In diesem Paper wurde eine neue Methode der Formerfassung schlauchförmiger Instrumente vorgestellt, die als Optimierungsgrundlage und zur Kalibrierungshilfe der Formsensoren medizinischer Instrumente verwendet werden soll. Der Aufbau der zur Formerfassung notwendigen Preformen und dessen Funktionalität wurden beschrieben. Weiter wurde die darauf angepasste Auswertungsmethodik erläutert. Im Hinblick auf weitere Arbeiten in Richtung eines semi-automatisierten Optimierungsverfahrens des Sensorsystems wurden die Ergebnisse diskutiert und weitere Entwicklungsschritte definiert.

6 Referenzen

- [1] C. Ledermann, H. Pauer, O. Weede, and H. Woern, *Simulation tool for 3D shape sensor based on fiber Bragg gratings and optimization of measurement points*, IEEE/CIS-RAM, 2013
- [2] A. Schneider, J. Harms, M. Scheuring, F. Haiti, Feussner, G. Wessels, *Navigation in der starren und flexiblen Endoskopie*, Biomedizinische Technik, Band 46, Seite 420-421, 2001
- [3] M. Kleemann, H.P. Bruch, *Navigation und Medizin*, FOCUS MUL, Band 4, Seite 194-195, 2006
- [4] M. Kleemann, V. Martens, P. Hildebrand, A. Besirevic, S. Schlichting, L. Mirow, U.J. Roblick, C. Bürk, H.P. Bruch, *Die Erfassung des Raumes*, FOCUS MUL, Band 4, Seite 201-205, 2006