

Spiegelunterstütztes optisches Tracking für die computerunterstützte Chirurgie

T. Fürtjes¹, M. Müller¹, M. de la Fuente¹, A. Korff¹, K. Radermacher¹

¹ RWTH Aachen, Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik, Lehrstuhl für Medizintechnik, Aachen, Germany

Kontakt: fuertjes@hia.rwth-aachen.de

Abstract:

Der zuverlässigen Lokalisierung chirurgischer Instrumente in Relation zum Patientenkoordinatensystem kommt in der computerunterstützten Chirurgie entscheidende Bedeutung zu. Aufgrund ihrer weiten Verbreitung im klinischen Alltag können optische Trackingsysteme als Standardverfahren für diese Aufgabe angesehen werden. Ein Nachteil von optischen Trackingsystemen liegt in der zwingend erforderlichen freien Sichtlinie (Line-of-Sight) zwischen Kamera und Objekten und der daraus resultierenden Einschränkung der Bewegungsfreiheit.

Diese Arbeit beschreibt ein spiegelunterstütztes optisches Trackingverfahren, welches die Generierung von redundanten Positionsinformationen ermöglicht und somit die Sichtbarkeitsproblematik reduziert und gegenüber konventionellen Trackingverfahren den Arbeitsraum erweitert. Die Funktionsfähigkeit des Verfahrens wurde anhand verschiedener Versuchsreihen bestätigt. Es konnte gezeigt werden, dass spiegelbasierte Messungen eine vergleichbare Genauigkeit erreichen wie die direkten Messmethoden.

Schlüsselworte: Optisches Tracking, line-of-sight, CAS

1 Problem

Optische Trackingsysteme (OTS) sind im Bereich der computerunterstützten Chirurgie (CUC) ein Standardverfahren zur Lokalisierung verschiedener Objekte im Operationssaal (OP). Der Grund für die große Akzeptanz und weite Verbreitung dieser Systeme liegt in der einfachen Integration in den operativen Workflow sowie der hohen erreichbaren Genauigkeit [1].

Ein Nachteil dabei ist, dass für den zuverlässigen Einsatz eines optischen Trackingsystems eine direkte Sichtverbindung zwischen Kamera und den getrackten Objekten gewährleistet sein muss [2]. Durch eine Unterbrechung der Sichtlinie sinkt sowohl die Zuverlässigkeit, Effizienz und Effektivität des Eingriffes als auch die Benutzerzufriedenheit. Zusätzlich zur vollständigen Verdeckung von Objekten können auch Teilverdeckungen einzelner Marker zu einer verschlechterten Systemperformance führen [3].

Die Gefahr und Folgen einer Sichtlinienunterbrechung hängen von der chirurgischen Anwendung ab. Wird das optische Trackingsysteme für reine Navigationsaufgaben eingesetzt [4], bei denen die Positionen der chirurgischen Instrumente und die anatomischen Strukturen in einer virtuellen Szene dargestellt werden, führt eine Sichtlinienunterbrechung lediglich zu einer Unterbrechung bzw. Verzögerung des Workflows. Im Gegensatz dazu erfordern teilweise automatisierte Systeme wie Navigated Control [5], der Precision Freehand Bone Sculptor [6] oder das Sicherheits-Trepanationssystem STS [7] die Erfassung der Positionsdaten in Echtzeit. Da die Regelung dieser Systeme auf den gemessenen optischen Daten beruht werden besonders hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Trackingsysteme gestellt. Um die Patientensicherheit auch im Fall einer Sichtlinienunterbrechung zu gewährleisten, müssen diese Systeme über zusätzliche Schutzmechanismen verfügen. Eine zusätzliche Problematik ergibt sich bei Anwendungen, die durch workflow- bzw. anwendungsbedingten Bewegung einen erhöhten Arbeitsraum aufweisen, welcher durch das optische Trackingsystem nicht gewährleistet werden kann [8].

Zur Vermeidung oder Reduzierung von Sichtlinienunterbrechungen finden sich im klinischen Alltag bzw. der Literatur verschiedene Ansätze. Eine umfassende Workflowanalyse von kritischen Anwendungen gibt Aufschluss über die Bewegungen der Chirurgen und Instrumente im Hinblick auf die Position des Trackingsystems und ermöglicht somit eine bessere Planung des chirurgischen Eingriffes. Eine Unterbrechung der Sichtlinienverbindung kann jedoch nicht ausschließlich aufgrund der Planung sichergestellt werden.

Eine zusätzliche Verbesserung der Line-of-Sight Problematik lässt sich durch eine angepasste Gestaltung der verwendeten Referenzkörper erreichen. Ein Beispiel für diesen Ansatz beschreibt die Verwendung von multi-surface Rigid-

Bodies, welche über mehrere separat erkennbare Geometrien (faces) verfügen, wodurch das Trackingsystem in der Lage ist die Referenzkörper aus verschiedenen Richtungen zu erfassen [8]. Auch die Verwendung angepasster Rigid-Bodies birgt weiterhin die Gefahr einer Verdeckung der Markerkugeln durch Instrumente oder OP-Personal.

Eine automatische Kameranachführung mindert die Einschränkungen durch das begrenzte Arbeitsvolumen des optischen Trackingsystems. Dabei führt ein in das System integrierter Motor die Kamera den Bewegungen eines Objektes nach und hält dieses somit im Zentrum des Arbeitsraumes [9]. Die Nachführung der Kamera bezieht sich jedoch nur auf ein Objekt wodurch andere Objekte aus dem Arbeitsraum gelangen können.

Hybrides Tracking beschreibt die Verwendung zusätzlicher Sensorik zur Positionsbestimmung. Beispiele hierfür sind der Einsatz von elektromagnetischem Tracking, zusätzlicher Kameras oder Gyrosensoren [10][11]. Die Verwendung von hybriden Trackingsystemen trägt durch die Erzeugung von redundanten Positionsdaten erheblich zur Reduzierung des Line-of-Sight Problems sowie der Erweiterung des Arbeitsraumes bei. Allerdings sind diese Systeme aufgrund ihrer hohen Kosten, des großen Platzbedarfs und der enormen technischen Anforderungen für viele Anwendungen ungeeignet.

In dieser Arbeit wird die Machbarkeit eines kostengünstigen Verfahrens untersucht, welches mit Hilfe eines Spiegels redundante Positionsdaten erfassen kann und somit die Sichtbarkeit der Rigid-Bodies bei chirurgischen Anwendungen verbessert und den Arbeitsraum des Trackingsystems modifiziert.

2 Methoden

Ein Spiegel reflektiert einfallendes Licht nach dem Reflexionsgesetz und erzeugt somit ein definiertes Abbild der Realität. Über die räumliche Registrierung und Kalibrierung der Abbildung können die realen Raumpositionen berechnet werden. Für den Einsatz des spiegelunterstützten Verfahrens muss der eingesetzte optische Spiegel so positioniert werden, dass die zu erfassenden Objekte (retroreflektive Markerkugeln) in dessen Reflexionsbereich liegen. Die Positionierung kann durch eine Planungshilfe unterstützt werden. Im Vorfeld der Anwendung werden die verwendeten Rigid-Bodies sowohl direkt als auch gespiegelt eingemessen. Bei dem verwendeten optischen Trackingsystem können die Rigid-Bodies als multi-surface Rigid-Bodies definiert werden. Dies ermöglicht eine gleichzeitige Geometriererkennung sowohl in der gespiegelten als auch in der direkten Messung. Zur Bestimmung der relativen und absoluten Objektkoordinaten (Position und Orientierungen im Kamerakoordinatensystem) wird der verwendete Spiegel ebenfalls getrackt und im Bezug zum Trackingsystem kalibriert. Durch die konstante Positionierung des Spiegels und der Kamera muss die Position des Spiegels lediglich einmalig zu Beginn der Anwendung aufgenommen werden. Das entwickelte System ist nun in der Lage anhand der bekannten Lagebeziehungen der Rigid-Bodies die genauen Positionen und Orientierungen der jeweiligen Objekte zu berechnen.

Um die Funktionsfähigkeit des Verfahrens zu zeigen werden die relativen Abstände zweier Referenzkörper im gespiegelten sowie im nicht gespiegelten Koordinatensystem verglichen. Zu diesem Zweck werden zwei passive Rigid-Bodies, ein optisches Trackingsystem Polaris Spectra (NDI, Waterloo, Canada) sowie ein Spiegel (600 mm * 600 mm) verwendet (Abb. 1). Die Rigid-Bodies werden in zehn unterschiedlichen Abständen positioniert und sowohl direkt als auch gespiegelt aufgenommen. Für eine Bewertung der Zuverlässigkeit der Positionswerte, werden zusätzlich die vom Trackingsystem ermittelten RMS Fehler des Abstands der Rigid-Bodies aufgezeichnet.

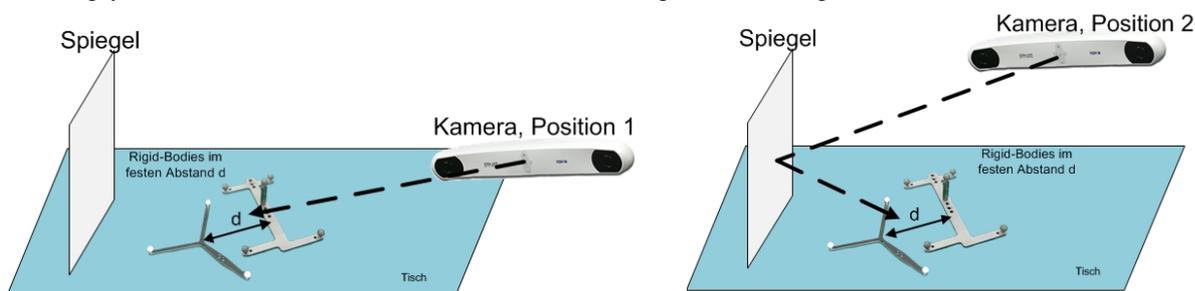


Abb. 1: Messung der relativen Genauigkeit. - *Links*: Direkte Ausrichtung der Kamera auf die Rigid-Bodies. *Rechts*: Aufnahme der gespiegelten Positionsdaten

Ein wichtiger Aspekt des spiegelunterstützten Tracking stellt die Erweiterung des nutzbaren Arbeitsvolumens der Kamera dar. Diese Erweiterung kann durch eine grafische Darstellung gezeigt werden, indem Positionswerte aufgezeichnet und visualisiert werden, die außerhalb des eigentlichen Arbeitsvolumens liegen. Für die Akquisition der benötigten Daten wird der Spiegel in der Mitte des Arbeitsraumes der Kamera platziert. Die Erfassung der Position und Ausrich-

tung der Spiegelfläche erfolgt über einen am Spiegel befestigten Referenzkörper. Im Anschluss wird die Geometrie eines weiteren Rigid-Bodies sowohl direkt als auch gespiegelt eingelesen. Im ersten Schritt wird die direkte Geometrie in das Trackingsystem eingeladen und der Rigid-Body durch das Arbeitsvolumen geführt. Im zweiten Schritt wird die gespiegelte Geometrie geladen und die Positionsmessung wiederholt. Für eine korrekte Darstellung der realen Positionen müssen die gespiegelten Koordinaten in das richtige Koordinatensystem transformiert werden. Die Durchführung der Transformation erfolgt anhand der erfassten Orientierung und Lage der Spiegelfläche.

3 Ergebnisse

In den durchgeführten Untersuchungen konnte die Funktionsfähigkeit des spiegelunterstützten optischen Tracking gezeigt werden. Die Genauigkeit der spiegelbasierten Messungen wurde anhand der relativen Abstände zwischen zwei Referenzkörpern ermittelt. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Messreihen zusammengefasst. Dabei hat sich gezeigt, dass die Messungen der Abstände im gespiegelten Koordinatensystem eine vergleichbare Genauigkeit erzielen können, wie die Messung im nicht gespiegelten Koordinatensystem. Die durchschnittliche Abweichung der Messungen beträgt 0,583 mm mit einer Standardabweichung von 0,334 mm. Die von der Kamera ermittelten RMS Fehler der einzelnen Rigid-Bodies vergrößerten sich leicht von durchschnittlich 0,149 mm (STD \pm 0,030 mm) bei der nicht gespiegelten Messung auf 0,212 mm (STD \pm 0,033 mm) bei der gespiegelten Messung.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Abstand direkt	19,04	61,37	83,95	107,03	143,45	173,67	200,00	225,28	238,70	277,88
Abstand gespiegelt	18,89	61,73	83,13	106,04	143,19	172,96	200,99	225,18	237,97	277,14
Abweichung	0,15	-0,37	0,82	0,98	0,26	0,70	-0,99	0,10	0,73	0,73
RMS direkt	0,14	0,18	0,16	0,14	0,12	0,16	0,11	0,15	0,21	0,16
RMS gespiegelt	0,18	0,22	0,21	0,18	0,15	0,25	0,23	0,21	0,25	0,24

Tabelle 1: Auswertung der relativen Abstands- und RMS-Messungen (Alle Werte in mm und gerundet)

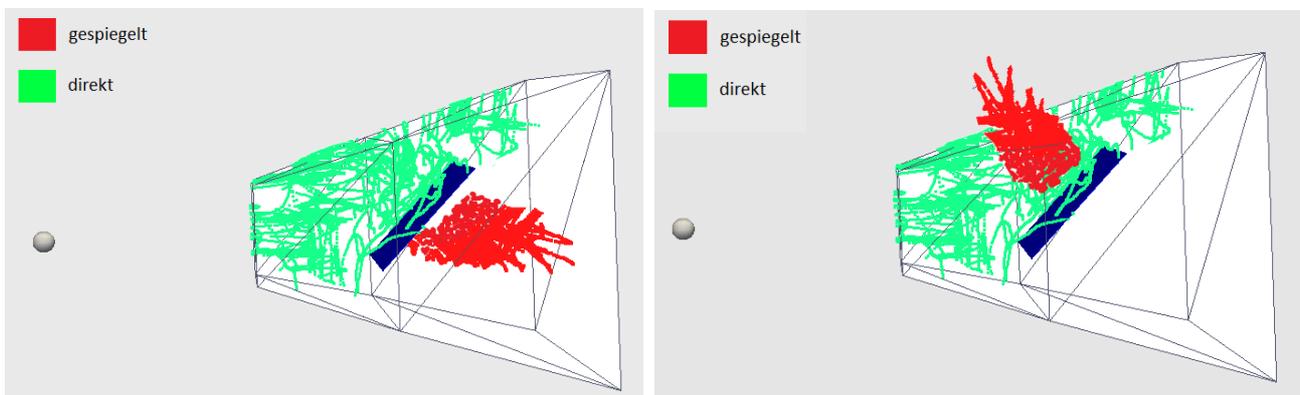


Abb. 2: Positionsdaten im Arbeitsvolumen. *Links*: Vor der Transformation. *Rechts*: Nach der Transformation. Der Punkt beschreibt die Position der Kamera.

Die Erweiterung des konventionellen Arbeitsraumes eines optischen Trackingsystems durch den Einsatz des spiegelunterstützten Verfahrens wurde dargestellt (vgl. Abb. 2). Die Darstellung beinhaltet das Arbeitsvolumen des optischen Trackingsystems (*weiß*), die Lage sowie das Abmaß des Spiegels (*blau*) und die aufgenommenen Positionsdaten (gespiegelt *rot*, nicht gespiegelt *grün*). Für die Messreihen wurden insgesamt 10576 Messungen für die direkte und 10212 Messungen für die gespiegelte Rigid-Body Geometrie aufgenommen. Die Verteilung der gespiegelten Koordinaten zeigt durch die Überschreitung des Arbeitsvolumens der Kamera die erwartete Änderung des Arbeitsraums. Die kubische Verteilung der Messwerte ist durch Form und Größe des Spiegels vorgegeben.

4 Diskussion

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur Erzeugung von redundanten Positionsinformationen vorgestellt, welches in der Lage ist das Sichtbarkeitsproblem zu vermindern sowie den Arbeitsraum des optischen Trackingsystems zu modifizieren.

Es konnte gezeigt werden, dass die relative Genauigkeit zwischen zwei Objekten durch den Einsatz des Spiegels erhalten bleibt (Mittlere Differenz $0,583 \text{ mm} \pm 0,334 \text{ mm}$). Lediglich der von der Kamera ermittelte RMS-Fehler ist leicht erhöht ($+ 0,063 \text{ mm}$). Die durchgeführte Visualisierung des erweiterten Arbeitsraumes zeigt das Potential dieses Verfahrens. Das spiegelunterstützte Tracking ermöglicht einerseits Objekte aus zwei verschiedenen Blickrichtungen gleichzeitig zu tracken und andererseits Objekte zu erfassen, die bei der direkten Messung aufgrund von großen Winkeländerungen außerhalb des gültigen Arbeitsvolumens liegen.

Die leicht erhöhten RMS-Werte bei den spiegelbasierten Messungen ergeben sich aus den nicht idealen Reflexionseigenschaften des eingesetzten Spiegels. Das Verfahren ermöglicht eine Modifikation des Arbeitsraumes, allerdings lässt sich durch dieses Verfahren nicht das gesamte Arbeitsvolumen des Trackingsystems vergrößern, da der Bereich hinter dem Spiegel nicht mehr erfasst werden kann. Für eine optimale Nutzung des Arbeitsraumes sollte daher die Größe des verwendeten Spiegel angepasst werden. Für den Einsatz dieses Verfahrens sollte außerdem für jeden Eingriff die Vorteile der redundanten Positionsgewinnung mit den Nachteilen der Arbeitsraumbeschränkung abgewogen werden.

Weitere Untersuchungen können Aufschluss über das genaue Reflexionsverhalten des verwendeten Spiegels geben, um eine Fehlerkorrektur zu ermöglichen. Zusätzlich ist es denkbar, den Spiegel durch eine höherwertige Variante zu ersetzen. Darüber hinaus muss das Verhalten des Systems auf Teilverdeckungen einzelner Marker evaluiert werden. Die Anwendung des Verfahrens im OP-Alltag erfordert außerdem eine Analyse des benötigten Platzbedarfs sowie einer geeigneten Positionierung im Hinblick auf den operativen Workflow.

Generell sind zusätzliche Erweiterungen zu dem vorgestellten Verfahren denkbar. Durch eine automatische Spiegelnachführung könnten Sichtlinienunterbrechungen einzelner Rigid-Bodies abgefangen werden, indem das System diese erkennt und den Spiegel speziell auf den betroffenen Rigid-Body ausrichtet. Abhängig von der Blickrichtung der Kamera auf einen Rigid-Body variiert die maximal erzielbare Genauigkeit der Trackingsysteme. Demnach könnten die redundante Messung zusätzlich genutzt werden, um die Informationen aus direktem und gespiegeltem Bild zu kombinieren und damit die gesamte Messgenauigkeit zu erhöhen.

Zusammengefasst kann das spiegelunterstützte Tracking bei Anwendungen in der computerunterstützten Chirurgie durch die Modifikation des Arbeitsraumes und die Minimierung von Sichtlinienunterbrechungen zu einer Verbesserung der Zuverlässigkeit, Effizienz und Effektivität des Eingriffes sowie zur Erhöhung der Benutzerzufriedenheit von Patienten und Chirurgen beitragen.

5 Referenzen

- [1] R. Elfring, M. de la Fuente: *Assessment of Optical Localizer Accuracy for Computer Aided Surgery Systems*. In Computer Aided Surgery, Nr. 15, S. 1-12, 2010
- [2] H.-C. Schneider, J. Wahrburg: *Aspekte bei der Plausibilitätsanalyse optisch erfasster Patientenbewegungen mittels Inertialsensorik*. In Tagungsband der 6. Jahrestagung der CURAC, S. 177-180
- [3] P. Knappe, J. Wahrburg: *Komponenten und Architektur eines navigierten Assistenzroboters für chirurgische Anwendungen*. In at-Automatisierungstechnik 53, Nr. 12/2005, S. 615-626, 2005
- [4] H. Visarius, J. Gong: *Man-machine interfaces in computer assisted surgery*. In Computer Aided Surgery 2(2), S. 102-107, 1997
- [5] K. Koulechov, G. Strauss: *FESS control: realization and evaluation of navigated control for functional endoscopic sinus surgery*. In Computer Aided Surgery 11(3), S. 147-159, 2006
- [6] G. Brisson, T. Kanade: *Precision Freehand Sculpting of Bone*. In Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, Vol. 3217/2004, S. 72-75, 2006
- [7] A. Follmann, A. Janß: *User-interaction of a semiautomatic trepanation system*. In Proceedings of the IFMBE (World Congress of Biomedical engineering and Medical Physics), S. 173-176, 2009.
- [8] T. Fürtjes, A. Korff: *Line of sight optimization for a semiautomatic hand-held tool for neurosurgery*. In Proceedings of the CARS (Computer Assisted Radiology and Surgery) Congress, Vol.6, S.290-292, 2011.
- [9] K. Daniilidis, C. Krauss: *Real-Time Tracking of Moving Objects with an Active Camera*. In Academic Press Limited, S. 3-20, 1998
- [10] M.Fawad Khan, S.Dogan: *Navigation-Based Needle Puncture of a Cadaver Using a Hybrid Tracking Navigational System*. In Investigative radiology 41(10), S. 713-720, 2006
- [11] A. Korff, R. Elfring: *Hybrid position control for a synergistic trepanation tool*. In Proceedings of the CARS (Computer Assisted Radiology and Surgery) Congress, S. 111-112, 2010