Ein Verfahren zur Genauigkeitsanalyse magnetischen Trackings

Peter Hassenpflug, Marcus Vetter, Marc Schneberger[1], Thorsten Liebler[1], Ivo Wolf, Matthias Thorn, Carlos Cárdenas, Götz Martin Richter[2], Wolfram Lamadé[3], Markus Büchler[3], Hans-Peter Meinzer

Abt. Medizinische und Biologische Informatik, [1]Abt. Medizinische Physik
Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), 69120 Heidelberg
[2]Radiologische Klinik, [3] Chirurgische Klinik
Ruprecht-Karls Universität Heidelberg, 69120 Heidelberg
Email: p.hassenpflug@dkfz.de

Zusammenfassung. In diesem Beitrag stellen wir ein Nachverarbeitungsverfahren vor, das dynamische Genauigkeitsuntersuchungen von Positions- und Winkelmessungen zweier den gleichen Raum beschreibender, nicht interferierender Tracking-Systeme ermöglicht. Bei gemeinsamer zeitlicher Taktung der Messungen eignet sich unsere Vorgehensweise darüber hinaus zur Realisierung eines hybriden Tracking-Systems.

1 Einleitung

Der Einsatz von magnetischen Tracking-Systemen (mTS) gewinnt in der Medizin zunehmend an Bedeutung. Anwendungsgebiete sind neben der bildgestützten Chirurgie vor allem freihandgeführter dreidimensionaler Ultraschall und Systeme der erweiterten Realität. Der Vorteil von mTS gegenüber anderen Tracking-Verfahren wie optischem, akustischem oder mechanischem Tracking besteht vor allem in den kleinen Abmessungen der Sensoren und der Fähigkeit zur Lokalisation auch bei fehlender Sichtverbindung zum TS. Dies ermöglicht ihre Anwendung in vivo innerhalb von Gefäßen, Organen, Biopsienadeln, Laparoskopen, etc.

Die Nachteile der mTS bestehen in den aktiven Komponenten im Operationsfeld (Sensoren mit Kabeln) und der Anfälligkeit gegenüber äußeren magnetischen Störeinflüssen, wie sie beispielsweise durch Metallteile bzw. Geräte im Operationssaal enstehen können.

In diesem Beitrag stellen wir ein Verfahren vor, das es ermöglicht, die Zuverlässigkeit von mTS für Anwendungen in der offenen Abdominal-Chirurgie analysieren zu können. Gegenüber statischen Genauigkeitsvermessungen wie in [1] und [2] erlaubt unser Verfahren auch die Untersuchung der dynamischen Lokalisationsgenauigkeit.

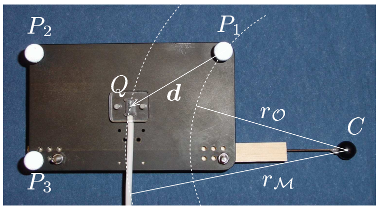

Abb. 1. Markerplatte mit Messpunkten des oTS (P_1, P_2, P_3), des mTS (Q) und Pivot-Punkt C an einem anschraubaren Rotationsarm; $\boldsymbol{d}$: Richtungsvektor $\overrightarrow{P_1Q}$.

2 Material und Methode

Als Referenzsystem für die Vermessung zweier aktueller mTS[1,2] verwenden wir zwei optische Tracking-Systeme (oTS) mit kalibrierbarer[3] bzw. vom Hersteller spezifizierter Genauigkeit[4].

Eine Markerplatte (s. Abb. 1) wird als Bezugsrahmen für den Vergleich von magnetischen mit optischen Messwerten verwendet. Das oTS liefert die Position des Messpunktes P_1 bezüglich seiner Orthonormalbasis (ONB) $\mathcal{O}$. Die aktuelle Rotation $\mathcal{S}_t$ der Markerplatte zum Zeitpunkt t wird mit Hilfe der weiteren Messpunkte P_2 und P_3 bestimmt. Der Messpunkt Q des mTS mit ONB $\mathcal{M}$ befindet sich innerhalb des Sensors. Dieser wird mit einem Adapter an der Markerplatte befestigt. Je nach Typ des Sensors sind neben den Positionswerten zwei bzw. drei Freiheitsgrade der Rotation verfügbar. Die Basen $\mathcal{O}$ und $\mathcal{M}$ sind bei allen uns verfügbaren Tracking-Systemen Rechtssysteme.

Im Folgenden verwenden wir eine Notation, nach der Repräsentationen eines Vektors ihre Basis als Index erhalten und ${}^{\mathcal{B}}\mathcal{T}_{\mathcal{A}}$ die lineare Transformation vom Koordinatensystem $\mathcal{A}$ in das System $\mathcal{B}$ beschreibt. Die abstrakte Basis $\mathcal{B}$ wählen wir, wenn ein Ausdruck sowohl auf $\mathcal{O}$ als auch auf $\mathcal{M}$ bezogen wird.

2.1 Ermittlung der Rotation der optischen in die magnetische Basis

Die Kugel am Rotationsarm mit Rotationszentrum C wird in einen Trichter gesetzt und mit der Markerplatte so ausgelenkt, dass an den Punkten P_1 und Q Ortsvektoren $\boldsymbol{y}_{\mathcal{O}}$ und $\boldsymbol{x}_{\mathcal{M}}$ gemessen werden. Diese liegen auf zwei Kugeloberflächen mit Radius $r_{\mathcal{O}}$ und $r_{\mathcal{M}}$. Für die Bestimmung einer gemeinsamen Basis $\mathcal{B}'$ beider Tracking-Systeme werden nach vier solchen Messung die Kugelmittelpunkte $\boldsymbol{c_{k\mathcal{B}}} = \left(x_{k\mathcal{B}}\ y_{k\mathcal{B}}\ z_{k\mathcal{B}} \right)^T,\ k = 0, 1, 2, 3$, mit zugehörigem Radius $r_{\mathcal{B}}$ ermittelt. Dazu werden die $\boldsymbol{c_{k\mathcal{B}}}$ und $r_{\mathcal{B}}$ durch einen Algorithmus nach [3] so

[1] AURORA$^{\text{TM}}$: http://www.ndigital.com/aurora.html
[2] miniBIRD 500®: http://www.ascension-tech.com/products/minibird/
[3] FIVE: http://www.dkfz-heidelberg.de/fs05/e0406/research2.html
[4] POLARIS®: http://www.ndigital.com/polaris.html

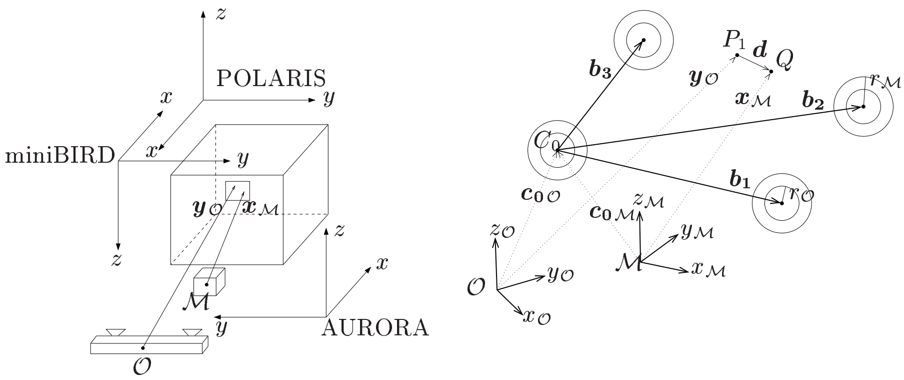

Abb. 2. Links: Versuchsaufbau und Achsenorientierungen der TSe. Rechts: Bestimmung gemeinsamer Basisvektoren $\boldsymbol{b_{1\mathcal{B}}}, \boldsymbol{b_{2\mathcal{B}}}, \boldsymbol{b_{3\mathcal{B}}}$ durch Ausgleichen einer Kugelfunktion. Die Größen $P_1, Q, \boldsymbol{y}_{\mathcal{O}}$ und $\boldsymbol{x}_{\mathcal{M}}$ sind zeitabhängig.

variiert, dass der quadratische Abstand der Messpunkte $(x_{i\mathcal{B}}, y_{i\mathcal{B}}, z_{i\mathcal{B}})$ zur beschriebenen Kugeloberfläche minimal wird (Gl. 1).

$$\left(\boldsymbol{c}_{\boldsymbol{k}}^{*}, r^{*}\right) = \underset{\boldsymbol{c}_{\boldsymbol{k}}, r}{\arg\min} \sum_{i=1}^{n} \left((x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2 - r^2\right)^2 \qquad (1)$$

Aus den Kugelmittelpunkten $\boldsymbol{c_{k\mathcal{B}}}$ werden drei linear unabhängige Richtungsvektoren bestimmt: $\boldsymbol{b_{i\mathcal{B}}} = \boldsymbol{c_{i\mathcal{B}}} - \boldsymbol{c_{0\mathcal{B}}},\ \mathcal{B} = \mathcal{M}, \mathcal{O},\ i = 1,2,3$. Die Basis $\mathcal{B}' = \left(\boldsymbol{b_{1\mathcal{B}}}\ \boldsymbol{b_{2\mathcal{B}}}\ \boldsymbol{b_{3\mathcal{B}}}\right)$ wird durch Anwendung des Gram-Schmidtschen Orthonormalisierungsverfahrens in die zugehörige ONB $\widehat{\mathcal{B}} = \left(\widehat{\boldsymbol{b_{1\mathcal{B}}}}\ \widehat{\boldsymbol{b_{2\mathcal{B}}}}\ \widehat{\boldsymbol{b_{3\mathcal{B}}}}\right)$ transformiert. Die Komponenten der Rotationsmatrix ${}^{\mathcal{B}}\mathcal{R}_{\mathcal{A}}$, die eine ONB $\mathcal{A}$ in eine ONB $\mathcal{B}$ überführt, berechnen sich aus ${}^{\mathcal{B}}\left[\mathcal{R}_{ij}\right]_{\mathcal{A}} = (\boldsymbol{b_i}, \boldsymbol{a_j})$. Damit kann die Rotation von $\mathcal{O}$ in $\mathcal{M}$ nach Gl. 2 als Verkettung linearer Abbildungen geschrieben werden:

$${}^{\mathcal{M}}\mathcal{R}_{\widehat{\mathcal{M}}}\ \ {}^{\widehat{\mathcal{M}}}\mathcal{R}_{\widehat{\mathcal{O}}}\ \ {}^{\widehat{\mathcal{O}}}\mathcal{R}_{\mathcal{O}} \quad = \quad {}^{\mathcal{M}}\mathcal{R}_{\mathcal{O}}. \qquad (2)$$

Mit ${}^{\mathcal{M}}\mathcal{R}_{\mathcal{O}}$ lässt sich nun ein Richtungsvektor zur Basis $\mathcal{O}$ passiv in den entsprechenden Richtungsvektor zur Basis $\mathcal{M}$ transformieren: ${}^{\mathcal{M}}\mathcal{R}_{\mathcal{O}}\boldsymbol{r}_{\mathcal{O}} = \boldsymbol{r}_{\mathcal{M}}$.

2.2 Abbildung der optischen auf die magnetischen Messwerte

Aus Abb. 2 rechts kann man Gl. 3 herleiten, die nach Bestimmung der Kalibrierungsparameter ${}^{\mathcal{M}}\mathcal{R}_{\mathcal{O}}, {}^{\mathcal{O}}\mathcal{S}_{1\mathcal{O}}, \boldsymbol{d}_{1\mathcal{O}}, \boldsymbol{c_{0\mathcal{O}}}$ und $\boldsymbol{c_{0\mathcal{M}}}$ die Messwerte $\boldsymbol{y}_{\mathcal{O}}, {}^{\mathcal{O}}\mathcal{S}_{t\mathcal{O}}$ des oTS in Positionsmesswerte $\boldsymbol{x}_{\mathcal{M}}$ des mTS abbildet.

$$\boldsymbol{x}_{\mathcal{M}} = {}^{\mathcal{M}}\mathcal{R}_{\mathcal{O}}\Big(\boldsymbol{y}_{\mathcal{O}} + \underbrace{{}^{\mathcal{O}}\mathcal{S}_{t\mathcal{O}}\left({}^{\mathcal{O}}\mathcal{S}_{1\mathcal{O}}\right)^{-1}\boldsymbol{d}_{1\mathcal{O}}}_{\boldsymbol{d}_{t\mathcal{O}}} - \boldsymbol{c_{0\mathcal{O}}}\Big) + \boldsymbol{c_{0\mathcal{M}}} \qquad (3)$$

Aus technischen Gründen war es nicht möglich, die verwendeten Tracking-Systeme über einen gemeinsamen Taktgeber zu triggern. Deshalb war eine Offline-Auswertung erforderlich. Zunächst muss eine Interpolation der Zeitserien mit anschließender Neuabtastung auf ein gemeinsames Zeitraster erfolgen. Für die Interpolation der Positionswerte wird ein kubischer Spline mit einer kardinalen Basis verwendet (vtkCardinalSpline,[4]). Die Interpolation der durch Quaternionen repräsentierten Rotationen wird durch sphärische lineare Interpolation nach [5] ermittelt. Nach Bestimmung der zeitlichen Verschiebung der beiden Zeitserien durch normalisierte Kreuz-Korrelation (s. z. B. [6]) können die Positions- und Winkelmessungen verglichen werden.

3 Ergebnisse

Wir haben ein Verfahren zur dynamischen Genauigkeitsuntersuchung magnetischer mittels optischer Tracking-Systeme entwickelt. Damit lassen sich im klinischen Umfeld die Erfüllung der medizinischen Anforderungen an dynamische Positions- und Winkelgenauigkeiten untersuchen. Mit dem hier vorgestellten Verfahren können darüber hinaus optische und magnetische Tracking-Systeme bei gemeinsamer zeitlicher Taktung zu einem robusteren hybriden Tracking-System erweitert werden.

4 Danksagung

Diese Arbeit ist Teil des Projektes ARION und wird vom BMBF im Rahmen des Innovationswettbewerbs Medizintechnik unter dem Kennzeichen 01EZ0008 gefördert. Für die Leihgabe von Tracking-Systemen und die Möglichkeit zur Teilnahme am AURORA-Beta-Testprogramm danken wir der Firma Northern Digital Inc. und insbesondere deren Mitarbeitern Dr. Christian Lappe, Turgut Acay und Manfred Schmid für die freundliche Unterstützung.

Literatur

1. Bryson S: Measurement and calibration of static distortion of position data from 3d trackers. Procs SPIE 1699:244–255, 1992.
2. Leotta DF, Detmer PR, Martin RW: Performance of a miniature magnetic position sensor for three-dimensional ultrasound imaging. Ultrasound Med Biol 23(4):597–609, 1997.
3. Marquardt D: An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters. SIAM Journal Applied Math 11:431–441, 1963.
4. Schroeder W, Martin K, Lorensen B: The Visualization Toolkit: An Object-Oriented Approach to 3-D Graphics. 2nd ed., Prentice-Hall, 1998.
5. Shoemake K: Animating Rotation with Quaternion Curves. Computer Graphics 19(3), 245–254, 1985.
6. Bendat JS, Piersol AG: Measurement and analysis of random data. Wiley, 1966.