

SYSTEMANALYSE UND GENAUIGKEITSUNTERSUCHUNG EINES VIDEOPTISCH BASIERTEN NAVIGATIONSSYSTEMS

T. Pfeifer¹, A. Göggelmann¹, E. Jäger², H.P. Tümmler¹

¹Aesculap AG & Co. KG, Tuttlingen, Deutschland

²FH Furtwangen, Außenstelle VS-Schwenningen, Deutschland

Tobias.Pfeifer@aesculap.de

Abstract— In this paper, the errors of an optical based navigation system relied to the hardware components are studied and classified. The sources of errors are the rigid bodies and an infrared localizer. Special attention is directed to the design of the rigid body and the prediction of the errors occurred by this design in combination with the localizer. A rigid body was designed that exploits improvement opportunities pointed out by error analysis. Using this rigid body, one source of errors can be reduced considerably.

Keywords— navigation system, tool design, error prediction, reference rigid body

Einleitung

Navigationssysteme zur Unterstützung medizinischer Operationsverfahren haben sich seit gut 10 Jahren in der Neurochirurgie etabliert. Ebenso sind seit den späten 90iger Jahren Anwendungen in der HNO und an der Wirbelsäule bekannt und werden erfolgreich genutzt. Den routinemäßigen Einsatz erfuhren diese Systeme erst in den letzten Jahren durch die Orthopädie, bei der Unterstützung der Implantationstechnik in der Gelenkprothetik. Im Zuge einer Multizenterstudie wurden im Zeitraum von 1999 bis 2001 insgesamt 821 Patienten registriert, die sich einer TKA (engl.: total knee arthroplasty) unterziehen mussten. 555 Implantationen wurden dabei navigationsunterstützt durchgeführt, wobei signifikant bessere Ergebnisse erzielt wurden [1]. Die ständig steigenden Anforderungen an solche Navigationssysteme führen dazu, dass die Genauigkeit dieser Systeme von grundlegendem Interesse ist. Dabei ist das Gesamtsystem Navigation sehr komplex und beinhaltet sehr viele unterschiedliche und von einander abhängige Komponenten, wobei jede für sich fehlerbehaftet ist. Aufgrund der immer größer werdenden Routine verlässt sich der Arzt zunehmend auf die hohe Messgenauigkeit des Systems. Um diesem Vertrauen gerecht zu werden, bedarf es der Angabe eines Vertrauensintervalls für die angezeigten Messwerte. Die Fehlerfortpflanzung durch die implementierten Algorithmen der Applikation ist dabei nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Die steigende Nachfrage nach minimalinvasivem Einsatz verlangt die Weiterentwicklung der aktuellen RBs. Diese erfolgt im Sinne einer Optimierung bezüglich Größe und Form.

Materialien

Das zu untersuchende Navigationssystem dieser Studie ist der OrthoPilot[®] der Firma Aesculap AG & CO. KG. Dabei

wird der Localizer POLARIS von Northern Digital Inc. (NDI) in Verbindung mit firmeneigenen RBs eingesetzt. Die POLARIS wird dabei sowohl rein aktiv, hybrid als auch rein passiv verwendet. Dabei garantiert der Hersteller modusunabhängig einen RMS (engl.: root mean square) von 0.35 mm für die Lokalisierung eines Markers im Raum. Je nach verwendetem Modus kommen dabei Infrarot-Dioden, retro-reflektorisch beschichtete Kugeln oder Disks zum Einsatz. Die POLARIS setzt sich aus zwei CCD-Kameras zusammen. In diesen erfolgt zunächst die Berechnung des Markerzentrums für die einzelnen zweidimensionalen Ansichten. Anschließend erfolgt die Berechnung der fehlenden Koordinate für die dreidimensionale Betrachtung anhand eines stereometrischen Modells. POLARIS-intern erfolgt somit die Reduzierung des Markers auf einen Punkt im dreidimensionalen Raum. Die Charakterisierungsdaten beschreiben die Markerkoordinaten in dem Koordinatensystem des RB's. Beim Tracking eines RB's errechnet die POLARIS die Transformation zwischen dem Localizer- und RB-Koordinatensystem. Diese Transformation resultiert aus der Registrierung der gesehenen Punkte im Raum mit den Charakterisierungsdaten. Der Algorithmus entspricht dabei der von K.P. Horn veröffentlichten geschlossenen Lösung für die punktorientierte Registrierung [2]. Abb. 1 verdeutlicht noch einmal die Funktionsweise der Registrierung:

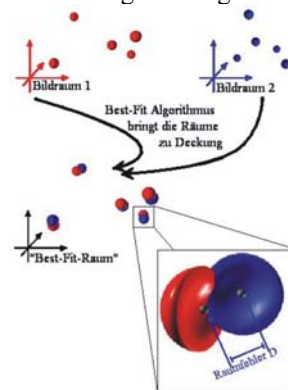


Abbildung 1: punktbasierte Registrierung

Grundlage für die Registrierung ist nach [2] die Minimierung der von der Registrierung verursachten Fehlerquadrate zwischen dem Bildraum 1 und 2:

$$e = \sum_{i=1}^N \|r_{1,i} - sR(r_{2,i}) - r_0\|^2 \quad (1)$$

mit dem Skalierfaktor s , der Rotation R und der Translation r_0 .

Methoden

Unabhängig der verwendeten Modi ist die Markeranordnung eines RB's entscheidend für die Fehlerfortpflanzung bei den Registrierungsvorgängen verantwortlich.

Die Beschreibung des Fehlers erfolgt bei [3] mit Hilfe der Störungstheorie und des Störparameters ε . Die für die Registrierung entscheidenden Faktoren werden dabei in drei Fehlerkategorien unterteilt:

- FLE: Der fiducial localizer error beschreibt den messtechnischen Fehler des Localizers unter Annahme einer Normalverteilung $N(0, \sigma)$ von ε . Danach ergibt sich nach [2] der FLE zu

$$\langle FLE^2 \rangle = K\varepsilon^2\sigma^2 \quad (2)$$

K beschreibt die Anzahl der Dimensionen.

- FRE: Aufgrund des FLEs lassen sich die gesehene Marker mit den Charakterisierungsdaten, die idealisiert betrachtet fehlerfrei sind, nicht vollständig zur Deckung bringen. Der RMS der Differenzen zwischen korrespondierenden Punkten nach der Registrierung wird in [3] als fiducial registration error bezeichnet. Der FRE ergibt sich nach [3] somit zu

$$\langle FRE^2 \rangle = \left(1 - \frac{2}{N}\right) \langle FLE^2 \rangle \quad (3)$$

Der Parameter N beschreibt die Markeranzahl. Abb. 1 verdeutlicht den Raumfehler D, der nach der Registrierung noch vorhanden ist.

- TRE: Der target registration error beschreibt den Registrierungsfehler für einen beliebigen Punkt im Messvolumen. Der TRE ergibt sich nach [3] zu:

$$\langle TRE^2(\vec{r}) \rangle \approx \langle FLE^2 \rangle \left(\frac{1}{N} + \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \sum_{j \neq i}^K \frac{r_i^2}{\Lambda_{ii}^2 + \Lambda_{jj}^2} \right) \quad (4)$$

Λ^2 sind dabei die Eigenwerte der Markerkonfiguration, die als Referenz für die Registrierung dienen und den Charakterisierungsdaten entsprechen.

Aus Gl. 4 wird ersichtlich, dass der TRE direkt von der Betragsgröße der Eigenwerte abhängt. Durch die POLARIS erfolgt die Interpretation des RB's als Körper, der sich nur aus Punkten zusammensetzt. Werden diesen Punkten eine Masse zugeordnet, entsprechen die Eigenwerte den Trägheitsmomenten, die entsprechenden Eigenvektoren den Trägheitsachsen dieses Körpers. Dabei äußern sich instabile Achsen durch kleine Trägheitsmomente. Somit wird der in Gl. 4 beschriebene Zusammenhang zwischen dem verursachten TRE und den Eigenwerten veranschaulicht.

Ergebnisse und Diskussion

Basierend auf diesen Kenntnissen wurde ein Referenz-RB entwickelt. Die Anforderungen an dieses RB waren losgelöst von jeglichen Aspekten in Bezug auf Design, Handhabung, Sterilisation oder ähnlichem. Sie konzentrierten sich auf die Optimierung der erreichbaren Genauigkeit. Dabei wurden die Marker auf dem RB so spezifiziert, dass sich die Markergeometrien von drei RBs, die derzeit im OrthoPilot® eingesetzt werden, wiederfinden; die übrigen Marker wurden hinsichtlich hoher und ausgeglichener

Eigenwerte angeordnet. Insgesamt besitzt das RB die maximal mögliche Markeranzahl der POLARIS für ein RB: 20 aktive Dioden. Abb. 2 zeigt das entwickelte Referenz-RB. Während die Eigenwerte untersuchter RBs immer mindestens einen Eigenwert im Bereich von $10^{-2} - 0.0$ aufweisen, liegen alle Eigenwerte für das Referenz-RB zwischen $0.6 \cdot 10^{-2} - 3.2 \cdot 10^{-2}$.

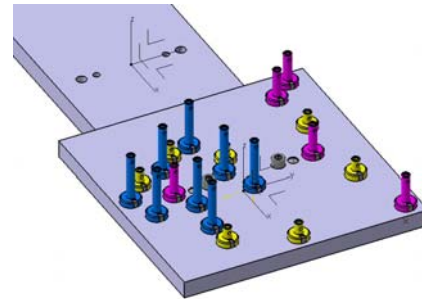


Abbildung 2: entwickeltes Referenz-RB

Mit diesem RB lassen sich die aufgeführten Fehlerkategorien für eine wählbare Markerkonfiguration messtechnisch nachvollziehen. Bei der Vermessung ist der in der Realität nicht konstante RMS-Wert der Kamera zu beachten. Der Localizer übergibt für jede berechnete RB-Position den verursachten FRE. Dadurch ist eine Rückrechnung auf den FLE für das Untervolumen, das von dem RB eingenommen wird, möglich (s. Gl. 2). Die Wahl für aktive Dioden begründet sich durch die Möglichkeit der optisch-mechanischen Vermessung. Dadurch löst man sich von der Charakterisierung und den dabei eingesetzten Algorithmen und nähert sich somit den theoretischen Betrachtungen eines fehlerfreien Referenzsystems an.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse dieser Untersuchung ermöglichen die intraoperative Angabe von Genauigkeitsgrenzen für die ermittelten Werte. Der Operateur erhält damit zusätzliche Informationen bezüglich der Validität des Systems, wodurch die Vertrauenswürdigkeit solcher Systeme erheblich gesteigert wird. Außerdem bilden diese Untersuchungen die Grundlage für die Optimierung zukünftiger RBs.

Literatur

- [1] Clemens, U., Miehle, R.K., Kohler, S., Kiefer, H., Jenny, J.Y., Konermann, W.: Computerassistierte Navigation mit dem OrthoPilot-System und der Search-Evolution-Knieendoprothese - Ergebnisse einer Multicenterstudie. In: Navigation und Robotik in der Gelenk- und Wirbelsäulenchirurgie, Hrsg.: W. Konermann, R. Haaker, Springer-Verlag, 2003, S. 207 - 216
- [2] Horn, K.P.: Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. In: Optical Society of America (1987), Nr. 4, S. 629-642
- [3] Fitzpatrick, J.M.; West, Jay B.; Jr., Calvin R.M.: Predicting Error in Rigidbody, point-based Registration. In: IEEE Transmed Imaging (1998), Nr. 17, S. 694 ff.