

Visualisierung und Optimierung von Messfehlern bei intraoperativer Navigation

C. Plattner¹, W. Freysinger²

¹ Leopold-Franzens-Universität, Institut für Informatik, Innsbruck, Österreich

² Medizinische Universität Innsbruck, Univ. Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde, Innsbruck, Österreich

Kontakt: Christian.Plattner@student.uibk.ac.at

Abstract:

In der Intraoperativen Navigation können fehlerhafte Messungen eine negative Auswirkung auf den Operationsverlauf mit sich bringen. Dieses Projekt zeigt eine Möglichkeit, Messfehler visualisiert werden können, um diese Fehler im Operationssaal zu verdeutlichen, um Awareness für das Problem zu schaffen. Weiterhin wird gezeigt, wie durch Zusammenführung verschiedener Messungssysteme die gesamte Präzision erhöht werden kann. In Experimenten werden synthetische und reale Messungen analysiert um die Erhöhung der Präzision zu zeigen, und Eigenheiten von Messfehlern aufzuzeigen.

Schlüsselworte: Intraoperative Navigation, Präzision, Verdeutlichung von Messfehlern, Awareness

1 Problemstellung

In der Chirurgie, besonders der geschlossenen Chirurgie, ist Intraoperative Navigation ein Hilfsmittel zur visuellen Darstellung der Operationssituation. Präoperative radiologische Bilder werden dabei als zweidimensionale Bilder dargestellt, in denen der Operationsplan oder die aktuelle Positionen von Operationsinstrumenten eingeblendet werden.

Zur Positionsmessung werden Tracker benutzt, etwa optische oder magnetische Tracker, mechanische oder auf Ultraschall basierende Verfahren angewendet. Jede Messung ist immer mit Messfehlern behaftet. Jeder Tracker hat seine eigene Charakteristik. Beispielsweise kann ein optischer Tracker eine Sonde zwar sehr genau auf einer zweidimensionalen Bildfläche mitverfolgen, aber der Abstand Sonde-Messgerät lässt sich weit ungenauer feststellen.

Es wäre hilfreich, solche Messfehler in Navigationssystemen ersichtlich zu machen. Das hilft dabei, die Qualität der im Navigationssystem angezeigten Daten zu erkennen und somit das Vertrauen oder Misstrauen in die angezeigten Bilder einzustufen.

Wir möchten diese Messfehler visuell verdeutlichen, um einen Einblick in die Charakteristika der zur Verfügung stehenden Daten zu bieten. Weiters möchten wir mehrere Informationsquellen zu denselben Messdaten so auswerten und zu einer Messung kombinieren, sodass das Ergebnis genauer ist als die Einzelmessungen.

2 Material und Methoden

Position und Rotation eines Objektes (etwa einer Sonde) werden als *Pose* bezeichnet. Zur mathematischen Darstellung und Verarbeitung von Rotationen werden *Quaternionen* verwendet.

Die Charakteristik der Präzision einer (mehrdimensionalen) Zufallsvariablen X (etwa die Position einer Sonde) wird in ihrer *Kovarianzmatrix* dargestellt. Die Kovarianzmatrix enthält in jeder Zeile i und Spalte j die Kovarianz der Zufallsvariablen X_i und X_j .

Unter der Annahme von Gaußscher Wahrscheinlichkeitsverteilung werden die Flächen mit konstanter Wahrscheinlichkeit für eine festgelegte Wahrscheinlichkeit S dargestellt. Wenn diese Fläche an die tatsächliche Position der Sondenspitze platziert wird, beinhaltet sie alle Punkte im Raum, in denen sie mit Wahrscheinlichkeit als S gemessen wird; alle Punkte die von dieser Fläche eingeschlossen werden, werden mit einer noch höheren Wahrscheinlichkeit gemessen. Diese Oberflächen haben für multi-dimensionale Gaußsche Verteilungen die Form eines Ellipsoids. [1, 6]

Die Darstellung der Kovarianz erfolgt auf Grundlage der Hauptachsenanalyse (PCA-Analyse), die durch Singulärwertzerlegung der Kovarianzmatrix die Eigenvektoren / Hauptachsen der Kovarianzmatrizen (die gleichermaßen Hauptachsen des darzustellenden Ellipsoids sind), und die Eigenwerte als die Länge der Hauptachsen liefert. In weiterer Folge sprechen wir von Fehlerellipsoiden.

In diesem Projekt wurden ein magnetischer Aurora Tracker (NDI, Deutschland) mit einem trinokularen optischen Tracker, easyTrack 500 (atracsys, Schweiz) kombiniert.

Verarbeitung

Zur Auswertung der Messdaten wurde eine Applikation basierend auf das Toolkit IGSTk³ geschrieben, das die Daten der zwei Tracker zueinander registriert, kombiniert und in verschiedenen Schnitten darstellt. Dazu sind folgende Schritte nötig: Messung der Kovarianzen, Kalibrierung der Sonde für beide Tracker, Registrierung der beiden Tracker zueinander, Propagation der Kovarianzen in das relevante Koordinatensystem, und Darstellung.

Die Messung der Kovarianz erfolgte auf Basis von rohen Messdaten. Dabei wurden, ohne die Sonde zu bewegen, pro Tracker mehrere hundert Messungen in und derselben Pose gesammelt.

Die statistische Auswertung aus dieser Stichprobe lieferte den (statistischen) Mittelwert und die Kovarianzmatrix. Unter der Annahme, dass Messfehler der Position und Rotation unabhängig voneinander sind, behandelten wir beide Informationen getrennt und berechneten zwei Kovarianzmatrizen wie folgt:

- Positionen wurden arithmetisch gemittelt; Rotationen wurden in Quaternionen gemessen, und deren Mittelwert wurde auf Länge 1 normiert. [3]
- Die n gemessenen Positionen und Rotationen abzüglich dieses Mittelwerts wurden in eine $n \times 3$ -Matrix D_p bzw. einer $n \times 4$ -Matrix D_r eingetragen, in der jede Zeile einer Realisierung entspricht.
- Im Anschluss berechnen sich die Kovarianzmatrizen durch $C_p = D_p^T D_p$ bzw. $C_r = D_r^T D_r$.

Damit sich Messdaten auf die Sondenspitze beziehen wurden die Sensoren mit einer Pivot-Kalibrierung [1] mit jeweils 100 Punkten **kalibriert**. Da der magnetische Sensor fest mit der optischen Sonde verbunden wurde, beziehen sich die Messungen des magnetischen Sensors auch auf die Spitze der optischen Sonde und beide Trackingsysteme sind auf denselben Punkt kalibriert.

Die erhaltene Kalibrierungs-Transformation T_{kalib} wurde in allen folgenden Schritten an jede Positionsmessung angewendet. Die kalibrierten Geräte wurden in weiterer Folge miteinander **registriert**. Für die Registrierung wurde das Landmarken-basierte Verfahren von Berthold K. P. Horn angewendet, das Paare von Quaternionenbasierten Posen akzeptiert und die Summe ihrer quadrierten Abstände minimiert [5]. Die Sonde wurde manuell im Raum bewegt, und währenddessen wurde die Pose der Sondenspitze von beiden Trackern verfolgt. Dadurch entstanden Paare von gleichzeitig gemessenen Punkten, die als Eingabe zur Landmarken-basierten Registrierung dienen. Zur Annahme von Gleichzeitigkeit wurden dabei für jede Messung Timestamps und ein Timeout von $1000/updaterate + 20$ ms zur Hilfe genommen; nur bei Überschneidung wird ein Punktpaar angenommen.

Die Registrierung aus diesen Punktpaaren lieferte uns die lineare Koordinatentransformation T_{reg} (sowohl Verschiebung als auch Drehung) der Koordinaten des magnetischen Trackers in das Koordinatensystem des optischen Trackers. Somit können beide Informationsquellen in ein einziges Koordinatensystem überführt werden.

Über diese Ketten von Operationen wurden die Positionen bestimmt:

$$\text{Für den optischen Tracker: } p_o^{(o)} = T_{kalib} \circ p_o \quad (2.1)$$

$$\text{Für den magnetischen Tracker: } p_m^{(o)} = T_{reg} \circ T_{kalib} \circ p_m \quad (2.2)$$

Die zur gleichen Zeit gemessenen und errechneten Posen $p^{(o)}$ sind durch die Registrierung nun Realisierungen derselben Zufallsvariablen im selben Koordinatensystem.

Propagation der Kovarianz

Die anfangs gemessene Kovarianz gilt in den Koordinatensystemen der unkalibrierten Messungen; sie muss jedoch in kalibrierten und registrierten Koordinatensystem ausgedrückt werden. Die Kovarianz muss nun über eine Kette von Operationen – wie die Posen – propagiert werden. Jede der Operationen (2.1) bzw. (2.2) wird nun auf eine Kovarianzmatrix angewendet.

Aus den Transformationsoperationen lassen sich Jakobi-Matrizen errechnen, die in weiterer Folge auf die Kovarianzmatrizen angewendet werden können, indem sie – von links unverändert und von rechts transponiert – mit der Kovarianzmatrix multipliziert wird. [8] Die Jakobimatrix, die auf die Kovarianzmatrix C_p angewendet wird, ist die Rotationsmatrix. Die Jakobimatrix, die auf die Kovarianzmatrix C_r angewendet wird, ist die Rotationsmatrix für Quaternion-Rotationen.

³ Image-Guided Surgery Toolkit, verfügbar unter <http://www.igstk.org/>

Somit erreichen wir die Kovarianzmatrizen, die die Messfehler im kalibrierten Koordinatensystem des optischen Trackers darstellen, durch folgende Matrixmultiplikationen:

$$\begin{aligned} C_{p,o}^{(o)} &= J_{o,kalib,p} C_p^{(o)} J_{o,kalib,p}^T, \\ C_{r,o}^{(o)} &= J_{o,kalib,r} C_r^{(o)} J_{o,kalib,r}^T, \\ C_{p,m}^{(o)} &= J_{reg,p} J_{m,kalib,p} C_p^{(m)} J_{m,kalib,p}^T J_{reg,p}^T, \\ C_{r,m}^{(o)} &= J_{reg,r} J_{m,kalib,r} C_r^{(m)} J_{m,kalib,r}^T J_{reg,r}^T. \end{aligned}$$

Zusammenführung der Messungen und Kovarianzen

Vorerst kann eine der zwei gemessenen Posen zur Darstellung verwendet werden. Die entsprechenden Fehlerellipsoide haben verschiedene Hauptachsen und Orientierungen.

Die Pose der Sondenspitze, gemessen von den beiden Tracker-Systemen im selben Koordinatensystem $p_o^{(o)}$ und $p_m^{(o)}$ und die Kovarianzen $C_{p,o}^{(o)}$, $C_{r,o}^{(o)}$, $C_{p,m}^{(o)}$ und $C_{r,m}^{(o)}$ sind bekannt. Die Posen werden in ihre Positionsanteile $p_{p,o}^{(o)}$ bzw. $p_{r,m}^{(o)}$ und Rotationsanteile $p_{r,o}^{(o)}$ bzw. $p_{r,m}^{(o)}$ zerlegt. Die endgültige Position p_p und Rotation p_r , ergibt sich aus [7]

$$\begin{aligned} p_p &= C_{p,m}^{(o)} (C_{p,o}^{(o)} + C_{p,m}^{(o)})^{-1} p_{p,o}^{(o)} + C_{p,o}^{(o)} (C_{p,m}^{(o)} + C_{p,o}^{(o)})^{-1} p_{p,m}^{(o)}, \\ p_r &= C_{r,m}^{(o)} (C_{r,o}^{(o)} + C_{r,m}^{(o)})^{-1} p_{r,o}^{(o)} + C_{r,o}^{(o)} (C_{r,m}^{(o)} + C_{r,o}^{(o)})^{-1} p_{r,m}^{(o)}. \end{aligned}$$

Die Kovarianzen dieser Variablen ergeben sich aus

$$\begin{aligned} C_p &= C_{p,m}^{(o)} (C_{p,o}^{(o)} + C_{p,m}^{(o)})^{-1} C_{p,o}^{(o)} + C_{p,o}^{(o)} (C_{p,m}^{(o)} + C_{p,o}^{(o)})^{-1} C_{p,m}^{(o)}, \\ C_r &= C_{r,m}^{(o)} (C_{r,o}^{(o)} + C_{r,m}^{(o)})^{-1} C_{r,o}^{(o)} + C_{r,o}^{(o)} (C_{r,m}^{(o)} + C_{r,o}^{(o)})^{-1} C_{r,m}^{(o)}. \end{aligned}$$

3 Ergebnisse

Es wurden zwei Experimente mit synthetischen Daten durchgeführt, um Eigenheiten der Fehlerkombination zu erfahren. Zwei Sensoren wurden simuliert, indem ihre Koordinaten aus unabhängigen Gauß-Verteilungen mit verschiedenen Standardabweichungen entnommen. Die resultierenden Posen und Kovarianzen wurden durch Registrierung in ein gemeinsames Koordinatensystem gebracht, dort kombiniert und als Fehlerellipsoide dargestellt. Als Fehlermaß wurden die Längen der Hauptachsen dieser Ellipsoide aus den Eigenwerten der Kovarianzmatrix ermittelt.

Im ersten Experiment hatten die simulierten gemessenen Positionen des ersten Tools für die X-, Y- und Z-Achse jeweils Standardabweichungen von 5, 0.1 und 0.2. Beim zweiten Tool wurden 1, 1, und 8 genommen. Diese wurden so gewählt, dass sich die größten Standardabweichungen nicht auf derselben Achse liegen (5 auf der X-Achse, 8 auf der Z-Achse).

Die Messung aus diesen Verteilungen lieferten folgende Hauptachsen-Längen:

- Erstes Objekt: 20.0134, 0.0363, 0.0100
- Zweites Objekt: 69.8587, 1.3407, 0.9549
- Vereinte Kovarianz: 1.1306, 0.0363, 0.0099
-

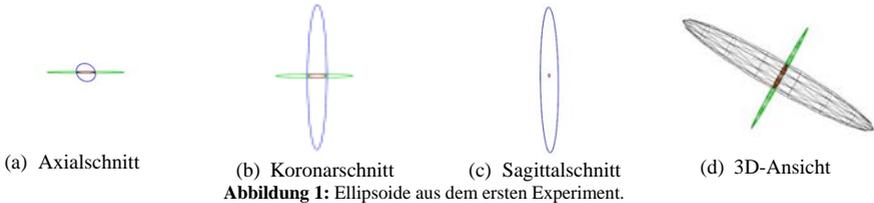


Abbildung 1: Ellipsoide aus dem ersten Experiment.

In Abb. 1 werden die Ellipsoide der gemessenen Kovarianzmatrizen grün (1.) und blau (2.) dargestellt. Man sieht eindeutig, dass ihre jeweiligen längsten Hauptachsen beinahe normal aufeinander stehen. Das kombinierte Ellipsoid wird rot dargestellt.

Im zweiten Experiment wurden wieder zwei Messungen simuliert, diesmal mit den Standardabweichungen 1, 1, 8 (erstes Objekt) und 1.5, 1.5, 7 (zweites Objekt).

Die daraus resultierenden Längen der Hauptachsen der Fehlerellipse waren:

- Erstes Objekt: 70.4038, 1.0731, 0.8028
- Zweites Objekt: 43.6937, 2.5158, 2.0395
- Kombiniert: 26.7937, 0.7161, 0.5993

Im Vergleich zum ersten Experiment sind hier die Hauptachsen des kombinierten Ellipsoids viel größer, was darauf hinweist, dass die kombinierte Messung hier um einiges unpräzise ist. Auch in der Visualisierung in Abb. 2 zeigt sich intuitiv, dass das Fehlerellipsoid der kombinierten Messungen einen größeren Raum einnimmt.



Abbildung 2: Ellipsoide aus dem zweiten Experiment (axial, koronar, sagittal und 3D-Ansichten).

Das dritte Experiment wurde mit dem magnetischen und dem optischen Tracker durchgeführt. Von jedem der Tracker wurde – repräsentativ für das gesamte Sichtfeld der Tracker – eine Kovarianz ermittelt, die die Präzision der gemessenen Daten in alle Richtungen darstellt.

Es wurde der optischen Tracker atracsys easyTrack 500 (mit einer spezifizierten Genauigkeit von < 0.2 mm Abweichung in < 1 Meter Abstand und < 0.3 mm Fehler bis 1.5 Meter Abstand mit einer Sonde mit vier aktiven Markern) und der elektromagnetischen Tracker Aurora von NDI mit einer Sensorspule von 10 mm Länge verwendet.

Die Sensorspule wurde an der optischen Sonde befestigt. Die metallene Sondenspitze des easyTrack wurde durch ein Kunststoffmaterial ersetzt, um Störungen im Magnetfeld zu minimieren.

Die Längen der Hauptachsen ergaben sich zu 95.371910, 21.387284, und 0.035506 für die optische Sonde; 60.05445, 5.77311 und 0.90542 für den magnetischen Sensor und 16.808039, 0.948716, und 0.035224 für die kombinierten Daten.



Abb. 3: Ellipsoide aus dem dritten Experiment.

4 Diskussion

Die präsentierten Methoden der Darstellung von Messungspräzision und der Kombination von zwei Messungen derselben Pose können in der Intraoperativen Navigation verwendet werden, auch für Augmented Reality. [7, 1] Damit kann ein Bewusstsein für die Vertrauenswürdigkeit der dargestellten Informationen geschaffen werden.

Die Ergebnisse legen nahe, dass die relative Orientierung der Tracker erheblichen Einfluss auf die kombinierte Präzision hat. So kann mit einer zueinander orthogonalen Orientierung von optischen Trackern der Messfehler in die z-Richtung (Tiefe) extrem minimiert werden. Eine parallele Ausrichtung bringt praktisch keinen Effekt.

Diese Arbeit beschäftigt sich lediglich mit unsystematischen Fehlern. Es kommen weitere Fehler durch die Benutzung wie Kalibrierung oder Registration zustande, die sich auf die Genauigkeit und Präzision weiter auswirken. Daher ist zu beachten, dass die dargestellte Methode nur einen Teil der Informationen über die Datenqualität liefert.

5 Zusammenfassung

Es wurde eine Methode zur Visualisierung von Impräzision von Messdaten präsentiert und es konnte gezeigt werden, dass durch Kombination mehrerer Informationsquellen derselben Position die Präzision dieser Daten verbessert werden kann.

6 Referenzen

- [1] Martin Bauer. *Tracking Errors in Augmented Reality*. Dissertation, Technische Universität München, 2007
- [2] J. Berry. B. W. O'Malley, S. Humphries, and H. Staecker. *Making image guidance work: understanding control of accuracy*. *Ann Otol Rhinol Laryngol*, **112**(8) 689-692, 2003
- [3] C. Gramkow. *On averaging rotations*. *International Journal of Computer Vision*, **42** 7-16, 2001.
- [4] Ö. Güler. *Novel paradigms for quality assurance in 3D-navigation: application accuracy and temporal synchronization of positional and video data*. PhD thesis, Medizinische Universität Innsbruck, November 2011.
- [5] B. K. P. Horn. *Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions*. *Journal of the Optical Society of America A*, **4**(4) 629-642, 1987.
- [6] D. Y. Hsu. *Spatial Error Analysis - A Unified Application-Oriented Treatment*. Wiley-IEEE Press, August 1998.
- [7] W. Hoff and T. Vincent. *Analysis of head pose accuracy in augmented reality*. *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, **6**(4), 2000.
- [8] X. Pennec, J.-P. Thirion. *A Framework for Uncertainty and Validation of 3-D Registration Methods Based on Points and Frames*. *International Journal of Computer Vision*, **25**(3) 203-229, 1997.