

Joint CTAC/CURAC Workshop

Genauigkeit in der
computerassistierten Chirurgie

Joint CTAC/CURAC Workshop

Genauigkeit in der computerassistierten Chirurgie

T. Lange¹, Peter M. Schlag²

¹ Charité – Universitätsmedizin Berlin, Experimental and Clinical Research Center, Berlin, Germany

² Charité – Universitätsmedizin Berlin, Charité Comprehensive Cancer Center, Berlin, Germany

Kontakt: thomas.lange@charite.de

Abstract:

Eine Hauptmotivation für die Entwicklung und den Einsatz von computerassistierten Chirurgiesystemen ist meist eine genauere Planung und Umsetzung eines chirurgischen Eingriffs zu ermöglichen als dies mit herkömmlichen Mitteln machbar ist. Die genaue 3D Modellierung anatomischer Strukturen, die genaue Simulation mechanischer oder physiologischer Prozesse können die Eingriffsplanung, genaue Navigations- oder mechatronische Assistenzsysteme können die Eingriffsdurchführung entscheidend verbessern.

Was aber ist Genauigkeit „genau“, wie wird sie im jeweiligen Kontext gemessen und ausgewertet? In Publikationen werden oft verschiedene Parameter verwendet, die sich nur bedingt oder gar nicht für die Bestimmung der erzielbaren Genauigkeit eignen. Dieser Workshop soll Licht in den Begriffsdschungel bringen, die relevante Terminologie einführen und bestehende Standards oder Quasi-Standards aufzeigen. Außerdem sollen empirische Genauigkeitsmessverfahren an Referenzobjekten (Phantomen), Referenzdatenbanken, Fehlerketten und die analytische Betrachtung der Genauigkeit thematisiert werden.

Schlüsselworte: Genauigkeit, Referenzdatenbanken, Target Registration Error (TRE), Total Targeting Error (TTE), uncertainty visualization, uncertainty propagation

1 Motivation und Ziel des Workshops

Die computerassistierte Chirurgieplanung soll Operateure in die Lage versetzen, geeignete Behandlungsstrategien für immer komplexere Aufgaben zu entwickeln und mögliche Risiken eines geplanten Eingriffs bereits vor der Operation verlässlich abschätzen zu können. Eine essentielle Grundlage für einen solchen Planungsprozess ist eine genaue geometrische Modellierung der relevanten anatomischen Strukturen bzw. eine genaue Simulation von wichtigen physiologischen Vorgängen. Eine genaue Planung erfordert meist eine ebenso genaue klinische Umsetzung, damit die geplanten Ziele erreicht werden können. Intraoperative Navigationssysteme und mechatronische Assistenzsysteme sind moderne Hilfsmittel für den Chirurgen, um eine genaue Umsetzung zur erzielen.

Informationen über die erzielbare (und erzielte) Genauigkeit bzw. die vorhandenen Unsicherheiten sind also für den Einsatz computerassistierter Planungssysteme und intraoperativer Navigations- oder mechatronischer Assistenzsysteme eine unabdingbare Voraussetzung. In den meisten wissenschaftlichen Veröffentlichungen und auch von Herstellern kommerzieller Systeme wird die Genauigkeit der vorgestellten Systeme bewertet. Allerdings werden oft unterschiedliche Parameter angegeben, die mit verschiedenen Methoden und Messprotokollen gewonnen wurden. Dadurch wird sowohl der Vergleich verschiedener Systeme erschwert, als auch die Beurteilung eines erfolgversprechenden und sicheren Einsatzes. Hinzu kommt, dass die Interpretation der Genauigkeitsparameter und Messprotokolle ein Basiswissen erfordern, das nicht in jeder Veröffentlichung neu vermittelt wird. Strauss et al. [1] haben aus 15 Veröffentlichungen über Navigationssysteme im Kopfbereich in den Jahren 1998-2004 die erstaunliche Anzahl von 24 Bezeichnungen für Genauigkeitsangaben und die eigentlich damit gemeinten 5 Parameter zusammengestellt.

Dieser Workshop ist deshalb ein erster Versuch, grundlegende Begriffe zur Genauigkeit und den aktuellen Stand zu Methoden der Genauigkeitsbestimmung und vorhandenen Standards stärker in der CAS community zu verbreiten und einen gemeinsamen Wissensstand zur erreichen. Langfristig hoffen wir, dass diese Initiative dazu beiträgt, gemeinsame Standards zu schaffen, bzw. bestehende Standards konsequenter zu nutzen, gemeinsam Referenzdatenbanken aufzubauen und offene Probleme der Genauigkeitsbetrachtung zu identifizieren.

2 Inhalte des Workshops

Zunächst werden wir einige grundlegende Begriffe klären und gegeneinander abgrenzen: Was ist Genauigkeit? Was ist der Unterschied zwischen Präzision, Richtigkeit und Genauigkeit? Was ist der wahre Wert und was sind Referenzwerte? Dabei werden wir die Terminologie verwenden, die in nationalen (DIN) und internationalen (ISO) Normen [2,3] festgelegt wurden. Auf die statistische Beschreibung der Messwerte wird kurz eingegangen werden.

Danach teilt sich der Workshop in die drei Bereiche: Planungssysteme, Navigationssysteme und mechatronische Assistenzsysteme. Für jeden dieser Bereiche werden der Genauigkeitsbegriff im jeweiligen Kontext erläutert und die bekanntesten Methoden zur Genauigkeitsbestimmung sowie vorhandene Standards oder Quasi-Standards vorgestellt.

Wie bereits erwähnt ist die genaue geometrische Modellierung relevanter anatomischer Strukturen essentiell für die computerassistierte Planung chirurgischer Eingriffe. Die Grundlage dieser Modellierung ist in der Regel eine Segmentierung der anatomischen Strukturen in den verfügbaren Bilddaten. Daher hat die Genauigkeit der Segmentierung einen großen Einfluss auf die Genauigkeit des gesamten Planungsprozesses. Für die quantitative Bestimmung der Segmentierungsgenauigkeit wird am häufigsten ein Satz von klinischen Testbildern mit von Experten interaktiv erzeugten Referenzsegmentierungen herangezogen (siehe [4], Kap. 3). Die von einem Segmentierungsverfahren erzeugten Ergebnisse werden mit diesen Referenzsegmentierungen verglichen und nach bestimmten Ähnlichkeitsmaßen (z.B. Größe der Überlappung) bewertet [5]. Für einen repräsentativen Satz von Testdaten, Referenzsegmentierungen von möglichst mehreren Experten für jeden einzelnen Testdatensatz erstellen zu lassen, ist mit einem erheblichen Aufwand verbunden und erfordert einen Zugang zu solchen klinischen Daten. Lobenswerterweise wurden in den letzten Jahren mehrere Segmentierungswettbewerbe im Rahmen von MICCAI-Konferenzen initiiert und durchgeführt, bei denen öffentlich zugängliche Referenzdatenbanken entstanden sind (siehe bspw. [5] für einen Wettbewerb zur Lebersegmentierung). Diese Referenzdatenbanken stellen Quasi-Standards dar, mit denen sich die Genauigkeit von Segmentierungsverfahren messen und vergleichen lässt. Neben diesen Aspekten zur Segmentierungsgenauigkeit werden wir im Workshop auch Quellen weiterer Ungenauigkeiten bei der Weiterverarbeitung der Segmentierung zu einer Oberflächenrepräsentation der anatomischen Strukturen erörtern.

Neben der Genauigkeit der geometrischen Modellierung anatomischer Strukturen spielt die Berechnung oder Simulation physiologischer Vorgänge oft eine wichtige Rolle bei der computerassistierten Planung [4], Kap. 5. Ein Beispiel ist die Berechnung des Blutflusses aufgrund von Phase-Contrast (PC) MRT-Daten. Friman et al. [6] berechnen die Unsicherheiten bei der Flussberechnung und visualisieren diese. Die Visualisierung von Unsicherheiten in einem Planungssystem steckt noch in den Kinderschuhen, auch wenn es vereinzelt Ansätze zumindest für Teile der Planung gibt. Die mitunter langen Fehlerketten in einem komplexen Planungsprozess stellen eine Herausforderung für die Bestimmung von Unsicherheiten dar.

Kommen wir nun zur genauen intraoperativen Umsetzung geplanter Eingriffe mittels Navigationssystemen. Je genauer man den gesamten Navigationsprozess betrachtet, umso mehr Aspekte entdeckt man, die einen Einfluss auf die Gesamtgenauigkeit des Navigationssystems haben. Bei konventionellem Navigationssystemen sind die wesentlichen Einflussfaktoren die Auflösung und Qualität der Bilddaten, die Genauigkeit des Lokalisiersystems (Trackingsystems), das Design der Referenzrahmen (Lokalisierrahmen) in Kombination mit den chirurgischen Instrumenten (Tool Design), das Registrierungsverfahren und die Aufrechterhaltung des registrierten Zustands. Auf diese übergeordneten Komponenten wirkt eine Vielzahl von einzelnen Einflussfaktoren (siehe auch [4], Kap. 11).

Wir beginnen mit der Betrachtung von Lokalisiersystemen, welche das Herzstück eines Navigationssystems darstellen. Es wird die Frage geklärt, wie die Genauigkeit eines Lokalisiersystems empirisch bestimmt wird und welche Messprotokolle es gibt. Auch die Einflussgrößen auf die Genauigkeit werden vorgestellt.

Die Registrierungsgenauigkeit ist eine weitere wichtige Einflussgröße auf die Gesamtgenauigkeit eines Navigationssystems. Zunächst werden die für die Bild-zu-Patienten-Registrierung wichtigen Begriffe Fiducial Localization Error (FLE), Fiducial Registration Error (FRE) and Target Registration Error (TRE) unterschieden [7]. Nur der TRE erlaubt eine Aussage über die Registrierungsgenauigkeit, oft wird aber nur der FRE in Veröffentlichungen abgeben, da dieser erheblich einfacher zu ermitteln ist. Anschließend werden die verschiedenen Einflussgrößen auf die Registrierungsgenauigkeit diskutiert (siehe auch [4], Kap. 9)

Nachdem die Genauigkeit der beiden wichtigsten Bausteine eines Navigationssystems analysiert wurden, wird jetzt die Gesamtgenauigkeit des Systems untersucht. Die Abweichung zwischen der Lage eines chirurgischen Instruments relativ zu bestimmten anatomischen Zielstrukturen, wie sie dem Chirurgen auf dem Bildschirm präsentiert wird, und der tat-

sächlichen Lage des Instruments relativ zu denselben Strukturen im Patienten ist letztlich das, was für den Chirurgen relevant ist. Für diese „Gesamtgenauigkeit“ oder diesen „Gesamtnavigationsfehler“ gibt es bisher keinen einheitlichen Begriff. Wir schließen uns der Bezeichnung von Fitzpatrick [8] an, der von Total Targeting Error (TTE) spricht. Neben der empirischen Bestimmung des TTE für konkrete klinische Anwendungen, liefern zunehmend Simulationen und analytische Untersuchungen der Genauigkeit wertvolle Erkenntnisse über die optimale Konfiguration eines Systems, sowie die theoretischen Grenzen und entscheidenden Einflussfaktoren (Sensitivitätsanalyse) auf die Genauigkeit. Bspw. wurde das Design der Referenzrahmen des Lokalisiersystems in Kombination mit den verwendeten chirurgischen Instrumenten (Tool Design) auf seinen Einfluss bezüglich der Genauigkeit analytisch untersucht [9]. Aus der Unsicherheit des Lokalisiersystems und des Tool Designs haben Bauer et al. [10] die Unsicherheit an der Instrumentenspitze analytisch bestimmt und online visualisiert. Simpson et al. [11] sind noch einen Schritt weitergegangen und haben neben der Unsicherheit des Lokalisiersystems auch die der Instrumentenkalibrierung und Patientenregistrierung berücksichtigt, um die Unsicherheit an der Instrumentenspitze zu berechnen und zu visualisieren.

Bei mechatronischen Assistenzsystemen hängt die Relevanz der Genauigkeit vom Konzept der Assistenz ab. Bei Telemanipulatoren (Master-Slave Systemen) wie dem DaVinci System spielt die Genauigkeit eine eher untergeordnete Rolle, da der Operateur über das Videobild seine Instrumente ggf. unbewusst nachsteuert. Bei navigierten Medizinrobotern sind analoge Genauigkeitsaspekte wie bei den Navigationssystemen relevant, aber auch spezifische Aspekte, wie die genaue Lokalisierung des Roboterflansches, sind entscheidend, da Medizinroboter teilweise eine geringe absolute Genauigkeit aufweisen, die erst durch die Verwendung von Navigationssystemen entscheidend verbessert wird. Insbesondere bei der Einhaltung von so genannten verbotenen Bereichen in denen Risikostrukturen liegen, ist die Genauigkeit von besonderer Relevanz (ebenso bei Navigated Control Ansätzen). Die online-Nachführung des navigierten Instruments durch den Roboter erfolgt durch eine dynamische Regelung, die besondere Anforderungen an die Abtastzeiten und das Rauschverhalten des Lokalisiersystems stellen, um niedrige Latenzzeiten und störungsfreie Bewegungen des Roboters zu ermöglichen (siehe auch [4], Kap. 12).

Die klinische Bewertung, in wie weit eine Erhöhung der Genauigkeit wirklich einen Benefit für den Patienten darstellt wird nur beispielhaft diskutiert werden. Die verschiedenen Anforderungen der einzelnen chirurgischen Disziplinen würden den Rahmen dieser Workshops sprengen.

3 Referenzen

- [1] G Strauss, M Hofer, W Korb, C Trantakis, D Winkler, O Burgert et al., Genauigkeit und Präzision in der Bewertung von chirurgischen Navigations- und Assistenzsystemen, HNO 54: 78-84, 2006
- [2] DIN-Norm 55350-13:1987-07 (Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe zur Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und Ermittlungsergebnissen)
- [3] ISO-Norm 5725-1:1994 [Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 1: General principles and definitions]
- [4] PM Schlag, S Eulenstein, T Lange, Computerassistierte Chirurgie, Urban und Schwarz Verlag, Elsevier GmbH, 2010
- [5] T Heimann, B van Ginneken, M Styner, et al., Comparison and Evaluation of Methods for Liver Segmentation from CT Datasets, IEEE Transactions on Medical Imaging 28(8): 1251-1265, 2009
- [6] O Friman, A Hennemuth, A Harloff, J Bock, M Markl, HO Peitgen, Probabilistic 4D flow tracking and uncertainty estimation, Medical Image Analysis, Epub ahead of print
- [7] J Fitzpatrick, J West, C Maurer, Predicting error in rigid-body point-based registration, IEEE Transactions on Medical Imaging 17(5):694-702, 1998
- [8] J Fitzpatrick, The role of registration in accurate surgical guidance. Journal of Engineering in Medicine 224(5): 607-622, 2009
- [9] J West, C Maurer, Designing Optically Tracked Instruments for Image-Guided Surgery, IEEE Transactions on Medical Imaging 23(5):533-545, 2004
- [10] M Bauer, M Schlegel, D Pustka, N Navab, G Klinker, Predicting and Estimating the Accuracy of n-ocular Optical Tracking Systems, The Fifth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR06)
- [11] A Simpson, The Computation and visualization of uncertainty in surgical navigation, Ph.D. Thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 2010

