

Evaluation der 3-D-Präzision eines bilddatengestutzten chirurgischen Navigationssystems

Jürgen Hoffmann¹, Dirk Troitzsch¹, Michael Schneider¹,
Frank Reinauer² und Dirk Bartz³

¹Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie,
Universitätsklinikum Tübingen, 72076 Tübingen

²Karl Leibinger Medizintechnik, 78570 Mühlheim

³Wilhelm-Schickard-Institut für Informatik, Graphisch-Interaktive Systeme,
Eberhard-Karls-Universität Tübingen, 72076 Tübingen
Email: juergen.hoffmann@uni-tuebingen.de

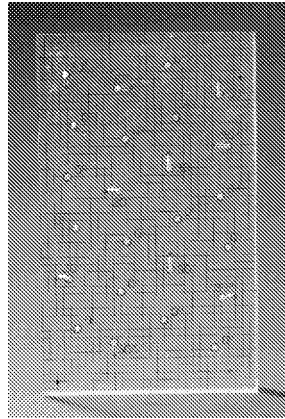
Zusammenfassung. Die bilddatengestutzte chirurgische Navigation findet für sehr unterschiedliche Indikationen bereits seit einigen Jahren klinische Verwendung. Die Weiterentwicklung der Hardware und insbesondere die Verbesserung der Bilddatenqualitat machte eine Re-Evaluation der Genauigkeit dieser Technik unter Berücksichtigung innovativer Konzepte erforderlich. Wir stellen die Ergebnisse der Präzisionsmessung bei Verwendung eines neuartigen standardisierten Modells vor. Im Vordergrund stand die metrische Analyse der Genauigkeit der Tooltip-Orientierung, jedoch auch die Vermessung der Trajektorien-Orientierung im dreidimensionalen Raum. Dazu kam ein 3D-Digitalisierer zum Einsatz, die Auswertung erfolgte in einer CAD-Umgebung.

1 Einleitung

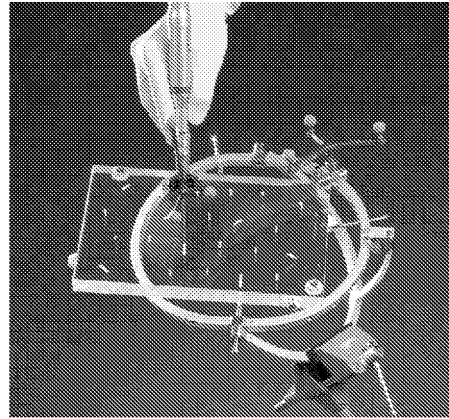
Für verschiedene operative Eingriffe in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie ist die korrekte dreidimensionale Orientierung von Instrumententrajektorien obligatorisch. So bedingt eine korrekte Platzierung dentaler und kraniofazialer Implantate unter Berücksichtigung des individuellen Knochenangebots deren spätere pro- bzw. epithetische Versorgung. Ferner dürfen durch eine Bohrung Risikostrukturen (wie z.B. Nerven und Blutgefäße) nicht verletzt werden [1-3]. Neben der Prazisionsbeurteilung für die Insertion alloplastischer Implantate kommt der korrekten dreidimensionalen Orientierung referenzierbarer chirurgischer Instrumente eine hohe Bedeutung zu.

Daher sollte die Genauigkeit des Auffindens vordefinierter Zielpunkte sowie der räumlichen Orientierung der Bohrungen in Bezug auf die vorgegebene Referenz in einer experimentellen in-vitro-Studie untersucht werden.

Abb. 1. Die auf Plexiglas als Modellgrundmaterial basierende Studie.



(a) Plexiglas-Phantommodell mit definierten Bohrlöchern



(b) Navigationsgestützte Bohrungen am Plexiglasrohling

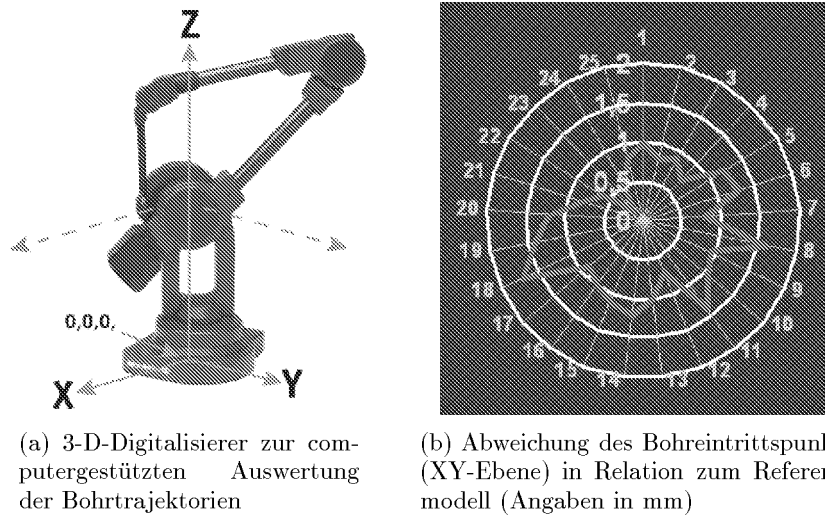
2 Material und Untersuchungsmethodik

Für die Studie wurde zunächst ein modulares Holzmodell entworfen und aufgebaut. Anatomische Risikostrukturen, in unserer Modellsituation z.B. der Nervus alveolaris, wurden durch eingelegte Kunststoffschichten mit differenter Strahlendichte imitiert. Dieses Spezialphantom wurde mit Titanschrauben verschiedener Dimensionen und Platten sowie Klebmarkern bestückt und mittels hochauflösender Computertomografie (Somatom Sensation 16, Siemens) gescannt. Nach dem Einlesen der Schichtbilddaten wurde das Modell über das Anfahren der Marker („Fiducials“) durch das Navigationssystem (VectorVisionTM, BrainLAB) registriert.

Im ersten Ansatz wurden die Schraubenköpfe navigationsorientiert aufgesucht und die Differenz zur tatsächlichen Lage dokumentiert. In einem zweiten Schritt wurden die Schrauben entfernt, die Öffnungen verschlossen und diese navigationsgeführt mit einem Spezialbohrer neu gebohrt. Hierbei ergab sich eine materialbedingte ungenaue Reproduzierbarkeit der Bohrungen.

Wir verwendeten daher für die weiteren Untersuchungen ein Plexiglasmodell definierter Geometrie (Abb. 1a). Hier erfolgten die Referenzbohrungen durch eine CNC-gesteuerte Bohrmaschine. Das Plexiglasreferenzmodell wurde ebenfalls in der oben beschriebenen Weise computertomographisch untersucht. Zur dreidimensionalen Orientierung waren hier, wie am Holzmodell, Klebmarker angebracht worden.

Die Bilddaten wurden nach Konversion in das Navigationsgerät eingelesen. Ein Plexiglasrohling wurde dann mit Klebmarkern in gleicher Position versehen und dreidimensional referenziert (Abb. 1b). Die Bohrungen an diesem Rohling erfolgten schliesslich navigationsgestützt auf Basis der am Referenzmodell akquirierten Bilddaten. Hierzu verwendeten wir ein mechanisch angetriebenes

Abb. 2. Messung der Abweichungen vom Referenzmodell.

konventionelles Dental-Handstück sowie Spiralbohrer mit definiertem Gewindedurchmesser.

Mittels eines hochpräzisen 3D-Digitalisierers (Immersion, San Jose (USA), Abb. 2a) wurde zum einen die Geometrie des Plexiglasmodells überprüft, zum anderen wurde der Eintritts- sowie Endpunkt der Bohrung abgetastet und die Genauigkeit im Vergleich zur vorgegebenen Ausgangssituation unter Verwendung eines CAD-Systems (Pro-Engineer, Fa. PTC) analysiert.

3 Ergebnisse

Das Identifizieren und Anfahren aller Schraubenköpfe gelang mit einer Genauigkeit zwischen 0,7 und 1,2 mm, als Differenz zwischen geplanter und tatsächlicher Position. Die Mehrzahl der insgesamt 240 Bohrungen konnten mittels Navigationsführung präzise durchgeführt werden, d. h. mit einer mittleren Genauigkeit von 0,8 mm und $0,3^\circ$ Achsenabweichung (Abb. 2b). Jedoch waren auch Ortsabweichungen (1,5-2,2 mm) bei korrekter Achsenrichtung sowie Abweichungen der Achsenrichtung ($0,6-0,9^\circ$) bei korrektem Bohreintritt festzustellen.

4 Diskussion

Die intraoperative Genauigkeit der auf Bilddatenbasis definierten Trajektorien ist nur schwer am Patienten eruierbar. Bislang wurden zwar Studien über die Genauigkeit von Implantatpositionen an Leichenpräparaten durchgeführt [4, 1, 3]. Hiermit war jedoch eine Aussage über den Bezug zu Risikostrukturen (Nerven, Kieferhöhle), jedoch keine korrekte Angabe über die 3-D-Orientierung der Trajektorien möglich.

Ausgehend von der bewährten Praxis in Osteosynthese-Übungskursen wurde daher zunächst ein einfaches Modell für Präzisionsmessungen mit dem Werkstoff Holz aufgebaut. Im hochauflösenden CT-Scan konnten die einzelnen Schichten und Titan-Schrauben bzw. Platten sehr gut kontrastiert dargestellt werden. Am hölzernen Modell waren jedoch materialbedingt Deviationen der Bohrrichtung aufgrund des inhomogenen Werkstoffs nicht auszuschließen. Wir entschlossen uns daher, Plexiglas als Referenzmodell sowie für die navigationsgestützten Bohrungen am Rohling einzusetzen.

In früheren Untersuchungen waren zur Beurteilung der Bohrrichtungen zu- meist schichtbildgebende Verfahren eingesetzt worden, deren Messungenauigkeit nach unserer Einschätzung eine Präzisionsbeurteilung erschwert. In anderen Studien war nur eine Abweichung des Bohreins- oder Austritts bzw. deren Bezug zu kritischen Strukturen evaluiert worden [1, 5, 2, 3]. In unserer experimentellen Untersuchung konnten teilweise Differenzen von mehr als 1 mm und Abweichungen in der Achsenrichtung bei navigationsgestützten Bohrungen festgestellt werden.

Inwieweit diese gefundenen Genauigkeitsabweichungen für die klinische Praxis, d. h. Platzierung von Implantaten u. ä., tatsächlich relevant sind, muss in weiterführenden Studien evaluiert werden. Ferner ist festzustellen, dass Präzisionsmessungen in der hier beschriebenen Form nur eine Aussage über die kumulierten Fehler unterschiedlicher Ursache erlauben. So ist schon durch die Bildgebung, insbesondere bei bewegten Objekten, eine Artefaktbildung möglich. Darüberhinaus können weitere Ungenauigkeiten durch eine inadäquate Technik der Patientenregistrierung auftreten, weitere Mängel entstehen durch Fehler der z.B. optischen Objektregistrierung [5-7]. Wir werden daher unter Verwendung reproduzierbarer Modellsituationen eine weitergehende Fehleranalyse durchführen und die Bedeutung der Ergebnisse für die klinische Verwendung der Navigations-techniken bewerten.

Literaturverzeichnis

1. Gaggl A, Schultes G, Karcher H: Navigational precision of drilling tools preventing damage to the mandibular canal. *J Craniomaxillofac Surg* 29(5): 271-5, 2001
2. Wanschitz F, Birkfellner W, Watzinger F et al.: Evaluation of accuracy of computer-aided intraoperative positioning of endosseous oral implants in the edentulous mandible. *Clin Oral Implants Res* 13(1): 59-64, 2002
3. Watzinger F, Birkfellner W, Wanschitz F et al.: Placement of endosteal implants in the zygoma after maxillectomy: a Cadaver study using surgical navigation. *Plast Reconstr Surg* 107(3): 659-67, 2001
4. Birkfellner W, Solar P et al.: In-vitro assessment of a registration protocol for image guided implant dentistry. *Clin Oral Implants Res* 12(1): 69-78, 2001
5. Hassfeld S, Muhling J: Comparative examination of the accuracy of a mechanical and an optical system in CT and MRT based instrument navigation. *Int J Oral Maxillofac Surg* 29(6): 400-7, 2000
6. Hassfeld S, Muhling J: Computer assisted oral and maxillofacial surgery – a review and an assessment of technology. *Int J Oral Maxillofac Surg* 30(1): 2-13, 2001
7. Khadem R, Yeh CC et al.: Comparative tracking error analysis of five different optical tracking systems. *Comput Aided Surg* 5(2): 98-107, 2000