

Haptische Interaktion zur Planung von Nasennebenhöhlen-Operationen

Arno Krüger¹, Kristina Stampe¹, Ilka Hertel²,
Gero Strauß² und Bernhard Preim¹

¹ Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Simulation und Graphik
² Universitätskrankenhaus Leipzig, Abteilung HNO-Heilkunde

Zusammenfassung. Moderne Operationstechniken im Bereich der Nasennebenhöhlen bringen Vorteile für den Patienten, jedoch auch neue Herausforderungen für den Operateur mit sich. Durch die endoskopischen Verfahren ist die Navigation und Orientierung während des Eingriffs erschwert und setzt eine besonders gründliche Planung voraus. Bei Problemfällen ist die Nutzung von 2d-Schichtbildern, die traditionell Verwendung finden, schwieriger. Vor allem bei Rezidivoperationen fehlen oft zur Orientierung wichtige anatomische Landmarken. In diesem Paper wird ein System vorgestellt, das mit Hilfe virtueller Endoskopie eine patientenindividuelle Planung von endoskopischen Nasennebenhöhlen-Eingriffen unterstützt. Dabei wird besonderer Wert auf die Interaktion mit der 3d-Darstellung und eine intuitive Nutzerführung gelegt.

1 Einleitung

Für die Behandlung von chronischen Nasennebenhöhlen (NNH)- Entzündungen haben sich minimal-invasive Operationstechniken gegenüber der Radikalchirurgie durchgesetzt. Für die Durchführung endoskopischer Eingriffe ist Erfahrung, ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen sowie manuelle Geschicklichkeit notwendig. Durch die eingeschränkte Sicht auf das Operationsfeld muss sich der Chirurg bei der Navigation durch die Hohlräume an anatomischen Landmarken orientieren. Durch anatomische Variationen, pathologische Veränderungen oder vorangegangene Eingriffe kann die Orientierung während des Eingriffs erschwert sein. Eine exakte Planung der Eingriffe ist deshalb unverzichtbar. Dazu werden hoch aufgelöste 3d-Datensätze genutzt. Die Segmentierung ermöglicht die Darstellung der relevanten anatomischen Strukturen in Form von 3d-Modellen. Damit können komplexe Lagebeziehungen, anatomische Besonderheiten (stehende Schädelbasis) sowie Risikostrukturen (z.B. Nähe N. Opticus oder A. carotis interna) in einer vereinfachten und verständlichen Art und Weise hervorgehoben werden. Bei der Operationsplanung ermöglichen die Visualisierungen von Patientendaten die Minimierung von Risiken. Eine räumliche Repräsentation, ähnlich zu der während des späteren Eingriffs (Virtuelle Endoskopie), kann zusätzlich als Vorbereitung für die Operation dienen und damit die intraoperative Orientierung unterstützen. Eine wesentliche Schwierigkeit stellt jedoch die Interaktion mit derartigen 3d-Visualisierungen dar, weshalb ein 3d-Eingabegerät mit Kraftrückkopplung eingesetzt werden soll.

2 Stand der Forschung und Zielstellung

Die Anwendbarkeit der virtuellen Endoskopie für die Diagnose von NNH-Erkrankungen war bereits Gegenstand der Forschung ([1], [2], [3]). Die Darstellung der 3d-Informationen erfolgt dabei mittels eines Volumen- oder Surface-Renderings. Die Modelle werden genutzt, um Bilder und Videos verschiedener anatomischer Strukturen aus Sicht eines Endoskops für diagnostische Zwecke zu generieren. Die Vergleiche zwischen virtueller und optischer Endoskopie zeigen, dass die anatomischen Strukturen und Variationen der NNH ebenfalls gut am 3d-Modell erkennbar sind (vgl. [3]). Die Darstellung von pathologischen Veränderungen der Oberfläche hängt dabei jedoch von der Auflösung der Daten ab. Weiterhin erschweren fehlende Informationen die Identifizierung von krankem Gewebe [2]. Eine Untersuchung der Nasennebenhöhlen auf strukturelle Veränderungen ist auch bei Verschluss der Öffnungen möglich, solange der Hohlraum frei ist. Für das Training von NNH-Operationen sind verschiedene Prototypen entwickelt worden, die auf einer Kombination von visueller Repräsentation des Operationsgeschehens, gekoppelt mit haptischem Feedback basieren (z.B. [4], [5]). Neben einer möglichst realistischen Darstellung der Strukturen ist auch die Bedienung auf größtmögliche Realitätstreue hin optimiert. Pößneck u.a. [5] setzen ein für die Simulation von endoskopischen NNH-Eingriffen angepasstes Trainingssystem ein. Eine Segmentierungs- und Modellierungssoftware wird genutzt, um aus 3d-Daten ein verformbares polygonales Modell der NNH zu erstellen.

Bestehende Trainingssysteme lassen sich für eine patientenindividuelle Operationsplanung nur bedingt einsetzen. Neben dem hohen gerätetechnischen Aufwand ist vor allem die Vorverarbeitungszeit von Datensätzen ein Hinderungsgrund. Darüber hinaus ist eine exakte Simulation, z.B. von Gewebe für die Fragestellungen bei der Operationsplanung nicht nötig. Das STEPS-System [6] wurde zwar für die Planung von endoskopischen Tumoroperationen am Gehirn konzipiert, bietet jedoch planungstechnisch interessante Ansätze, die auch für NNH-Eingriffe anwendbar sind. Der Zugang zum Gehirn findet beim STEPS-System durch die gesunden NNH statt, wodurch keine Visualisierungs-Probleme mit Schwellungen oder krankhaft veränderten Strukturen auftreten können. Es werden direkt die CT-Daten des Patienten genutzt, und es besteht die Möglichkeit einer haptisch unterstützten Navigation mittels eines Force-Feedback-Joysticks.

Die hier vorgestellte Planung verfolgt die Zielstellung eine speziell für die NNH angepasste Operationsplanung zu schaffen, welche die Besonderheiten dieser sehr häufigen Eingriffe optimal unterstützt. Sowohl auf Seiten der Visualisierung als auch der Steuerung mit haptischer Unterstützung wird dem Chirurgen Vertrautes angeboten werden. Darüber hinaus wird für den praktischen Einsatz eine minimale Vorverarbeitungszeit der Patientendaten angestrebt.

3 Umsetzung

Für Untersuchungen der Hohlräume der Nase eignen sich egozentrische Interaktionsmetaphern, die eine Sicht aus der Ich-Perspektive ermöglichen. Exozen-

trische Sichten können jedoch zusätzlich eine Übersicht vermitteln und die Orientierung erleichtern. Für die Realisierung der Kameraführung ist die Umsetzung einer geführten Navigation am geeignetsten, da sie dem Anwender eine individuelle Kameraführung ermöglicht, diese jedoch sinnvoll einschränkt. Eine automatische Berechnung eines idealen Kamerapfades für die Untersuchung der NNH ist aufgrund der Komplexität und Individualität der Anatomie nicht möglich. Hinzu kommt die besondere Schwierigkeit durch krankhafte Veränderungen. Eine Alternative ist die manuelle Bestimmung eines Kamerapfades zu den relevanten Strukturen, was jedoch den Aufwand im Vorfeld stark erhöht. Die Aufgabe des haptischen Feedbacks bei der geführten Navigation liegt in der Simulation des Kontaktes zwischen Kamera und Gewebe. Durch den Einsatz von 3d-Eingabegeräten kann die Positionierung von Messelementen bzw. virtuellen Instrumenten schneller durchgeführt werden. Haptisches Feedback kann die Präzision dieser Aktionen erhöhen, indem eine fühlbare Kollision mit der Oberfläche von Objekten über den Tastsinn des Benutzers simuliert wird.

Um eine größtmögliche Darstellungsgenauigkeit der filigranen Strukturen zu erreichen, eignet sich die Darstellung der Volumenmodelle über Direktes Volumenrendering (DVR). Die zeitintensive Generierung von Oberflächenmodellen entfällt bei diesem Ansatz. Für die Erzeugung von haptischem Feedback für die Planung von NNH-Eingriffen sind Volumenmodelle ebenfalls sehr gut geeignet. Kraftfelder werden z.B. vorberechnet und reduzieren damit den Rechenaufwand zur Laufzeit. Einige Algorithmen nutzen die Transferfunktion zum direkten Volumenrendering ebenfalls zur Bestimmung der haptischen Oberflächeneigenschaften [6]. Dieses Vorgehen erlaubt auch ein direktes visuelles und haptisches Rendern auf den originalen Volumendaten, stellt jedoch nur eine grobe Annäherung dar. Für die Interaktionsaufgabe der Kamerasteuerung eignen sich besonders Potentialfelder, die den Betrag der Abstoßungskräfte in Abhängigkeit von der Distanz zur Organoberfläche repräsentieren (vgl. [7]). Ein Eindringen in die Gewebeoberfläche wird damit verhindert und der Anwender erhält eine Sicht auf die Hohlräume. Während der Entwicklung wurde ein kommerziell verfügbares haptisches Eingabegerät PHANTOM der Firma Sensable verwendet. Es besitzt in der Desktop-Version 6 Freiheitsgrade für die Eingabe und 3 für die Ausgabe.

4 Ergebnisse

Es wurde prototypisch ein System für die haptisch unterstützte virtuelle Endoskopie der NNH entwickelt. Als Plattform für die Umsetzung kam MeVisLab (www.mevislab.de) zum Einsatz. Dieses Rapid-Prototyping-System für medizinische Anwendungen beinhaltet viele der benötigten Bildverarbeitungs- und Visualisierungskomponenten in Modulform. Der Prototyp liegt in Netzwerken aus solchen Modulen vor. Dabei dient eines der Erzeugung der Datenstrukturen und ein weiteres für die virtuelle Endoskopie. Das neu entwickelte und für die Berechnung der Rückgabekräfte zuständige Modul setzt ein haptisches Rendering auf der Basis von Distanz- und Gradientenfeldern um. Das generierte haptische Feedback dient als Benutzerführung und lässt sich bei Bedarf durch et-

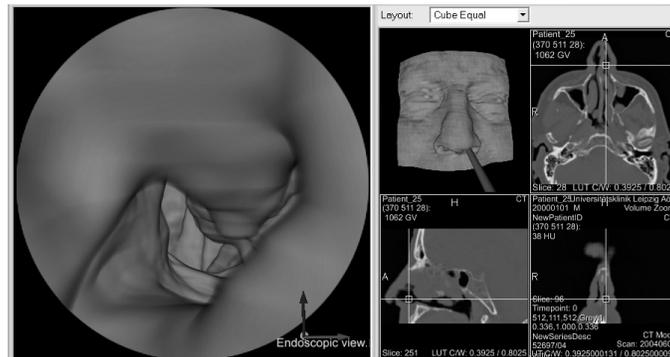


Abb. 1. Endoskopische Sicht (links), kombiniert mit den orthogonalen Navigationsansichten sowie der Lage des Endoskops (rechts).

was stärkere Kraftaufwendung überwinden. Damit können auch Hohlräume, die keine direkte Verbindung zu den NNH besitzen, beispielsweise beim Verschluss oder Verlegung der Ostien durch Gewebe, untersucht werden. Die Visualisierung umfasst die Sicht des virtuellen Endoskops auf den Datensatz, orthogonale Schnittbilder für die Position des Endoskops und eine 3d-Übersicht, welche die Lage des Endoskops innerhalb des Datensatzes visualisiert (Abb. 1). Die Vorverarbeitung nimmt ca. 5 min in Anspruch, wobei die größte Zeitspanne für die Berechnung der Felder benötigt wird. Komplexe manuelle Anpassungen sind nicht erforderlich.

5 Evaluierung und Diskussion

Der Prototyp für die virtuelle Endoskopie wurde mit verschiedenen klinischen NNH-Datensätzen erfolgreich getestet. Es fand eine Evaluierung der Benutzerschnittstelle mit sechs Probanden im Alter zwischen 19 und 31 Jahren statt. Weiterhin haben HNO-Chirurgen und Experten im Bereich Computer Assisted Surgery das System beurteilt (Abb. 2). Die haptisch unterstützte Kamerasteuerung stellte sich bei den Tests gegenüber anderen (z.B. Maus oder SpaceMouse; 3d-Eingabe) als geeignetste Technik heraus. Die direkte Steuerung erleichterte die Orientierung und Positionierung des virtuellen Endoskops im NNH-Modell. Dieses äußerte sich in der Bewertung der Kriterien *räumliche Orientierung*, *Zufriedenheit* und *Erlernbarkeit*. Die Benutzerführung, die durch die Vermeidung von Kollisionen mit dem Gewebe unterstützt wird, ermöglicht eine effizientere Exploration der Daten als z.B. mit einer SpaceMouse. Die Navigation mit dem PHANTOM ohne Rückgabekräfte wurde von den Probanden in einigen Punkten besser bewertet, als die Navigation mit der SpaceMouse, jedoch ist die freie Positionierung im Raum als anstrengend eingeschätzt worden. Bei der Interaktion mit dem System werden zukünftig auch kostengünstigere Eingabegeräte untersucht, die evtl. für die Operationsplanung hinreichende Möglichkeiten bieten.



Abb. 2. Evaluierung der Interaktionstechniken durch eine HNO-Ärztin.

Weitere Entwicklungen erfolgen auch bei der Visualisierung, die aus ärztlicher Sicht noch zu wenig zwischen den Strukturen differenziert. Das betrifft vor allem die Unterscheidung zwischen knöchernem und weichem Gewebe und eine differenzierte Darstellung von z.B. Verschattungen der NNH. Dieses Ziel setzt zwangsläufig eine umfangreichere Vorverarbeitung der Daten (u.a. Segmentierung) voraus, ermöglicht dann jedoch eine noch detailliertere Planung.

Literaturverzeichnis

1. Rogalla, P.: Virtual endoscopy of the nose and paranasal sinuses. In Rogalla, P., van Scheltinga, J.T., Hamm, B., eds.: *Virtual Endoscopy and Related 3D Techniques*. Springer, Berlin [u.a.] (2001) 17–39
2. Bisdas, S., Verink, M., Burmeister, H.P., Stieve, M., Becker, H.: Three-dimensional visualization of the nasal cavity and paranasal sinuses: Clinical results of a standardized approach using multislice helical computed tomography. *Journal of Computer Assisted Tomography* **28** (2004) 661 – 669
3. Han, P., Pirsig, W., Ilgen, F., Gorich, J., Sokiranski, R.: Virtual endoscopy of the nasal cavity in comparison with fiberoptic endoscopy. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology* **257** (2000) 578–83
4. Voss, G., Ecke, U., Bockholt, U., Müller, W.K., Mann, W.: How to become the „high score cyber surgeon“ - endoscopic training using the nasal endoscopy simulator (nes). In: *Proc. of CARS 2000*, Elsevier (2000) 290–293
5. Pößneck, A., Nowatius, E., Trantakis, C., Cakmak, H., Maass, H., Kühnapfel, U., Dietz, A., Strauß, G.: A virtual training system in endoscopic sinus surgery. In: *Proc. of CARS 2005*, Elsevier (2002) 527–530
6. Neubauer, A., Wolfsberger, S., Forster, M.T., Mroz, L., Wegenkittl, R., Buhler, K.: Steps - an application for simulation of transsphenoidal endonasal pituitary surgery. In: *VIS '04: Proc. of the Conference on Visualization '04*, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society (2004) 513–520
7. Bartz, D., Gürvit, Ö.: Haptic navigation in volumetric datasets. In: *Proc. of PHANTOM User Research Symposium*, Springer (2000)