

HNO 2009 · 57:789–796
 DOI 10.1007/s00106-009-1977-1
 Online publiziert: 29. Juli 2009
 © Springer Medizin Verlag 2009

Redaktion

P.K. Plinkert, Heidelberg

G. Strauß^{1,3} · E. Limpert² · M. Fischer^{1,3} · M. Hofer^{1,3} · C. Kubisch⁴ · A. Krüger⁴ · A. Dietz^{1,3} · J. Meixensberger⁶ · C. Trantakis⁶ · M. Strauss⁵ · B. Preim⁴

¹ Klinik und Poliklinik für HNO-Heilkunde/Plastische Operationen, Innovation Center Computer Assisted Surgery (ICCAS), Universität Leipzig

² Praxisklinik für HNO-Heilkunde, Kopfbereich Leipzig

³ BMBF-Innovation Center Computer Assisted Surgery (ICCAS), Universität Leipzig

⁴ Institut für Simulation und Graphik, Universität Magdeburg

⁵ Lehrstuhl Mikro- und Medizingerätetechnik (MiMed), Technische Universität München

⁶ Klinik und Poliklinik für Neurochirurgie, Universität Leipzig

Virtuelle Echtzeit-Endoskopie der Nase und Nasennebenhöhlen

Surgical-Planning-System „Sinus Endoscopy“ (SPS-SE)

Fragestellung

Die Vorbereitungen auf eine Operation (Op.) der Nase und Nasennebenhöhlen (NNH) erfordern eine Analyse der vorbestehenden anatomischen Situation, anatomischer Normvarianten und der individuellen Pathologie. Diese Analyse basiert heute v. a. auf der klinischen Untersuchung und der Analyse von planaren Schnittbildern der Computertomographie (CT). Bei der klinischen Untersuchung werden vorrangig die Nasenhaupthöhle und der Nasenrachen endoskopisch dargestellt. Die NNH lassen sich nur in seltenen Fällen ohne schmerzhaftes Interventionen einsehen. Mit Hilfe einer Kamera können die endoskopischen Befunde dem Patienten demonstriert und aufgezeichnet werden. Die CT-Bilder dienen im Wesentlichen der Einschätzung der NNH und dem Verifizieren wichtiger Landmarken (Schädelbasis, Lamina papyracea, Keilbeinhöhle).

Die Fortschritte in der CT-Bildgebung der vergangenen Jahre haben zu einer wesentlich verbesserten Auflösung beigetra-

gen [9]. Das hat zur Folge, dass heutzutage etwa 80–250 Schnittbilder der Nase und NNH-Region verfügbar sind. Unter der Annahme, dass pro Schnittbild mindestens 10 s benötigt werden, um die wichtigsten Informationen zu erkennen und interpretieren, so resultiert pro Patient ein theoretischer Zeitbedarf von bis zu 40 min. Dieser zeitliche Aufwand ist nicht mit dem realen Ablauf einer Op.-Planung in Übereinstimmung zu bringen. Hinzu kommt, dass die Rekonstruktion zu einem dreidimensionalen Modell bei einer solchen Vielzahl von Daten für den Menschen kaum noch oder nicht mehr ausreichend zu leisten ist [2].

Eine Zielsetzung besteht deshalb schon allein in der Entwicklung einer besser geeigneten Darstellungsform der verfügbaren Informationen für den HNO-Chirurgen und den Patienten. In den vergangenen Jahren sind mehrere Untersuchungen zur dreidimensionalen Darstellung der Nase und NNH erfolgt. In einigen Fällen wurden exemplarische Datensätze zu Ausbildungszwecken, in anderen Fällen individuelle Datensätze zur

Op.-Planung eingesetzt [12, 14]. Allen Arbeiten ist jedoch gemeinsam, dass im Bereich der Visualisierungsqualität und des notwendigen Aufwands zum Erstellen eines Modells zur virtuellen Endoskopie die Schwelle zum tatsächlichen klinischen Einsatz nicht übersprungen werden konnte, da die resultierende Qualität und/oder der notwendige Rechenaufwand den Anforderungen aus der praktischen Arbeit eines HNO-Chirurgen nicht genügt [13, 15, 4].

Ziel der Arbeit

Diese Arbeit verfolgt das Ziel, eine Methode zur verbesserten Darstellung der routinemäßig vorhandenen CT-Aufnahmen der Nase und NNH zu entwickeln und im klinischen Einsatz zu evaluieren. Eine virtuelle Endoskopie soll einen schnellen Überblick über die Anatomie und Pathologie des jeweiligen Patienten geben. Die virtuelle Endoskopie soll zusätzliche Informationen zur optischen Endoskopie liefern. Daraus werden folgende Mindestanforderungen an eine erfolgrei-

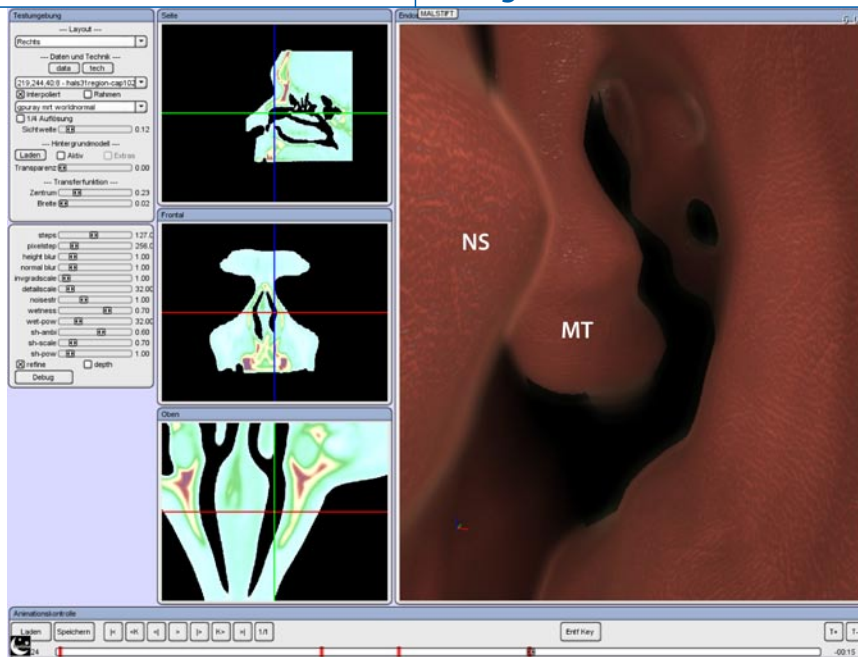


Abb. 1 ▲ Virtuelle Endoskopie der linken Nasenhaupthöhle (MT mittlere Muschel, NS Nasenseptum)

sprechende Lösung als Hypothesen abgeleitet:

1. Die Methode gibt die Anatomie des dargestellten Patienten korrekt wieder.
2. Die virtuelle Endoskopie erlaubt klinisch nutzbare Manöver des virtuellen Endoskops.
3. Die Visualisierung wird von erfahrenen Nutzern als geeignet für eine Anwendung in der Praxis eingeschätzt. Kriterien dafür sind Realitätsgrad, Rechenleistung, vertretbarer Aufwand von Nutzen und Kosten.
4. Das System verspricht einen zusätzlichen Nutzen über die Leistungsfähigkeit der optischen Endoskopie hinaus. Das könnte beispielsweise die Möglichkeit der (virtuellen) Endoskopie der Kieferhöhle und der Keilbeinhöhle sein. Vorteile gegenüber dem optischen System würden auch bei der Möglichkeit des Eindringens in Siebbeinzellen und der Vorwegnahme von Op.-Ergebnissen (Schleimhautreduktion, Eröffnen einer Bulla ethmoidalis oder des Recessus frontalis) sein.

Material und Methoden

Software

Das Surgical-Planning-System „Sinus Endoscopy“ (SPS-SE) wurde vollständig neu konzipiert und entwickelt [6]. Die DI-

COM-Daten des Patienten lassen sich direkt in das System einladen und werden ohne zusätzliche vorbereitende Schritte mit direktem Volumenrendering dargestellt. Das dafür verwendete Verfahren (Raycasting) wurde komplett auf der Graphikkarte (GPU) implementiert und entlastet damit den Prozessor (CPU) des Computers. Dadurch ist stets eine hinreichend hohe Bildwiederholfrequenz bei der Bewegung des virtuellen Endoskops sichergestellt. Kostengünstige Standard-GPUs bieten genug integrierten Arbeitsspeicher an, um CT-Datensätze mit über 256 Schichten bei einer Standardauflösung von 512×512 Punkten darzustellen. Die Leistungsfähigkeit der modernen Graphikkarten ist so hoch, dass in SPS-SE zusätzliche Materialeffekte für ein natürlicheres Aussehen hinzugefügt werden konnten. Oberflächendetails, wie der Glanz von Nässe sowie eine hautähnliche Textur und Farbgebung führen zu einer natürlichen Darstellung des Renderings.

Im System gibt es neben der perspektivischen Endoskopsicht auch 3 orthogonale Schnittansichten entlang der Hauptachsen, die an die Lage der Kamera im Raum gekoppelt sind. Die Bewegung der Kamera erfolgt entweder durch Ziehen der Maus innerhalb der Endoskopsicht oder per Klick in den Schnittansichten. Eine integrierte Kollisionsabfrage zu den virtuellen Oberflächen sorgt dabei für ei-

ne kontrollierbare Navigation. Ein Animationsmodul ermöglicht es dem Benutzer, Schlüsselpositionen und -rotationen zu verschiedenen Zeitpunkten zu erstellen, sodass in wenigen Schritten Animationen erstellt werden können. Auf der gesamten Anwendung können außerdem mit einer integrierten Zeichenfunktion Anmerkungen und Skizzen hinzugefügt werden. In der Endoskopansicht lassen sich diese Annotationen auch direkt auf die virtuelle Organoberfläche projizieren. Diese bleiben dann auch bei Kamerabewegungen auf der Oberfläche an dieser Position erhalten.

Softwaretechnisch umgesetzt wurde SPS-SE mit einer modernen 3D-Engine, welche heute v. a. die Basis moderner Computerspiele bilden. Mit dieser Softwareplattform war der Einsatz moderner Graphiktechniken und ein verbessertes Bedienkonzept effizient umzusetzen. Zusätzlich ist dadurch der entstandene Prototyp modular und sehr flexibel aufgebaut, um spätere Änderungen und Erweiterungen leicht umsetzen zu können.

Hardware

SPS-SE funktioniert auf Standard-PC-Hardware. Bedingt durch die Datensatzgröße und die Anforderungen, die sich durch ein direktes Volumenrendering ergeben, ergibt sich eine Hardwareanforderung, die knapp über einem typischen Bürocomputer liegt. Der PC sollte über genügend Arbeitsspeicher verfügen (ab 1 GByte) um die Datensätze effizient bearbeiten zu können. Wesentliches Element für SPS-SE ist die Graphikkarte, da hierauf alle Berechnungen ausgeführt werden. Diese sollte separat als Steckkarte vorliegen und mit ausreichend großem Speicher (ab 256 MByte) ausgestattet sein.

Für die Untersuchungen standen 2 ähnlich konfigurierte Standardrechner zur Verfügung, welche um eine nVidia-GeForce-8600GS-Graphikkarte (512 MByte) erweitert wurden und für den virtuellen Flug mit einem großer Plasmafernseher als Bildschirm ausgestattet waren.

Patienten

Es wurden insgesamt 125 Patienten im Zeitraum vom 1.10.2007 bis 30.06.2008

HNO 2009 · 57:789–796 DOI 10.1007/s00106-009-1977-1
© Springer Medizin Verlag 2009

G. Strauß · E. Limpert · M. Fischer · M. Hofer · C. Kubisch · A. Krüger · A. Dietz · J. Meixensberger · C. Trantakis · M. Strauss · B. Preim

Virtuelle Echtzeit-Endoskopie der Nase und Nasennebenhöhlen. Surgical-Planning-System „Sinus Endoscopy“ (SPS-SE)

Zusammenfassung

Problemstellung. Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung und klinische Evaluation einer neuen Methode zur virtuellen Endoskopie der Nase und Nasennebenhöhlen (NNH).

Material und Methoden. Das Surgical-Planning-System „Sinus Endoscopy“ (SPS-SE) wurde vollständig neu entwickelt. Oberflächen werden auf Basis von CT-Bilddaten mit direktem Volumenrendering (VR) dargestellt. Das dafür verwendete Verfahren („Raycasting“) ist auf der Graphikkarte implementiert und stellt eine hinreichend hohe Bildwiederholfrequenz bei der Bewegung des virtuellen Endoskops sicher. In SPS-SE werden zusätzliche Materialeffekte für ein natürlicheres Aussehen genutzt. Die Detailtreue wurde bildstatistisch zwischen Original-Endoskopiebild und virtuellem Korrelat verglichen (115 gemessene Abstandswerte von 34 Datensätzen). Die virtuelle Endoskopie erfolgte durch 5 operativ erfahrene HNO-Ärzte bei 125 Patienten. Die Beurteilung des Systems durch Ärzte und Patienten erfolgte mit einem standardisierten Fragebogen.

Ergebnisse. Von definierten Landmarken wich die virtuelle im Vergleich zur optischen

Endoskopie in der Bildanalyse 1,4–11,1 mm ab. Nach Urteil der Nutzer ließ es sich mit dem virtuellen Endoskop übereinstimmend besser manövrieren als mit dem optischen Endoskop, wesentliche Visualisierungsparameter waren ähnlich. Negativ wurde die Genauigkeit des VR im Bereich der mittleren Muschel, die hohe Variabilität der Skalierbarkeit der anatomischen Grenzen und die Orientierung im Situs bewertet. Insgesamt war die Beurteilung durch die HNO-Chirurgen ausgewogen, durch die Patienten ausnahmslos positiv.

Diskussion. Belegt wurde hier die hohe Leistungsfähigkeit des SPS-SE bei der dreidimensionalen Echtzeitrekonstruktion hochauflöser CT-Daten der Nase und NNH. Vor einer Anwendung in der alltäglichen Routine sind jedoch noch einige Modifikationen notwendig.

Schlüsselwörter

Virtuelle Endoskopie · Nasennebenhöhlen · Computerassistierte Planung · Volumenrendering · Raycasting

Virtual endoscopy of the nose and paranasal sinuses in real-time. Surgical planning system “Sinus endoscopy” (SPS-SE)

Abstract

Problem. The aim of this study was the development and clinical evaluation of a new method for virtual endoscopy of the nose and paranasal sinuses.

Material and methods. The surgical planning system “sinus endoscopy” (SPS-SE) was completely newly developed. The surfaces of the CT images are represented with direct volume rendering (raycasting) which allows a sufficiently high image repetition frequency with the movement of the virtual endoscopy and material effects for a natural appearance were added. Detail accuracy of the virtual illustrations was examined with the help of a picture-statistic comparison between optical and the virtual endoscopy. The evaluation of the system by the patients and physicians was made with a validated questionnaire.

Results. The deviations from defined landmarks of virtual in comparison to optical endoscopy are between 1.4 mm and 11.1 mm.

Manoeuvring the virtual endoscope was found to be better than with the optical endoscope but the important parameters for visualization were similar. The accuracy of volume rendering, the high variability of scaling of the anatomical borders and orientation were judged to be negative factors. Altogether there was a balanced opinion from the ENT surgeons but without exception patients judged the system positively.

Discussion. This investigation proved the efficiency of SPS-SE for three-dimensional real time reconstruction of high-resolution CT data of the nose and paranasal sinuses. However, some modifications are necessary before introduction into routine use.

Keywords

Virtual endoscopy · Paranasal sinuses · Computer-assisted planning · Volume rendering · Raycasting

in die Untersuchung einbezogen. In allen Fällen lag eine CT der Nase und NNH vor. Bei den Patienten war eine Op. im Bereich der Nase (Septumplastik, Septorhinoplastik, Muschelchirurgie) und/oder der NNH geplant. Das durchschnittliche Alter der Patienten betrug 42 (21–70) Jahre. Die Geschlechtsverteilung war nahezu gleichverteilt (m:w = 61:64). Allen Patienten wurde die virtuelle Endoskopie im Anschluss an die herkömmliche Untersuchung demonstriert. Von den 125 Patienten wurden 27 Patienten im Untersuchungszeitraum operiert. Die intraoperativen Ergebnisse gingen in die Untersuchung teilweise mit ein.

Computertomographische Daten

Bei den Patienten lag in allen Fällen eine CT der NNH mit einem Routine-NNH-Protokoll (Kollimation 1,0; rekonstruierte Schichtdicke 0,75 mm; 120 kV, 100 mAs) vor.

Untersucher

Die virtuelle Endoskopie wurde an 2 voneinander unabhängigen HNO-Kliniken von insgesamt 5 operativ erfahrenen HNO-Ärzten (jeweils >200 NNH-Operationen) durchgeführt. Die Software wurde in allen Fällen von einem zusätzlichen Assistenten (Assistenzarzt, MTA oder Krankenschwester) bedient. Die eigentliche virtuelle Endoskopie erfolgte durch die HNO-Ärzte.

Konventionelle Endoskopie

Die konventionelle Nasenendoskopie wurde mit starren Endoskopen (4 mm) mit 0° und 45°-Optiken durchgeführt. Die videoendoskopische Aufzeichnung erfolgte mit einer digitalen Videokamera und einem Aufzeichnungssystem (Image 1 CCD, AI-DA compact, Fa. Karl Storz, Tuttlingen). Es wurde in jedem Fall eine Endoskopie der Nasenhaupthöhle (unterer und mittlerer Nasengang), des Nasopharynx, des Recessus frontalis und des natürlichen Kieferhöhlenostiums durchgeführt.

Virtuelle Endoskopie

Die virtuelle Endoskopie umfasste dieselben Areale wie die konventionelle En-

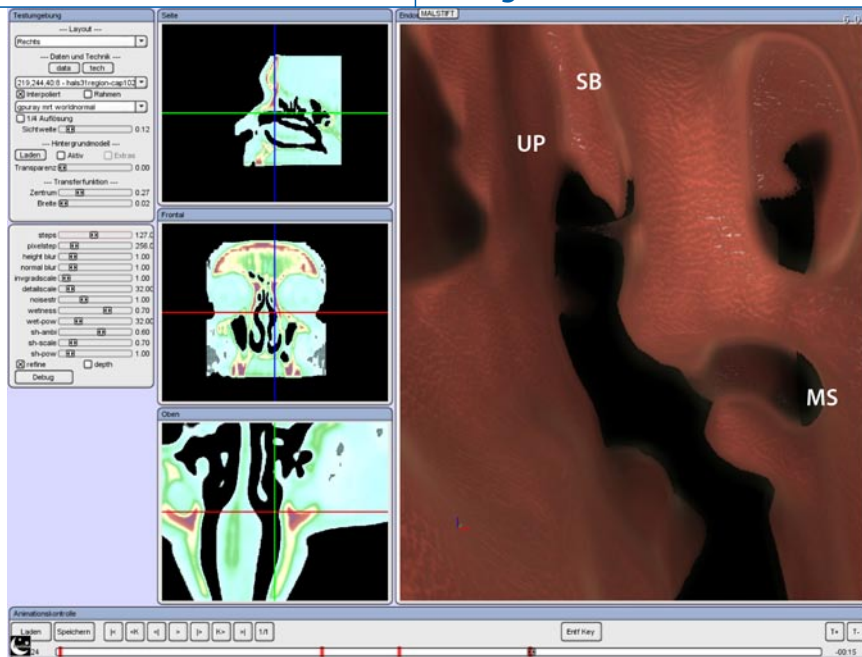


Abb. 2 ▲ Virtuelle Endoskopie mit Eröffnung des linken anterioren Ethmoids (Bulla ethmoidalis, Proc. uncinatus, Ansatz der mittleren Muschel). Durch einen virtuellen Gewebeabtrag kann der Insertionstyp des Proc. uncinatus (UP, hier Typ II) einfach bestimmt werden. Die Distanz zur Frontobasis (SB) kann abgeschätzt oder gemessen werden. Das natürliche Kieferhöhlenostium (MS) ist zu erkennen

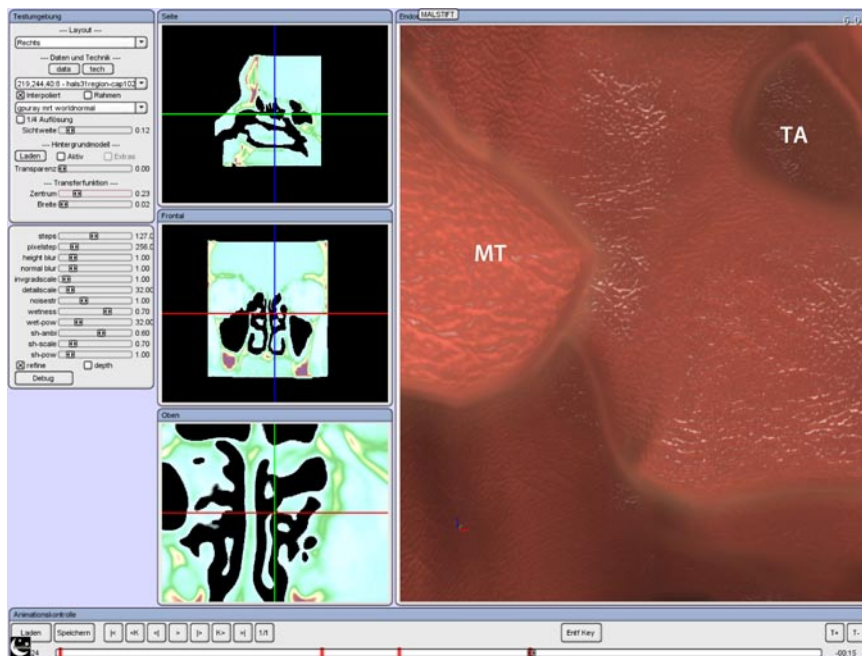


Abb. 3 ▲ Virtuelle Endoskopie des Nasopharynx. Nach virtueller Reduktion der mukösen Oberfläche (Schleim) ist die Region des linken Tubenostiums (Rosenmüller-Grube, TA) und der hintere Kopf der mittleren Muschel (MT) zu erkennen

doskopie. Zusätzlich erfolgte in allen Fällen die Darstellung des Siebbeinzellsystem. Außerdem wurde die Grenze zu Periorbita (Lamina papyracea) und zum Endokranium (Frontobasis) im Bereich der Fovea ethmoidalis passiert (Abb. 1, 2, 3, 4, 5). Alle Untersuchungen wurden in einem

festgelegten Rahmen der variablen Transferfunktionen für Gewebe und Viskosität durchgeführt, um systematische Fehler bei der Berechnung des Volumens und der geometrischen Beziehungen möglichst gering und konstant zu halten und damit vergleichbar zu machen (Tab. 1).

Beurteilung

Anatomische Detailtreue

Die Beurteilung der Detailtreue der virtuellen Abbildungen erfolgte im Vergleich zwischen einer optisch-endoskopischen Übersichtsaufnahme der Nasenhaupthöhle mit dem entsprechenden Ausschnitt der virtuellen Endoskopie. Dieser Abschnitt umfasst das Nasenseptum im mittleren Drittel, die mittlere Nasenmuschel und die Bulla ethmoidalis. Die optischen und virtuellen Abbildungen wurden mit Hilfe einer Bildverarbeitungssoftware (Adobe Photoshop Elements 6) korreliert. Dazu wurden die Aufnahmen zunächst gegeneinander in Maßstab und Perspektive skaliert. Nachfolgend erfolgte die Messung der Abweichungen an 3 exemplarischen Punkten zwischen optischer und virtueller Endoskopie. Damit erfolgte ein Vergleich zwischen den realen endoskopischen Abbildungen und den errechneten virtuellen Abbildungen. Es standen 115 gemessene Abstandswerte von 34 Patientendatensätzen zur Auswertung zur Verfügung.

Die Nutzer wurden außerdem mit Hilfe eines Fragebogens (ICCAS-Standardfragebogen Automationsfolgen 2007) um eine Einschätzung der Detailtreue der virtuellen Endoskopie im Vergleich zur optischen Endoskopie gebeten. Die Bewertungsskala reichte von 1 (vollständige Übereinstimmung) bis 5 (überhaupt keine Übereinstimmung). Freie Kommentare waren erwünscht.

Orientierung und Manövrierfähigkeit

Die Software erlaubt beliebige Manöver mit dem virtuellen Endoskop. Dabei können auch Schleimhaut oder Knochen überwunden werden und somit ein Blick in das NNH-System möglich werden. Durch die uneingeschränkten Freiheitsgrade besteht jedoch auch die Gefahr, die Orientierung innerhalb des Situs zu verlieren. Mit Hilfe eines Fragebogens wurden die Untersucher nach den Kriterien „allgemeine Orientierung“, „konventionelles Manövrieren“ und „invasives Manövrieren“ befragt.

Es standen 89 vollständig ausgefüllte Fragebögen zur Verfügung. Die Bögen waren über die 5 in die Studie einbezogenen HNO-Chirurgen nahezu gleichverteilt. Die Skala reichte von 1 („bedeutend

besser als optische Endoskopie“) über 3 („gleich gut“) bis 5 („bedeutend schlechter als optische Endoskopie“). Freie Kommentare waren erwünscht.

Visualisierung

Die Qualität der Visualisierung wurde mit Hilfe eines Fragebogens nach den Kriterien „Helligkeit“, „Kontrast“, „Farben/Textur“, „Beschleunigung/Dynamik“, „Licht/Schatten“ und „Dreidimensionalität“ dokumentiert. Es standen 89 vollständig ausgefüllte Fragebögen zur Verfügung. Die Bewertungsskala reichte von 1 (vollständige Übereinstimmung) bis 5 (überhaupt keine Übereinstimmung).

Aus Sicht des HNO-Chirurgen

In einem Fragebogen wurden die Nutzer nach den derzeitigen Vorteilen und den perspektivischen Anwendungen befragt. Darüber hinaus konnten freie Kommentaren eingefügt werden. Es standen 114 vollständig ausgefüllte Fragebögen zur Verfügung.

Aus Sicht des Patienten

Auch die Patienten wurden in einem Fragebogen nach ihren Eindrücken bezüglich der Demonstration der virtuellen Endoskopie befragt. Darüber hinaus konnten freie Kommentare abgegeben werden. Es konnten 89 Fragebögen in die Untersuchung einbezogen werden.

Ergebnisse

Das SPS-SE konnte alle präoperativen CT-Daten ohne zusätzliche Bearbeitung verwenden. Das Einlesen von DICOM-Rohdaten erfolgte unabhängig von dem Hersteller des CT-Geräts und dem mitgelieferten Viewer. Die Vorbereitungszeit bis zur dreidimensionalen Darstellung dauerte pro Fall zwischen 30 und 60 s.

Anatomische Detailtreue

Die Abweichungen von definierten Landmarken der virtuellen Endoskopie im Vergleich zur optischen Endoskopie beträgt in der Bildanalyse minimal 1,4 bis maximal 11,1 mm (Tab. 2). Eine besonders hohe Ungenauigkeit ist im Bereich der mittleren Muschel festzustellen (durchschnittlich 7,8 mm), während die anderen

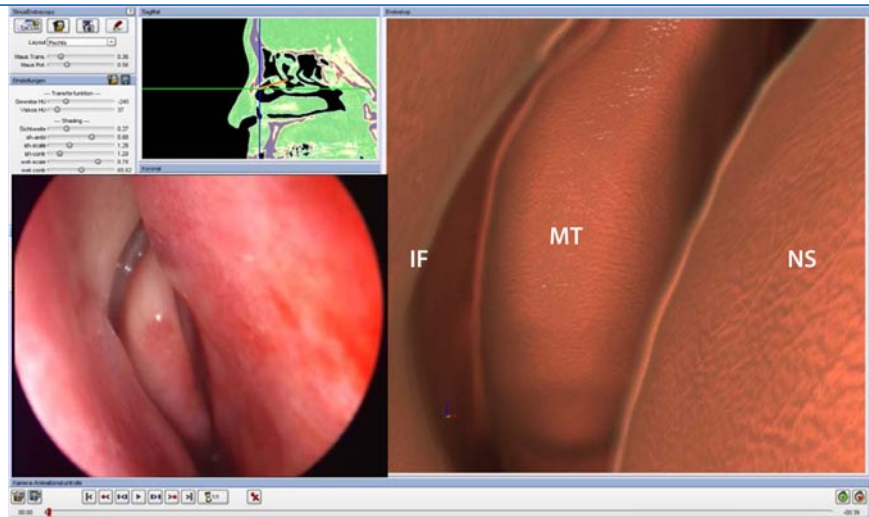


Abb. 4 ▲ Virtuelle Endoskopie des mittleren Nasengangs. Der Einfluss der knöchernen Septumdeviation (NS) nach rechts auf die Region des Infundibulums kann demonstriert werden. Die mittlere Muschel (MT) wird durch das Nasenseptum und die zusätzliche Schleimhauthyperplasie nach lateral in Richtung Infundibulum (IF) gedrückt. Links dazugehöriges optisch-endoskopisches Bild intraoperativ

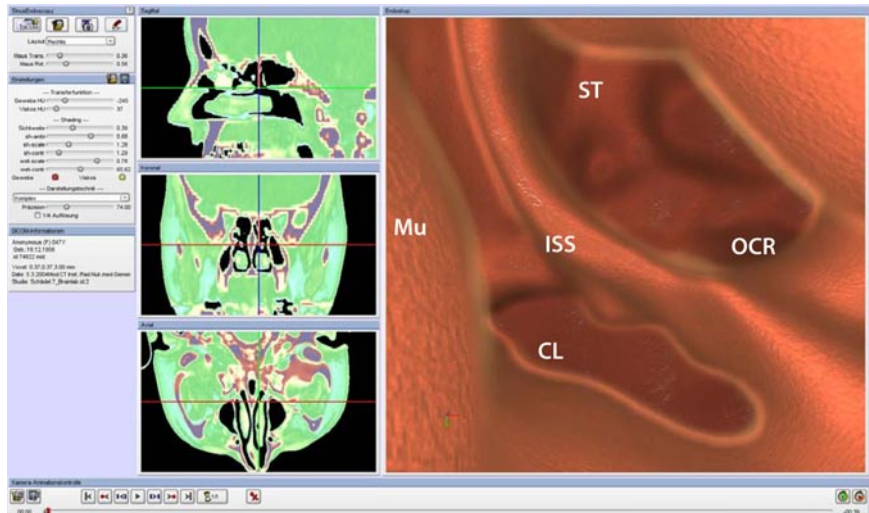


Abb. 5 ▲ Virtuelle Endoskopie der Keilbeinhöhle von links. Der schräge Verlauf des Septum intersphenoidale (ISS) ist zu erkennen. Die kleine Sella (ST) wölbt sich durch ein Hypophysenadenom dezent nach vorn. Links im Bild wahrscheinlich Schleimhautanteile (Mu). Außerdem sind Klivus (CL) und optikokarotidaler Rezessus (OCR)

Regionen gute Übereinstimmungen zeigen. Die Ergebnisse weisen auf eine Abhängigkeit von der gewählten Einstellung der Transferfunktion für Gewebe f_{Gew} hin. Gute Ergebnisse finden sich für f_{Gew} zwischen 215 und 230 Hounsfield-Einheiten (HU). Die Ergebnisse in der Gruppe mit Werten von $f_{\text{Gew}} > 230$ HU sind deutlich schlechter (Tab. 3)¹. Die Ergebnisse der Angaben aus dem Fragebogen stützen diese Ergebnisse.

¹ Aufgrund der geringen Zahl der verbleibenden Messpunkte kann hier keine statistische Signifikanz nachgewiesen werden.

Bei der praktischen Arbeit mit dem System empfanden die 5 Nutzer die Abbildungsgenauigkeit im Bereich der Bulla ethmoidalis und des Nasenseptums überwiegend gut, im Bereich der mittleren Muschel zeigte sich im Durchschnitt keine ausreichende Übereinstimmung mit der Realität (Tab. 4). In den freien Kommentaren wurde trotz der eigens für diese Untersuchung eingeschränkten Variabilität der Parameter der Transferfunktionen auf den direkten Einfluss dieser Einstellungen auf die anatomische Skalierung hingewiesen.

Tab. 1 Einstellungen der VE-Software für die Variablen-Transferfunktion „Gewebe“ und „visköse Oberflächen“

	Minimalwert (HU)	Maximalwert (HU)
Gewebe	–255	–215
Visköse Oberfläche	25	45

HU Hounsfield-Einheiten.

Tab. 2 Abweichung von definierten Messpunkten der virtuellen Endoskopie zur optischen Endoskopie (115 Messwerte)

	Nasenseptum	Mittlere Muschel	Bulla ethmoidalis
Anzahl der Messpunkte	75	31	9
Abweichung (mm)	2,2 (1,8–3,0)	7,8 (1,6–11,1)	1,5 (1,4–1,7)

Tab. 3 Abhängigkeit der Abweichung zwischen optischer und virtueller Endoskopie von den gewählten Parametern für die Transferfunktion „Gewebe“ (31 Messwerte)

Transferfunktion Gewebe f_{Gew}	$-215 < f_{\text{Gew}} < -230$ HU	$-230 < f_{\text{Gew}} < -255$ HU
Anzahl Messwerte	19	12
Abweichung (mm)	3,3 (1,6–5,0)	9,1 (6,0–11,1)

HU Hounsfield-Einheiten.

Tab. 4 Subjektive Bewertungen der Detailgenauigkeit der virtuellen Endoskopie im Vergleich zur optischen Endoskopie durch die Nutzer

Anatomische Region	Nasenseptum	Mittlere Muschel	Bulla ethmoidalis
Bewertung der Detailgenauigkeit	2,3 (1,5–4,5)	3,1 (1,5–4,5)	1,8 (1,5–3,0)

1 Vollständige Übereinstimmung ... 5 überhaupt keine Übereinstimmung.

Tab. 5 Bewertungen der Orientierung und Manövrierfähigkeit der virtuellen Endoskopie

Allgemeine Orientierung	Konventionelles Manövrieren	Invasives Manövrieren
4,0 (3,0–5,0)	2,2 (1,5–3,0)	2,0 (2,0–2,0)

1 Bedeutend besser ... 3 gleich gut ... 5 bedeutend schlechter als optische Endoskopie.

Tab. 6 Bewertungen der Visualisierungsqualität der virtuellen Endoskopie im Vergleich zur optischen Endoskopie

Helligkeit	Kontrast	Farben/Textur	Beschleunigung/Dynamik	Licht/Schatten	3D
1,2 (1–2)	2,0	3,4 (1,5–4,5)	1,0	1,7 (1–3,5)	2,5 (1–3,5)

1 Vollständige Übereinstimmung ... 5 überhaupt keine Übereinstimmung.

Orientierung und Manövrierfähigkeit

Die Nutzer empfanden die Möglichkeiten des Manövrierens mit dem virtuellen Endoskop übereinstimmend als besser bis deutlich besser als die Arbeit mit dem optischen Endoskop (Bewertungen von 1,5–3,0; **Tab. 5**). Einschränkend gab es kritische Bewertungen bei der Möglichkeit der Orientierung im Situs. Hier schnitt das virtuelle Endoskop klar schlechter ab als das optische Endoskop. Besonders häufig ver-

loren die Nutzer die Orientierung im Bereich des Siebbeins und im Nasopharynx. In der Regel war dann ein Neustart der Endoskopie am Naseneingang erforderlich. Eine Rückkehr an einen zwischengespeicherten Punkt (an welchem die Orientierung noch gegeben war) war in der vorliegenden Softwareversion nicht direkt möglich.

Visualisierung

Die Beurteilung der wesentlichen Parameter zur Visualisierung belegt eine an-

nähernde Übereinstimmung der virtuellen Endoskopie mit der optischen Endoskopie in den Kriterien Helligkeit, Kontrast, Beschleunigung/Dynamik, Licht/Schatten. Kritischer werden die Parameter Farben/Textur und 3D-Effekt beurteilt. Hier wird eine nicht ausreichende Übereinstimmung mit der Realität festgestellt (**Tab. 6**). In den freien Kommentaren wird auf die beeindruckende Textur hingewiesen, die in dem SPS-SE erstmals Einsatz findet. Diese Textur erstreckt sich jedoch über alle anatomischen Regionen und wirkt damit mit zunehmender Erfahrung am System geringgradig artifiziell. Sehr positiv beurteilt wurden die Möglichkeit einer „virtuellen Reduktion“ der mukösen Oberfläche (Schleim), um sonst nicht zugängliche Regionen zu erkennen, sowie die Möglichkeit, die Beleuchtung zu variieren und die Sichtweite des virtuellen Endoskops anzupassen.

Allgemeine Beurteilung

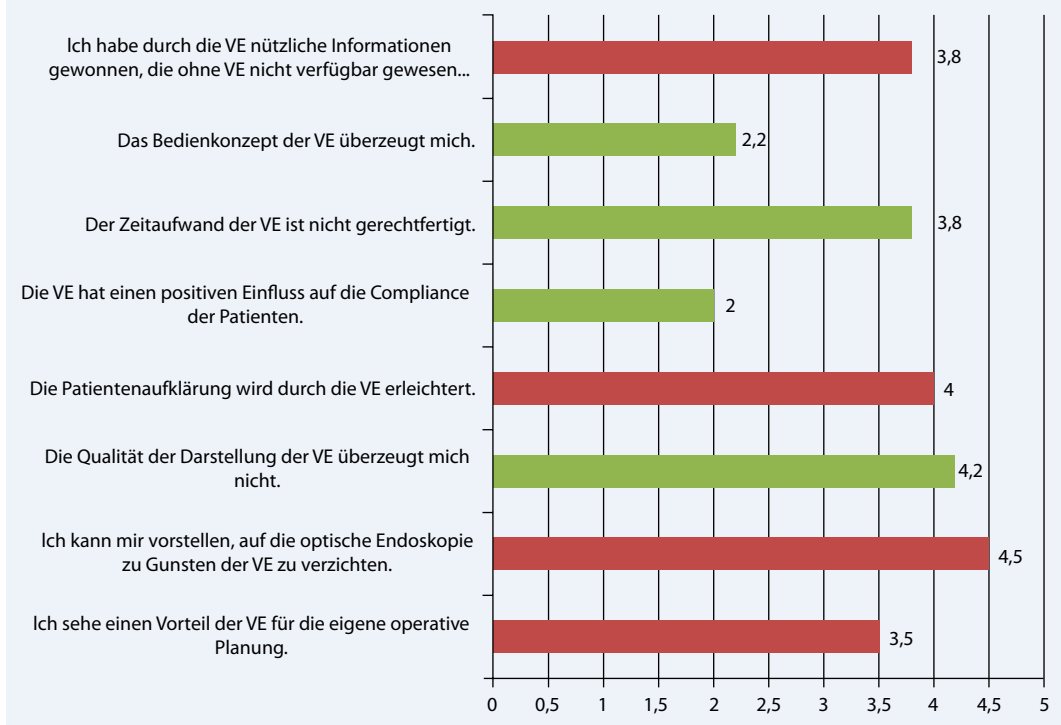
In der allgemeinen Beurteilung der HNO-Chirurgen finden sich besonders gute Bewertungen für die Qualität der Visualisierung, die Ergonomie der Bedienung und die Wirkung der virtuellen Endoskopie auf den Patienten. Kritischer werden der Gewinn von zusätzlichen Informationen und die Substitution der optischen Endoskopie beurteilt. Insgesamt ergibt sich eine ausgewogene Beurteilung durch den Nutzer (**Abb. 6**).

Die Patienten beurteilen das System ausnahmslos positiv. Es werden zahlreiche Zusatzinformationen zur Erkrankung aus der virtuellen Endoskopie gewonnen. Die optische Endoskopie stellt dafür nach Angaben der Patienten keine Alternative dar. Die Patienten hatten darüber hinaus den Eindruck, dass der Arzt sich mehr Zeit genommen habe und auch besser vorbereitet in die Op. gegangen sei. Die optische Endoskopie wird als wenig invasiv und schmerzhaft beurteilt (**Abb. 7**).

Schlussfolgerungen

Diese Studie belegt die Leistungsfähigkeit des untersuchten Systems auf dem Gebiet der dreidimensionalen Echtzeitrekonstruktion hochaufgelöster CT-Daten der Nase und NNH. Das virtuelle En-

Abb. 6 ► Auswertung des Fragebogens „Gesamtbeurteilung HNO-Chirurg“ (1 Ich stimme vollständig zu... 5 Ich stimme überhaupt nicht zu). Grüne Balken symbolisieren günstige, rote Balken ungünstige Bewertungen für die virtuelle Endoskopie (VE)



doskop ist nach kurzer Eingewöhnungszeit schnell und sicher zu führen. Die anatomischen Zusammenhänge entsprechen dem realen Eindruck. Das untersuchte System kann sich zu einer ergänzenden oder alternativen Lösung zur bisherigen Betrachtungsweise der planaren CT-Schnittbilder entwickeln.

In dem derzeitigen Entwicklungsstadium sind jedoch auch kritische Punkte zu nennen. Die Skalierung der anatomischen Abbildung unterliegt einer hohen Variabilität. In Abhängigkeit der gewählten Transferfunktionen können die Ausdehnungen der Nasenhaupthöhle und der NNH stark verändert werden. Der Nutzer gewinnt dadurch den Eindruck einer gewissen Beliebigkeit der virtuellen Endoskopie. Es bedarf einer Festlegung der Parameter in einem bestimmten Rahmen. (Diese konnten nach der Studie erfolgreich implementiert werden.)

Durch die Mittelung der Abschwächungskoeffizienten für die Berechnung der HU bei der CT können mehrere Gewebearten in einem Voxel repräsentiert und klare Abgrenzungen erschwert werden. In der Literatur finden sich Werte zwischen -350 HU und -250 HU für die Darstellung der Nasenseidewand, der unteren und mittleren Nasenmuscheln und -400 HU für die restlichen Strukturen [10, 1]. Hier ist unbedingt an der Wei-

terentwicklung geeigneter Parameter und deren Festlegung im System zu arbeiten. Ziel sollte in Anlehnung an die geforderten Genauigkeiten im Bereich der Navigation eine maximale Abweichung der knöchernen Strukturen in der virtuellen Endoskopie von <1 mm sein [3, 7, 8]. Das erfordert eine Kalibrierung und den virtuellen Nachbau realer Endoskopoptiken.

Auch eine bessere Differenzierung der ansonsten sehr überzeugenden Texturierung wäre wünschenswert. Die zugrunde liegenden CT-Daten lassen jedoch keine weiter differenzierte Texturierung zu, da derartige Informationen in den CT-Daten nicht enthalten sein können. Realistischere Texturen sind zwar technisch problemlos zu realisieren (Austausch der Bilder), bürden jedoch sehr stark die Gefahr einer Fehlinterpretation der Ergebnisse. Für SPS-SE wurde die Texturierung für eine verbesserte Erkennbarkeit von Krümmungen und Formen eingeführt. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen bei texturierten Oberflächen eine deutliche Verbesserung der visuellen Wahrnehmung [5]. Auch in anderen Systemen für die virtuelle Endoskopie werden bereits ähnliche Bestrebungen in Richtung einer Texturierung unternommen [11].

Eine weitere Voraussetzung für eine praktische Anwendung einer virtuellen

Endoskopie in der Nase ist zu betonen: Es lässt sich derzeit aus Nutzerperspektive noch kein Mehrwert gegenüber der optischen Endoskopie darstellen. Allein die Möglichkeit des „Eintauchens“ in die NNH oder die exzellente Möglichkeit, dem Patienten die geplante Op. zu erläutern, begründet nach den vorliegenden Daten nicht die Benutzung oder die Anschaffung eines solchen Systems. Diese Einschränkung kann auch nicht durch die durchweg positive Einschätzung durch die Patienten kompensiert werden. Allein als Aufklärungs-, Überzeugungs- und Marketinginstrument wird die Anschaffung eines solchen Systems nicht effizient sein, zumal die zusätzliche Vergütung einer virtuellen Endoskopie unwahrscheinlich ist. Somit sind die Hypothesen 1 und 4 noch nicht erfüllt.

Aus Sicht der Autoren besteht jedoch eine realistische Erfolgsaussicht in der Integration einer Arbeitsraumplanung in das System. Dafür ist die Möglichkeit einer Definition von Landmarken („safety region“), Sicherheitszonen („safety zone“), Präparationsgrenzen („safety margins“) und Sollvolumina erforderlich. Von großer Bedeutung wird ein geeignetes Bedienkonzept sein, um in komplizierten dreidimensionalen Räumen entsprechende Programmierungen vornehmen zu können. Über ein geeignetes Protokoll müs-

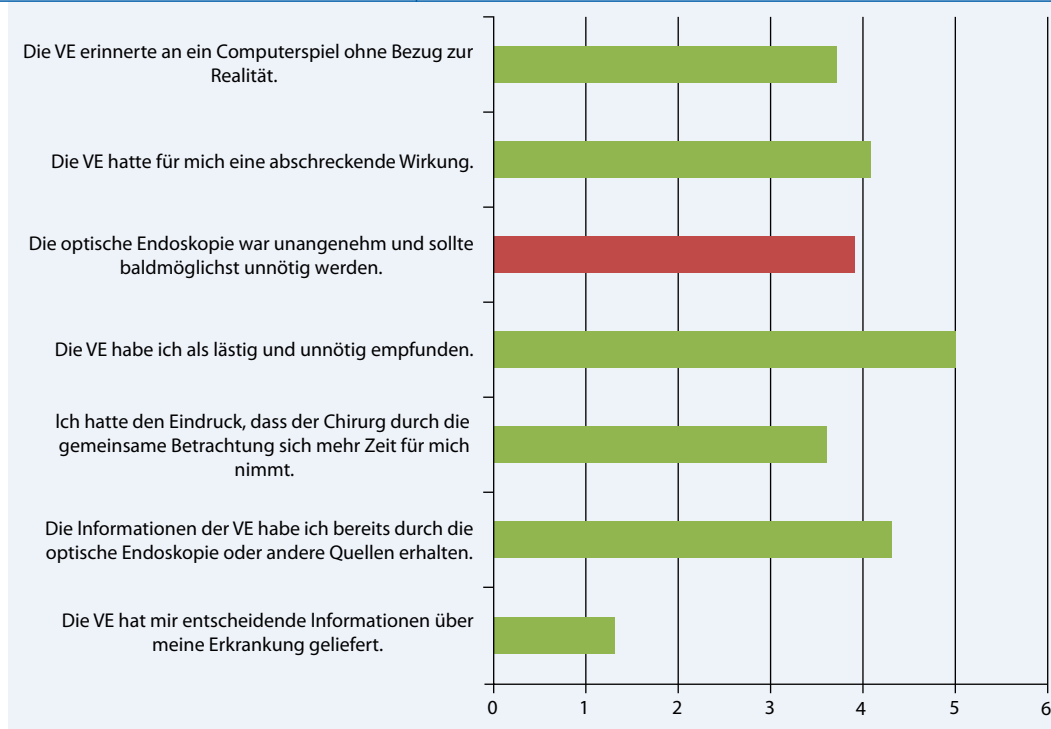


Abb. 7 Auswertung des Fragebogens „Gesamtbewertung Patient“ (1 Ich stimme vollständig zu... 5 Ich stimme überhaupt nicht zu). Grüne Balken symbolisieren günstige, rote Balken ungünstige Bewertungen für die virtuelle Endoskopie (VE)

sen diese Daten möglichst vielen chirurgischen Assistenzsystemen (pointerbasierte Navigation, navigierte Instrumente, navigiert-kontrollierte Instrumente, „volume control“) zur Verfügung gestellt werden können. Auf dieser Basis könnte die gezeigte dreidimensionale Visualisierung der DICOM-Rohdaten die Basis einer chirurgischen Plattform zur Auswertung und Weiterverarbeitung dieser Daten darstellen.

Fazit für die Praxis

Das hier erstmals eingesetzte und untersuchte System zur virtuellen Endoskopie der Nase und Nasennebenhöhlen verspricht zahlreiche Anwendungen in der Planung rhinochirurgischer Eingriffe. Die Qualität und Effizienz der Visualisierung ist außergewöhnlich gut. Grundsätzlich kann man deshalb von diesem System eine ergänzende oder alternative Lösung zur bisherigen Betrachtungsweise der CT-Schnittbilder erwarten. Die bessere Skalierung der anatomischen Abbildung, eine Differenzierung der Texturierung und die Integration einer Arbeitsraumplanung sind Aufgaben, die zuvor jedoch noch gelöst werden müssen.

Korrespondenzadresse

PD Dr. G. Strauß

Klinik und Poliklinik für HNO-Heilkunde/Plastische Operationen, Innovation Center Computer Assisted Surgery (ICCAS), Universität Leipzig
Liebigstraße 10-14, 04103 Leipzig
Gero.Strauss@medizin.uni-leipzig.de

Förderung und Sponsoren. Die Fa. Karl Storz GmbH&Co.KG, Tuttlingen, stellte zahlreiche medizintechnische Systeme für diese Untersuchung zur Verfügung.

Hinweise auf bestehende Vorarbeiten und Patente, Interessenkonflikt. Das hier eingesetzte System wurde von Arno Krüger und Christoph Kubisch entwickelt.

Literatur

1. Bisdas S, Verink M, Burmeister HP et al (2004) Three-dimensional visualization of the nasal cavity and paranasal sinuses. Clinical results of a standardized approach using multislice helical computed tomography. J Comput Assist Tomogr 28:661–669
2. Cao L, Su H, Cao Z (2004) A study on sampling strategies in the figure cognitive process. J Zhejiang Univ Sci 5:1160–1164
3. Caversaccio, Freysinger (2003) Computer assistance for intraoperative navigation in ENT surgery. Minim Invasive Ther Allied Technol 12:36–51
4. Han P, Pirsig W, Ilgen F et al (2000) Virtual endoscopy of the nasal cavity in comparison with fiberoptic endoscopy. Eur Arch Otorhinolaryngol 257:578–583
5. Interrante VL (1997) Illustrating surface shape in volume data via principal direction-driven 3D line integral convolution. Proc SIGGRAPH, 97:109–116

6. Krueger A, Kubisch C, Strauß G, Preim B, Arbeitskreis Computer & Visualisierung in der Chirurgie (2008) Sinus endoscopy – application of advanced GPU volume rendering for virtual endoscopy. IEEE Trans Vis Comput Graph 14(6):1491–1498
7. Lapeer R, Chen MS, Gonzalez G et al (2008) Image-enhanced surgical navigation for endoscopic sinus surgery: evaluating calibration, registration and tracking. Int J Med Robot 4:32–45
8. Ledderose GJ, Stelter K, Leunig A, Hagedorn H (2007) Surface laser registration in ENT-surgery: accuracy in the paranasal sinuses—a cadaveric study. Rhinology 45:281–285
9. Leunig A, Betz CS, Sommer B, Sommer F (2008) Anatomische Varianten der Nasennebenhöhlen; multiplanare CT-Analyse an 641 Patienten. Laryngorhinootologie 87:482–489
10. Rogalla P, Nischwitz A, Gottschalk S et al (1998) Virtual endoscopy of the nose and paranasal sinuses. Eur Radiol 8:946–950
11. Schaller C, Wellein D, Born S et al (2007) Textures for virtual endoscopy. Workshop Bildverarbeitung für die Medizin, Berlin
12. Solyar A, Cuellar H, Sadoughi B et al (2008) Endoscopic sinus surgery simulator as a teaching tool for anatomy education. Am J Surg 196:120–124
13. Wankhar B, Bapuraj JR, Gupta AK et al (2007) Chronic sphenoid sinusitis revisited: comparison of multidetector axial sections, multiplanar reconstructions, and virtual sinuscopy with endoscopic sinus surgery. Arch Otolaryngol Head Neck Surg 133:710–716
14. Wolfsberger S, Forster M, Donat M et al (2004) Virtual endoscopy is a useful device for training and preoperative planning of transsphenoidal endoscopic pituitary surgery. Minim Invasive Neurosurg 47:214–220
15. Yong J, Zhang H, Chen X, Zhang X (2007) The application and evaluation of helical CT reprosection technique in the diagnosis of nasal cavity and paranasal sinus diseases. Lin Chung Er Bi Yan Hou Tou Jing Wai Ke Za Zhi 21:922–925