

実時間透視図表示による 内視鏡手術ナビゲーションシステムの評価

山下樹里¹⁾、持丸正明¹⁾、山内康司¹⁾、福井幸男¹⁾、横山和則²⁾

1): 生命工学工業技術研究所 (〒305 茨城県 つくば市 東 1-1)

E-mail: juli@nibh.go.jp

2): 土浦協同病院 耳鼻咽喉科 (〒300 茨城県 土浦市 真鍋 新町 11-7)

E-mail: RA4K-YKYM@j.asahi-net.or.jp

内視鏡鼻内手術では、初心者のトレーニングのため、また術中に過って視神経や脳などを傷つける危険性を低くするため、正確な実時間ナビゲーションが求められている。我々は、透視図表示による実時間内視鏡手術ナビゲーションシステムを開発、既存の内視鏡・顕微鏡手術の実時間ナビゲーションシステムで主流の三面図表示と比較した。その結果、三面図表示はほとんど利用されない、タスクが難しくなるほど透視図表示でのパフォーマンスが向上するなどの興味深い結果を得た。

Evaluating A Real-Time Navigation System with Single Perspective View for Endoscopic Paranasal Sinus Surgery

Juli YAMASHITA¹⁾, Masaaki MOCHIMARU¹⁾, Yasushi YAMAUCHI¹⁾,
Yukio FUKUI¹⁾, and Kazunori YOKOYAMA²⁾

1): National Institute of Bioscience and Human-Technology (1-1, Higashi, Tsukuba 305, Japan)

2): Department of Otorhinolaryngology, Tsuchiura Kyodo Hospital (11-7, Shinmachi, Manabe, Tsuchiura 300, Japan)

This paper presents a real-time, perspective displayed navigation system for endoscopic sinus surgery treating paranasal sinusitis. Endoscopic surgery is becoming more common because of its low invasiveness. Its problem with disorientation, however, is one of the toughest barriers for the novice and may even lead an expert to commit serious surgical errors, e.g., causing CSF leakage or blinding the patient. To prevent such complications and optimize training, our system navigates showing a single perspective view of the patient model and a virtual image of an endoscope with a viewing cone that indicates the viewing direction and visual field in real time through virtual reality. The system's three clipping planes automatically follow the endoscope and help keep the surgeon aware of the endoscope's actual position. An experiment evaluating the system's effectiveness showed its superiority over conventional navigation using a triplanar display.

Key Words: Endoscopic sinus surgery, computer-assisted surgery, 3D navigation, viewing cone, virtual reality

1. はじめに

内視鏡手術は、傷も小さく患者の負担が少ない低侵襲手術であるが、術中に術者が位置・方向感覚を失い、どこを見ているのかわからなくなるという大きな問題がある。特に副鼻腔炎(著膿症)の内視鏡鼻内手術[1, 2]では、副鼻腔内の構造が複雑である上に、副鼻腔と紙のように薄い骨を隔てて視神経・眼球・脳底などの重要な組織が隣接しており (Fig. 1)、ちょっとしたミスでも失明・脳脊髄液鼻漏な

どの重大な合併症を引き起こしかねず、術中の正確なナビゲーションと内視鏡手術の教育システムが求められている。

内視鏡手術で術者が位置・方向感覚を失う主な理由は、以下であると考えられる。

- (1) 内視鏡の先端が患者の体内に入って見えない。鼻内手術に使われるのは硬性内視鏡（長さ約 20 cm、外径 4 mm、Fig. 2）で、通常、術者は内視鏡の方向と挿入された長さから先端位置の見当をつける。
- (2) 内視鏡の観察方向は 0 度～ 120 度 (Fig. 3) までであり、術者は場合に応じて適当な観察方向の内視鏡を選ぶ。さらに、内視鏡は CCD カメラに取りつけ軸周りに回転させ、見たい方向に向けて使用する (Fig. 2) が、0 度以上の観察角度を持った内視鏡を回転させた場合は正しい位置・方向感覚を保つのは大変難しい。
- (3) 内視鏡では対象が拡大されて見える。しかし、視野は狭く、像はかなり歪む。また、出血や膿のために視野が妨げられることも多い。
- (4) 患者の体内では、内視鏡で解剖学的な特徴点を視認することで位置を判断するが、病変や前回までの手術によって特徴点が大きく変形あるいは除去されており、手がかりが無いことがある。

既存のナビゲーションシステム [3-6] は、術中にプローブ先端で指し示された位置を、三面図上に患者の CT 画像と重ねて表示し (Fig. 4)、術者が 3 次元的な位置を読み取るものである。しかし、三面図から 3 次元位置を判定するのはかなりの精神的負担を要求する。さらに上記の内視鏡そのものに由来する問題は何ら解決されていない。

そこで筆者らは、内視鏡そのものに関する情報をより効率的に呈示するナビゲーションシステムを開発した [7]。本システムは、内視鏡の位置・方向と患部とを一枚の透視図として実時間呈示する。三面図表示と透視図表示とのナビゲーション比較実験を行ったので、報告する。

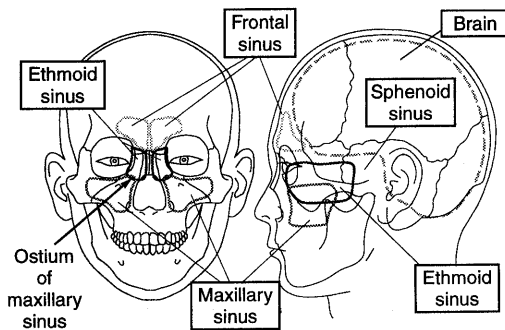


Figure 1. Anatomy of Paranasal Sinuses

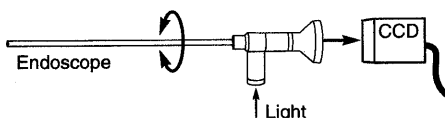


Figure 2. Endoscope for Paranasal Sinus Surgery
Rigid, 4.0 mm in diameter and about 20 cm long.
Being attached to a CCD camera and rotates independently.

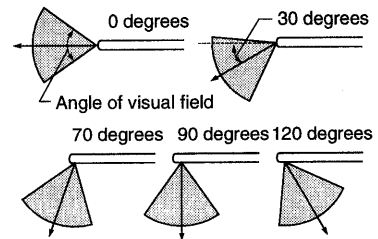


Figure 3. Endoscope Viewing Directions

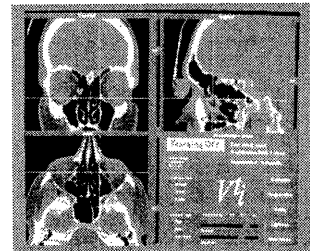


Figure 4. InstaTrak Triplanar Display and Crosshair Cursor

2. 内視鏡手術ナビゲーションシステムの概要

ナビゲーションプログラムは、C および OpenGL [8] を用いて SGI-Cray 社の GWS 用に開発した。内視鏡の位置および方向を FASTRAK センサーで実時間計測し、内視鏡の観察方向及び回転の様子を示すための「視円錐」を持つ「仮想内視鏡」として CG 表示する (Fig. 5)。内視鏡先端には視円錐に合わせたスポット・ライトが付けてあり、光源に近いものほど明るく表示される。患者の CT 画像から患部および皮膚面を抽出、VTK [9] を使ってマーキング・キューブ法 [10] によりポリゴンモデルを作成し、仮想内視鏡と重ねて呈示する。実際に内視鏡を移動・回転させると、ナビゲーション画面上で仮想内視鏡と視円錐が実時間で追従し、観察方向にある患部が光源からの距離に応じた明るさで照らし出される。このほか、本システムには、前額断、矢状断、水平断の 3 枚の切断面を設定することができる。また、こ

これらの切断面が内視鏡先端部分を自動追尾するモードも設けた。Fig. 6 にナビゲーション画面の例を示す。

SGI Onyx RE2 (4 CPU) を使い、ポリゴン総数 21,500 余りのモデルを両面シェーディングで表示したところ、切断面の設置数によって 5~10 Hz の画面更新レートが得られた。表示速度の向上が、今後の課題のひとつである。

視円錐、スポットライトの効果は良好であった。内視鏡の観察方向を確実に把握でき、しかもライトで照らされた部分の明るさから直観的にそこまでの距離を推量することができるため、実際に内視鏡でどこを見ているのか、次に内視鏡をどちらに動かせばよいのかがよくわかる。自動追尾モードの切断面と併用することで、内視鏡のモニタを見ずに望みの場所を内視鏡モニタ上に映し出すという、飛行機で言う「計器飛行」に相当することが可能である。本ナビゲーションシステムは、患者体内での位置・方向の把握に大いに資するとの確信を得た。

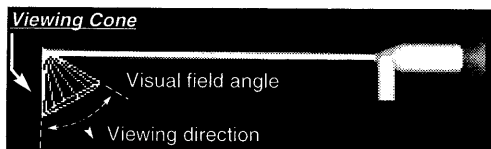


Figure 5. Virtual Endoscope with Viewing Cone

The viewing cone shows the viewing direction and visual field angle of the endoscope.

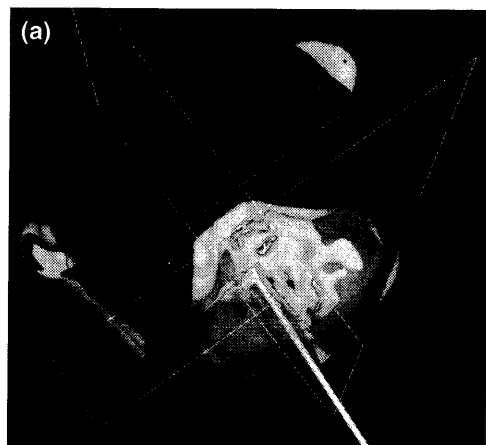
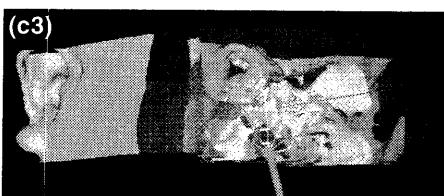
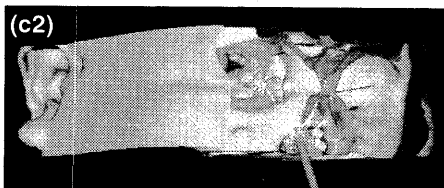
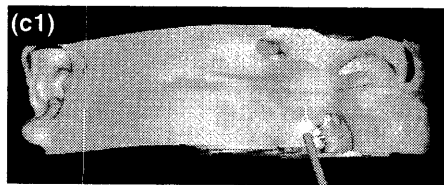
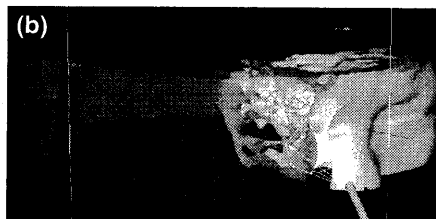


Figure 6. Perspective Navigation Example

(a) Coronal and sagittal clipping planes activated.

(b) Sagittal clipping plane activated.

(c1-c3) The coronal clipping plane is active, and traces the endoscope tip showing the inside structure.



3. 三面図表示と透視図表示の比較実験

内視鏡の位置情報の呈示方法の違いが、内視鏡の操作性にどのような影響を及ぼすかを調べる実験を行った。

3.1 実験条件

<装置> ナビゲーション画面で表示するのと同じ患者のCT画像から、光硬化性樹脂を用いてダミーの患部を作成した。このダミーの上顎洞自然孔 (Fig. 1: Ostium of maxillary sinus) 付近にマークをつけ、ターゲットとする。内視鏡のモニタ及びナビゲーションの画面は、両方を同時に見ることができないよう 80 cm ほど離して配置する。内視鏡先端部の軌跡を記録する他、被験者の様子をビデオ撮影する。

<課題> 内視鏡を鼻腔から挿入し、内視鏡先端部がダミーの内壁に接触しないよう内視鏡を移動・回転操作し、内視鏡のモニタ上にターゲットが表示される位置へ持って行く。被験者には、「早い方がよいですが、無理をしないで下さい」と指示し、内視鏡をダミーと接触させない方が課題を早く終えること

より重要であることを伝える。

<内視鏡の条件> 0度（直視鏡）および30度（前方斜視鏡）を使用。

<ナビゲーション条件> 下記いずれの条件でも、内視鏡のモニタは常に表示される。

- (1) ナビゲーション無し
- (2) 透視図表示ナビゲーション（自動追尾モードの矢状断面あり）
- (3) 透視図表示ナビゲーション（自動追尾モードの前額断面あり）
- (4) 三面図表示ナビゲーション（内視鏡先端位置での三つの断面を表示）

<被験者> 内視鏡操作、副鼻腔構造に関して知識の無い、5名の初心者（日本人成人男性四名、女性一名）。内視鏡鼻内手術のエキスパートである耳鼻科医師1名。計6名。

<試行> 実験条件の順序をランダムにし、各条件の組み合わせに関して3回の試行を行った。

3.2 実験結果

(ア) 課題遂行時間 (Fig. 7-a)：対応ありのt検定の結果 (Table 1)、0度直視鏡を用いた場合のナビゲーション条件 (3) - (4) の組み合わせで有意差が見られた ($t(11) = 3.03, p < 0.02$)。

(イ) 参照時間比率 (Fig. 7-b)：課題遂行中にナビゲーション画面を実際に参照していた時間を、課題遂行時間で割ったものが参照時間比率である。対応ありのt検定の結果 (Table 2)、有意差が見られた組み合わせは、30度斜視鏡を用いた場合のナビゲーション条件 (2) - (4) ($t(11) = 3.09, p < 0.02$) および (3) - (4) であった ($t(11) = 3.25, p < 0.01$)。

(ウ) その他：内視鏡でダミーに接触しないように、という事前の指示にもかかわらず、初心者はたびたび「接触事故」を起こした。

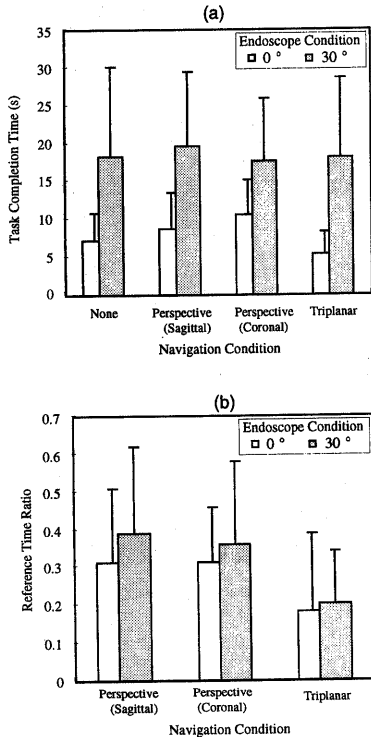


Figure 7. Results

Table 1. Results of Task Completion Time Test

Endoscope condition	Navigation condition	Result (paired t-test)
0°	None - Perspective (Sagittal)	$t(11) = -0.858, p = 0.4090$
	None - Perspective (Coronal)	$t(11) = -1.870, p = 0.0884$
	None - Triplanar	$t(11) = 1.199, p = 0.2559$
	Perspective (Sagittal) - Perspective (Coronal)	$t(11) = -0.953, p = 0.3610$
	Perspective (Sagittal) - Triplanar	$t(11) = 1.994, p = 0.0715$
	Perspective (Coronal) - Triplanar	$t(11) = 3.034, p = 0.0114$
30°	None - Perspective (Sagittal)	$t(11) = -0.467, p = 0.6495$
	None - Perspective (Coronal)	$t(11) = 0.183, p = 0.8578$
	None - Triplanar	$t(11) = 0.015, p = 0.9885$
	Perspective (Sagittal) - Perspective (Coronal)	$t(11) = 1.115, p = 0.2888$
	Perspective (Sagittal) - Triplanar	$t(11) = 0.312, p = 0.7607$
	Perspective (Coronal) - Triplanar	$t(11) = -0.128, p = 0.9004$

Table 2. Results of Reference Time Ratio Test

Endoscope condition	Navigation condition	Result (paired t-test)
30°	Perspective (Sagittal) - Triplanar	$t(11) = 3.089, p = 0.0103$
	Perspective (Coronal) - Triplanar	$t(11) = 3.250, p = 0.0077$

4. 考察

4.1 参照時間比率

Fig. 7-b から、透視図表示を見ていた時間が総課題遂行時間の30~40%を占めるのに比べ、三面図では20%弱であり、三面図はあまり使われなかったことがわかる。実験後の被験者の感想でも、「三面図は見てもわからないので見なかった」「(三枚の断面図のうち) どれを見ればよいのかわからなかった」という意見が多かった。課題遂行時間の比較で、(1)と(4)で有意差が出なかったことは

これで説明できる。また、より難しい条件下（30度斜視鏡）で透視図表示ナビゲーションが有意に好まれたことは、透視図表示がよりわかりやすい情報呈示方法であることを示唆するものである。

熟練者の被験者である医師によれば、特定の部位の手術時に特定の断面での情報が有用になる（脳底付近の手術の場合、矢状断）ことはあるが、一般的にリアルタイムで変化する三面図から内視鏡の先端位置を把握できるようになるには相当な訓練が必要であろうとのことであった。ただし、プローブと三面図表示を用いた既存のナビゲーションシステムでは、三面図に表示されるのはプローブの位置であって内視鏡先端位置ではないため、プローブを固定すれば、内視鏡でプローブ周辺を観察しながら時間をかけて三面図から位置を判定できるので、今回の実験結果から即、三面図が劣っていると結論することはできない。

4.2 課題遂行時間

ナビゲーションシステムを使用する場合、被験者は内視鏡モニタ画面とナビゲーション画面の二つを見ることになるため、通常の内視鏡モニタのみの場合に比べ、「二つの画面に表示されているものを同時に把握する」「二つの画面からひとつを選ぶ」という余分の負荷がかかるはずである。従って、課題遂行時間がその分長くなることが予想される。同時に、もしナビゲーションが情報をよりわかりやすく表示しているとするれば、被験者の負担は軽くなり、課題遂行時間は短縮することが期待される。

4.1で述べた通り、三面図表示のナビゲーションはあまり使用されなかったため、ここでは条件

(1)、(4)をほぼ同等と見なし、これらと(2)、(3)（透視図表示）を比較する。0度直視鏡では、5%水準では(3) - (4)のみ有意差が認められたが、その他(1) - (3)、(2) - (4)もかなり低い確率を示しており、透視図表示ナビゲーションを使用した場合は課題遂行時間が長くなっていることと結論して差し支えないであろう。しかし、30度斜視鏡を使用した場合は、ナビゲーション画面を30%以上注視していたにもかかわらず、課題遂行時間の差は全く無い。これは、直視鏡では、課題が簡単であるため、ナビゲーションによる負荷の軽減効果が小さく、二つのモニタを見ながら作業をすることによる負荷の増加が、操作時間の差として現れた。斜視鏡では、課題が難しいため、ナビゲーションによる負荷の軽減効果が大きくなり、二つのモニタを見るという負荷の増加と相殺し、操作時間の差が出なかった。と解釈することができる。より難しい課題（70度斜視鏡等）であれば、ナビゲーションの効果がより大きく、操作時間が逆転する可能性もある。今後の検討課題である。

4.3 初心者は乱暴である

「内視鏡で内壁に触らない」ことは、内視鏡で組織を損傷すること防ぐだけでなく、視界を確保するという点からも重要である。内視鏡の先端のレンズ部分を内壁に接触させると、レンズに粘液が付着して視界が悪化するため、一度内視鏡を抜き出してレンズを洗浄する必要がある、それだけ余計な時間がかかって手術の進行が遅れることになる。今回の実験で、事前の注意にもかかわらず、初心者の被験者がかなり頻繁に、それも時にはかなり強く内視鏡で内壁に接触していたことは、大きな驚きであった。実際の医師の内視鏡使用訓練の初期においても、同様な問題があるという。初心者訓練のためのシミュレータの開発が急務である。

4.4 今後の課題

- ・今回は実験のために内視鏡モニタとナビゲーションモニタをかなり離して設置したが、実際の場面ではもっと近づけた方が見やすいのは当然である。
- ・被験者の中には、仮想内視鏡のスポットライトによる明るさの変化が、遮蔽物があっても変化しない（陰影ができない）ことに気づいた人が何人かあった。これはOpenGLの「照明」の特徴であり、これを克服して陰影を正しく表現するには光線追跡法[11]を使用するしかないが、計算機の処理能力から見てリアルタイムでの光線追跡法は現在では無理である。何らかの新しいアルゴリズムの開発が求められている。
- ・実験ではダミーを用いたが、本システムを実際に患者に臨床応用する場合には、患者の頭部の動きを追跡する必要がある。頭部用位置センサーの選定、手術台付近の配置等に慎重な検討を要する。

5. おわりに

3次元ポリゴンモデル化した患部及び内視鏡を、実時間で透視図表示する内視鏡手術用ナビゲーションシステムを開発した。本システムでは、仮想内視鏡の視円錐とスポットライトで内視鏡の観察方向を表現し、内視鏡に追隨して動く切断面で患部の内部構造をわかりやすく呈示することで、ある程度「計器飛行」に近いナビゲーションが可能である。従来の三面図表示に比べ、より難易度の高い課題においてパフォーマンスの改善効果が見られることが実験から明らかになった。今後、内視鏡を追跡するセンサーや表示方式等を改善し、臨床応用を目指す考えである。

謝辞

本研究にご協力下さいました(株)第一医科および(株)日本シリコングラフィックス・クレイにこの場を借りて感謝いたします。

参考文献

- [1] Rice, D. H. and S. D. Schaefer: "Endoscopic Paranasal Sinus Surgery", Raven Press, Ltd., 1993.
- [2] Rikio Ashikawa, Hiroshi Moriyama, Yutaka Uchida, Koichi Yamasita: "Endoscopic Endonasal Sinus Surgery - Surgical Anatomy and Technique -", Igakusyoin, 1995.
- [3] Anon, J. B., S. P. Lipman, D. Oppenheim, and R. A. Halt: "Computer-Assisted Endoscopic Sinus Surgery", Laryngoscope, 104, 1994.
- [4] Roth, M., D. C. Lanza, J. Zinreich, D. Yousem, K. A. Scanlan, and D. W. Kennedy: "Advantages and Disadvantages of Three-Dimensional Computed Tomography Intraoperative Localization for Functional Endoscopic Sinus Surgery", Laryngoscope, 105, 1995.
- [5] Fried, M. P., J. Kleefield, and R. Taylor: "A New Armless Image Guidance System for Endoscopic Sinus Surgery", in Proc. of American Academy of Otolaryngology-Head & Neck Surgery Meeting, 1995.
- [6] Klimek, L., R. Moesges, G. Schloendorff: "Long-Term Experience with Different Types of Localization Systems in Skull-Base Surgery", Computer-Integrated Surgery, Taylor, R. H., S. Lavallee, G. C. Burdea, and R. Mosges eds., MIT Press, pp. 635-638, 1996.
- [7] Juli Yamashita, Yasushi Yamauchi, Masaaki Mochimaru, Yukio Fukui, and Kazunori Yokoyama: "A 3D Navigation System for Endoscopic Sinus Surgery," Proc. of ICAT '96 (The Sixth International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence), 1996.
- [8] J. Neider, T. Davis, and M. Woo, "OpenGL Programming Guide," Reading, MA: Addison Welsey, 1993, pp.19-219.
- [9] W. E. Lorensen and H. E. Cline, "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm," ACM Computer Graphics, Vol. 21, No. 4, pp. 163-169, 1987.
- [10] Schroeder, W., K. Martin, and B. Lorensen: "The Visualization Toolkit - An Object-Oriented Approach To 3D Graphics -", Prentice Hall, 1996.
- [11] J. D. Foley, A. van Dam, S. K. Feiner, and J. F. Hughes, "Computer Graphics -- Principle and Practice," Reading, MA: Addison-Wesley, 1990, pp. 734-741.