

- Congress of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS 2006), pp.156-158, Osaka, June 28-July 1, 2006.
- 15) M. Rissanen, Y. Kuroda, N. Kume, M. Nakao, T. Kuroda and H. Yoshihara, "Interactive Authoring of Example Surgical Procedures from Recorded Physics-based Simulation", 20th International Congress of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS 2006), pp.154-156, Osaka, June 28-July 1, 2006.
 - 16) M. Rissanen, Y. Kuroda, N. Kume, M. Nakao, T. Kuroda and H. Yoshihara, "Audiovisual Guidance for Simulated One Point Force Exertion Tasks", ACM VRCIA, pp.365-368, Hong Kong, June 14-17, 2006.
 - 17) 黒田嘉宏, 平井真, 中尾恵, 黒田知宏, 長瀬啓介, 吉原博幸, "力覚提示装置を用いた臓器圧排シミュレータの評価", 第16回設計工学・システム部門講演会, pp.333-334, 名古屋, November 15-17, 2006.
 - 18) 黒田嘉宏, 竹村匡正, 桑直人, 岡本和也, 堀謙太, 中尾恵, 黒田知宏, 吉原博幸, "手術書から抽出されたメタ言語データからの手術シミュレータ構築機構の設計", 医療情報連合大会, pp.1154-1156, 札幌, November 1-3, 2006.
 - 19) 桑直人, 黒田嘉宏, 中尾恵, 黒田知宏, 長瀬啓介, 吉原博幸, 小森優, "軟組織破断 VR シミュレータによる力覚呈示を目的とした投機実行手法の提案", 医療情報連合大会, pp.1151-1153, 札幌, November 1-3, 2006.
 - 20) ミッコ・リッサネン, 黒田嘉宏, 中尾恵, 桑直人, 黒田知宏, 長瀬啓介, 吉原博幸, "VR 手術シミュレーションにおける手技操作記録の編集時の特徴量保存に関する研究", 医療情報連合大会, pp.1157-1160, 札幌, November 1-3, 2006.
 - 21) 黒田嘉宏, 平井真, 中尾恵, 黒田知宏, 長瀬啓介, 吉原博幸, "多指力覚提示装置を用いた臓器圧排シミュレータの構築", 第11回日本バーチャルリアリティ学会大会, pp.364-365, 仙台, September 7-9, 2006.
 - 22) ミッコ・リッサネン, 黒田嘉宏, 中尾恵, 桑直人, 黒田知宏, 吉原博幸, "記録された力覚操作の編集機能に関するユーザビリティ評価", 第11回日本バーチャルリアリティ学会大会, pp.205-206, 仙台, September 7-9, 2006.
 - 23) 河本 敏孝, 中尾 恵, 湊 小太郎, "有限要素法に基づく実時間切開シミュレーション", 第11回日本バーチャルリアリティ学会大会, pp.472-473, Sep. 2006.
 - 24) 黒田嘉宏, M. Rissanen, 吉村耕治, 中尾恵, 黒田知宏, 賀本敏行, 小山博史, 小川修, 吉原博幸, "複数弾性体間相互作用モデルに基づく直腸指診シミュレータを用いた医師触診操作の記録", 第6回日本 VR 医学会学術大会, 大阪, September 1-2, 2006.
 - 25) 桑直人, 黒田嘉宏, 中尾恵, 黒田知宏, 長瀬啓介, 吉原博幸, 小森優, "侵襲的手技を対象とした VR シミュレーションの投機実行手法に基づく投機ヒット率と応答時間の予測", 第6回日本 VR 医学会学術大会, pp.41, 大阪, September 1-2, 2006.
 - 26) 佐藤寿彦, 中村達雄, 黒田嘉宏, 中尾恵, 湊小太郎, "VR 空間内での肺実時間臓器変形及び弾性可塑モデル", 第6回日本 VR 医学会学術大会, pp.32, 大阪, September 1-2, 2006.
 - 27) 松雪 大貴, 中尾 恵, 湊 小太郎, "胸腔鏡下手術計画におけるボリューム像操作環境の開発", 情報科学フォーラム FIT, pp.441-442, Sep. 2006.
 - 28) 川島 礼子, 中尾 恵, 湊 小太郎, 小久保 雅樹, "変形シミュレーションに対応した高速なスライススペース DRR", 情報科学フォーラム FIT, p.439~440, Sep. 2006.
 - 29) 箕輪 弘嗣, 中尾 恵, 湊 小太郎, "弾性体操作における力覚追体験環境に関する研究", 第6回日本 VR 医学会学術大会, p43, Sep 2006.
 - 30) 黒田嘉宏, M. Rissanen, 吉村耕治, 中尾恵, 黒田知宏, 賀本敏行, 小山博史, 小川修, 吉原博幸, "前立腺触診を対象とした技能教材 VR システムに関する研究", 第25回日本医用画像工学会大会, CDROM 内, 京都, July 21-22, 2006.
 - 31) 川島 礼子, 中尾 恵, 湊 小太郎, 小久保 雅樹, "四面体メッシュに対応した高速なスライススペース DRR", 第25回日本医用画像工学会大会, OP11-1, Jul. 2006.
 - 32) 松雪 大貴, 中尾 恵, 湊 小太郎, "手術計画支援のためのボリューム像操作環境の開発", 第25回日本医用画像工学会大会, OP11-3, Jul. 2006.
 - 33) 桑直人, 黒田嘉宏, 中尾恵, 黒田知宏, 吉原博幸, 小森優, "力学計算に基づく分散 VR シミュレーションの設計と計算量の算定", システム制御情報学会 第50回大会講演論文集, pp.653-654, 京都, May 10-12, 2006.
 - 34) ミッコ・リッサネン, 黒田嘉宏, 中尾恵, 桑直人, 黒田知宏, 吉原博幸, 力学 VR シミュレーション記録の対話編集手法, システム制御情報学会 第50回大会講演論文集, pp.661-662, 京都, May 10-12, 2006

(和田)

- 1) 会長要請企画：進化するITテクノロジーと内視鏡外科—ロボット手術とバーチャル外科内視鏡外科におけるhaptics技術の開発と応用. 森川康英、大西公平、小澤壯治、中澤和夫、古川俊治、和田則仁、西宏章、北島政樹. 第19回日本内視鏡外科学会総会、京都、国際会館、2006/12/05
- 2) デジタル・フォレンジックを取り入れた手術動画画像生体情報同時記録システムの開発. 和田則仁、古川俊治、森川康英、北島政樹. 第26回医療情報学連合大会、札幌コンベンションセンター、2006/11/03
- 3) デジタル・フォレンジックによりデータ保全された手術動画生体情報同期記録システム. 和田則仁、古川俊治、森川康英、北島政樹. 第15回日本コンピュータ外科学会大会、東京、慈恵医大西新橋校、2006/10/27
- 4) Robotic Surgeryと新しい手術機器開発商用高速回線を利用した遠隔共同手術の実用化に向けた検討. 和田則仁、古川俊治、小澤壯治、森川康英、北島政樹、磯部陽、窪地淳、松本純夫. 第18回日本内視鏡外科学会総会、京王プラザホテル、2005/12/09
- 5) 遠隔共同手術の実用化に向けた問題点. 和田則仁、古川俊治、磯部陽、窪地淳、森川康英、北島政樹. 第14回日本コンピュータ外科学会大会、千葉県幕張、海外職業訓練協会研修施設 (OVT A)、2005/11/19
- 6) 鏡視下手術の医療安全に対する情報技術の応用. 和田則仁、古川俊治、磯部陽、窪地淳、松本純夫、北島政樹. 第43回日本癌治療学会総会、名古屋国際会議場、2005/10/25
- 7) 内視鏡における医療情報の活用内視鏡動画情報リアルタイム転送による診療支援の臨床応用. 和田則仁、古川俊治、北島政樹. 第70回日本消化器内視鏡学会総会、神戸国際会議場、ポートピアホテル、2005/10/08
- 8) 遠隔共同手術の便益評価. 和田則仁、古川俊治、磯部陽、窪地淳、北島政樹. 第105回日本外科学会定期学術集会、名古屋国際会議場、2005/05/12
- 9) 先進的胃外科手術腹腔鏡補助下幽門側胃切除術 (LADG) に対する遠隔手術指導. 和田則仁、古川俊治、大谷吉秀、金史英、大住幸司、岸真也、徳山丞、北條隆、竹内裕也、島田敦、大石崇、磯部陽、窪地淳、森川康英、北島政樹. 第6回関東腹腔鏡下胃切除研究会、主婦会館プラザエフ (東京)、2004/11/06
- 10) 遠隔手術指導のシステム開発と胃癌治療に対する臨床応用. 和田則仁、古川俊治、磯部陽、窪地淳、北島政樹. 第42回日本癌治療学会総会、京都国際会館、2004/10/28
- 11) シンポジウム10 「遠隔医療ネットワークの現状と展望」遠隔共同手術の臨床応用. 和田則仁、古川俊治、磯部陽、窪地淳、北島政樹. 第66回日本臨床外科学会総会、ホテルメトロポリタン盛岡 4 F 第5会場、2004/10/15

IV. 研究成果の刊行物・別刷

ENDOSCOPIC MICRONEUROSURGERY: USEFULNESS AND COST-EFFECTIVENESS IN THE CONSECUTIVE EXPERIENCE OF 210 PATIENTS

Akio Morita, M.D., Ph.D.

Department of Neurosurgery,
Faculty of Medicine,
University of Tokyo,
Tokyo, Japan

Masahiro Shin, M.D., Ph.D.

Department of Neurosurgery,
Faculty of Medicine,
University of Tokyo,
Tokyo, Japan

Laligam N. Sekhar, M.D., F.A.C.S.

North Shore University-Long Island
Jewish Health System,
Great Neck, New York

Takaaki Kirino, M.D., Ph.D.

Department of Neurosurgery,
Faculty of Medicine,
University of Tokyo,
Tokyo, Japan

Reprint requests:

Akio Morita, M.D., Ph.D.,
Department of Neurosurgery,
Faculty of Medicine,
University of Tokyo,
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku,
Tokyo, Japan 113-8655.
Email: amort-tyk@umin.ac.jp

Received, April 18, 2004.

Accepted, December 2, 2004.

OBJECTIVE: Indications, usefulness, and cost-effectiveness of the endoscope in routine microneurosurgery are not clear. To delineate such aspects, we assessed our experience of endoscopic application and additional cost to use an endoscope.

METHODS: Endoscopes were used in 210 patients with cranial base and cisternal pathological features in the previous 7 years. Lesions were located in the extradural cranial base in 78 patients and in the cistern in 132 patients. Rigid lens endoscopes 2.7 to 4 mm in width, 11 to 20 cm in length, and 0 to 70° in angle were used.

RESULTS: Endoscopes were used for primary or a significant part of the surgery in 64% of the extradural cranial base procedures. Although endoscopes were used only for visual assistance in 82% of cisternal pathological features, significant benefit was noted in 9% and was not different from cranial base lesions. Eleven patients may have had complications if the endoscope had not been used, and 10 procedures would have been impossible without endoscopic use. Therefore, the number of patients need to treat to experience significant benefits by endoscope was 10. Endoscopic equipment costs an additional US \$326 per patient and, hence, significant benefit was the equivalent of US \$3260. No permanent complications resulted from the use of the endoscope.

CONCLUSION: The endoscope can be applied safely in routine microsurgery with specific equipment and has proven useful in 1 of 10 patients. To perform more effective procedures using endoscopes, we need to develop specially designed instruments usable through a narrow corridor and in an angled field.

KEY WORDS: Cost, Cranial base, Endoscope, Holder, Microneurosurgery

Neurosurgery 58:315-321, 2006

DOI: 10.1227/01.NEU.0000195011.26982.5B

www.neurosurgery-online.com

Recently, endoscopes have been introduced in multiple surgical fields to minimize surgical invasiveness or to provide new visual dimensions. Endoscopes can be used through a narrow corridor and provide clear and close-up views of objects. Endoscopes also provide angled views where no view would otherwise be possible. In the field of neurosurgery, endoscopic procedures have established their role in specialized applications for spinal and peripheral nerve lesions (1, 14), and ventricular pathological features or intraparenchymal mass lesions (4, 11). But in routine cranial microneurosurgery, the endoscope has not become an essential addition, because the endoscope cannot provide information about the surrounding structures and

there is no expandable space in the cranium to create working space for the endoscope (12). In this study, the authors retrospectively assessed the initial experience of endoscopic application in 210 consecutive patients with cranial base and cisternal pathological features for the benefits and cost-effectiveness. The authors attempted to clarify the indication and method to best use the endoscope in routine microneurosurgery.

PATIENTS AND METHODS

Patients and Assessment

Clinical material included 210 patients with cranial pathological features in the cranial base or in the cistern primarily managed by

the first author (AM) at the George Washington Medical Center (July 1997–August 1998) and at the University of Tokyo Hospital (September 1998–February 2004). Endoscopes were used as the primary visual equipment to perform surgery or as an assisting device to manage 132 cisternal and 78 cranial base pathological features as depicted in *Table 1*. During the same period, the endoscope was applied in an additional 46 intraparenchymal or ventricular pathological features and 10 spinal lesions. Some of the patients were included in previous studies reported by one of the authors (LNS) (9, 13).

Usefulness of endoscopes was assessed by the following categories: Class I, not found useful; Class II, provided useful visual information; Class III, endoscope was used to perform main part of the procedure or was used as only optical device (i.e., primary endoscopic procedure); Class IV, endoscope was absolutely essential for surgery, mainly because of the following two achievements: 1) complication avoidance for the patients in whom the endoscope provided information to avoid complication and 2) increased possibility for the patients in whom the endoscope improved the surgical possibilities over those provided by microscope alone.

Endoscopic Method

Primary Endoscopic Surgery

This type of application involves endoscopes only as an optical device. In these procedures, we used 2.7- to 4.0-mm straight rigid endoscopes, angled 0 to 70°, 18 to 20 cm in length (Machida Seisakushyo, Tokyo, Japan, or Carl Storz GMBH & Co., Tuttlingen, Germany) or an Olympus Bayonet-shaped

endoscope (length, 13 cm) with an integrated endoscope holding system (EndoArm; Olympus Co., Tokyo, Japan) (12). As the holding device, we also used a Mitaka Point Setter (Mitaka Kohki Co., Tokyo, Japan). For video equipment, we used the Storz Tricam 3-CCD Video Camera system (Carl Storz GMBH & Co.). Instruments used in these procedures need to be specially designed to work around the endoscope. When the scope was clouded by mucous or blood, we cleared the tip of the scope using irrigating suction. For these purposes, a curved irrigation suction device, narrow-shaft straight and curved bipolars, and various malleable dissecting or curetting devices (*Fig. 1*) that fit through narrow surgical corridors and provide angled directions according to the endoscopic view were developed.

Endoscope-Assisted Surgery

In this application, endoscopes are used to provide additional, close-up, or angled views during routine microsurgery. The endoscopes can be used before starting the main procedure to confirm the anatomy around the lesion, and then the scope can be fixed to a holder and used to give additional visual information during the main procedure. At the end of the procedure, endoscopes can be used to confirm the surgical effects such as the clipping, removal of the tumor, or possible complications. For these procedures, we mainly used 30 or 45° 3-mm width endoscopes with the working length of 11 cm (Hopkins 7209 BA or FA; Carl Storz GMBH & Co.). Endoscopes were used either under free hand or fixed to a holding device. These scopes were rarely used alone, but rather under the guidance of a microscope. We used an Olympus OME 8000

microscope (Olympus Co.), which is equipped with a picture-in-picture projection system with the endoscopic view in the upper left corner of the surgeon's eyepiece, so that the surgeon can integrate two different visual fields simultaneously (*Fig. 2A*).

Cost Analysis

Because no additional fee can be charged for the use of the endoscope in Japan, all the cost of the equipment divided by the number of patients should be considered as the additional costs. To evaluate such additional cost, we sent a questionnaire to the neurosurgeons who frequently use the endoscope in their practice and present their experience in medical meetings or in peer review

TABLE 1. Two hundred ten patients who underwent endoscopic microsurgery^a

Cisternal pathologic features		Extradural cranial base/paranasal sinus pathologic features	
Pathologic feature	No. patients	Pathologic feature	No. patients
Vestibular schwannoma	30	Pituitary lesions	51
Aneurysm	27	Chordoma	7
Cranial base meningiomas	23	Cranial base malignancies	5
Microvascular decompression	21	Cranial base bony lesions, CSF leak	5
Hypothalamic tumor	10	Cholesterol granuloma	4
Epidermoid	3	Meningioma	2
Brainstem lesion	3	Other cranial base tumors	4
Schwannomas (V, VII, IX)	3	Total no.	78
Glioma	2		
Chiari malformation	2		
Chordoma/chondrosarcoma	2		
Arachnoid cyst	2		
Vascular anomaly	2		
Other tumor	2		
Total	132		

^a CSF, cerebrospinal fluid.

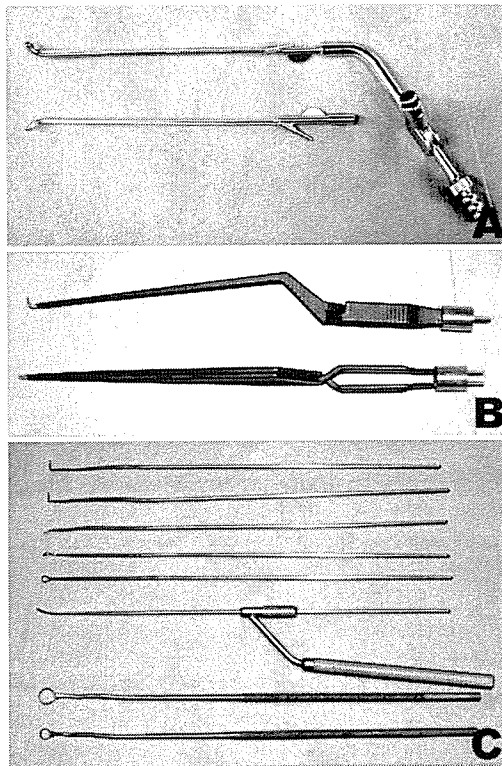


FIGURE 1. Equipment developed for primary endoscopic procedures (Fujita Ika Co., Tokyo, Japan). A, irrigation suction devices with various angles. B, narrow shaft, reversed opening bipolar forceps. This bipolar opens by squeezing the handle, so that this bipolar can be inserted through narrow corridor. C, various malleable dissectors that can be bent toward the direction of view.

articles and asked what are their most frequent indications in using an endoscope. Also we sent letters to the companies providing endoscopic equipment in Japan (Aesculap, Machida, Olympus, Stryker, Storz, and Wolf) requesting the information on the average price of an endoscope and video system, recommended renewal of the systems, and the frequency of requested repairs.

RESULTS

Clinical Benefits

We performed 51 primary endoscopic procedures and 159 endoscopy-assisted procedures. *Table 2* shows the clinical usefulness of the scope in the cisternal and extradural cranial base and paranasal sinus pathological features. In the cisternal pathological features, the scopes were used only for visual assistance in most patients (82%). However, in most of the air sinus or extradural cranial base pathological features, especially for pituitary procedures, endoscopes were used as the primary optical device (63%; Class III). The benefits scored as Class IV can be categorized into two types: 1) complication avoidance and 2) increased

possibility. As the Type 1 benefits, the endoscope identified inappropriate clipping in five patients that required replacement of the clip, residual tumors in two patients, and perforation to the air sinus in four patients that might have induced cerebrospinal fluid leaks. All except one surgeon were experienced in the management of cisternal pathological features. For the patients in whom the endoscope increased the surgical possibilities (Type 2 benefits), we could perform procedures to manage subchiasmatic lesion only under the endoscope in two patients (*Fig. 2, B–D*). Although 64% of procedures were listed as Class III or above, most extradural or paranasal sinus lesions could be managed under the routine microscope; however, in eight patients with tumor extension into the cavernous sinus (*Fig. 3*) (3), suprasellar region (3), or both (2), the endoscope provided direct vision to these areas and made the procedures into this area much safer and easier. Although a χ^2 test showed significant difference in the ratio of Class II and III between cisternal and cranial base pathological features ($P < 0.0001$), the ratio of Class IV in each series did not show significant difference ($P = 0.56$). The number of patients needed to treat to experience one clear benefit by the use of an endoscope in routine microneurosurgery was 10 patients (21 of 210 patients). The time required to prepare the endoscope and other necessary instruments, including the holder, was on average of 10 minutes.

Complications

Complications induced by the use of an endoscope are listed in *Table 3*. In earlier pituitary surgeries, when we did not have appropriate scope holders, we encountered cerebrospinal fluid leaks in three patients. This was caused by inadequate reconstruction of the sellar floor, because we could not perform delicate bimanual procedures without an adequate holding device. In two patients with microvascular decompression for hemifacial spasm, we encountered delay of the brainstem auditory evoked potential, which may have been caused by the heat of the scope but did not induce permanent sequelae. In the last complication, an unrecognized paraclinoid aneurysm rupture occurred during transnasal pituitary surgery. This patient recovered uneventfully after the emergency craniotomy and clipping. No permanent complication was noted by the use of endoscopes.

Cost of Using an Endoscope and Cost of Significant Benefit of the Endoscope

Of 15 questionnaires sent to neurosurgeons, we received 9 replies, and all endoscopic companies replied. Results of the responses are summarized in *Table 4*. Responding surgeons performed a median of 80 procedures using an endoscope per year (range, 5–150) and they used average of 2 scopes per surgery (range, 1–4). Most of the surgeons responded they never broke scopes during surgeries, but two very experienced surgeons (T. Nishihara and P. Cappabianca) and the authors reported breaking 1 scope on average for every 100 surgeries. Also, the endoscopic companies responded that they encountered repair of each scope an average of once per year (by the data of median surgery, 1 per 80 procedures). Of note, all the companies re-

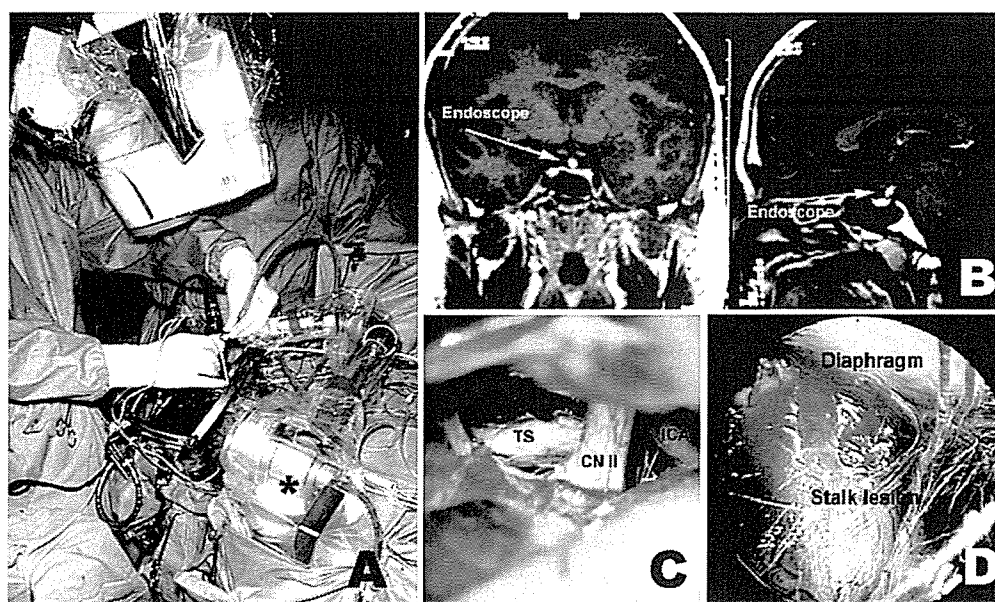


FIGURE 2. Illustrative case for endoscope-assisted surgery (histiocytosis X involving pituitary stalk). A, current set-up for endoscope-assisted surgery consisting of microscope with picture-in-picture device (arrowhead) and negatively actuating pneumatic endoscope holder (*). B, coronal and sagittal gadolinium diethylenetriamine penta-acetic acid-enhanced magnetic resonance imaging scan showing subchiasmatic lesion. C, microscopic view showing no lesion. TS, tuberculum sellae; CN II, optic nerve; ICA, internal carotid artery. D, endoscopic view demonstrating subchiasmatic lesion clearly.

per patient. Hence, the assumed median cost of using an endoscope was calculated to be US \$326 for each procedure. Considering that a significant benefit was experienced in 21 of 210 patients in our series (1 of every 10 patients) and, if we do not count the procedures that did not change the outcome, endoscopic use costs US \$3260 to experience one benefit.

DISCUSSION

Benefits and Cost-effectiveness of Endoscopic Microneurosurgery

Endoscopes are widely accepted as the equipment that has brought a new dimension to multiple surgical specialties. However, in the field of routine cranial microneurosurgery, except for ventricular or intraparenchymal mass lesions, the benefits and usefulness of endoscopes is debatable. Fries and Perneczky (3) pioneered the use of the endoscope as an assisting device in specifically designed microsurgery techniques. They advocated the use of the endoscope with a small keyhole approach to provide additional vision, which was not provided through the microscopic

TABLE 2. Classification and outcome of endoscopic procedure

Usefulness	Cisternal pathologic features	Extradural/sinus pathologic features
I: Not found useful	10	0
II: Provided useful visual information	109	28
III: Primary endoscopic procedure	1	41
IV: Essential ^a	12	9
Total	132	78

^a Endoscope provided information to avoid complications or to improve surgical possibilities.

sponded that the frequency of repair and endurance of the scope can vary significantly depending on how the scopes are handled not only by surgeons or nurses who manipulate scopes during surgery, but also by the comedical staff, who clean and prepare scopes before and after procedures. The median costs of an endoscope is US \$8000, and the most updated endoscope video system costs a median of US \$50,000. The video systems are required to be renewed by the government law every 6 years in Japan. Only a few neurosurgeons share the scope system with other divisions. The most advanced endoscope holding device made by Aesculap Co. or Mitaka Khoki costs approximately US \$25,000 and also should be renewed every 6 years. The disposable cover for the scope holder costs US \$10. According to the median numbers shown in Table 4, the scope itself costs approximately US \$160 and the video system costs approximately US \$104 per patient. In the same manner, an endoscope holder cost US \$52

view partly because of the narrow surgical approach (3, 12). However, Jho (7, 8) pioneered the application of the endoscope as a primary optical device, especially in pituitary or spinal procedures, and advocated the usefulness of the endoscope to minimize surgical invasiveness. In this paper, we determined the clinical benefits gained by use of the endoscope and not by its "less invasiveness," because it is difficult to gauge how invasive a procedure is (7). We assessed the benefit of endoscope by the absolute benefits gained by the endoscope, such as preventing complications or improved achievements, which were not feasible or safe under the operative microscope. In our experience of 210 consecutive patients undergoing endoscopic microneurosurgery, we noted 10% of patients experienced these benefits by the use of an endoscope. These clear benefits are equally present in the treatment of both

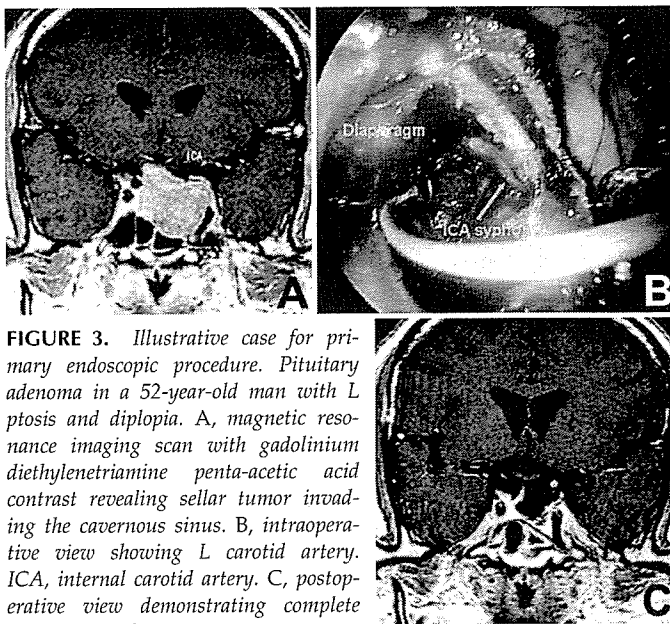


FIGURE 3. Illustrative case for primary endoscopic procedure. Pituitary adenoma in a 52-year-old man with L ptosis and diplopia. A, magnetic resonance imaging scan with gadolinium diethylenetriamine penta-acetic acid contrast revealing sellar tumor invading the cavernous sinus. B, intraoperative view showing L carotid artery. ICA, internal carotid artery. C, postoperative view demonstrating complete tumor removal.

able information in managing objects beyond the deep narrow corridor and behind the fixed important structures with minimal mobility, such as internal carotid arteries, optic nerves, cranial nerves entering cranial base foramen, the brainstem itself, the limit of bony removal, and so forth. In the cistern, endoscopes will be highly beneficial in managing aneurysms in the backside of carotid artery or in the basilar complex, lesions in the interpeduncular fossa, third ventricular and paraschiasmatic lesions, vestibular schwannomas in the internal auditory canal, and in decompressing redundant offending vessels during microvascular decompression without retracting cerebellum excessively. Also in the extradural and cranial base pathological features, when the lesions extend outside the line of sight behind the limit of bony removal or important structures, endoscopes should be prepared, or such lesions should be managed by primary endoscopic procedures. However, the endoscope may provide minimal benefits in managing lesions circumferentially accessible under the microscope, such as the lesions around the middle cerebral artery complex, the superficial cerebral or cerebellar lesions. To reduce the additional cost by damaging scopes, the comedical staff in addition to surgeons and nurses should be well trained in handling and preparation of fragile endoscopes. Also in the institutions where fewer endoscopic procedures can be achieved per year, collaborating on the purchase of the endoscope and video system and efficient use of limited resource should be entertained.

Technical Difficulties in Endoscopic Microneurosurgery and Solutions

There are still a number of difficulties in using endoscopes during microneurosurgery, including 1) neurosurgeons are not used to using endoscopes or video-guided surgery, 2) bimanual surgical procedures cannot be achieved when holding a scope with one hand, 3) no information immediately around the endoscope is available, 4) clouding vision by bloody body fluid, and 5) insufficient development of endoscopic equipment. To overcome such technical barriers, the endoscope should be used as frequently as possible in the initial phase of the procedure by the surgical team so that they become familiar with the preparation and use of endoscopes. Also, an endoscopic procedure should be practiced with cadaveric or virtual models. To perform sophisticated bimanual procedures under endoscopic view, there needs to be an easily maneuverable endoscopic holding device that can be quickly fixed and released (10). When the endoscope is used to assist routine microsurgery, the microscope should be equipped with a picture-in-picture device so that the surrounding neurovascular structures are not damaged when the instruments under the endoscope are inserted or manipulated. Also, irrigating suction can solve the problem of cloudy vision simply. Surgical instruments for neurosurgical endoscopic surgery must provide meticulous and accurate maneuverability in addition to the possibility of passing through the narrow corridor (2, 6). To be able to perform various types of proce-

Type of complication	No.
Cerebrospinal fluid leak	3
Delay of auditory brainstem response	2
Dislodged aneurysm clip	1
Cortical vein tear	1
Intratumoral hematoma	1
Bleeding from unrecognized aneurysm during pituitary surgery	1

cisternal or extradural cranial base pathological features. According to our and other neurosurgeons' experience as well as the information provided by the endoscope companies, the average cost for the use of an endoscope per patient was calculated to be US \$326. The significant benefit of the endoscope was equivalent to US \$3260. Considering the cost of reoperation to treat complications or to manage residual lesions, which might have occurred in these 21 patients, the authors believe this cost is reasonable and that using an endoscope in routine neurosurgery should be considered cost-effective. Also, even if only additional visual information without clinical improvement is obtained by the endoscope, it can provide reassurance for the surgeon. No permanent complication from the endoscope was encountered in our experience.

To improve the cost-benefit of the endoscope in the field of neurosurgery, a precise indication should be delineated. In our experience and according to the response from the frequent endoscope users, endoscopes provided the most valu-

TABLE 4. Assessment of additional costs in using endoscope in routine microneurosurgery by the data acquired from 10 neurosurgeons and 6 companies that provide endoscopic equipment in Japan

Information	Range	Median
Neurosurgeons ^a		
Patients per year	5–150 patients/yr	80 patients/yr
Frequency of braking or renewal of endoscopes	0–1/50 patients	1/100 patients
Renewal of video system	2–5 yr	5 yr
How many scopes used per surgery?	1–4 scopes/surgery	2 scopes/surgery
Share endoscopes with other departments	No	No
Endoscopic companies ^b		
Cost of a scope (United States)	US \$5000–11,000	US \$8000
Cost of the most recommended video system (United States)	US \$25,000–57,000	US \$50,000
Recommended renewal		
Endoscopes	5–8 yr	8 yr
Video system	6 yr	6 yr
Experienced repair per scope	1/400 patients–2/yr	1/yr
Selling a scope system to sharing divisions?	0–10%	0%
Average costs (United States)		
Endoscope	(US \$8000×2)/100	US \$160
Video system	US \$50,000/(6×80)	US \$104

^a Neurosurgeons who responded to the questionnaire included Drs. P. Cappabianca, H.D. Jho, T. Hori, Y. Kato, T. Miki, H. Mori, T. Nishihara, K. Oka, M. Taneda, and the authors.

^b Endoscopic companies include representatives in Japan who sell equipment made by Aesculap Co., Machida Khoki Co., Stryker Co., Storz Co., Olympus Co., and Wolf Co. Selling price may include additional cost and taxes for import except for two of the Japanese companies.

dures in such limited situations, we believe the introduction of a microsurgical robotic system is necessary (5). With the development of such systems, we believe surgical procedures under the endoscope can be improved dramatically and the endoscope will be used efficiently.

CONCLUSION

Through the experience of 210 microsurgical patients, we confirmed that the endoscope is a useful tool to be used in the routine microsurgery, not only in the specific small craniotomy approaches. It was used with significant benefit in 1 of 10 applications in our initial experience. To gain the most benefit from endoscopes, we should use endoscopes further in precisely selected approaches and develop more efficient surgical instruments and safer surgical approaches to manipulate instruments freely.

REFERENCES

- Agee JM, McCarroll HR Jr, Tortosa RD, Berry DA, Szabo RM, Peimer CA: Endoscopic release of the carpal tunnel: A randomized prospective multicenter study. *J Hand Surg* 17:987–995, 1992.
- Cappabianca P, Alfieri A, Thernes S, Buonamassa S, de Divitiis E: Instruments for endoscopic endonasal transsphenoidal surgery. *Neurosurgery* 45:392–396, 1999.
- Fries G, Perneczky A: Endoscope-assisted brain surgery: Part 2. Analysis of 380 procedures. *Neurosurgery* 42:226–231, 1998.
- Gaab MR, Schroeder HW: Neuroendoscopic approach to intraventricular lesions. *J Neurosurg* 88:496–505, 1998.
- Hongo K, Kobayashi S, Kakizawa Y, Koyama J, Goto T, Okudera H, Kan K, Fujie MG, Iseki H, Takakura K: NeuRobot: Telecontrolled micromanipulator system for minimally invasive microneurosurgery—preliminary results. *Neurosurgery* 51:985–988, 2002.
- Ikeda Y, Koyanagi N, Ezaki T, Toyomasu T, Sue K, Minagawa S, Sugimachi K: New suturing device for transanal endoscopic microsurgery. *Br J Surg* 84:1290, 1997.
- Jho HD: Endoscopic microscopic transpedicular thoracic discectomy. Technical note. *J Neurosurg* 87:125–129, 1997.
- Jho HD, Carrau RL: Endoscopic endonasal transsphenoidal surgery: Experience with 50 patients. *J Neurosurg* 87:44–51, 1997.
- Kalavakonda C, Sekhar LN, Ramachandran P, Hechl P: Endoscope-assisted microsurgery for intracranial aneurysms. *Neurosurgery* 51:1119–1126, 2002.
- Morita A, Okada Y, Kitano M, Hori T, Taneda M, Kirino T: Development of hybrid integrated endoscope-holder system for endoscopic microneurosurgery. *Neurosurgery* 55:926–932, 2004.
- Nishihara T, Teraoka A, Morita A, Ueki K, Takai K, Kirino T: A transparent sheath for endoscopic surgery and its application in surgical evacuation of spontaneous intracerebral hematomas. Technical note. *J Neurosurg* 92:1053–1055, 2000.
- Perneczky A, Fries G: Endoscope-assisted brain surgery: Part 1. Evolution, basic concept, and current technique. *Neurosurgery* 42:219–224, 1998.
- Rak R, Sekhar LN, Stimac D, Hechl P: Endoscope-assisted microsurgery for microvascular compression syndromes. *Neurosurgery* 54:876–883, 2004.
- Regan JJ, Guyer RD: Endoscopic techniques in spinal surgery. *Clin Orthop Relat Res* 335:122–139, 1997.

Acknowledgments

The authors thank Drs. P. Cappabianca, H.D. Jho, T. Hori, Y. Kato, T. Miki, H. Mori, T. Nishihara, K. Oka, and M. Taneda for their responses to the questionnaire and valuable comments and the Japanese representatives of the endoscopic companies (Aesculap Co., Machida Khoki Co., Stryker Co., Storz Co., Olympus Co., and Wolf Co.), who provided valuable information. Part of the study was supported by a grant from New Energy and Industrial Technology Development Organization in Japan.

COMMENTS

The dramatic development of surgical sciences in the 20th century and in the first years of the 21st century is in part owing to the introduction and continued refinement of sophisticated instrumentation that help doctors to perform complex surgeries in a safer and more effective manner for both the patients and surgeons. Perhaps, this is even more true for neurosurgery. The reverse of the medal is that these usually expensive equipment weigh heavily on the costs of the patients' care. Such costs could be redeemed with the critical use of the tools in the direction to avoid operative complications, avoid reoperation for incomplete tumor removal, and to improve surgical possibilities.

In this article, Morita et al. carefully reviewed the cost effectiveness of the use of the endoscope in neurosurgery. They present their experience regarding a wide range of intracranial pathologies and integrated a survey conducted among neurosurgeons worldwide, who frequently use endoscope in their practice, and among companies providing endoscopic equipment in Japan.

They found that the use of the endoscope, even if as a complement of microsurgery (endoscope-assisted microneurosurgery), positively affected the overall costs of routine microsurgical operations in terms of improvement of surgical results and reduction of complications. Indeed, it would have been also interesting to know how much their results affected the postoperative hospital stay, which may represent one of the indicators of usefulness and cost-effectiveness of any new procedure.

In planning to buy new tools and instrumentations, hospital management should consider the purchase as a mid- to long-term investment, with an economic return that usually exceeds the previous expenses if the same tools and instrumentations are used with the proper indications and skill.

Luigi M. Cavallo
Paolo Cappabianca
Naples, Italy

There is actual considerable pressure for more cost-effective procedures with lower risk in neurosurgery. The title of the paper is very promising for both the patients and the surgeons. Health politicians also have interest and are involved in this matter. But, we are sorry to say, the authors have no news. It is of no effect to repeat commonly known facts such as uncertainty and limitations of endoscopic procedures in cranial base and cisternal space occupying lesions. Everything has been reported several times. Meanwhile, the hazards of neuroendoscopy are well known. The contribution of this article to the usefulness of neuroendoscopy and endoscopically assisted microneurosurgery to pathologies described is rather poor. Complaints about the inadequacy of the endoscopic instruments, not properly fitted to the pathology to be treated, are also well known.

Concerning the learning curve, we agree with the authors that instrumentation should first be practiced with cadaveric or virtual models before real surgical experience. We also emphasize the need for an easily maneuverable endoscopic holding device. Only in this way it is possible to free the surgeon's hands for both bimanual procedures under microscopic view and the IN and OUT procedures with the endoscope.

Concerning the cost effectiveness of neuroendoscopy, the calculation presented is highly speculative and based on 210 very heterogeneous pathologies with different approaches and probably not comparable operating times. In fact, in only 10% of the cases presented, the procedure, or the mode of acting, was, to some extent, successful. In 90%, the endoscopic procedure was only

visual assistance of the microsurgical procedure without considerable influence to the strategy or the outcome of the operation. Strictly speaking, is that worth the expense? I think neurosurgeons familiar with the handling of the endoscope in brain surgery have experienced that the equipment now available is not appropriate for most of the pathologies presented in this study. In the long run, this kind of neuroendoscopy does not contribute towards more familiarity and trustworthiness of the procedure. Finally, it remains to be mentioned from the reviewer's point of view only a prospective, randomized trial with a definite study design can give an answer to such a complex matter of surgical usefulness and cost-effective management. Lastly, it may be remembered that the significance of neuroendoscopy, especially in extracerebral and cranial base processes, is still a matter of controversy in neurosurgery.

Bernhard L. Bauer
Hannover, Germany

This study from Morita et al. is a valuable evaluation of endoscopic procedures using the personal series of the principal author (AM) in two departments. The most important features are: 1) evaluation of the usefulness of endoscopes by applying four classes and 2) the calculation of indications for a "cost-effectiveness" of the endoscope application in neurosurgery. This calculation is certainly "raw," but a valuable estimate for further discussion based on quantitative information from scope companies and a questionnaire sent to a number of endoscopically active neurosurgeons.

The total number of patients (210) was divided into those with extradural/paranasal sinus base pathologies, and those with cisternal pathologies. The main results are of significant importance and are of interest to the neurosurgical reader: In cisternal pathologies, endoscopes were mainly (82 %) used only for visual assistance. This was, however, of great value in individual cases (e.g., in replacing clips), whereas in extradural cranial base procedures, the endoscope was the only ("primary") or at least in a significant part used visualization device in 88% of cases. This corresponds to our experience, in which the extradural approach to the anterior cranial base, especially to the sellar and clival region, utilize the endoscope instead of the microscope in most patients today. We agree with the authors that, in contrast to ventriculoscopy, there do not yet exist clear standards of endoscopic technique in this area, e.g., we do not completely agree with Dr. Cappabianca's no-speculum-technique. In our experience with far more than 100 cases, the selective use of specula improves the surgical preparation and cuts down dramatically the time of surgery. The cost-effectiveness is important for evaluation, and is under intense discussion in other fields of endoscopic surgery, e.g., in ear, nose, and throat surgery close to the anterior cranial base (1). Morita et al. find the scope useful in 1 out of 10 applications. These figures should be improved in the future by applying endoscopic neurosurgery more precisely according to the indication.

So the most important parts are the quantitative evaluations with the adequate tables. Also, the case illustrations are adequate. This study is certainly not an exact analysis of possibilities, limitations, and costs of using endoscopes in cranial base surgery. But, it is a good base for the ongoing discussion in this field and should encourage more neurosurgeons to be trained in endoscopy and to use this valuable tool in routine neurosurgery. Then, we will develop real standards as we have for the microscopic approach.

Michael R. Gaab
Hannover, Germany

1. Wang PC, Chu CC, Liang SC, Tai CJ: Cost-utility analysis for endoscopic sinus surgery. *Otolaryngol Head Neck Surg* 130:31-38, 2004.

* 研究論文 *

連続関数型変形モデルを用いた皮膚の変形
シミュレーションと医療トレーニングシステムへの応用田村 信彦^{*1} 津村 徳道^{*1} 三宅 洋一^{*1} 岡住 慎一^{*2} 田辺 政裕^{*3}

要 旨

本研究では触診、注射針の穿刺に伴う皮膚の変形シミュレーションを行い、中心静脈穿刺トレーニングシステムに応用した。中心静脈穿刺トレーニングシステムは触覚デバイス、立体視液晶メガネを用いて視覚・触覚的に人体を提示し、仮想的に人体に穿刺針を刺すことができるシステムであり、本研究で開発を行った。このようなVRシステムでは視覚と触覚を同期させることが重要であるため、触覚ポイントの皮膚への接触に伴い皮膚をインタラクティブに変形させる必要がある。インタラクティブ性に優れた変形モデルとして、柱状要素で物体を構成する Long Element Method (LEM) が Remis らにより提案されている。本研究では LEM を離散表式から連続表式に変形し、得られる微分方程式の解に基づき変形を行うことにより、変形処理を高速化した。また、解析解に含まれる物理パラメータは三次元スキャナによる測定形状と、理論形状の誤差を最小とするように定めた。

キーワード：変形モデル、医療トレーニングシステム、連続関数、中心静脈穿刺、VR

Med Imag Tech 22(1):-, 2004

1. はじめに

近年の計算処理能力の向上、グラフィックスハードウェアの発達などを背景に、PC レベルにおいても高密度なポリゴンの描画が高いフレームレートで実現可能である。多くの 3D アプリケーションではマウスやキーボードからの入力に対し、視点位置を変化させ、インタラクティブに画像を生成することができる。こうしたCG技術の発展の恩恵を受け、PHANToMなどの触覚デバイスを用いたリアルタイム医療トレーニングシステムが提案されている[1]。リアルタイム医療トレーニングシステムではCGにより表示された人体に対し、触覚を伴って仮想的に手術訓練などが行えることから、医学教育に多大な貢献をもたらすものと考えられている。

本研究で開発を行った触覚デバイスを用いた医療トレーニングシステムでは、視点を任意に選択できる他に、触覚ポイントが皮膚を押した場合に、その深度に応じてこれを変形させる必要が生じる。開発したシステムにおいて皮膚の触覚再現は Spring-damper モデル [2] を用いて実現しているが、仮想物体が変形を伴わない場合、触覚的には軟らかい感触が得られるにもかかわらず、視覚的には仮想物体の形状は変わらず、剛体として知覚されてしまう不具合が生じる。触覚と視覚の同期を取ることは、トレーニングシステムの現実感を高める上で不可欠であり、インタラクティブにCG物体を変形させる必要がある。

CG物体を変形させる技術は1980年代から現在に至るまで活発に研究されており、CG技術において一分野を構成している。インタラクティブな変形シミュレーションの実現方法は初期に提案された、バネと質点から三次元メッシュでCG物体を再構成し、局所的な変形の総体として物体の変形を捉える手法 [3] が主流となっている。この手法を基に、バネの振動発散を抑えたモデル [4] や多重解像度表現により、大域的な変形を高速化する手法 [5] などが提案されてい

^{*1} 千葉大学大学院自然科学研究科 [〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33]

e-mail: tamura@graduate.chiba-u.jp

^{*2} 千葉大学大学院医学研究院先端応用外科

^{*3} 千葉大学医学部附属病院卒後・生涯医学臨床研修部

投稿受付：2003年8月18日

最終稿受付：2003年11月7日

採用決定日：2003年11月18日

る。

しかしながら、三次元メッシュを構成する上で、CG物体のスケールに対し、三乗のオーダーでバネと質点からなる変形要素が増加することや、時間進展に関する漸化式を解く必要性から、常にインタラクティブ性と変形精度がトレードオフの関係にある。とくに人体など多数のポリゴンから構成されるCG物体に関しては、PCレベルでは処理能力の限界に達することが多い。

本研究では、Remisらにより提案された、比較的計算負荷の低い変形モデル Long element method (LEM) [6] を改良し、連続関数型変形モデル、Continuous LEM (C-LEM) を提案する。C-LEM では逐次計算をベースとする LEM において離散形式で表された基礎方程式を連続形式に変形し、得られた微分方程式の解である変形形状を求めることにより、フレームごとに必要となる逐次計算の負荷を軽減する。また、解析解は弾性率などの物理パラメータを含むが、本研究では穿刺時の形状を三次元スキャナにより取得し、モデルによる形状との誤差が最小となるようにこれらを定めた。逐次計算が主流の変形モデルの分野において、解析解を求め変形の高速度を図ることは画期的であると考えられる。また、形状測定により物理パラメータを求める手法は、他分野へも広く応用可能であると考えられる。

次節では C-LEM 開発の動機となった中心静脈穿刺トレーニングシステムについて概説する。

2. 中心静脈穿刺トレーニングシステム

中心静脈穿刺は中心静脈栄養法において用いられる手技である。中心静脈栄養法とは、心臓の

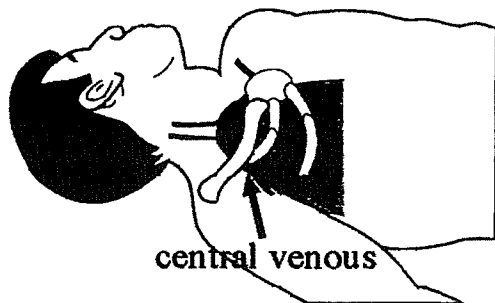


Fig. 1 Central venous.

近くの太い静脈（鎖骨下静脈）に中心静脈カテーテルを挿入し、このカテーテルから点滴を行う方法である。カテーテルを静脈内に通すためには、ガイドとなる穿刺針を刺して鎖骨下静脈へ到達させる必要がある。この際、注射針による鎖骨下静脈に隣接する臓器の損傷、すなわち肺損傷（気胸）、動脈損傷（出血）などを起こさないように穿刺を行わなければならない（Fig. 1）。すなわち鎖骨下静脈は安定性に優れ長期留置に適する一方で、体表から観察ができず、また解剖学的にも難しい位置にあり、穿刺にあたって習得が困難な部位といえる。鎖骨下静脈穿刺は臨床において頻りに利用する手技であるにもかかわらず、いまだ有効な練習方法が開発されていなかった。

本研究で開発を行った中心静脈穿刺トレーニングシステムでは CT 画像を基にマーチングキューブ法により三次元再構成を行い、実物と同スケールでの立体視を用いて人体を表示する。マーチングキューブ法では閾値の設定により、閾値に対応する部位の表面形状が得られるが、本研究では血管造影を行ったため、骨と血管の CT 値が近く、三次元形状が同時に取得されてしまう。このため、ポリゴン編集ソフトウェアなどを利用し、手動で分離を行った。

触診、穿刺の際の力覚再現には SensAble Technologies 社製 PHANTOM を用いた。ユーザーは PHANTOM のスタイラスを操作することにより触診、穿刺などの手技を仮想的に行うことができる（Fig. 2）。また、体表を透過表示することにより、血管位置を把握するなど学習効果を高める機能も付与した（Fig. 3）。穿刺ステップでは、

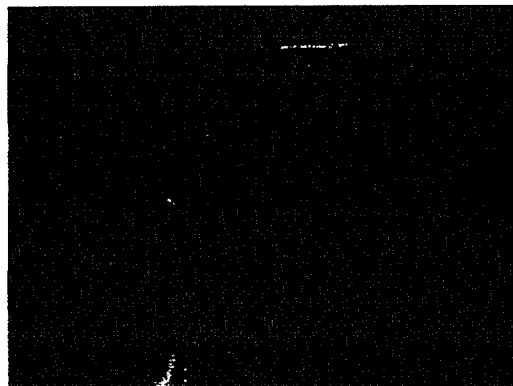


Fig. 2 Training system for central venous injection.

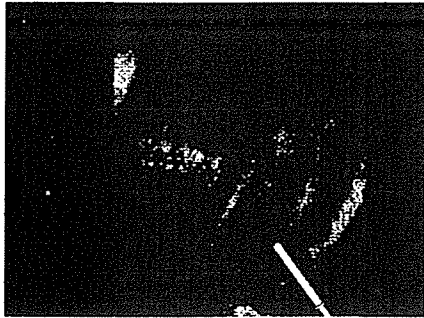


Fig. 3 Screen of the training system.

実際は皮膚にある程度の変形が生じた後、穿刺針が刺さるが、本研究ではこの変形をC-LEMにより実装する。

3. Long element method 概要

LEM では、変形対象である物体を LE(Long Element) に分割し、表面形状の変形を個々の LE の伸縮 ΔL_i により表現する (Fig. 4).

i 番目の LE を LE_i とする。仮に LE_i が DL_i 引き伸ばされているとすると、 LE_i の表面 A_i には弾性力と気圧 P_{atm} 、および周辺 LE から受ける表面張力により (1) 式で表される下向きの力 F_{down} が加わる。

$$F_{down} = \frac{E}{L_i} \Delta L_i A_i + P_{atm} A_i + \sum_{j \in Nbr_i} k(\Delta L_i - L_j) \quad (1)$$

ここで E は弾性率、 A_i は LE 上底の面積、 k は表面張力の強さを表す定数であり、第三項の総和は i に隣接する LE についてとるものとする。 Nbr_i は LE_i に隣接する LE の集合を表す。第三項では LE_i が周辺の LE より伸びている場合には下向き、逆の場合には上向きの力が加わる。LE 上底に上向きに加わる力として LE の内部圧力 P_{fluid} が存在する。 F_{down} と内部圧力 P_{fluid} の釣りあいを考えて (2) 式を得る。

$$\frac{E}{L_i} \Delta L_i + \frac{k}{A_i} \sum_{j \in Nbr_i} (\Delta L_i - L_j) + \Delta P = 0 \quad (2)$$

ただし、 ΔP は次式で定義する。

$$\Delta P = P_{atm} - P_{fluid} \quad (3)$$

LEM では一点接触を仮定しており、触覚ポイントにより、 α 番目の LE が y 押されていると考え

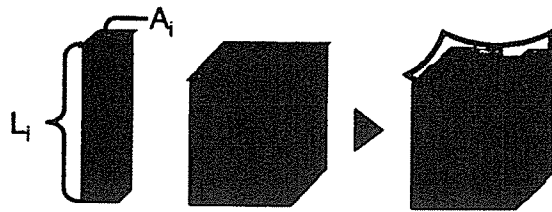


Fig. 4 Long element method.

ると

$$\Delta L_\alpha = y \quad (4)$$

LEM では物体を非圧縮性流体と考え、(5) 式によりその定義を行う。

$$\sum_{i=1}^N A_i \Delta L_i = 0 \quad (5)$$

N は LE の総数である。 ΔL と ΔP の $N+1$ 個の変数があり、 $i \neq \alpha$ である $N-1$ 個の LE について (2) 式、 α 番目の LE について (4) 式、体積不変性から (5) 式の合計 $N+1$ 個の方程式が存在する。したがってこれらの線形方程式を解くことにより、個々の LE の変形 ΔL_i を求め、表面形状を得ることができる。

LEM における構成要素 LE は、バネ質点モデルと異なり、CG 物体のスケールの二乗、すなわち物体表面を構成するポリゴン数に比例して増大するため、比較的リアルタイム処理に適している。しかしながら、PC ベースのシステムで、なおかつ他のシステム処理と並行して動作させるには、描画フレームごとに線形方程式を解く計算負荷は無視できるものではない。しかし、本研究で開発を行った中心静脈トレーニングシステムにおいて、触診部位の変形による体積変化量は人体の体積に比べて微小であり、(2) 式における物体内外の圧力差 P は一定であると考えられる。他にも触診部位から十分離れた LE は触診部位の LE の変形に関与しないなど、変形アルゴリズムを簡略化し、計算負荷を軽減できる余地が残されている。

4. Continuous LEM

1) 解析解の導出

本研究で提案する Continuous LEM (C-LEM) では (2) 式を微分方程式として表し、近似的に解析解を得ることにより、線形方程式の計算による

負荷を軽減する。

(2)式において物体内外の圧力差Pを一定とする。これはLEMを中心静脈穿刺トレーニングシテムに応用する場合、接触点近傍による変形体積が人体体積に比べ微小であるため、圧力の増減は変形に寄与しないことに基づいている。(2)式において $\Delta P=0$ として、次式を得る。

$$\frac{E}{L_i} \Delta L_i + \frac{k}{A_i} \sum_{j \in Nbr_i} (\Delta L_i - \Delta L_j) = 0 \quad (6)$$

LEMでは物体を矩形分割するが、(6)式を微分形式に直す上では、極座標形式で分割を行う方が都合がよい。すなわち極座標表現を行う。 $\Delta L(r, \theta)$ は時間に関する差分であるから微小量として表すと(7)式のように書き直すことができる。

$$\Delta L_i(r, \theta, t) = L(t + \Delta t) - L(t) \Rightarrow \frac{\partial L}{\partial t} dt \quad (7)$$

ここで矢印 \Rightarrow は離散式から連続式への書き直しを表すものとする。(6)式の第二項についてLEの面積 A_i は極座標系の微小面積として(8)式のように書くことができる。

$$A_i \Rightarrow r \theta dr \quad (8)$$

また、第二項における隣接するLEに関する総和を展開して(9)式を得る。

$$\sum_{j \in Nbr_i} (\Delta L_i - \Delta L_j) = \Delta L(r, \theta) - \Delta L(r + \Delta r, \theta) + \Delta L(r, \theta) - \Delta L(r - \Delta r, \theta) \quad (9)$$

ただし、変形は回転対称と考えるため、 $\Delta \theta$ に関する差分は無視した。(9)式について $\Delta r \rightarrow 0$ とすることで(10)式を得る。

$$\sum_{j \in Nbr_i} (\Delta L_i - \Delta L_j) \Rightarrow \frac{\partial \Delta L(r, \theta)}{\partial r} dr^2 \quad (10)$$

(7), (8), (10)式から(11)式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[E \log L - \frac{k}{r} \frac{\partial^2 L}{\partial r^2} \right] = 0 \quad (11)$$

ここで $\Delta r / \Delta \theta = 1$ の関係を保ちながら極限をとると $dr/d\theta = 1$ が成立し、(11)式を積分し、(12)式を得る。

$$E \log L - \frac{k}{r} \frac{\partial^2 L}{\partial r^2} = C_1(r)$$

同じ係数に等かず
 $\frac{k}{r} \frac{\partial^2 L}{\partial r^2}$ の分母は
同じ分母
(12)式

C_1 は未定関数である。外力が加えられていない

$$\left(-\frac{k}{r} \frac{\partial^2 L}{\partial r^2} \text{ なら } -\frac{k}{r} \frac{\partial^2 L}{\partial r^2} \right)$$

$$\int_{j \in Nbr_i} (\Delta L_i - \Delta L_j) \Rightarrow - \frac{\partial^2 \Delta L(r, \theta)}{\partial r^2} dr^2$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2 L}{\partial r^2} =$$

$$\frac{k}{r} \frac{\partial^2 L}{\partial r^2}$$

12式同様に

状態でのLEの長さを L_0 とすると、(12)式は次の特解を持つべきである。

$$L(r) = L_0 \quad (13)$$

(12), (13)式から

$$E \log \frac{L}{L_0} - \frac{k}{r} \frac{\partial^2 L}{\partial r^2} = 0 \quad (14)$$

を得る。(14)式を変形し、次の表式を得る。

$$\alpha \log l - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 l}{\partial r^2} = 0, \text{ where } \alpha = \frac{E}{kL_0}, l = \frac{L}{L_0} \quad (15)$$

すなわち変形形状は表面張力と弾性力の比であるパラメータ α により定められることになる。

(15)式を近似的に解いて次式を得る。

$$l(r) = 1 - \exp \left[\frac{1}{6} \alpha r^3 - \frac{1}{2} C_1 r^2 + C_1 r + C_2 \right] \quad (16)$$

ここで C_1, C_2 は未定係数である。

2) 変形パラメータの決定

(16)式で与えられた変形形状は表面張力と弾性力の比 α と未定係数 C_1, C_2 の3つのパラメータを含む。これらパラメータを決定するため、本研究では三次元スキャナ VIVID900(MINOLTA)を用いて、穿刺点付近である鎖骨付近を鋭利な物体で圧迫しながら撮影し、穿刺時の三次元形状を取得した(Fig.5)。この形状と通常時の形状との差分をとることにより、変形形状を求める。なお、差分はFig.5における白線上でとった。(16)式におけるパラメータを理論変形形状と実測による変形形状との誤差が最小となるように、最適化を行い、決定した。Fig.6に実測から得た変形曲線とモデルによる曲線を表す。なおFig.6では原点における変形を1とした。触診時の変形パラメータも圧迫する物体の面積を変えることにより、同様の手法により求めることができる。

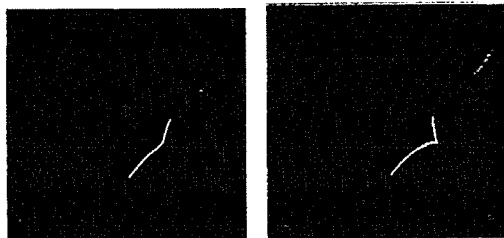


Fig. 5 Deformation of skin.

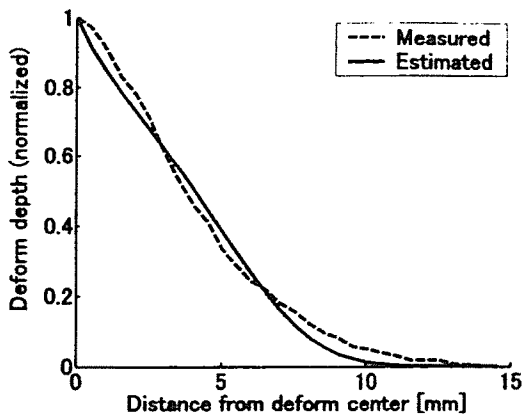


Fig. 6 Approximation of deformation.

3) 中心静脈穿刺システムへの実装

C-LEM を CG 物体に適用する場合, PHANTOM スタイルと皮膚の接触を検出し, CG 物体を構成する頂点を接触点との距離に基づき, 変形させる. 具体的には i 番目の頂点の変形前の座標を X_i, Y_i, Z_i , 接触点との距離を r_i , PHANTOM スライラス位置を X_{ph}, Y_{ph}, Z_{ph} , 接触があった頂点の変形前の位置を X_0, Y_0, Z_0 とした場合, i 番目の頂点座標を次式により計算した.

$$\begin{bmatrix} X'_i \\ Y'_i \\ Z'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} + e^{f(r_i)} \left\{ \begin{bmatrix} X_{ph} \\ Y_{ph} \\ Z_{ph} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \right\} \quad (17)$$

ただし,

$$f(r) = \frac{1}{6}ar^3 - \frac{1}{2}C_1r^2 + C_1r + C_2 \quad (18)$$

接触点から遠方の頂点には影響がないことから, 変形は接触点から 15mm 以内の頂点に限った. Fig. 7 に平面物体に C-LEM を適用した場合の形状変化を表す. また, Fig. 8 に中心静脈穿刺トレーニングシステムに C-LEM を実装した際の変形の様子を表す. C-LEM をシステムに実装した結果, フレームレートにして 30 frame/sec での描画が可能であることを確認した.

5. まとめ

本研究では皮膚の変形モデルとして C-LEM を提案し, 中心静脈穿刺トレーニングシステムへの実装を行った. RC-LEM では LEM における基

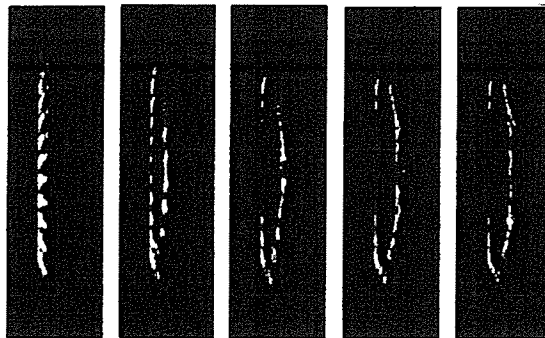


Fig. 7 Implementation of RC-LEM for planer surface.

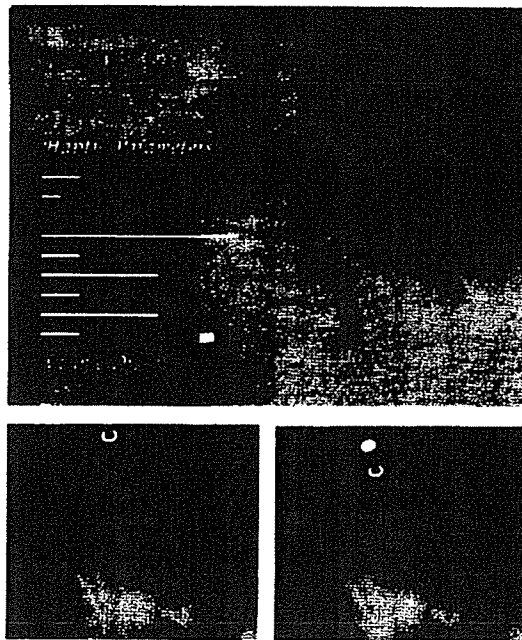


Fig. 8 Implementation of RC-LEM for training system.

礎方程式を微分形式で表し, これを近似的に解くことにより, 漸化式の計算にかかる負荷を廃した. また, 三次元スキャナを用いて変形形状を取得し, 理論形状をフィッティングさせ, 誤差が最小となるようパラメータを決定した. また, C-LEM を中心静脈穿刺システムに実装し, インタラクティブな変形が行われることを確認した.

文 献

- (1) 向井信彦, 原田雅之, 小山博史: リアルタイム手術シミュレータの構築. VR 医学 1(1): 72-77, 2002
- (2) Frederick PB et al: Project grope-haptic displays for scientific visualization. Proc. conf. SIGGRAPH: 177-185, 1990

- [3] Demetri T, John P, Alan B et al: Elastically deformable models. Computer Graphics: 205-214, 1987
- [4] 宮崎慎也, 安田孝美, 横井茂樹, 他: 仮想弾性物体の対話操作のためのモデル化と実現. 電子情報通信学会論文誌 J79-A,11: 1919-1926, 1996
- [5] Gilles D, Mathieu D et al: Adaptive Simulation of Soft Bodies in Real-Time. Computer Animation 2000:133-144, 2000
- [6] Remis B, Ivan FC: LEM – An approach for physically based soft tissue simulation suitable for haptic interaction Fifth Phantom User Group Workshop: 26-30, 2000

Simulation of Skin Deformation Using RC-LEM and its Application to a Medical Training System

Nobuhiko TAMURA^{*1}, Norimichi TSUMURA^{*1}, Yoichi MIYAKE^{*1},
Shinichi OKAZUMI^{*2}, Masahiro TANABE^{*3}

^{*1} Graduate School of Science and Technology, Chiba University

^{*2} Department of Academic Surgery, Graduate School of Medicine, Chiba University

^{*3} Chief, Postgraduate and Continuing Medical Education Center, Chiba University Hospital

In this paper, we propose an analytic deformation model for the skin. We have applied our method to a medical training system for central venous injection, which is a part of central venous catheter (CVC) placement. The training system renders the human body with haptic interaction using a PHANTOM haptic device. In such a VR system, it is important to synchronize the visual representation with the haptic interaction. Therefore, it is necessary for the skin to deform when it is touched. A number of studies have investigated the animation of deformable bodies, but the methods described have generally been computationally intensive, especially for large polygons. We propose C-LEM using an approximate solution of a base equation in LEM as proposed by Remis et al. to exclude computation for a linear system. The parameters of the proposed model were determined by minimizing the error between the modeled and measured shapes.

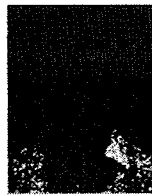
Key words: Deformation model, Medical training system, C-LEM, CVC, VR

Med Imag Tech 22(1): -, 2004



田村信彦 (たむら のぶひこ)

1977年生。2002年3月千葉大学大学院博士前期課程卒業。同大学院博士後期課程に在学中。色再現工学、医療トレーニングシステムの開発に従事。日本VR医学会会員。



津村徳道 (つむら のりみち)

1995年大阪大学大学院博士後期課程修了。工博。現在、千葉大学工学部情報画像工学科情報工学コース助教授。1999～2000年米国ロチェスター大学客員助教授。医用画像工学、計測画像工学、色再現工学、質感再現工学の研究に従事。日本医用画像工学会、応用物理学会、日本写真学会、日本光学会、OSA、IS&Tなどの会員。



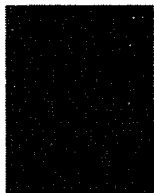
三宅洋一 (みやけ よういち)

1968年千葉大学大学院工学研究科修士課程修了。京都工芸繊維大助手。助教授。スイス連邦工科大研究員。千葉大工学部助教授を経て1989年より千葉大学工学部情報画像工学科情報工学コース教授。1997年米国ロチェスター大学客員教授。1997年よりタイ国チュラロンコン大学客員教授。2001年より東京工業大学教授併任。工博。



岡住慎一 (おかずみ しんいち)

1984年千葉大学医学部卒業。1990年沼津市立病院外科医長。千葉大学医学部付属病院助手。2002年より千葉大学医学部付属病院講師。日本外科学会認定医。指導医。日本消化器外科学会認定医。専門医。指導医。



田辺政裕 (たなべ まさひろ)

1974年千葉大学医学部卒業。1983～1988年アメリカ合衆国スタンフォード大学医学部放射線腫瘍学講座リサーチ・アシエント。千葉大学医学部附属病院小児外科助手。千葉大学医学部小児外科学講座助教授を経て1999年千葉大学医学部附属病院教授(卒後・生涯医学臨床研修部)。

■ 特集 役に立つ材料, 器具, 装置あれこれ

外科教育・訓練に役立つシミュレータ (器具, 装置)

田 辺 政 裕*

はじめに

手技を修得する際, “see one, do one, teach one”という学習のプロセスがある。最初に, 指導医の実技を観察し, 次に自分でやってみて, 最後に教えられるようになればその手技を修得したことになる。技能を高めていくうえで, 実際に手技を自ら行うというプロセスは不可欠である。しかし, 近年未熟な臨床技能に起因する医療事故がしばしば報道され, 患者, 国民からその改善が強く求められている。そのような要求に応えるためには, 臨床技能修得のためのトレーニングのプロセスが国民, 患者に対して明らかにされなければならない。患者を対象とした新たな技能のトレーニングを実施する際には, 学習者が基盤となる基本的な知識, 技能を身に付けていることがあらかじめ証明されなければならない。学習者は可能な限り患者以外の対象を使ってトレーニングを行い, その過程で基本的な知識, 技能を修得していることを証明する必要がある。このような背景からシミュレータを利用した外科手技のトレーニングは外科医が新しい技能を修得するためには欠かせないプロセスとなってきた。

I. 技能修得のためのシミュレータの利点

外科手技のトレーニングにシミュレータを利用することの利点としては以下のことがあげられる¹⁾。

- (1) 学習者は患者への配慮なしに自由にトレーニング項目を設定でき, 何回でも繰り返し

トレーニングすることができる。

- (2) 失敗が許される環境であるため, 臨床的には許容されないレベルまで手技を試すことが可能で, 真に危険なレベルを経験することで手技の安全性を高めることができる。
- (3) 主にコンピュータを利用したシミュレータでは学習者のパフォーマンスを逐次数値的に記録することが可能で, 客観的な評価に利用できる。
- (4) 学習記録をもとに瞬時にコンピュータによるフィードバックが可能で, その結果をもとに効率的な自己トレーニングができる。

上記のような利点以外にもシミュレータを利用するトレーニングは, ①主に自己学習であるため, 常時監督, 指導する必要がなく, その時間を利用して指導医は診療, 研究に従事できる, ②初期トレーニングを患者を対象に行わないことで, 患者はトレーニングの対象ではないことを学習者が自覚し, 医師としての倫理観の涵養に役立つ, ③シミュレータを利用することにより, 客観的評価が可能になり, 技能レベルの標準化が可能になるなどである。

II. シミュレータの種類と内容

本稿で使われるシミュレータにはいわゆるマネキンと呼ばれる人体モデル, コンピュータを利用した仮想 (virtual reality: VR) のモデル, および両者のハイブリッド型がある。ハイブリッド型は麻酔のトレーニング用に開発されたコンピュータプログラムを内蔵したハイテクマネキン, 外科用ロボットなどが該当するが, 本稿では外科教育用ということで扱わず, 人体モデルと VR モデル

* 千葉大学医学部附属病院卒後・生涯医学臨床研修部
〔〒260-8677 千葉市中央区爰鼻1-8-1〕



図1 千葉大学医学部附属病院におけるスキルス・ラボ
5年次学生が呼吸音, 心音の聴診の学習をしている。

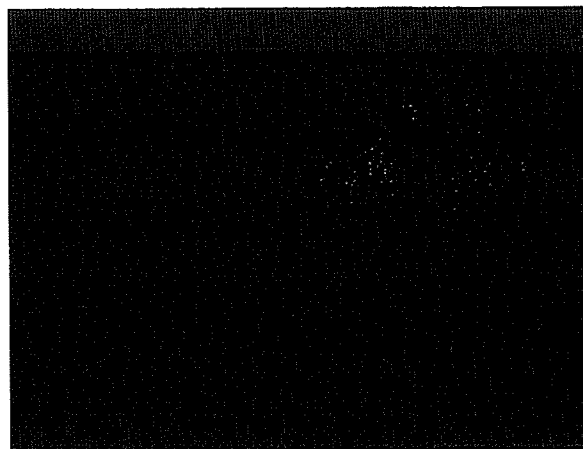


図2 前立腺触診モデル

について述べる。

1. 人体モデル (マネキン)

近年, 技術開発が進み外観, 感触など人体に類似したモデルが利用できるようになってきた。モデルの用途は身体診察, 技能トレーニング, 救急処置トレーニングに大別される。これらのモデルを利用して医療技能をトレーニングする部門が大学に設置されるようになってきた²⁾。スキルス・センター, スキルス・ラボ (図1) などと呼ばれ, 学生, 研修医はここで集中的にトレーニングを受けることができる。外科のトレーニングに関連した人体モデルを紹介する。

1) 身体診察

侵襲性のある診察手技のトレーニングのために利用される。乳癌触診モデル, 直腸診察モデル, 前立腺触診モデルなどがある。乳癌触診モデルは乳腺癌, 線維腺腫などの数種類の腫瘍をしこりとして触診できる。患者に対する自己診察法の指導にも使われる。直腸診察モデルは Sims 体位のモデルで肛門部を観察し, 肛門および直腸内を指診することができる。直腸内ポリープ, 癌など腫瘍性病変がセットになっている。前立腺触診モデル (図2) は碎石位のモデルであり, 正常前立腺, 前立腺肥大, 前立腺癌などをハンドル操作で交換できる。学習者はそれぞれの病変を順次触診することができる。

2) 診療手技

診療手技は主にカテーテル挿入, 穿刺, 縫合, 手術手技などであり, それぞれのトレーニングに適したモデルが用意されている。医学生とともに看護師などコ・メディカルの技能教育にも利用される。

(1) カテーテル挿入

男性 (女性) 尿道モデル, 口鼻腔・気管吸引用モデルなどがある。尿道モデルではカテーテルが膀胱内に達すると尿 (水) が排出する仕組みになっている。男性モデルでは尿道が S 字状に屈曲しているため, 陰茎を引き上げて尿道をまっすぐにしてカテーテルを挿入できるようになっている。口鼻腔・気管吸引用モデルはシミュレータ本体の断面が透明で見ることができ, 挿入したカテーテルの走行を見ながら吸引のトレーニングができる。気管は気管切開部からの吸引が行える。

(2) 穿刺

静脈・動脈採血, 静脈・筋肉・皮内注射, 中心静脈穿刺・カテーテル挿入, 腰椎穿刺などがある。穿刺は侵襲性のある代表的な手技でもあり, 多種類の人体モデルが利用可能である。静脈採血・注射モデル (図3) は腕モデルの皮下に正中皮静脈など採血に利用される血管が触診でき, 採血, 注射のトレーニングができる。注射のモデルは静脈のほかに筋肉, 皮内注射のモデルなども利用可能である。

中心静脈穿刺は臨床では必須の手技であるが, 気胸などの合併症があるため, とくにシミュレー



図 3 静脈採血・注射モデル

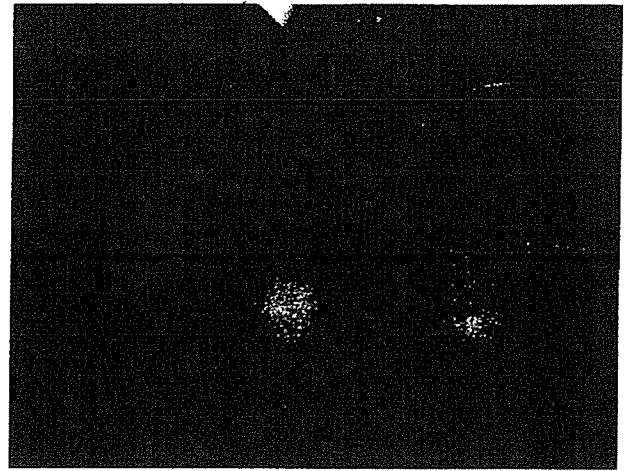


図 4 中心静脈穿刺・カテーテル挿入モデル

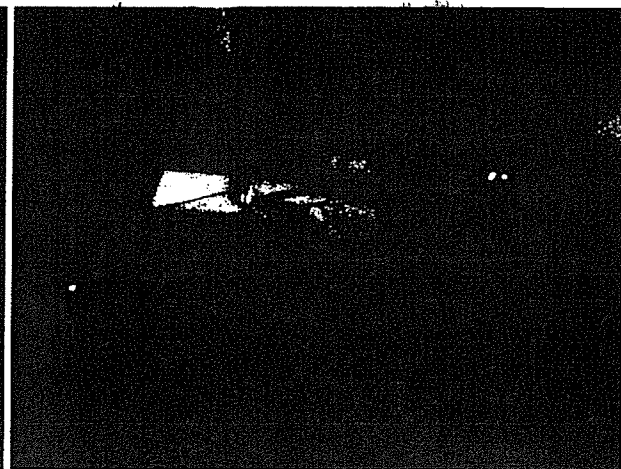
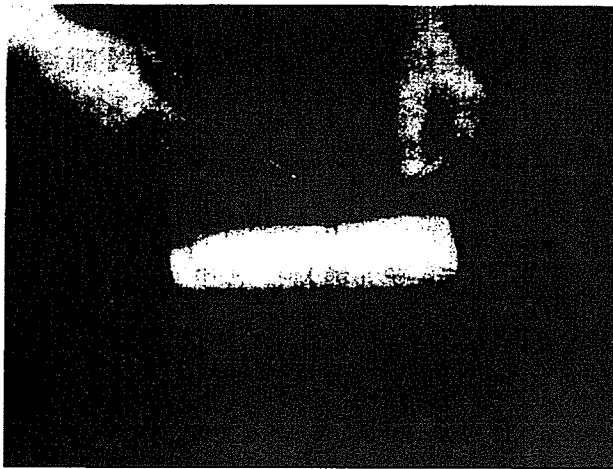


図 5 A. 縫合用モデル (皮膚), B. 縫合用モデル (腸管)

タを利用したトレーニングが求められる。中心静脈穿刺・カテーテル挿入モデルは現在試作の段階であるが、その概要を紹介する。胸部および頸部の人型モデル(図4)で、CT画像をもとに正確な解剖学的位置関係に右鎖骨下静脈・動脈および右内頸静脈、総頸動脈が組み込まれている。血管内には血液(赤色の液体)が流れており、穿刺されると血液の逆流がみられる。肺を穿刺すると空気が引け、右鎖骨下動脈および右総頸動脈を穿刺すると穿刺を示すランプが付くようにセットされている。右総頸動脈の拍動が触れるようになっており、これを指標に右内頸静脈を穿刺することができる。さらにセルジンガー法によりガイドワイヤーを利用して中心静脈カテーテル挿入のトレーニングも行える。

腰椎穿刺モデルは穿刺に加えて腰椎麻酔、硬膜

外麻酔、仙骨麻酔のトレーニングにも利用できる。 L_3 から L_5 および仙骨部が穿刺可能で、穿刺時に髄液(水)の逆流がみられる。

(3) 縫合

縫合は糸結びと並んで外科医にとっては欠くことのできない手技である。従来動物を利用するなどさまざまな方法でトレーニングが行われてきたが、最近では人体モデルが利用できるようになってきた。縫合用の皮膚、腸管、血管(図5)などがあり、目的に合わせて選択できる。皮膚モデルは全国の医学部学生を対象とする臨床実習前共用試験OSCE(Objective Structured Clinical Examination)でも小外科のステーションで使用されている。

(4) 手術手技

腹腔鏡下手術トレーナーが利用されている。腹

表 VR モデルの分類

操作	必要な技能	例
穿刺	針など正確な部位への穿刺	静脈留置針挿入, 中心静脈穿刺, 腰椎穿刺針挿入
検査手技	カテーテル, 内視鏡, 超音波の探触子などの操作	消化管(食道・胃・大腸)内視鏡, 気管支鏡, 腹部超音波検査
手術手技	手術手技などの実施	腸管・血管吻合, 腹腔鏡手術

(Kneebone, 2003 一部改変)¹⁾

腔を模した箱型の練習台にトロッカーを穿刺し、エンドスコープおよび操作用鉗子を挿入する。学習者はモニターに映し出される腹腔内の胆嚢のシミュレータを見ながら、鉗子を操作して胆嚢摘出術のトレーニングをすることができる。

3) 救急処置

喉頭鏡を使った気管挿管, 心マッサージ(成人・乳児) トレーニングなどのモデルがある。この領域は気管切開, 緊張性気胸に対する胸腔穿刺, 喉頭・気管異物排出手技などあらゆる救急疾患の状況を想定した救急処置のモデルが利用できる。最近では救急救命のトレーニングの普及に伴って新たな製品が開発されている。コンピュータを利用してシナリオに沿ってトレーニングが可能なモデルは ACLS 等のトレーニング用シミュレータとして世界的に汎用されている。

2. VR モデル

近年のコンピュータ, IT 技術の進歩によりこの領域のモデルは急速に進化している。コックピットでの航空機操縦のトレーニングなどに利用されていたシミュレーション技術が医療技術のトレーニング用に応用されるようになってきた。臓器の3次元画像をコンピュータグラフィックス(CG)でリアルに再現し, 患者および再現された臓器の処置に対する反応(変形, 出血など)を音声, CGでリアルタイムに伝え, さらに画面上に映し出される臓器および操作の感触も正確に学習者が感じることができるようになった。これらの技術革新により学習者は仮想の空間で人体に対するさまざまな処置のトレーニング(表)をすることが可能になった。

1) 穿刺

静脈穿刺の VR モデルでは, CG で患者の前腕

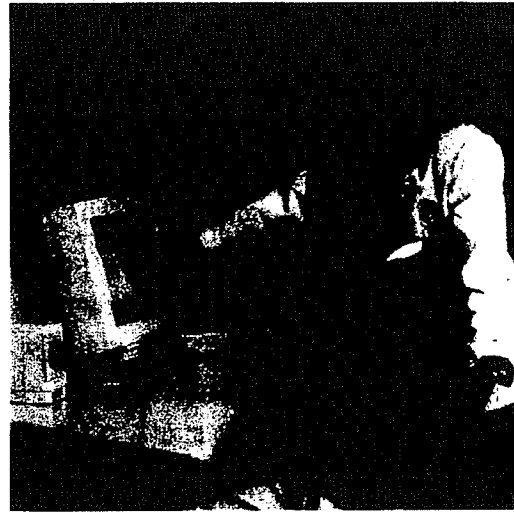


図 6 VR 静脈留置針穿刺トレーニングシステム

がコンピュータの画面上に映し出される。学習者はそこから静脈穿刺をする皮膚の穿刺部位を決め, 一連の手技(駆血帯を巻き, 静脈をタッピングで浮き上がらせ, 消毒し, 静脈に合うサイズの静脈留置針を選択し, 挿入部皮膚を緊張させ, 適切な角度で針を挿入し, 挿入できると血液の逆流がみられ, 内筒を抜去する)で静脈留置針を挿入する(図6)。上記の手技はすべてコンピュータのスクリーンを見ながらコンピュータのマウスと穿刺用シミュレータ針を使って行う。穿刺時, 学習者は実際の皮膚を穿刺する感触を VR で感じることができる。操作終了後, 操作が成功したか否かのメッセージがコンピュータから伝えられる。記録画面で学習者は手技が成功したか否か, 手技に要した時間, 血腫などの合併症の有無, 患者満足度など自らの手技の評価結果をみることができる。失敗した場合, その理由を検索するために穿刺部位と血管の透過像および血管と針との矢状断