

integration. CT and PET are conducted on the same inspection bench, and by superposing both images, anatomical CT information is added to PET imaging. Cancer is located correctly, effectively improving the diagnostic yield.

We demonstrated the effectiveness of integrating multiple diagnostic information, although the integration of preoperative image information is conducted only for the integration of preoperative image information. No system has, to our knowledge, been reported that integrates histological information such as brain malignancy by 5ALA induced Pp9 fluorescence measured during surgery, which our proposal realizes with anatomical and functional information obtained from diagnostic devices prior to surgery and shown in real time.

By proactively using both preoperative information and information from measurement equipment during surgery, the surgeon is encouraged to judge more exactly and effective treatment support is ensured. The integrated platform integrating intra-operative and preoperative information is expected to progress in the future as a basis for realizing more effective treatment support. To obtain precise treatment information, it is useful to realize and maintain precise time synchronization. We have shown that 30 ms time-synchronous precision is stably obtained under continuous two-hour system operation in an *in vivo* environment simulating clinical use, so more precise computer-assisted surgery is expected to be realized.

6. Conclusions

In our work, we have assumed a surgical environment in no Internet connection is available and have developed an integrated platform focusing on the integration of position and time. To realize such integration, we emphasized the importance of highly precise time standardization of subsystems and a redundant time-synchronous server.

We realized highly precise time integration by synchronizing time based on Cristian's algorithm under system environment limited to a LAN. Experiment confirmed highly precise time synchronization within 2 ms is realized.

We developed and implemented an algorithm in which a time-synchronous server is made redundant based on the number of surgical devices to be used, and integrated time information is maintained even when the time-synchronous server is not connected. In experiments evaluating performance, the standard time in the integrated system is not lost when the server is not connected and time consistency is maintained within a time-synchronous precision of 30 ms. Communication components combine communication and time-control components. Surgical navigation is configured using an integrated environment for neurosurgery and *in vivo* experiments confirmed basic navigation functions.

Acknowledgements

We thank the many people and groups who have contributed to this effort. Research on medical devices for analyzing, supporting, and substituting for the function of the human body was funded by the Ministry of Health, Labor, and Welfare of Japan.

References

- [1] K. Shimizu, S. Toyonori, E. Kobayashi, H. Inada, Y. Muragaki, T. Maruyama, H. Iseki, and I. Sakuma. "Application of blue semiconductor laser to measurement of 5-ALA induced fluorescence for intraoperative detection of brain tumor," Proceeding of 6th Japan-France Congress on Mechatronics and 4th Asia-Europe Congress on Mechatronics, pp. 135-140, 2003.
- [2] M. Noguchi, E. Aoki, D. Yoshida, E. Kobayashi, S. Orno, Y. Muragaki, H. Iseki, K. Nakamura, and I. Sakuma. "A novel Robotic Laser Ablation System for Precision Neurosurgery with Intraoperative 5-ALA-induced PpIX Fluorescence Detection," In Proceedings of 7th International conference, MICCAI 2006, pp. 543-550, Copenhagen, Denmark, Oct., 2006.
- [3] J. Hong, Y. Muragaki, T. Inomata, R. Nakamura, N. Hata, T. Dohi, and H. Iseki. "Intraoperative 3-D display of glioma for effective removal," JSCAS, pp. 235-236, Tokyo, Japan, 2004.
- [4] E. Aoki, M. Noguchi, J. Hong, E. Kobayashi, R. Nakamura, T. Maruyama, Y. Muragaki, H. Iseki, and I. Sakuma. "Development and Evaluation of integrated surgical robotic platform for neurosurgery," JSCAS, pp. 89-90, Chiba, Japan, 2005.
- [5] G. Coulouris, J. Dollimore, and T. Kindberg. "Distributed systems, Concepts and Design." Wokingham, Addison-Wesley, 3rd ed., 2001.
- [6] P. Knappe, I. Gross, S. Pieck, J. Wahrburg, S. Kuenzler, and F. Kerschbaumer. "Position control of a surgical robot by a navigation system," Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003), Vol.3, pp. 3350-3354, 2003.
- [7] O. Schorr, N. Hata, A. Bzostek, R. Kumar, C. Burghart, R. H. Taylor, and R. Kikinis. "Distributed Modular Computer-Integrated Surgical Robotic Systems: Architecture for Intelligent Object Distribution," Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI), pp. 979-987, 2000.
- [8] A. Bzostek, R. Kumar, N. Hata, O. Schorr, R. Kikinis, and R. H. Taylor. "Distributed Modular Computer-Integrated Surgical Robotic Systems: Implementation using modular software and network systems," Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI), pp. 969-978, 2000.
- [9] S. Jia and K. Takase. "Internet-Based Robotic System Using CORBA as Communication Architecture," Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol.34, pp. 121-134, 2002.
- [10] D. Levine and S. Mungee. "The Design and Performance of Real-Time Object Request Brokers," Computer Communications, Vol.21-4, 1998.
- [11] G. Pardo-Castellote and S. Schneider. "The network data delivery service: real-time data connectivity for distributed control applications," Proceedings 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.4, pp. 2870-2876, 1994.
- [12] J. Tokuda, M. Hirano, T. Tsukamoto, T. Dohi, and N. Hata. "Real-Time Organ Motion Tracking and Fast Image Registration System for MRI-Guided Surgery," Systems and Computers in Japan, Vol.37, No.1, pp. 83-92, 2006.
- [13] A. Pope. "The CORBA Reference Guide: Understanding the Common Object Request Broker Architecture." Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1998.
- [14] B. Dalton and K. Taylor. "Distributed Robotics over the Internet," IEEE Rob. Autom. Mag. 7(2), pp. 22-27, 2000.
- [15] F. Cristian. "Probabilistic Clock Synchronization," Distributed Computing, Vol.3, pp. 146-158, 1989.
- [16] <http://www.slicer.org/>



Name:
Eisuke Aoki

Affiliation:
Ph.D. student, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

Address:

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Brief Biographical History:

2004 Master (Environmentology), Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

Main Works:

• "System Design for Implementing Distributed Modular Architecture to Reliable Surgical Robotic System," Lecture Note in Computer Science 3217, pp. 184-191, 2004.

Membership in Academic Societies:

- The Japan Society of Computer Aided Surgery (JSCAS)
- The Robotics Society of Japan (RSJ)



Name:
Jae-Sung Hong

Affiliation:
Research Associate, Department of Nanobiomedicine, Faculty of Medical Sciences, Kyushu University

Address:

3-1-1 Maidashi, Higashi-ku, Fukuoka 812-8582, Japan

Brief Biographical History:

2004- JSPS Foreign Researcher, The University of Tokyo
2005- Research Associate, Kyushu University

Main Works:

- "An Ultrasound-driven Needle Insertion Robot for Percutaneous Cholecystostomy," Physics in Medicine and Biology, Vol.49(3), pp. 441-455, Jan. 2004.
- "Interventional Navigation for Abdominal Surgery by Simultaneous Use of MRI and Ultrasound," Medical and Biological Engineering and Computing, Vol.44(12), pp. 1127-1134, Dec. 2006.

Membership in Academic Societies:

- Japan Society of Computer Aided Surgery (JSCAS)



Name:
Masafumi Noguchi

Affiliation:
Ph.D. student, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

Address:

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Brief Biographical History:

2005 Master (Environmentology), Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

Main Works:

• "Development of a Compact Automatic Focusing System for a Neurosurgical Laser Instrument," Journal of JSCAS, Vol.6, No.4, pp. 483-489, 2004.

Membership in Academic Societies:

- The Japan Society of Computer Aided Surgery (JSCAS)



Name:
Etsuko Kobayashi

Affiliation:
Associate Professor, Department of Precision Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo

Address:

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Brief Biographical History:

2000- Research associate at the Univ. of Tokyo
2002- Lecturer at the Univ. of Tokyo
2006- Associate Professor at the Univ. of Tokyo

Main Works:

• "Development of Wide-Angle-View Laparoscope using Wedge Prisms," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.16, No.2, pp. 129-137, 2004.

Membership in Academic Societies:

- The Robotics Society of Japan (RSJ)
- Japan Society of Computer Aided Surgery (JSCAS)
- International Society for Computer Aided Surgery (ISCAS)



Name:
Ryoichi Nakamura

Affiliation:
Research Associate, Institute of Advanced Biomedical Engineering and Science, Tokyo Women's Medical University

Address:

8-1 Kawadacho, Shinjuku, Tokyo 162-8666, Japan

Brief Biographical History:

2001-2003 Visiting Researcher, Dept. of Radiology, Brigham and Women's Hospital and Harvard Medical School

2003- Research Associate, Tokyo Women's Medical University

2005- Research Assistant Professor, International Research and Educational Institute for Medical Science, TWMU

Main Works:

- "Control System for MR-Guided Cryotherapy - Short-term Prediction of Therapy Boundary Using Automatic Segmentation & 3D Optical Flow -," Lecture Note in Computer Science, 3217, pp. 542-550, June 2004.

Membership in Academic Societies:

- The Robotics Society of Japan (RSJ)
- International Society for Computer Aided Surgery (ISCAS)
- Japan Society of Computer Aided Surgery (JSCAS)



Name:
Yoshihiro Muragaki

Affiliation:
Assistant professor, Faculty of Advanced techno-surgery (FATS), Institute of advanced Biomedical Engineering & Science (ABME&S), Graduate school of Medicine (R&D), Tokyo Women's Medical University (TWMU) and Department of Neurosurgery, TWMU

Address:

8-1 Kawada-cho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8666, Japan

Brief Biographical History:

1986-1988 Resident of department of neurosurgery Tokyo Women's Medical College

1988- Attending staff of department of neurosurgery Tokyo Women's Medical College

1992- Board neurosurgeon of Japanese Neurosurgical Society

1992-1995 Visiting scientist of Department of pathology and laboratory Medicine of Pennsylvania University (USA; Prof. Trojanowski and Prof. Lee)

2000- Attending staff of Faculty of Advanced techno-surgery (FATS), Tokyo Women's Medical University

2006- Assistant professor of Faculty of Advanced techno-surgery (FATS) and Department of Neurosurgery, Tokyo Women's Medical University

Main Works:

- Y. Muragaki, T. T. Chou, D. R. Kaplan, J. Q. Trojanowski, and V. M. Y. Lee, "Nerve growth factor (NGF) induces apoptosis in human medulloblastoma cell lines that express TrkA receptors," *Journal of Neuroscience*, 17(2), p. 530.
- Y. Muragaki, H. Iseki, T. Maruyama, T. Kawamata, F. Yamane, R. Nakamura, O. Kubo, K. Takakura, and T. Hori, "Usefulness of Intraoperative Magnetic Resonance Imaging for Glioma Surgery," *Acta Neurochirurgica Suppl.*, 98, pp. 67-75, 2006.
- Y. Muragaki, M. Hashizume, D. Hashimoto, H. Iseki, and K. Takakura, "A new concept of three-dimensional endoscope for practical use of endoscopic surgery," *Surgical Endoscopy*, (10), 2003, robotis and navigation system for advanced surgical procedures.

Membership in Academic Societies:

- The Japanese Society of Neurological Surgery
- The Japanese Society of Neuropathology
- The Japanese Computer Assisted Radiology and Surgery



Name:
Takashi Maruyama

Affiliation:
Research Associate, Institute of Advanced Biomedical Engineering and Science, Tokyo Women's Medical University

Address:

8-1 Kawadacho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8666, Japan

Brief Biographical History:

1992- M.D., Faculty of Medicine, Showa University

1993- Research Fellow at Faculty of Neurosurgery, Graduate School, Tokyo Women's Medical University

1994- Research Fellow at Harvard Medical School, Brigham & Women's Hospital, Children's Hospital, Brain Tumor Research Center

1997- Ph.D. at Faculty of Neurosurgery, Graduate School, Tokyo Women's Medical University

1999- Board of Japan Neurological Surgery

Main Works:

- "Efficacy of 5-Aminolevulinic acid induced fluorescence detection in malignant glioma surgery." Springer, p. 1290, June 23-26, 2004.

Membership in Academic Societies:

- Japan Neurological Surgery



Name:
Hiroshi Iseki

Affiliation:
Associate Professor, Faculty of advanced
Techno-surgery, Institute of advanced Biomed-
ical Engineering & Science, Graduate School of
Medicine, Tokyo Women's Medical University

Address:
8-1 Kawada-cho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8666, Japan

Brief Biographical History:
1976- Research Assistant Professor at Dept. of Neurosurgery, Tokyo
Women's Medical College (TWMC)
1996- Assistant Professor at TWMC
2001- Associate Professor at Tokyo Women's Medical University
(TWMU)
2006- Professor at Tokyo Women's Medical University (TWMU)

Main Works:
• "Intelligent Operating Theater Using Intraoperative Open-MRI,"
Magnetic Resonance in Medical Sciences, 4(3), pp. 129-136, 2005.

Membership in Academic Societies:
• Japan Neurosurgical Society (JNS)
• Japan Society of Computer Aided Surgery (JSCAS)
• Japan Society for Medical and Biological Engineering (JSMBE)



Name:
Ichiro Sakuma

Affiliation:
Professor, Department of Precision Engineering,
School of Engineering, The University of Tokyo

Address:
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Brief Biographical History:
1985-1987 Faculty of Engineering, The University of Tokyo
1987-1998 Faculty of Science and Engineering, Tokyo Denki University
1990-1991 Research Instructor at Baylor College of Medicine
1998-2001 Associate Professor at The University of Tokyo
2001- Full Professor at The University of Tokyo

Main Works:
• "Stem Cell Harvesting Device with Passive Flexible Drilling Unit for
Bone Marrow Transplantation," IEEE Trans. Robotics Automation, 19,
pp. 810-817, 2003.
• "A Dynamic Action Potential Model Analysis of Shock-Induced After
effects in Ventricular Muscle by Reversible Breakdown of Cell
Membrane," IEEE Trans. Biomed. Eng. 49, pp. 18-30, 2002.

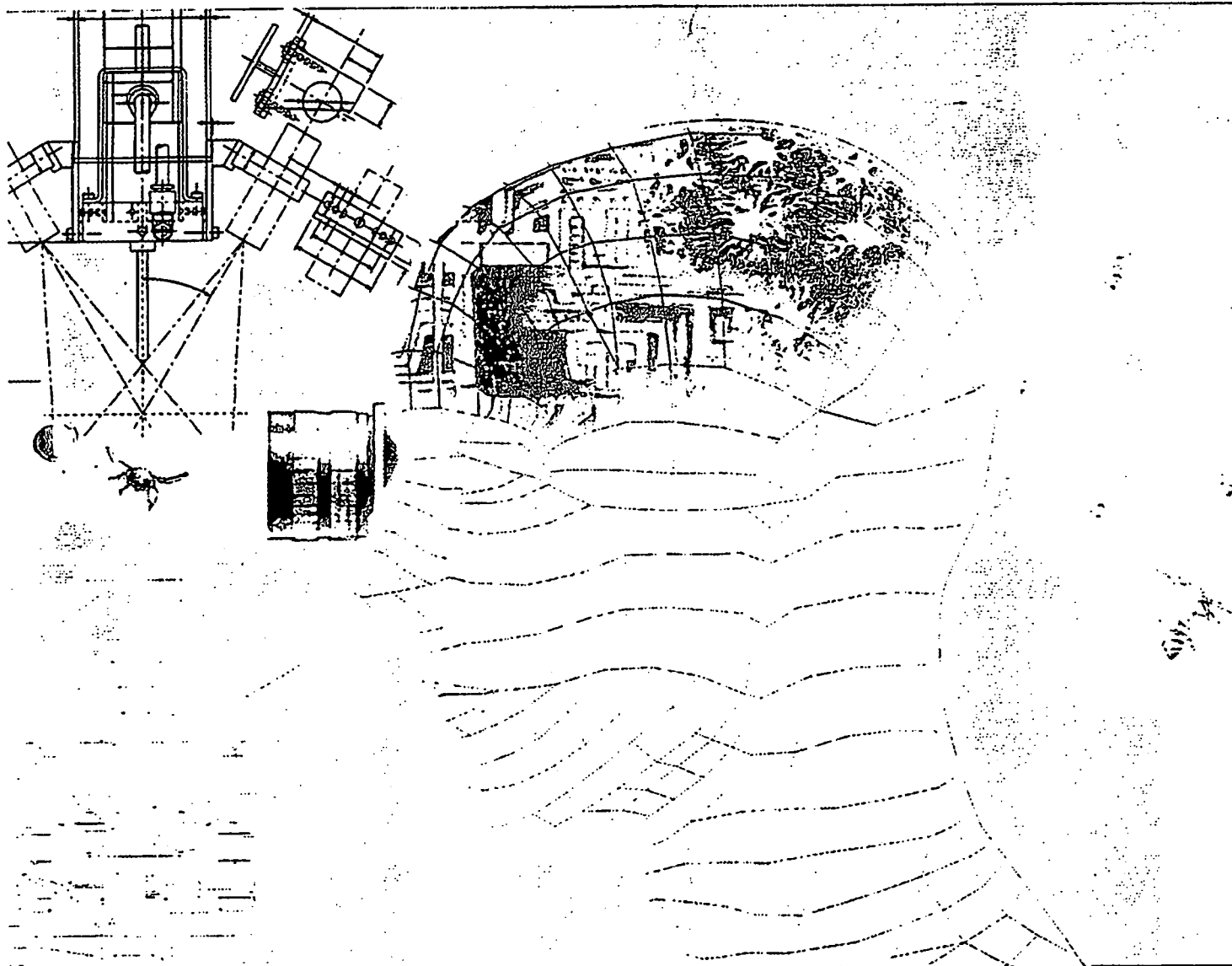
Membership in Academic Societies:
• The Japan Society for Mechanical Engineers (JSME)
• Japan Society of Computer Aided Surgery (JSCAS)
• Japanese Society for Medical and Biological Engineering (JSMBE)
• The Japan Society for Precision Engineering (JSPE)
• The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
• International Society for Computer Aided Surgery (ISCAS)
• American Society for Artificial Internal Organs (ASAIO)
• Japanese Society for Electrocardiogram

Journal of Robotics and Mechatronics

Vol.19 No.3 Jun. 2007

■ **Special Issue on Selected
Papers from ROBOMECH'06
(Part 2)**

Technically Co-sponsored by
Robotics and Mechatronics Division of
Japan Society of Mechanical Engineers



脳外科領域における 術中ナビゲーションシステム

東京女子医科大学先端生命医科学研究所¹ / 東京女子医科大学医学部脳神経外科²

伊関 洋¹ / 村垣善浩^{1,2} / 丸山隆志^{1,2} / 中村亮¹ / 堀 智勝²

要旨

術中診断技術の発達により、診断即治療のリアルタイム性を追求する診断と治療の融合の時代となった。診断機器と治療機器との一体化により実現される精密手術を効率的に行うためには、術中画像特にMRIの形態を中心とした画像だけではなく、種々のイメージングを活用した高度な統合医療情報とその有効活用が重要である。直前の術中画像をリアルタイムにアップデートするナビゲーション技術と覚醒下手術などによる脳機能の術中モニタリングにより、術中のbrain shift (手術操作による脳の変形・移動)を回避し、手術操作を正確かつ安全に支援することで、機能領域の悪性脳腫瘍をぎりぎりの切除にまで肉薄できるようになり、悪性脳腫瘍の切除率を平均93%にまで高めた。5年生存率でみるとGⅢ(44例)は78%(全日本脳腫瘍統計25%)、GⅣ(44例)は13%(7%)、GⅢ(44例)とGⅣ(44例)を併せると42%(18%)であり、全国統計の約2倍を達成した。

はじめに

術中の三次元各種医用画像の取得が容易となり、各種術中医療情報や画像情報の統合の基に、標的となる腫瘍および周辺の構造、特に錐体路などの機能情報を含む神経線維の位置関係や機能領域の機能を明確に可視化し、術中にも手術チームに提供することができるようになった。すなわち

診断と治療の融合が進み、診断の結果を基に治療が行われ、その治療の結果を直ちに評価し、次の治療方針を決定する診断即治療の時代となった。しかし、現状では主として術前医療画像を基にした手術ナビゲーションシステムで脳外科手術を行うのが一般的である。手術ナビゲーションは手術に際して手術スタッフに手術操作部位の位置情報を1mm以下の精度で提供する手術支援システムであるが、術前画像を基にしたナビゲーションから、術中の手術操作による残存腫瘍などダイナミックに変動する状況を想像することは不可能である。特に、手術中にbrain shift (手術操作による脳の変形・移動)が生じると、術前画像と実際とが合わなくなってしまうのが弱点であった。手術操作による臓器の変形や移動に追従するには、術中に画像診断装置を稼働させて術中画像を取得し、直前の術中画像をリアルタイムにアップデートする必要がある。ナビゲーション情報を更新する術中画像ナビゲーション技術により、術中のbrain shiftを回避し、手術操作を正確かつ安全に支援することができる。術者の要求度に応じて、空間、質、機能の情報のプライオリティを重視して、選択されるべきものなのである。術前画像と術後画像から、術中の手術操作や残存腫瘍の状況などを想像することは不可能である。術中に画像を撮るということは、手術スタッフに現在の状況を的確かつわかりやすく可視化して表示することにより、安心感と次のステップの決断を容易にすることは言うまでもない。21世紀は、診断と治

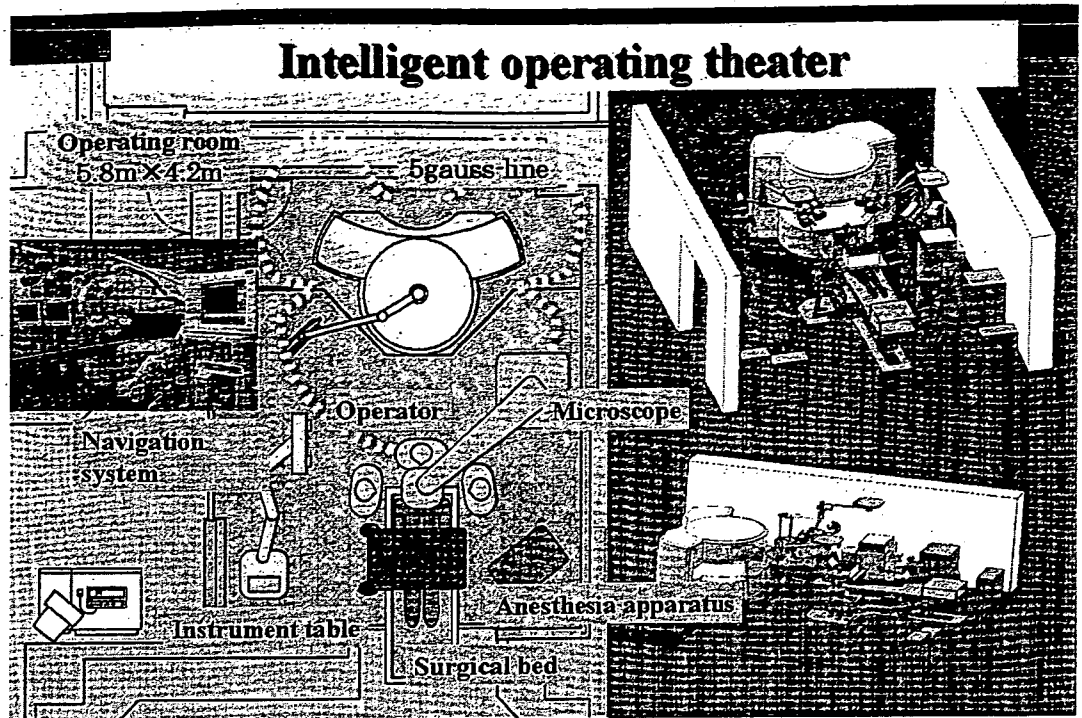


図1 インテリジェント手術室の概要

巻頭カラー参照

療がシームレスに移行し、短時間での診断とその結果に基づく治療方針が提示され、診断結果を即時に治療に反映すると同時に、その治療行為に基づく結果が即時に評価されるのである。すなわち、現状を術中にリアルタイムに探査し、治療操作を加える範囲の状況を明確に評価し、最適な治療法・手段の選択をすることに他ならない。

外科医の新しい目

外科医の新しい目とは、見えない物を可視化する技術に他ならない。医療のあらゆる局面を「可視化」することによって、患者にとっても医療スタッフにとっても状況がわかりやすくなり、安全・確実・迅速な医療サービスを保証できるようになる。インテリジェント（オープンMRI）手術室では（図1）、術中画像特にMRIの形態を中心とした画像だけではなく、種々のイメージングを活用した高度な統合医療情報とその有効な活用が図ら

れている。各種医療画像情報の統合により、標的となる腫瘍および周辺の構造、特に錐体路などの機能情報を含む神経線維の位置関係を明確に可視化し、手術チームに提供することができる。手術ナビゲーションシステムは手術に際して、手術スタッフに手術操作部位の位置情報を提供する手術支援装置である。手術している場所が画像上のどこに当たるのかを1mm以下の精度で画像モニタに表示する。手術器具の位置を常時計測するために赤外線位置計測装置を使い、さらに画像と実際の臓器との位置関係を計測するために皮膚や頭蓋骨に固定したマーガを利用する。しかし、手術操作による臓器の変形や移動に追従するには、術中に画像診断装置を稼働させて術中画像を取得し、直前の術中画像をリアルタイムにアップデートする必要がある。ナビゲーション情報を更新することで、変形・移動に即したナビゲーションが可能で、これをリアルタイム・アップデート・ナビゲーションと呼んでいる。本ナビゲーション技

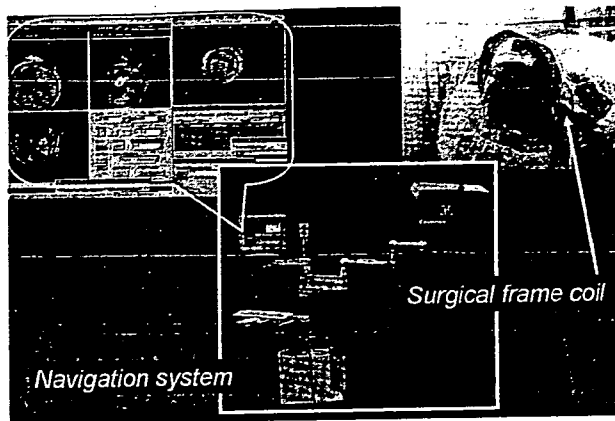


図2 ナビゲーションシステムと手術用MR対応RFコイル
 巻頭カラー参照

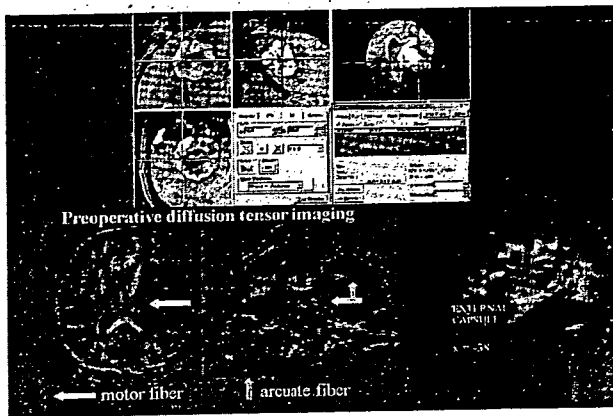


図3 拡散強調ナビゲーションと術前DTI
 巻頭カラー参照

術により、術中のbrain shiftを回避し、手術操作を正確かつ安全に支援することができる(図2)。また、T1・T2・MRA・DWI(diffusion weighted image)や脊髄の髄質まで描出可能なT2starという特殊なシーケンスの活用がなされ、撮像時間の短縮と手術に必要な十分な画質を得ている。機能領域、特に運動野から錐体路近傍の脳腫瘍の手術では、術中拡散強調画像で錐体路を可視化しながらナビゲーション手術を行っている(図3)。ケミカルナビゲーションは、5-アミノレブリン酸(5-ALA)を経口投与すると、ポルフィリン(PpIX)という物質に変化して腫瘍細胞にのみ蓄積する。405nmの青色光を当てると635nmの赤色蛍光を発生し、肉眼でフィルターを介して残存腫瘍の確認ができる(図4)²⁾。形態学的には、術中に超音波、モバイルCT、オープンMRIなどで手術操作によ

るbrain shiftの状況を把握する³⁾。機能的には、術野の機能領域を同定することで、脳腫瘍を過不足なく切除し、失語症や運動麻痺の合併症を低減することが可能となる⁴⁾。すなわち、覚醒下手術や脳波、誘発電位などの各種生理学的モニタリングを実施し、術中の状況を形態学的にも機能的にもそして組織学的にも把握しながら手術することが重要である(図5)。特に、脳腫瘍そのものが人によって異なり、不規則な形状や侵潤するという特性を持ち、個人によっても脳の機能領域には差があることを考慮する必要がある。脳外科手術で腫瘍を摘出し過ぎると、運動麻痺や言語障害などを引き起こす危険性がある。術後もできるだけ機能を温存し、腫瘍の摘出率を最大にすることが求められている。少しの運動障害が出て、生きることを優先させるのではなく、日常生活を送るこ

図4 化学的ナビゲーション(5-ALA)

巻頭カラー参照

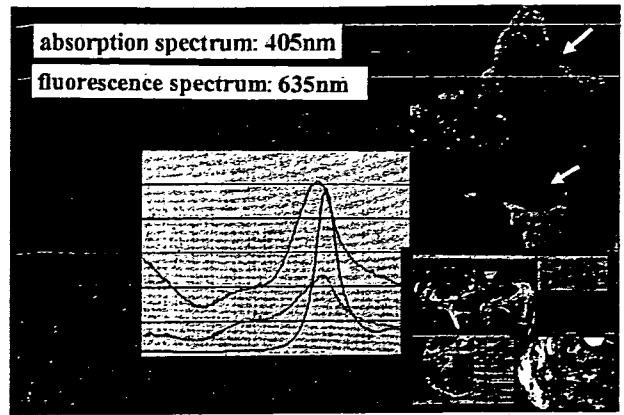
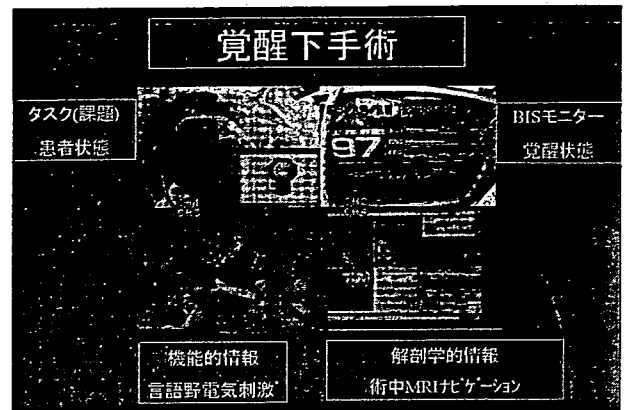


図5 覚醒下手術での統合画像表示

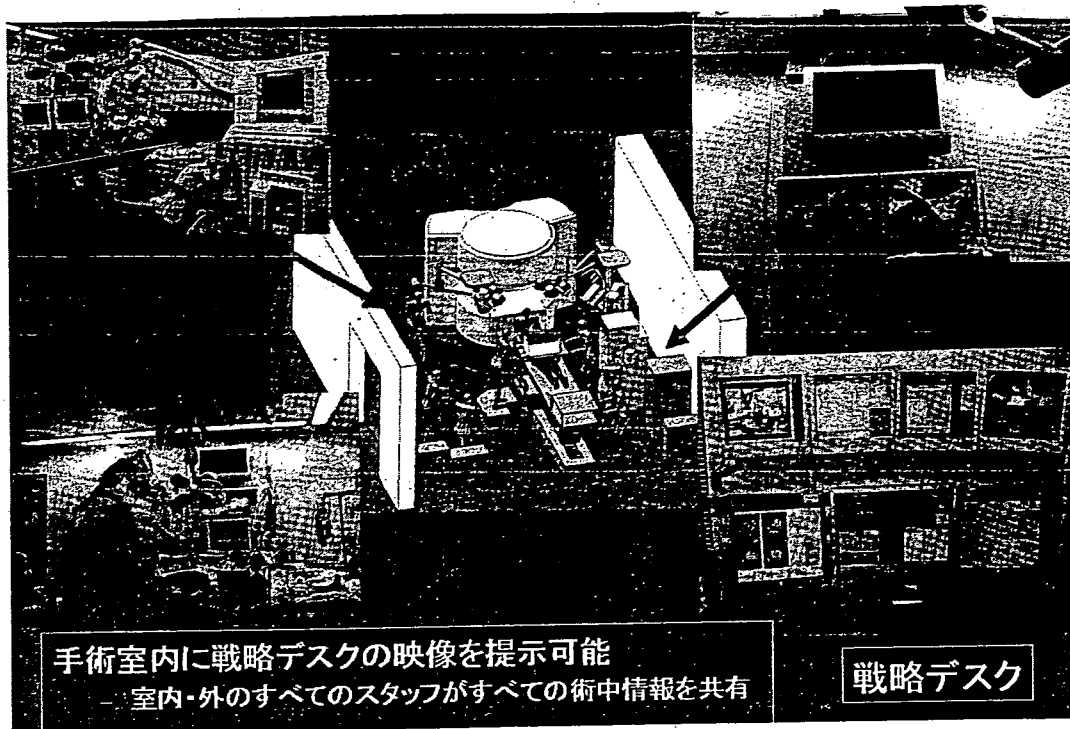
巻頭カラー参照



とを前提に治療の質を向上させることで、安心、安全な手術を実現することが、医療現場におけるインテリジェント手術室構築の目的である。特に、手術情報の共有は、手術スタッフ間の迅速な意思疎通を可能にした。また、術中MR画像で患部周辺の状況を確実に把握できるという利点は比喩にならないほど大きい。診断即治療のリアルタイム性を追求する診断と治療の融合技術の発達と共に、術中にリアルタイムの治療決断を支援するシステムの構築が必然となった。また、決断のために必要な医療情報はリアルタイムに更新されるシステムで支援され、治療行為の結果は即座に術者にフィードバックされ、時々刻々の変化に対応した、最適な解決法が提示される仕組みがインテリジェント手術室のゴールである戦略デスクである(図6)^{5,9)}。

インテリジェント手術室での治療成績

悪性脳腫瘍においては、術中MR画像で残存腫瘍を確認することにより、安全かつ確実に90～95%の切除率が達成できる。この疾患では切除率が手術成績を決める主要な要因であり、手術しない場合を含め、切除率75%以下では5年生存率が14.8～10.8%であるが、切除率95%以上だと5年生存率22.5%、全摘出できると40.9%である。しかし腫瘍切除率を向上させることだけを目指したのでは、運動領野・言語領野などの重要な機能部位を傷害して重篤な機能障害を生じる恐れがある。このため、術中MR画像やナビゲーションなしで過不足のない高い切除率を安全に達成することは非常に困難である⁵⁻⁷⁾。2000年3月より、東京女子医科大学インテリジェント手術室に0.3T



手術室内に戦略デスクの映像を提示可能
 室内-外のすべてのスタッフがすべての術中情報を共有

戦略デスク

図6 戦略デスクの情報共有化とインテリジェント手術室での表示システム

巻頭カラー参照

のオープンMRI (AIRIS II : 日立メディコ製) を導入し、2007年3月末までに499例の脳外科手術を行っている。現在までに、集計した400例中(2000年3月から2006年6月まで)の283例(70%)は、glioma症例である。手術による合併症は、4例(1%)で感染、2例(0.5%)で術後出血(1例は術後3日目、1例は電極挿入)であった。その283例中から96例のグリオーマ症例を、初期のシリーズ(2000年~2001年)46例と後期(2003年~2004年)50例とに分け比較検討した。平均摘出率は、全体で93%であり、初期の91%から後期には95%まで向上した。全摘出率は、46%(44/96)である。5年生存率の検討では、G I (5例)は100%(全日本脳腫瘍統計100%)。G II (56例)は90%(全日本脳腫瘍統計69%)。G III (44例)は78%(全日本脳腫瘍統計25%)。G IV (44例)は13%(全日本脳腫瘍統計7%)。G III (44例)とG IV (44例)を併せると、42%(全日本脳腫瘍統計18%)であり、約2倍の5年生存率を達成した。

おわりに

悪性脳腫瘍を安全確実に切除するためには、診断と治療の融合が必須である。インテリジェント手術室では、形態を中心とした術中MR画像ナビゲーションだけではなく、種々のイメージングと医療情報を縦横無尽に活用した高度統合医療情報システムが稼動し、その有効活用が図られている。目指すところは、治療の質を最大限に引き上げる診断と治療融合による精密・標的治療である。それを実現する診断と治療の一体化戦略は、精密誘導技術を駆使して、微細治療を安全・確実に支援するシステムである。術中の探索に必要な情報は、注目する部位の空間、質、機能に分類される。術中MRIの情報だけではなく、術者は、機能領域なのか傍機能領域(near eloquent area)なのかで、優先する情報が異なることを認識して手術を行うことが、5年生存率を向上させることにつながることは言うまでもない。今後、手術工程の標準化

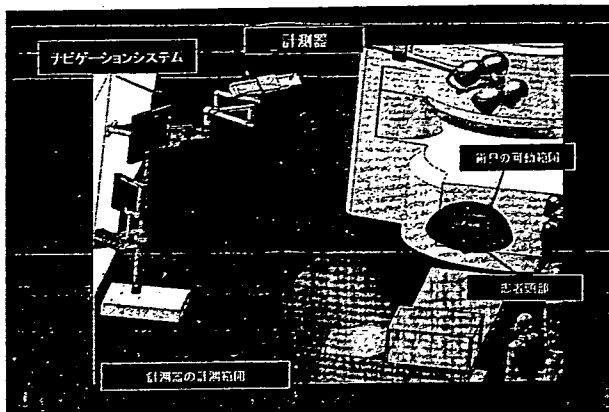


図7 ナビゲーションの最適化範囲シミュレーション
 巻頭カラー参照

が必然となり、手術スタッフをはじめとするワークフローの解析がその基盤となるであろう。その一環としてのワークフローシミュレーションとし

て、ナビゲーションの最適範囲を工程解析の一環として行っている(図7)。

参考文献

- 1) 伊関 洋ほか: 脳のための最先端手術室. 医器学 73(7): 358-363, 2003
- 2) Maruyama T et al: Intraoperative detection of malignant gliomas using 5-Aminolevulinic acid induced protoporphyrin fluorescence, open MRI and real-time navigation system. Lemke HU et al(ed), CARS2001-Computer Assisted Radiology and Surgery, Elsevier Science Health Science Div, Amsterdam, 2001, p279
- 3) 伊関 洋ほか: 脳腫瘍摘出手術に必要な検査法-術中検査-. 脳神経外科ジャーナル 11(8): 508-514, 2002
- 4) 村垣善浩ほか: 機能的マッピングと術中MRIを併用したグリオーマの手術. BRAIN MEDICAL 13(3): 255-263, 2001
- 5) 伊関 洋ほか: 手術における医療トレーサビリティと戦略デスク. 泌尿器外科 16(7): 731-737, 2003
- 6) Iseki H et al: Intelligent operating theater using intraoperative open-MRI. Magn Reson Med Sci 4(3): 129-136, 2005
- 7) Muragaki Y et al: Usefulness of intraoperative magnetic resonance imaging for glioma surgery. Acta Neurochir Suppl 98: 67-75, 2006

スライダリンクと空気圧を用いた手術器具挿入支援用 柔剛可変外套管の開発

A Development of Rigid-Flexible Outer Sheath using Slider-linkage Locking Mechanism and Air Pressure for Endoscopic Surgery

八木昭彦 (学生会員) ^{a*}, 松宮潔^a, 正宗賢^a, 廖洪恩^b, 土肥健純^a

^a東京大学大学院 情報理工学系研究科

^b東京大学大学院 工学系研究科

Akihiko Yagi^a, Kiyoshi Matsumiya^a, Ken Masamune^a, Hongen Liao^b, Takeyoshi Dohi^a

^a Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

^b Graduate School of Technology, The University of Tokyo

Abstract

To reduce the invasiveness of surgery, we developed an outer sheath for flexible devices in endoscopic surgery. The outer sheath is switched to two statuses, flexible and rigid. Operator inserts the sheath through tissues or organs from a narrow gap in flexible mode. After insertion, operator switches the sheath to the rigid mode. Then operator can insert devices and reach devices the target of the deep area easily. This sheath consists of a set of frame units connected serially, and each unit has a link, a slider, a stopper, and an air channel inside the instrument. When air is added to the sheath, it can be switched to the rigid mode, and when the air pressure is off, the sheath is switched to the flexible mode.

We made the prototype whose diameter is 16mm and length is 290mm. We evaluated the performance of switching two modes, and the performance of insertion via a silicone phantom experiment and an animal experiment. The experimental results show that this device switches from flexible mode to rigid mode when air is added over 200kPa pressure, the sheath was possible to go through the curved path with a curving radius of more than 7.5cm, and the sheath was possible to be inserted into the narrow gap where conventional laparoscopic tools can't reach.

Key words

Rigid-Flexible outer sheath, Flexible surgical device, Laparoscopic surgery.

1. はじめに

内視鏡外科手術は体に数箇所の小さな切開孔を開け、そこから内視鏡と長柄のついた手術器具を挿入して手術を行なう術式である。この手術は従来の開腹、開胸手術に比べ傷の治りも早く、入院時間も短縮できるなどの利点から低侵襲な手術方法として注目され、現在腹部をはじめ様々な部位での手術で行なわれている。

このように内視鏡外科手術は患者にとって負担の少ない望ましい治療方法である。しかし術者にとっては特殊な器具を使用して治療するなど負担の大きな術式である。そこで内視鏡外科手術における術者の負担を軽減し、様々な処置を可能とするための機器の開発研究が多く行なわれている。主なものとして先端で屈曲することによって腹腔鏡下で細かな動作を可能とした多自由度能動屈曲マニピュレータ¹⁾がある。さらに da Vinci など術者の手の動きをそのまま再現するマスタースレーブ方式の手術ロボットも開発されており、da Vinci によって心臓に対する手術を鏡視下で可能とするなど従来の開腹、開胸手術と同等の治療を低侵襲で

*東京大学大学院情報理工学系研究科

〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

akihiko@atre.t.u-tokyo.ac.jp

受付 2006 年 11 月 13 日;採択 2007 年 5 月 29 日

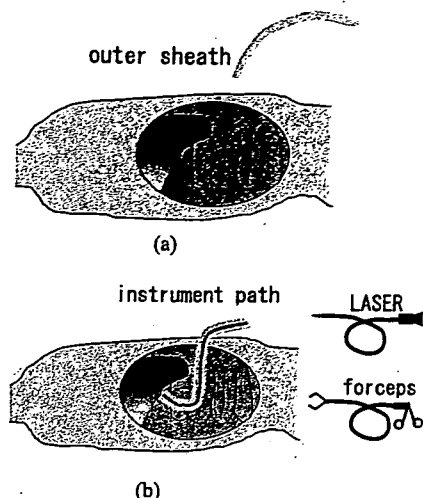


Fig. 1 Image of outer sheath: a) the sheath enters into human body in advance. b) after reaching target, the sheath makes the path for flexible devices.

行なうことが可能となっている。

上述のように近年では腹部、胸部の多くの疾患に対して内視鏡外科手術による低侵襲治療が可能となっている。しかしながら内視鏡外科手術は体内深部に存在する病変に対しては適応が困難であり、このことが問題点として挙げられる。腹腔鏡下手術の場合、気腹や吊り上げ法によって腹壁を持ち上げることで腹部前方に手術空間を作成して治療する。そのため腹部前方にある病変に対しては容易にアプローチすることが可能である。しかし腹腔内でのアプローチは従来の手術と変わらないため、体内深部組織への治療には前方の組織の移動や、臓器の間に存在する膜組織の大きな切開が必要となる。例えば脾臓の治療の場合、前方に胃が存在するため胃を大きく回転させる必要がある。そのため腹腔内での手術空間が狭くなるため腹腔鏡下手術による治療が困難な部位となる。また心臓の治療を内視鏡外科手術で行なう場合は肋骨の隙間から機器を挿入することになるが、心臓は複雑な形状をしているため症例によってアプローチする方向が異なるため胸骨切開を多少なりとも必要とする。またみぞおち方向からの経胸骨の治療は不可能である。

体内深部にある組織や、直線的な従来の機器では難しい部位に対してさらなる低侵襲治療のためには臓器を動かすのではなく、治療機器が組織の間を迂回して体内を進入し、アプローチすることが求められる。このため柔軟なシャフトを持つマニピュレータが求められる。柔軟なマニピュレータについては消化管や血管内を進入するためのマニピュレータの研究が行なわれており、鈴木⁹⁾らやIkuta⁶⁾らによって開発されたマニピュレータや、形状記憶合金⁷⁾や水圧駆動⁸⁾を用いて先端

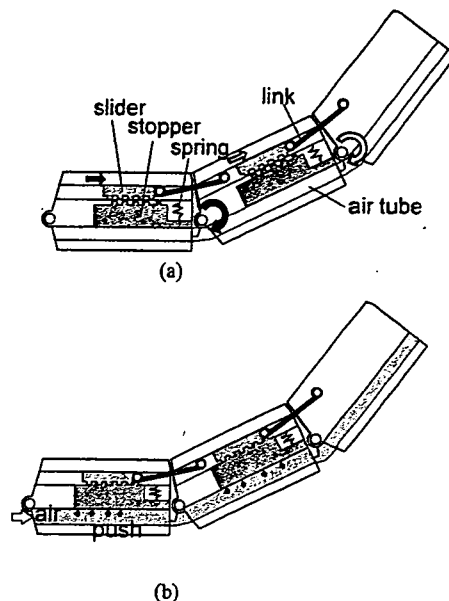


Fig. 2 Mechanism to switch rigid mod and flexible mode: a) flexible mode. b) rigid. mode.

の操作を可能にしたカテーテルなどがある。しかし腹腔や胸腔などは組織が密に詰まっており、通路となるような空間は存在していない。そのためマニピュレータを術部へ到達させることがさらなる課題となる。

そこで筆者らは柔軟な手術器具の通路を体内に作成する外套管マニピュレータの開発を行なっている⁹⁾。手術器具を挿入する前にあらかじめ機器の通路を体内に作成することで機器の挿入や入れ替えを容易にすることが可能となる。

本論文では体内に手術器具挿入支援用の通路を作成するために必要な機能、およびその機能を実現させるための原理について述べる。そして試作機における上記機能を実現した原理、および外套管自身の挿入性能を評価したので報告を行なう。

2. 柔剛可変外套管

2.1 想定使用方法と要求機能

目的とする外套管は術者の操作によって挿入口から体内へ進入し、体内の組織間の隙間や組織と膜の間を通り抜けて先端がターゲットとなる術部へ到達する (Fig. 1a)。外套管通る体内の通路は複雑な彎曲形状をしており、進入する際には通路に合わせての彎曲が可能な柔軟性が求められる。また、術者が外套管を挿入する際に目的となる場所へ到達させるためには術者が外套管の進行方向を操作できる必要がある。進行方向を操作するには先端の向きを術者が操作できることが求められる。一方で残りの部分は周辺の組織への影響

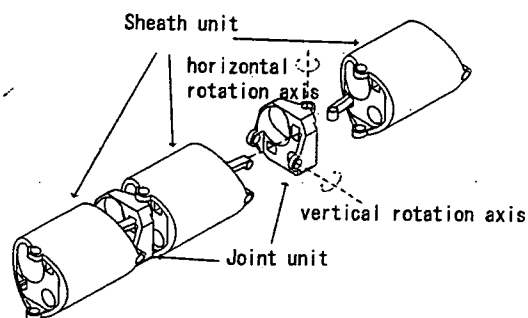


Fig. 3 Mechanism to three dimensional snake-like curve.

を減らすためにも術者の操作の影響を受けずに形を維持する必要がある。つまり、先端部分のみを操作可能にする必要がある。

外套管の先端が目的の場所へ到達した後は、Fig. 1bに示すように外套管は内視鏡や鉗子などの手術器具が通過するための通路となる。このとき手術器具が彎曲部分を通過する際に生じる反力や先端を操作する際に生じる伝達動力などに対して動かないための剛性を持つ必要がある。これは挿入時に必要な柔軟性と相反しており、両方の性質を持つためには必要に応じて切り替えられる必要がある。以上をまとめると次の二つの機能が必要である。

- ・ 複雑な通路にあわせて柔軟に変形でき、変化した形状のままロックして剛性を持つこと
- ・ 先端の向きを術者が操作できること。そして操作の際に残りの部分が先端屈曲操作の影響を受けないこと

以下に二つの機能を実現させるための原理、および試作した外套管について述べる。

2.2 柔剛可変の原理

外套管が柔と剛の状態の切り替えを可能にする方法について述べる。この外套管はFig. 2aに示すように複数のユニットが直列に連結されることで一本の長い管を構成する。それぞれのユニットはピンによって連結されており、ピンを中心として自由に回転をすることが可能である。そのため全体として任意の形状に変形させることが可能となる。各ユニットは内部にリンクとスライダ、およびスライダの移動を固定させるためのストッパを有している。スライダはリンクを通じて隣接したユニットと連結されており、隣接ユニットの回転に対して一対一の位置関係を保ちながらユニット内部を前後に移動する。スライダには歯型がついており空気圧を用いて同じ歯型を有するストッパを押し上げ、お互いの歯型を合わせることでスライダの運動をロックすることにより関節におけるユニットの回転を

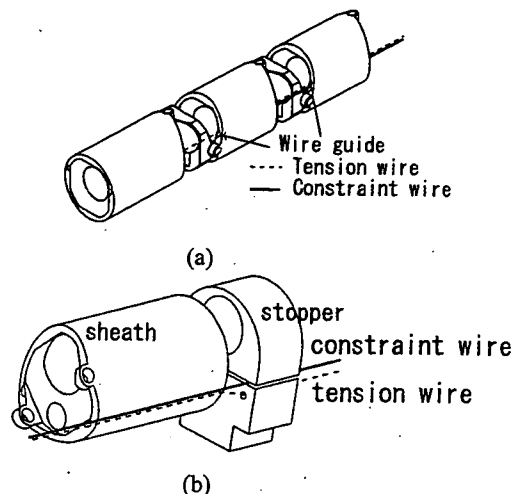


Fig. 4 Double wire mechanism: a) Wire1 is attached to head unit and wire2 is attached to second unit. b) The wire stopper attached on the tail of sheath to stop movement of only wire2.

ロックする(Fig. 2b)。そしてすべてのユニットの回転がロックされることで外套管全体の形状が固定される。

本原理の特徴として一つのアクチュエータですべてのストッパを駆動できることがある。そのため外套管の径を変えずに長さを変更することが可能である。さらに空気圧の圧力はストッパを押し上げるだけの大きさで充分であり、高い圧力を加えることなく形状を固定することが可能となる。

実際のユニットの結合はFig. 3に示すように、ユニット同士を直接連結させず、距離の短いユニット(以下間接ユニットと呼ぶ)を間に挟んで連結されている。スライダ、ストッパはユニットの方に二つずつ内蔵されており、それぞれ隣接する関節ユニットとリンクでつながっている。そして各ユニットおよび関節ユニットの回転軸を互いに垂直に配置することで、回転軸の向きがさまざまな方向を取り、三次元での姿勢をとることが可能となる。また向きの異なる二つの回転軸の距離を小さくすることで球面ジョイントに近い形での関節の回転が可能となる。

2.3 ワイヤによる外套管操作

本外套管は術者の挿入動作によって体内を進入していく。そのときに術者が先端のユニットの向きを操作することで体内において適切な通路を選択し、術部へと外套管を向かわせることが可能になると考えられる。曲がった先へ動力を伝達させる手段としてはワイヤによる伝達が簡便であり、サイズを小さくすることが可能な方法である。しかしワイヤ駆動の場合、一般的に全関節にワイヤの張力が作用するため、先端部のみを動作させるには何らかの工夫が求められる。そこで本研究では2種類のワイヤを通すことによりワイヤの張力を先端にのみ作用させる方法で先端を屈曲させる方

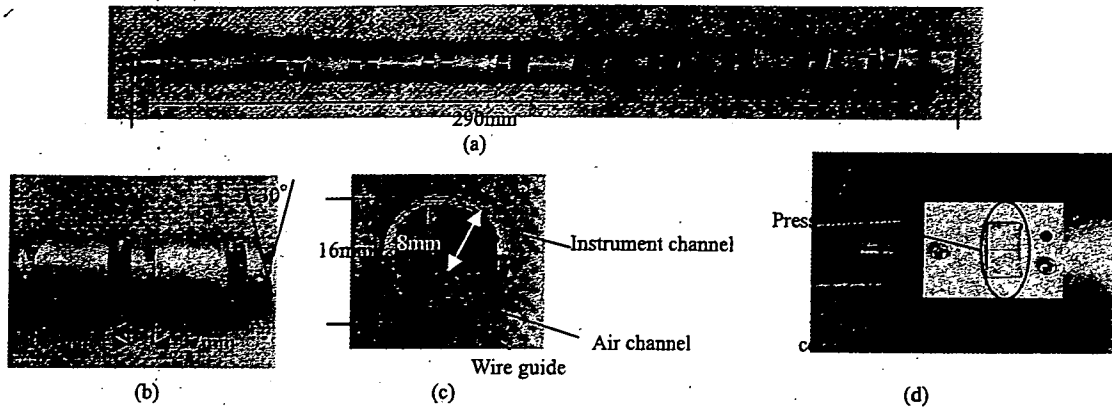


Fig. 5 The prototype of outer sheath: a) over view of the sheath. b) close up image of the units and joints. c) the cross section image. d) Tail part of the sheath.

法を採用した。外套管周辺部にはワイヤガイドとなる小さな穴が開けられている(Fig.4a)。この一つのワイヤガイドに駆動用および拘束用の2種類のワイヤを通す。駆動用ワイヤは外套管の根元から先端まで届いており、拘束用ワイヤはワイヤの先端が外套管の先端から数えて2番目のユニットで固定されている。外套管の根元にはFig.4bに示すようなワイヤストップが取り付けられている。ストップは二つのパーツに分かれており、拘束用ワイヤはパーツ同士の隙間を、駆動用ワイヤパーツに開けられたガイド孔を通る。ワイヤストップを上下から押さえつけることによって拘束用ワイヤを挟み、固定する。拘束用ワイヤが固定された状態で駆動用ワイヤを引っ張ることで先端の関節のみが屈曲する。拘束用ワイヤ軸方向の圧縮に対する抵抗を持つ必要があるため、金属の細径ワイヤを使用する必要がある。今回は局所的に起こる大きな曲げに対しても弾性変形が可能なNi-Ti超弾性合金を用いた。

2.4 外套管試作器

前節に基づいて試作した外套管について述べる。試作機のサイズとしては標準的な腹腔鏡器具として10mm以下の外径が望ましいが、本研究ではこの2倍である20mm以下での実現を目指した。長さについてはユニットの連結数によって変更が可能である。今回はある程度の彎曲形状が確認可能である、また体内深部への到達が可能な長さとして300mm程度とした。製作した外套管試作をFig.5に示す。この外套管は10個のユニットと9つの関節ユニットが交互に連結されて構成されており、全体での自由度数は18である。ユニット単体の長さは22mmであり、関節ユニット単体の長さは7mmである。外套管全体の長さは290mmであり、質量は117gである。また各関節において $\pm 30^\circ$ の回転が可能である。外套管の直径は16mmであり、内部に直径8mmの手術器具通過用のチャンネル、直径3.6mmの空



Fig. 6 The image of outer sheath: This image shows that the sheath curves like snake and hold its shape against the self gravity.

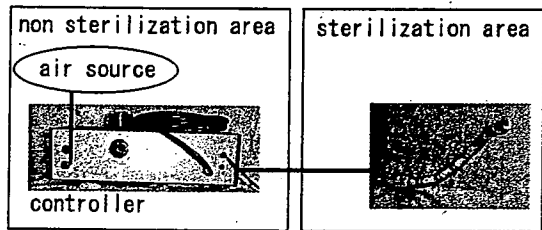


Fig. 7 System of the outer sheath.

気圧用チャネルを有している。外套管の素材としてリンク、スライダ、ストップにはステンレスを使用し、その他の部分にはアルミニウムを使用した。外套管の内側には外径8mmの軟性チューブが取り付けられており、実際に外套管の内部を手術器具が通過する際のガイドの役割を行なう。Fig.5dは外套管の根元の部分を示している。外套管の根元部分にはワイヤによって先端部分を操作するためのボタンが取り付けられており、術者は外套管を操作する際にワイヤを引っ張ることで全体の彎曲および先端の屈曲を行なうことになるが、ワイヤのみ引っ張った場合は全体が引っ張られたワイヤの方向へ彎曲し、ボタンを押しながらワイヤを引っ張ることによって先端の先端が屈曲する。また空気圧を供給するためのエアチューブとのコネクタが取り付けられており、チューブとの容易な着脱が可能である。この外套管試作器が実際に彎曲している様子を

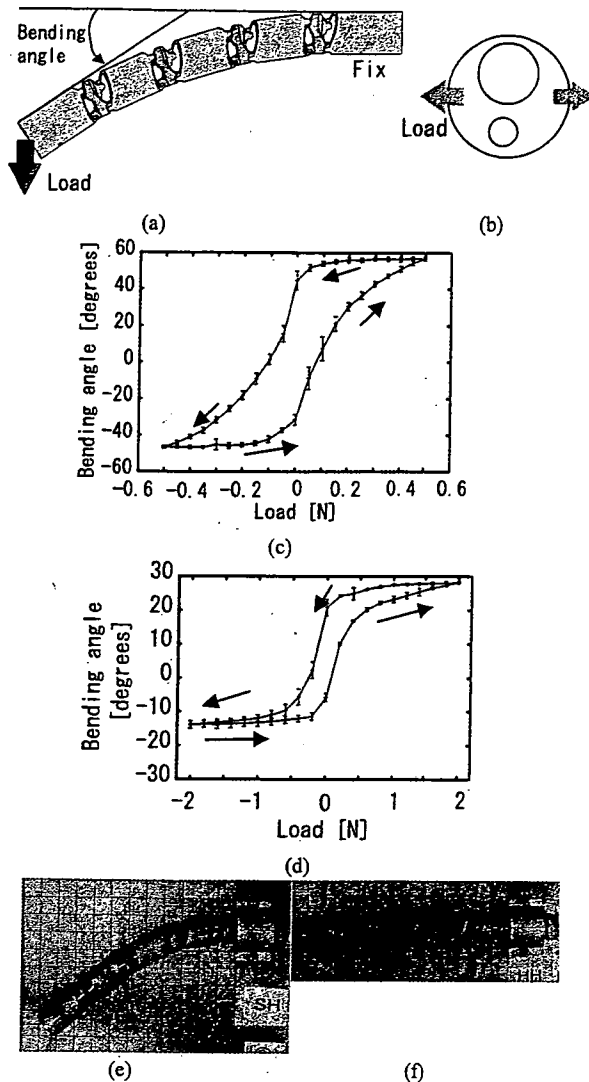


Fig. 8 Experiment between external load and sheath curve: a) experiment condition and parameter. b) load direction. c) this graph shows relation between load and head angle in flexible mode. d) graph in rigid mode. e) sheath's shape when load was 0.4N in flexible mode. f) sheath's shape when load was 0.4N in rigid mode.

Fig. 6に示す。この図では空中に重力に対してこの姿勢を維持しており、様々な形状で姿勢を固定できることを示している。

外套管全体のシステムをFig. 7に示す。システムとしては外套管のほかに空気圧を供給する供給源と制御ボックスとで構成される。制御ボックスでは空気圧の供給を切り替えるスイッチ取り付けられており、スイッチを切り替えることで柔剛状態を変化させることが可能である。またスイッチは手元スイッチやフットスイッチなど複数の中から選択することが可能となっている。そして外套管とは空気圧チューブによって連結されるが、チューブの着脱を容易にすることで滅菌部分と非滅菌部分との着脱が可能である。

3. 評価実験

本外套管マニピュレータで用いた柔剛可変機構と先端屈曲機構の有効性と試作した外套管の体内進入可能性を評価するための実験を行なった。行なった実験項目は柔剛それぞれの状態における外力に対する彎曲応答性、加える空気圧と外套管の剛性との関係、ワイヤによる操作性の基本特性、およびファントム通路を用いた外套管の操作特性である。

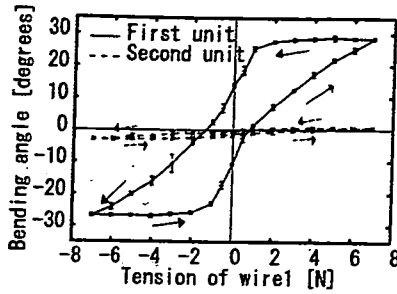
3.1 柔剛の切り替えに関する基本特性

本外套管に持たせる機能である柔と剛の切り替えについて採用した機構の有効性を評価するため、柔の状態と剛の状態それぞれにおいて、外力による変形に関する特性の評価を行なった。測定方法を以下に述べる。Fig. 8aに示すとおり外套管を先端から5番目のユニットで固定する。そして先端にFig. 8bの方向に直線状態から垂直となるように負荷をかける。そのとき負荷の大きさと先端のユニットが最初の直線状態に対してなす角度を測定した。Fig. 8cに外套管に空気圧を加えていない状態における負荷外力と先端ユニットの角度の関係を示す。そしてFig. 8dに外套管300kPaの空気圧を加えた状態での関係を示す。またFig. 8e, 8fに0.4Nの負荷を先端に付加したときの外套管の形状をそれぞれ示す。空気圧を加えない柔の状態においては0.5Nの先端負荷で58度の回転角度となった。0.5Nは外套管自身にかかる重力よりも小さな負荷であり、小さな外力によって変形できることを示している。一方で空気圧を加えた状態では加える負荷が小さいところではある程度の彎曲が生じたが一定以上の彎曲はせず、大きな負荷に対してはほぼ剛体と同じような性質を示した。これはギアによる歯のかみ合い部分やスライダ、リンクなどの連結部分の遊びが一定範囲内の彎曲の原因として考えられる。

外套管に加える空気圧と外套管が発生する剛性との関係は加える空気圧が100kPa以下の場合、空気圧を加えていない状態と同じ変形特性を示した。そして空気圧が200kPa以上では300kPaの空気圧を加えたときと同じ特性を示し、空気圧をそれ以上大きくすることでの変化は見られなかった。これは剛性を発生させるために必要な空気圧が200kPaであることを示している。空気圧のチャネル径も小さく体積も少ないことからこのときに蓄えられるエネルギーは小さく、空気漏れや破損の際にも人体に影響を及ぼすことなく安全な方法である。

3.2 ワイヤによる先端屈曲に関する実験

本外套管の目標とする先端屈曲機能に対して採用した原理の有効性、および進入動作への有効性を評価す



(a)



(b)

(c)

Fig 9 Experiment about curve by wire. a) Relation between unit bending angle and tension of wire1. b) Sheath's shape when wire1 tension is 6N and wire2 is locked. c) Sheath's shape when wire1 tension is 6N and wire2 is free.

るための実験の行なった。実験方法は前述の実験と同様直線状態からの先端ユニットのなす角および2番目のユニットのなす角を測定し、比較を行なった。Wire1, Wire2ともに対となる一組のワイヤガイドにそれぞれ通し、片方のワイヤに加えた張力を正、もう片方に加えた場合を負としている。屈曲角度はまっすぐに伸ばした状態から正の張力を加えた場合に向く方向を正の角度とした。Fig. 9aはWire2を固定したときのWire1の張力と先端のユニット、および二番目のユニットそれぞれが直線状態のときとの間でなす角を示したものである。先端のユニットは約30度のあたりまで向きを変更し、2番目以降のユニットは直線状態から4度以内の向きの変更で収まっていた。Fig. 9bはWire2を固定した状態において6Nの張力をWire1へ加えたときの様子である。比較として拘束用ワイヤを固定しなかったときの彎曲の様子をFig. 9cに示す。Fig. 9に示す通り先端部分以外をほぼ直線状態に保ったまま先端ユニットのみを屈曲させることが可能であった。

3.3 体内挿入性、操作性に関する評価

次に外套管マニピュレータが体内に進入していくための特性についての評価実験を行なった。実験用のファントムとしてシリコンゴムを用いてFig. 10に示すような通路を作成し、挿入性能と、ワイヤによる操作性を評価した。使用したシリコンはRTVシリコンゴム（信越化学）とシリコンオイル（信越化学）を質量比1:2の割合で混合させて製作したものであり、弾性率は生体組織に近い $2 \times 10^5 \text{ Pa}$ である。ファントムには通路は二つの分岐点を用意し、a)直線的な通路、b)一度彎曲し、彎曲した方向へ進入する通路、c)一度湾

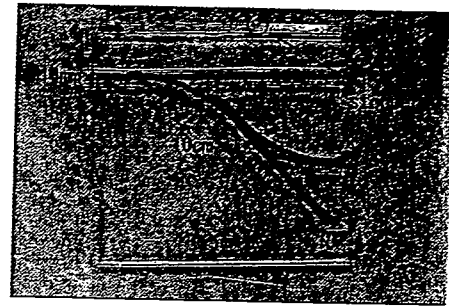
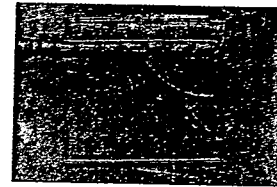
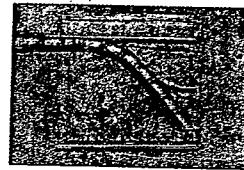


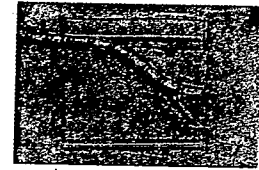
Fig 10 Condition of experience about insertion and control.



(a)



(b)



(c)

Fig 11 Image that outer sheath goes through the path made by silicone. a) the straight path. b) curves one time. c) curves twice.

曲した後に、逆方向へもう一度彎曲をする通路の3つの通路を用意した。ファントムは周囲のストッパによって支えられているが、この範囲内での挿入による変形や移動が可能である。通路の幅は14mmに設定されており、外套管は通路のシリコンを横方向へ押し分けながら進入する。分岐点において彎曲をする道の屈曲半径は100mmである。外套管を挿入する際には通路が分岐する場所に差し掛かる際に先端操作によって外套管の先端が目的の進路へ侵入するようにする。そして選択した通路へ進入したことを確認したら後ろからの挿入動作のみで次の分岐点に到達するまで進入させる。外套管が3つの通路を選択して進入する様子をFig. 11に示す。この図に示す通り分岐点において外套管が進路を選択し、三つの通路を通過することが可能であった。

3.4 姿勢維持性能に関する評価

外套管の姿勢維持性能の評価を行なうため模擬的な軟性マニピュレータを挿入し、先端屈曲の際における外套管の姿勢のずれを測定した。使用した模擬マニピュレータは径4mmの軟性塩化ビニルチューブにワイヤガイドを取り付け、ワイヤによって全体が彎曲する

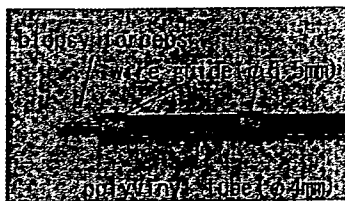


Fig. 12 Phantom manipulator for outer sheath.

ようにしたものである。そしてこのチューブの中に径2.4mmの生検鉗子を通して(Fig. 12)。この模擬マニピュレータを外套管に挿入し、先端部分が通り抜けたところでワイヤ駆動によって彎曲させる。外套管は先の実験と同様に5番目のユニットで固定し、直線状態、および90度の円弧状態の二つの状態で空気圧を加え、形状を固定させた。そして先端部分の屈曲動作の際に外套管の先端が動いた振れ幅を測定した。このとき模擬マニピュレータを屈曲させるために必要とした張力は10.0Nであった。先端の移動した振れ幅は直線状態で21.8mm、円弧の状態で16.8mmであった。これは先の実験において確認された遊びの影響によるものであることが考えられる。そのため変形に伴う力が弱い場合でも上記のブレが生じると考えら得る。しかし遊びによる影響以外は大きな変形外力に対しても姿勢を維持することが可能であることが確認された。

4. In vivo実験

本外套管が実際の腹腔に対して目的となる体内深部への挿入可能性を検証するため、動物(ブタ, 38kg, オス)を使用しての評価を行なった。今回の実験では気腹下で行い、挿入を行うための経路として腹腔鏡から確認可能な肝臓周辺への外套管挿入を試みた。腹部中央あたりから外套管マニピュレータを挿入、腹膜下部から挿入された内視鏡によって外套管の様子を確認しながら外套管が肝臓における肝葉同士の隙間および腹腔の横隔膜側の肝臓と腹膜との隙間への外套管の進入を試みた。Fig.13に内視鏡からみた外套管の腹腔での様子を示す。この図では外套管の先端が見えておらず、外套管が腹腔鏡では見えない部分に到達していることが認められる。そして外套管を通してファイバースコープ(径2.4mm 住田工学ガラス製)を通して、外套管の先の様子を確認した。このファイバースコープからの映像をFig.13cに示す。このように外套管を操作することで臓器同士の隙間や臓器と膜の間など体内の深部にある狭い領域へ到達させることが可能であることを確認した。また腹腔鏡下手術においてこの外套管が気腹下での使用が可能であることの知見が得られた。

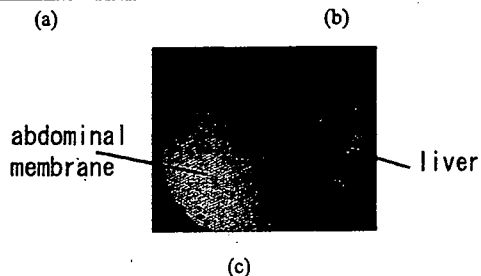


Fig 13 Outer sheath inserted into abdominal space: a) through gap of the liver lobes. b) gap between liver and abdominal membrane. c) The view from fiber scope that went through the sheath.

5. 考察

本研究では目標とした柔剛の可変機能に対してスライダリンクと空気圧を使用した柔剛可変機構を考案し、そして先端のみの屈曲による操作性には2組のワイヤを使用した先端屈曲機構を考案して実装を行なった。基礎評価において、空気圧を加えていないときは十分な彎曲性能を示し、200kPaというあまり高くない圧力で形状を固定し、剛体化することが可能であった。これは安全に剛体化できるということでも有効な手段であると考えられる。しかし形状を固定した剛の状態において各関節で生じる遊びの影響が確認された。この遊びの原因としてはスライダとストップのかみ合いの際の隙間やストップ自体の可動部分の動き、リンクとの結合部分の隙間などが原因として考えられる。今回の試作機ではストップが軸方向へ動いてしまう遊びができやすい設計になってしまっていたためストップの部分の軸方向のブレが主因になっていると考えられる。今後剛体時の遊びの影響を小さくするためにはストップの側面に傾斜をつけることで持ち上がった際の軸方向への遊びを小さくする、またリンクとの連結部分の形状を変更することで現在生じているずれをなくすなどの設計時の工夫が必要となる。さらに加工精度を高めることによって各関節での遊びは1度以下に抑えることが可能であると考えられる。回転部分の遊びはユニットの連結部分からスライダまでの距離に依存し、距離が大きいほど小さく抑えることができる。したがって細径化を行なうことによって遊びが大きくなる恐れがあるため、今後の設計に注意が必要となる。

先端屈曲機構では、外套管の先端以外の部分の変形を伴わずに先端を屈曲させることが可能であった。そ

してこの先端屈曲によって体内での隙間が分岐する場所において適切な進路へ操作していくことが可能であった。

In vivo実験では腹腔鏡による確認下で外套管マニピュレータを目的の場所へ到達させることが可能であった。今回の実験で外套管が到達した場所は従来の直線的な器具による腹腔鏡下手術では視野および手術器具が届かない場所である。この外套管マニピュレータと軟性の手術器具やファイバースコープを用いることで従来では低侵襲な方法で治療できなかった病変部に対しての低侵襲治療が可能になると考えられる。

今後の問題点としては外套管の位置、姿勢の確認および進行方向の視野を確保するための方法が求められる。In vivo実験では腹腔鏡を用いて挿入する際の外套管の位置を確認したが、前述のとおり従来の内視鏡では視野が届かないところへ本外套管は進入する。よって内視鏡以外の方法で進路の様子および外套管の姿勢を確認する必要がある。現在体内を可視化する方法としては超音波やX線、MRIなどが存在しており、超音波誘導化で複雑な臓器である心臓に対しても治療への試みが行なわれている¹⁰⁾。また機器の一部に光学式計測装置や磁気センサなどを取り付け、体外での位置、姿勢から計算して画像に重ね合わせるという手法がある。しかしこの方法は器具が変形しないことが前提であり、本外套管のように自由に姿勢を変形する場合には、それぞれの可視化方法に対する外套管の適応性ととも直接姿勢を表示できるような誘導技術が求められる。また外套管が侵入する先の様子を確認する方法としては外套管を挿入する際に内部に軟性鏡を挿入することで前方の視野を確認することが可能である。しかし組織の隙間など狭い領域を進行することになるため、十分な視野を得るにはバルーンなどを用いて進行する先を拡張してから確認し、その後外套管を進行させるための補助マニピュレータなどが必要になる。上記の問題を解決することで体内の複雑な領域に対して低侵襲にマニピュレータを挿入し、局所的な治療を行うことが可能になると考えられる。

外套管の位置を低侵襲な方法で確認し、挿入を行なうことが可能になることで様々な場所の病変に対して患者への負担が少ない方法での機器の挿入、治療が可能になる。本研究では患者にとってより負担の少ない手術を目標としており、その手段として本外套管が有効な手段である。

6. 結論

従来の腹腔鏡下手術では届かない部位に対し、手術

器具の誘導通路を作成するための柔剛可変外套管の開発を行なった。柔剛可変の原理としてスライダリンク機構と空気圧を用いた機構を考案し、外套管の試作を行なった。試作機は外径が16mmで、内部に径8mmの通路を有しており、200kPaの圧力において形状を固定することが可能であった。挿入実験では曲率半径が100mm以上のカーブに対して進入可能であり、ワイヤによる先端屈曲によって体内の隙間を任意に選択して進入が可能であること、そして従来の器具では到達できない場所への手術器具の挿入が可能であることを確認した。

謝辞:本研究の一部は厚生労働省 厚生労働科学研究費補助金 身体機能解析・補助・代替機器開発事業「新たな手術用ロボット装置の開発に関する研究 (H15-フイジ-002)」によるものである。

文献

- 1) Peris J, Reynaerts D, Van Brussel H. A miniature manipulator for integration in a self-propelling endoscope. *Sensors and Actuators A* 2001;92:343-349.
- 2) 山下紘正, 金大永, 波多伸彦, 土肥健純. 多節スライダ・リンク機構を用いた腹部外科手術用鉗子マニピュレータの開発. *JJSCAS* 2004;5:421-427.
- 3) 神野誠. 腹腔鏡下手術支援用ロボット鉗子. *日本ロボット学会誌* 2004;22:439-443.
- 4) Nakamura R, Oura T, Kobayashi E, Sakuma I, Dohi T, Yahagi N, Tsuji T, Hashimoto D, Shimada M, Hashizume M. Multi-DOF Forceps Manipulator System for Laparoscopic Surgery -Mechanism miniaturized & Evaluation of New Interface- *MICCAI2001.Utrecht* 2001:606-613.
- 5) 鈴木直樹, 服部麻木, 林部充宏, 大竹義人, 鈴木薫之, Murakami EAY, 炭山和毅, 池田圭一, 田尻久雄. 左右に鉗子アームを持つ内視鏡ロボットの開発. *JJSCAS* 2002;4:247-248.
- 6) Ikuta K, Sasaki K, Yamamoto K, Shimada T. Remote Microsurgery System for Deep and Narrow Space - Development of New Surgical Procedure and Microrobotic Tool. *MICCAI 2002. Tokyo, 2002:163-172.*
- 7) Mineta T, Mitsui T, Watanabe Y, Kobayashi S, Haga Y, Esashi M. An active guide wire with shape memory alloy bending actuator fabricated by room temperature process. *Sensors and Actuators A* 2002;97:632-637.
- 8) Ikuta K, Ichikawa H, Suzuki K. Safety-Active Catheter with Multiple-Segments Driven by Micro-hydraulic Actuators. *MICCAI 2002. Tokyo, 2002:182-191.*
- 9) 八木昭彦, 松宮潔, 正宗賢, 廖洪恩, 土肥健純. スライダリンク機構及び空気圧を用いた可撓性外套管のための柔剛可変機構における基礎的検討. *JJSCAS* 2005;7:399-400.
- 10) Suematsu Y, Marx GR, Friedman JK, Mihaljevic T, Mora BN, Takamoto S, Nido PJ. Three dimensional echocardiography guided artery septectomy: A experimental study. *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery* 2004; 128: 53-59.

バイポーラコアギュレータを有する 細径2自由度屈曲マニピュレータの開発

Development of a Miniature 2-DOFs Bending Manipulator with Bipolar Coagulator

山下紘正 (学生会員)^{a*}, 松宮 潔^a, 正宗 賢^a, 小林英津子^b, 佐久間一郎^b, 廖 洪恩^b,
橋爪 誠^c, 土肥健純^a

^a東京大学大学院情報理工学系研究科

^b東京大学大学院工学系研究科

^c九州大学大学院医学研究院

Hiromasa Yamashita^a, Kiyoshi Matsumiya^a, Ken Masamune^a, Etsuko Kobayashi^b, Ichiro Sakuma^b,
Hongen Liao^b, Makoto Hashizume^c, Takeyoshi Dohi^a

^aGraduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

^bGraduate School of Engineering, The University of Tokyo

^cGraduate School of Medical Sciences, Kyushu University

Abstract

We developed a miniature 2-DOFs bending manipulator of 5-mm diameter for laparoscopic surgery. Bending directions of the mechanism are perpendicular and the mechanisms are controllable respectively. A new wire-connected linkage-driven bending mechanism is built in the manipulator to drive rotate joints for 2-DOFs motion. This manipulator has a central channel of 1.3-mm diameter to drive a pair of blades with electrodes as the tip-side bipolar-coagulator. Surgeons control the manipulator with a grip-type interface in one hand. In mechanical performance evaluations, bending angle was maximum 153.9 degrees (from -71.6 to 82.3 degrees) with positioning reproducibility of maximum 0.7 mm. About generated force, holding force of bending mechanism was more than 1.82 N, and grasping force by a pair of blades was maximum 3.70 N. In vivo experiment using a pig (38 kg, male) with laparoscopy, we evaluated whether the manipulator performed as a suitable bipolar coagulator for practical clinical use. We were able to coagulate living tissues and occlude blood vessels on the mesenterium completely. In conclusion, our new bending mechanism is useful for miniaturization of the laparoscopic manipulator with the simple structure and high mechanical performance.

Key words

Wire-connected bending mechanism, Linkage-driven, Laparoscopic surgery.

1. はじめに

腹腔鏡下手術を低侵襲に行なうためには、腹腔内に

挿入する手術器具の細径化・多自由度化が重要である。細径化によって切開創が小さくて済み、また、患部以外の部位への余計な接触を避けることができる。また、多自由度化によっては、手術操作にとって最適な方向から患部へアプローチできるようになる。

細径化には構成要素の小型化が有効であるが、術具の耐久性の低下を防ぐためにはさらに構造・機構の簡素化が必要である。しかし多自由度化、特に屈曲機構

*現・国立成育医療センター特殊診療部
〒157-8535東京都世田谷区大蔵2-10-1
yamashita-h@ymail.plala.or.jp
受付2006年11月13日；採択2007年7月23日