

Fig. 8. Integration of Pp9 Spectrum data and 3D position data.

5. Discussion

5.1. Evaluation of Integrity of Integrated Time

Surgical information often is too sensitive, e.g., private patient information, to be sent via the Internet connection and NTP is often not available. When configuring a distributed system under such circumstances, a time lag exists between computer clock time and actual time. Given that integrated systems into surgery are continuously used for at least two to three hours, experiments indicate a time lag of about one second is created when using Windows.

As clarified by the result of the experiment, to realize time-synchronous precision of 30 ms required in our work, time synchronization must be within 8 minutes for Windows and 26 minutes for Linux. Since the clock fluctuates with Windows, we concluded that the frequency of the time-synchronous server must have a margin to realize time synchronization every 20 minutes for Linux and every 5 minutes for Windows.

5.2. Evaluation of Time Synchronization Precision

One may have an objection that if there is sufficient real time performance, when each time is different, there is no obstacle to function. Even if real-time performance of individual equipment software is ensured, it is unclear whether real-time performance is ensured for communication between equipment. Even if sufficient communication resources are ensured in the LAN when using the network, a communication lag of a maximum 40 ms may arise [7]. In the liver, for example, the positioning fluctuation of 50 to 60 mm may exist at intervals of 7 to 8 seconds. A time lag between measuring instruments could make treatment information unreliable when information is integrated. Our proposed time synchronization realizes precise time synchronization by considering communication time lags by measuring loop-back time with the time synchronization server. After determining network communication conditions, time is synchronized using Cris-

tian's algorithm when a communication time lag is sufficiently short. Our experiments showed that time synchronization with precision of 2 ms is feasible.

5.3. Evaluation of Failure Tolerance of Time-Synchronous Server

Since sufficient time precision is maintained for short periods when switching to the clock in each computer, it could be assumed that fault-tolerant performance already existed.

Even when the time-synchronous server is disconnected, the time lag of each computer is considered small when system operating time is short. As discussed in Section 5.1.1, a time lag of 30 ms exists for 8 minutes for Windows. When considering that computer-assisted surgery is operated continuously for two to three hours, it becomes difficult to maintain time consistency in the integrated system without the time-synchronous server. As mentioned in Section 2.4.1, when a standard time-synchronous server is disconnected from the integrated system, consistency of information cannot be maintained.

The fault-tolerant time-synchronous server we propose copes with these problems because even if problems occur in the time-synchronous server, it continues to provide standard time in the integrated system.

5.4. Evaluation of Entire System by *in Vivo* Experiment

To reduce cost and development time when changing specifications and adding functions, we used distributed-object technology, developed communication components in which all functions such as time synchronization are involved, and applied these to a neurosurgery-assisted system.

An integrated navigation system is configured by integrating already developed computer-assisted surgical devices, but it takes almost a week. We have no choice but to evaluate development time with qualitative and subjective indexes because communication software is developed separately based on the environment is no longer required. Since time consistency is realized in the background by the communication component we developed, labor for developing the integrated system is reduced.

Through an *in vivo* evaluation experiment, we standardized time, which is important for integrating intra-operative information, using time-synchronous precision of 1 ms, equivalent to results of experiments in Section 4.2, i.e., 2 ms. The time lag is within 30 ms under continuous 2-hour system operation. Basic functions of integrated navigation are confirmed and that intra-operative measurement information from measurement systems such as cancer identification and the auto-focusing robot is integrated based on standardized time to be displayed on a navigation screen having preoperative diagnosis information.

Positron emission tomography/computed tomography (PET/CT) is an example ensuring multiple information

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 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. Omori, 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 Nanobio-medicine, 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," *Physica 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



特集2 術中ナビゲーションシステムの現在

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⁾／東京女子医科大学脳神経外科²⁾

伊藤 洋¹⁾／村垣 謙浩²⁾／丸山 隆志²⁾／中村 亮²⁾／堀 智勲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移動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易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カを利用する。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

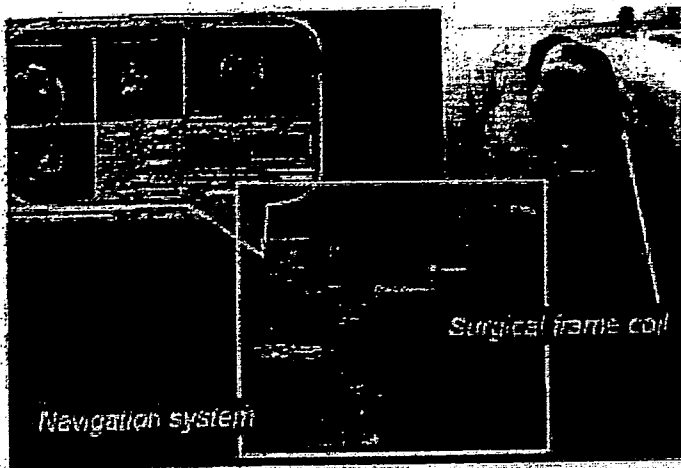


図2 ナビゲーションシステムと手術用MR対応RFコイル

巻頭カラー参照

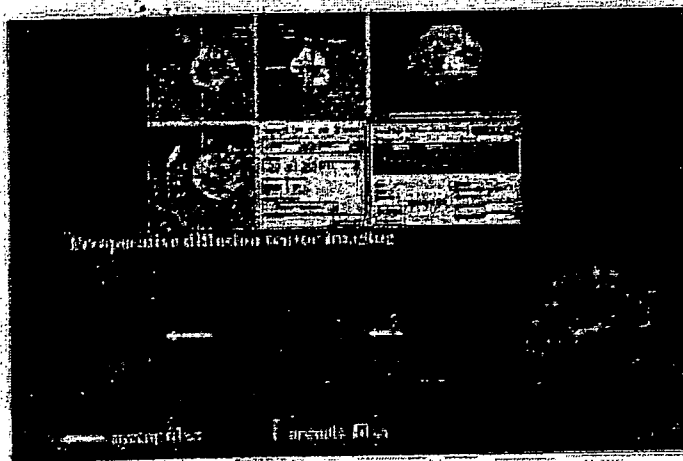


図3 拡散強調ナビゲーションと術前DTI

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かつ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)。ア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

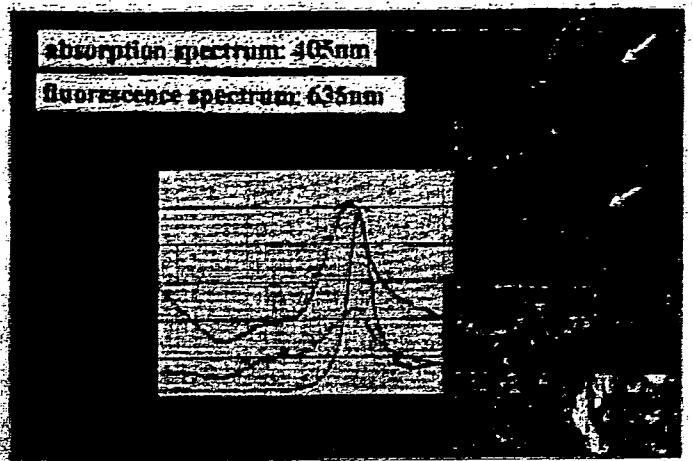


図4 化学的ナビゲーション(5-ALA)

巻頭カラー参照

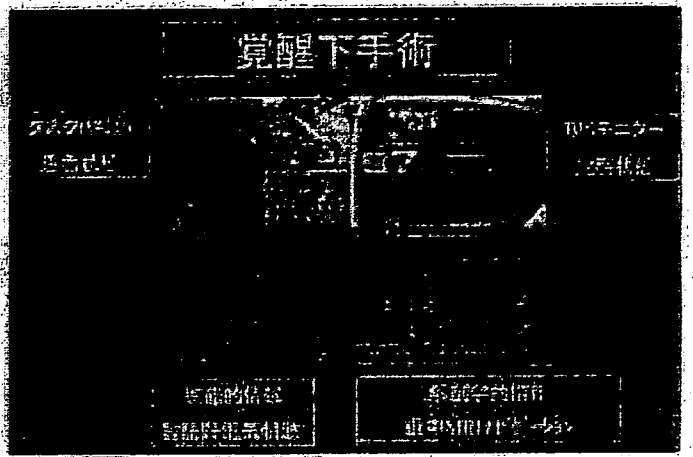


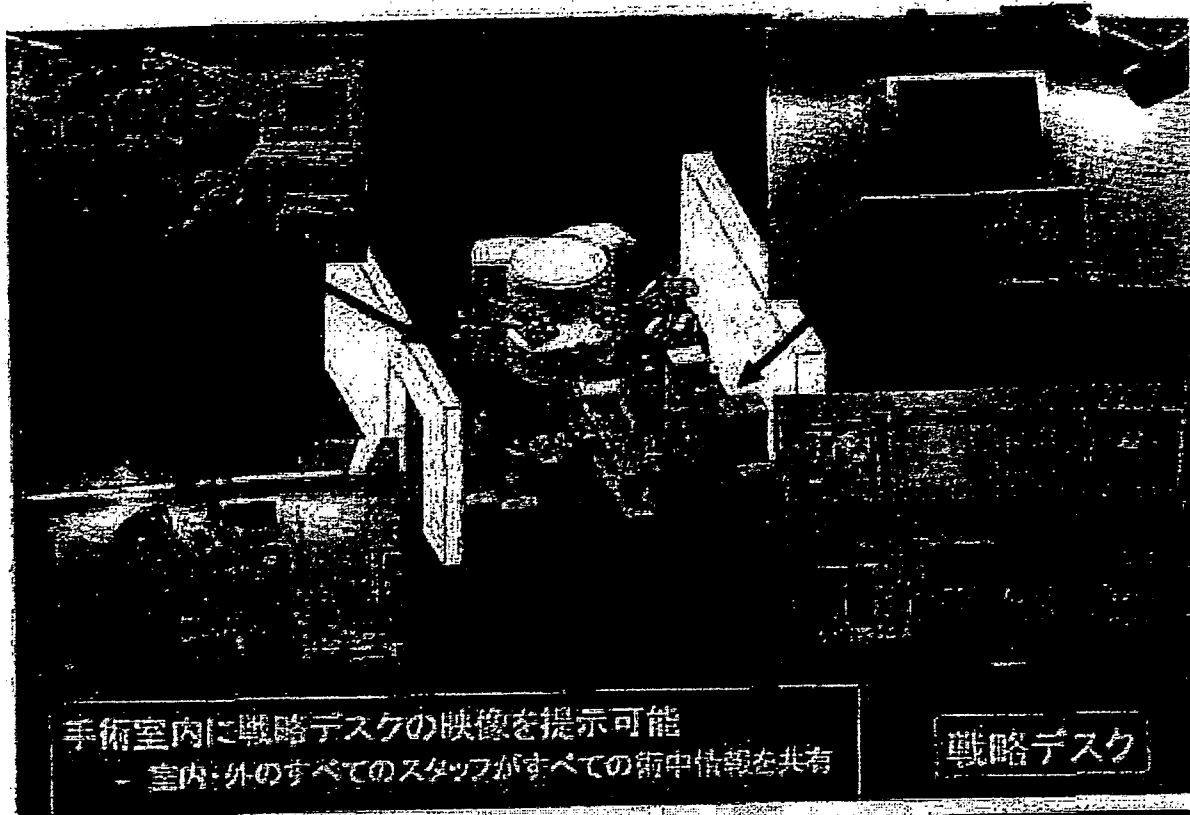
図5 覚醒下手術での統合画像表示

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べ物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)^{5,6)}。

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B 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働し、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

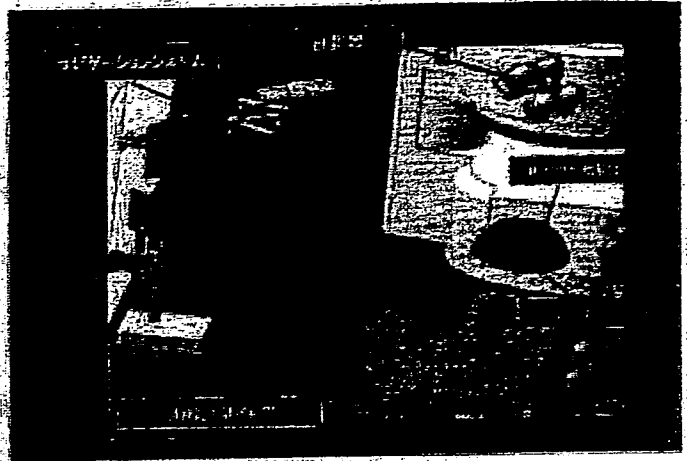


図7 ナビゲーションの最適化範囲シミュレーション

言語カラー変換

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(edt), 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

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 A Handheld Laparoscopic Forceps Manipulator using Multi-Slider Linkage Mechanisms

山下紘正 (学生会員)*, 金 大永, 波多伸彦, 土肥健純
東京大学大学院 情報理工学系研究科

Hiromasa Yamashita, Daeyoung Kim, Nobuhiko Hata, Takeyoshi Dohi
Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

Abstract

This paper proposes a new handheld laparoscopic forceps manipulator for laparoscopic surgery using 2 bending mechanisms by multi-slider linkage mechanisms to achieve high mechanical performance and applicability. A bending mechanism consisted of 3 outer frames, 2 rotating joints and 2 sliding linkages for drive and restraint. The rotation of the joint was available by pulling / pushing the adjacent element by sliding linkage in order. We connected 2 bending mechanisms, one was for the horizontal plane bending and the other was for the vertical plane bending, enabling 2-DOFs independent motions between -90 degrees and $+90$ degrees. The 2-DOFs bending mechanism and 1-DOF forceps mechanism were driven by 3 brushless DC-servomotors. We examined the actual angle of 2-DOFs bending mechanism, obtaining repeatability of ± 0.87 degrees in the horizontal plane bending and ± 0.91 degrees in the vertical plane bending. In an animal experiment this manipulator performed laparoscopic surgical tasks under pneumoperitoneum. In conclusion, we were sure of a usefulness of multi-slider linkage mechanisms for the new handheld forceps manipulator to clinical application, which showed high repeatability of less 1.0 mm manipulation and large working space with sufficient generated power of end-effector.

Key words Multi-slider linkage mechanisms, Laparoscopic, Manipulator.

1. はじめに

腹腔鏡下外科手術は従来の開腹下における手術と比較して腹壁への損傷が少なく、患者への侵襲を最小限に抑えることができる。一方で腹腔鏡下外科手術に用いられる鉗子や電気メスなどの手術器具の多くは細長い直線状であり、挿入孔を支点とした低自由度な動きに制限され術者にかかる負担が増大して

しまう。

この問題に対し、従来の手術器具の先端部に新たな自由度を付加するマニピュレータの研究が行なわれており、駆動方法として様々な手法がとられてきた^{1)~9)}。ワイヤ駆動は自由度の付加が容易でマニピュレータの径を細くすることができ、滅菌した駆動部と非滅菌のアクチュエータを明確に分離できる^{1)~6)}。リンク駆動は、ワイヤ駆動で起こりうるワイヤの伸びや破断という問題に対し、動力伝達部に剛体のリンクを採用することにより高い再現性と剛性、耐久性を実現し、より安全な手術が期待できる^{7)~9)}。しかし構造上の制限からワイヤ駆動のような広い駆動領域を確保することが難しい。

* 東京大学大学院情報理工学系研究科
先端治療福祉工学研究室

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

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

受付 2003 年 12 月 17 日 ; 採択 2004 年 1 月 14 日

そこで本研究では、新たな駆動方法として複数のリンク節を組み合わせ、多自由度化に伴うスペースの制限を解決した、多節スライダ・リンク機構を提案する。多自由度による広い駆動領域と、リンクによる確実性の高い動力伝達駆動を両立する腹部外科手術用の屈曲鉗子マニピュレータの開発を目的とする。

2. 多節スライダ・リンク機構

本研究では腹部外科手術、特に肝臓における手術での使用を想定し、従来の手術器具ではアプローチが困難な、臓器の裏側などの腹腔内深部における組織の剥離、把持、結紮、そして縫合作業を行なうためのマニピュレータを開発する。より広い術野を確保するための1自由度当たり $\pm 90^\circ$ の屈曲範囲を持つ屈曲2自由度と、手術器具として最も基本的な把持1自由度の合計3自由度、繰返し誤差 1.0° 以下の屈曲再現性、そして成人の肝臓の1/3程度を持ち上げるための0.4 kgfの屈曲発生力を目標とする¹⁰⁾。

2.1 1自由度屈曲機構

1自由度の屈曲機構は、円筒状の3つのフレーム、各フレームを連結し $\pm 45^\circ$ の回転を行なう2箇所のピンジョイント、そして3つのリンクから成る駆動

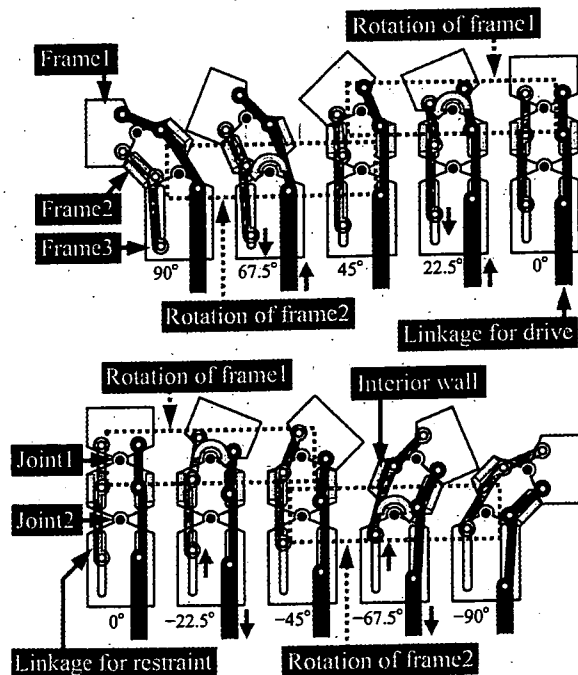


Fig. 1 Bending mechanism with multi-slider linkage, transforming linear motion of linkages to rotation of frames to enable ± 90 degrees bending manipulation.

用リンク節と2つのリンクから成る拘束用リンク節で構成される。1自由度の屈曲機構を多関節構造化し、術者の指のような柔軟な動きを実現する。駆動用リンク節をアクチュエータと連結し、前後にスライドさせることにより、各フレームにピンジョイント周りのモーメントを与え、最大 $\pm 90^\circ$ の屈曲を可能にする (Fig. 1)。

フレームの内部にはリンクを通すためのチャンネルを設け、各リンク節をチャンネル内部の壁面に沿わせながら前後にスライドさせる。それぞれのチャンネルはリンクが直進のみ可能な部分と、直進と回転が可能になる部分に分かれており、リンクの動きに構造的に制御することができる。拘束用リンク節は 0° を中心にして駆動用リンク節と完全に対称的な軌道を取り、 -45° から $+45^\circ$ の間で、第2フレームが第1フレームより先に回転するのを防ぎ、2つのフレームが互いに逆方向に回転するのを防ぐ。この拘束用リンク節の作用により、3つのフレームの冗長性を排除し、一意の順番で回転させることができる。

2.2 2自由度屈曲機構

2つの1自由度屈曲機構をフレームの軸周りに 90°

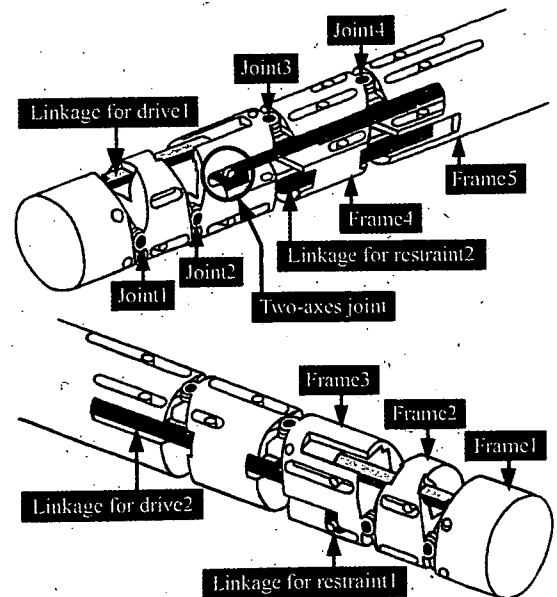


Fig. 2 Perspective view of the architecture of 2-DOFs bending mechanism that consists of 5 frames, 4 linkages and 4 pin-joints. Linkages for drive 1 and for restraint 1 are for the vertical plane bending, and linkages for drive 2 and for restraint 2 are for the horizontal plane bending. Linkage for drive 1 connects to the actuator by added linkage that consists of 3 links in third, fourth and fifth frames.

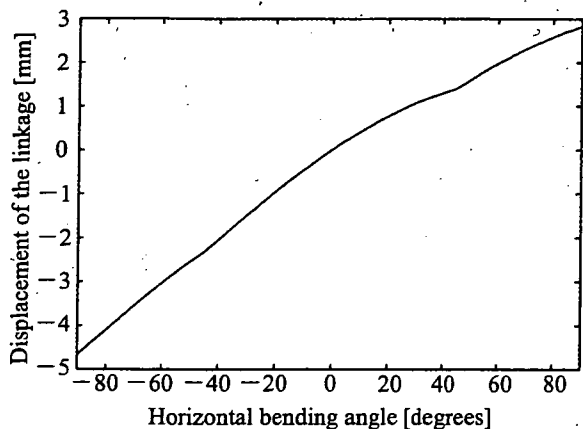


Fig. 3 Relationship between the displacement of linkage for drive and the angle of the horizontal plane bending. Although actions differ a little bordering on -45 degrees and $+45$ degrees, both have an almost linear relation.

捻り、ピンジョイントによって前後一列に連結することで、水平面と垂直面での屈曲を実現する2自由度屈曲機構を構築する (Fig. 2)。先端側の自由度を垂直面屈曲、根元側の自由度を水平面屈曲とし、第3フレームにおいて垂直面屈曲用の駆動用リンク節を2軸回転可能なジョイントと連結する。そして第4・第5フレーム内部でさらに2本のリンクをフレームの長軸方向に連結することで、根元側の水平面屈曲角度とは独立した垂直面屈曲駆動用リンク節のスライドが可能となる。各自由度ごと最大 $\pm 90^\circ$ という広い屈曲範囲により、体内の複雑な器官や組織の間を潜り抜け、回り込むような柔軟な作業に対応で

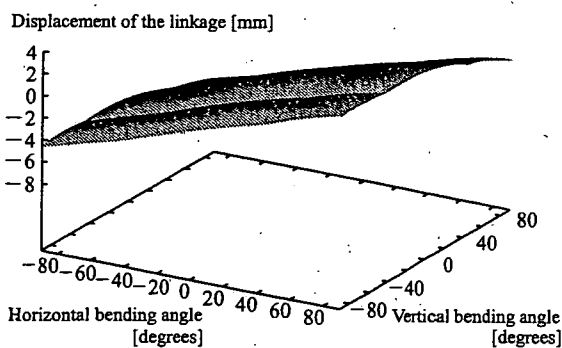


Fig. 4 Relationship between the displacement of linkage for drive of the vertical plane bending and the angle of both the horizontal and vertical plane bending. The displacement is determined by 9 kinds of divisions bordering on -45 degrees and $+45$ degrees of the horizontal and vertical plane bending.

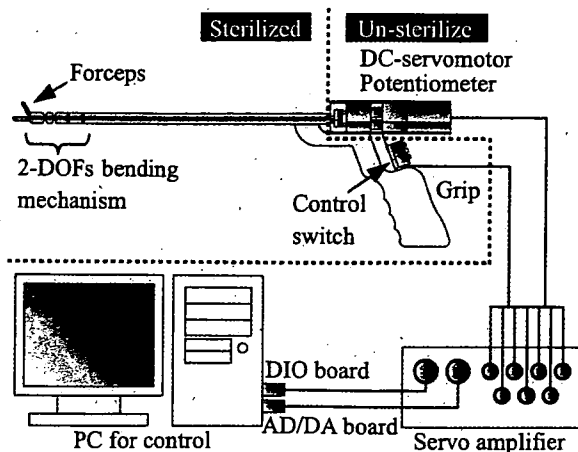


Fig. 5 System configuration of a handheld laparoscopic forceps manipulator. Forceps is sterilized and clearly separable with un-sterilized linear-drive unit.

きる。

各フレームが一意的順番で回転することにより、駆動用リンク節のスライド変位量と屈曲角度の関係が一意的に定まる。水平面屈曲におけるリンク節のスライド変位量と屈曲角度の関係を Fig. 3 に示す。また、マニピュレータ先端側の垂直面屈曲においては、垂直面屈曲角度と水平面屈曲角度の両方から駆動用リンク節のスライド変位量が一意的に定まる (Fig. 4)。この計算値に基づいてアクチュエータの位置サーボ制御を行なう。

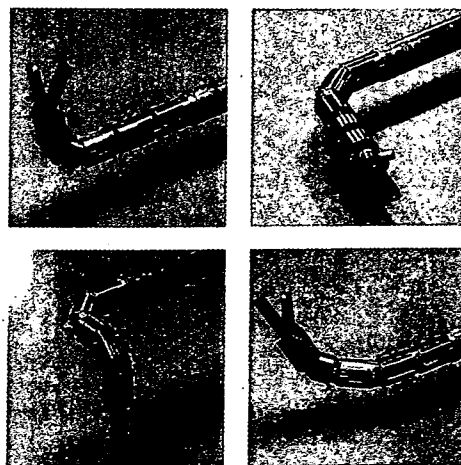


Fig. 6 Multi-DOF forceps with 2-DOFs bending mechanism and 1-DOF forceps mechanism.

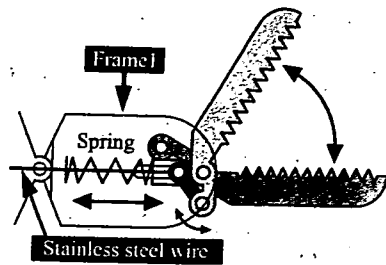


Fig. 7 Details of the wire driven forceps mechanism driven by links, a spring and a wire. Grasping angle is from 0 to +60 degrees.

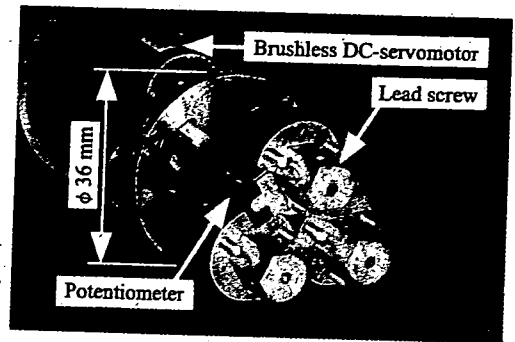


Fig. 9 Details of a linear-drive unit with lead screws, brushless DC-servomotors and potentiometers. Slide type potentiometer is embedded to the cylindrical guide of lead screw.

3. システム構成

Fig. 5 に製作した屈曲鉗子マニピュレータのシステム構成を示す。本システムは、多自由度鉗子、直動ユニット、そして制御用計算機から構成する。多自由度鉗子は完全に滅菌する必要があり、非滅菌部である直動ユニット部分とは明確に分離できるようにする。

3.1 多自由度鉗子

多自由度鉗子のフレームの外径は 9 mm、長さは 60 mm であり、リンク駆動式 2 自由度屈曲機構とワイヤ駆動式把持機構の合計 3 自由度を有する。各自由度はそれぞれ独立した操作が可能である (Fig. 6)。また、把持機構を Fig. 7 に示す。なお、把持部の中心位置 (先端側の垂直屈曲用回転軸より 10 mm 前方) における作業領域を Fig. 8 に示す。

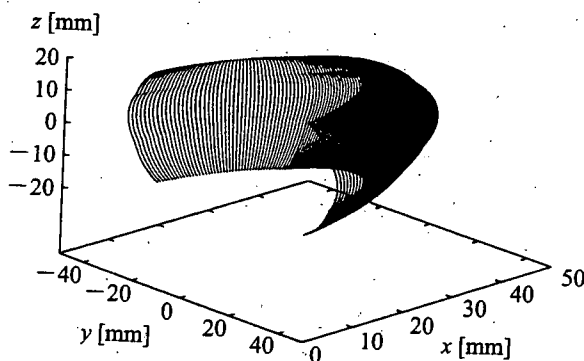


Fig. 8 Working space of the forceps with 2-DOFs bending manipulation. The x-y coordinates plane and the origin of the coordinates is the horizontal plane bending.

3.2 直動ユニット

屈曲機構と把持機構を駆動させるための 2 組のリンク節と 1 本のワイヤは、送りねじ (M3 × 0.5) とブラシレス DC サーボモータで構成した直動ユニットに接続する。3 つの直動ユニットは正三角形に配置し、各ユニットに埋め込んだスライド型ポテンシオメータによって送りねじの変位を検出することでフィードバック制御を行なう (Fig. 9)。また、気腹下によるガス漏れを防止するためにユニット全体を密閉している。

3.3 制御用計算機

本研究では操作用のグリップを装着し、医師が従来の鉗子と同じ感覚で取り扱えるような手に持って扱うタイプのマニピュレータを開発した。操作インターフェースには様々な方法があるが、手に持ち、水平・垂直方向の屈曲と把持の開閉操作を独立に行なうことのできるボタン式を採用した。また、トロッカーからの出し入れを円滑に行なえるように、屈曲角度と把持角度を 0° に戻し直線形状にするためのリセットボタンを設けた。操作スイッチから得られる目標角度とポテンシオメータから得られる現在の屈曲角度から、2 組のリンク節と 1 本のワイヤの

Table 1 Generated power and torque.

Mechanism	Direction	Power [kgf]	Torque [mNm]
Horizontal	0 to +90°	0.21	79.6
	0 to -90°	0.55	208.4
Vertical	0 to +90°	0.33	58.9
	0 to -90°	0.30	53.5
Forceps	Close		50.4

変位量を算出し、サーボアンプを介してアクチュエータへ出力する。操作用スイッチからの入力とモータの回転方向制御はデジタル入出力ボード、ポテンシオメータからの入力とモータの速度制御はAD/DA変換ボードにより行なう。

なお、多自由度鉗子、直動ユニット、操作用グリップの総重量は、ケーブルを除いて550 gfであり、全体の小型軽量化を図っている。

4. 結果

4.1 性能評価実験

屈曲鉗子マニピュレータの再現性、発生力の性能を評価するため、2自由度屈曲機構における性能評

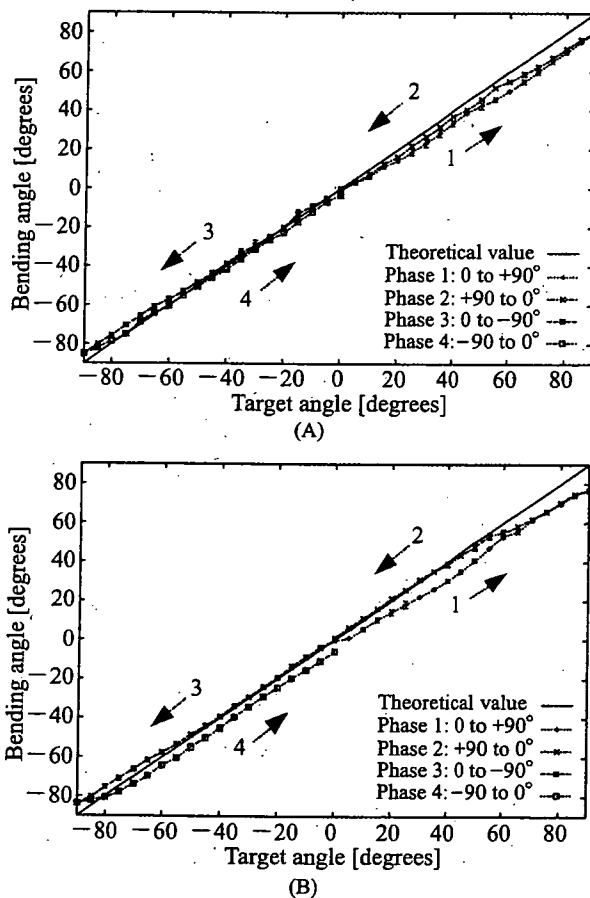


Fig. 10 Results of bending characteristic in 2-DOFs manipulation, which is relationship between target angle and actual bending angle. (A) is in the horizontal plane bending, and (B) is in the vertical plane bending. The forceps is unloaded during the measurements. At the time of measurement of one DOF, the other DOF is fixed to 0 degree. Each trial starts from 0 degree toward +90 degrees (1), next returns toward 0 degree (2), then toward -90 degrees (3), and finally returns toward 0 degree (4) repeatedly 5 times.

価実験を行なった。最初に入力した目標屈曲角度に対して実際に得られた角度を各自由度ごとに測定した。0°を開始点とし、+90°、0°、-90°へと屈曲させた後、再び0°へと戻すという4段階の試行を5回ずつ繰り返し、その平均値をFig. 10に示す。繰り返しの誤差については、水平面屈曲における標準偏差が平均で $\pm 0.91^\circ$ 、垂直面屈曲における標準偏差が平均で $\pm 0.87^\circ$ という結果であり、最大でも $\pm 1.0^\circ$ 以下の再現性を確認した。また、屈曲と伸展のヒステリシスは水平面屈曲で最大 5.5° 、垂直面屈曲で最大 9.0° であり、理論値の直線に近い軌道を得た。一方で屈曲角度は若干不十分であり、水平面屈曲においては -85° から 80° 、垂直面屈曲においては -84° から 77° の範囲であった。次に、先端の把持部での屈曲発生力を自由度ごと測定し、屈曲機構のフレーム先端側関節 (Fig. 2中 Joint 1および Joint 3) で発生する屈曲トルクを算出した。また、把持機構において歯を閉じる方向への把持トルクを測定して、その結果をTable 1に示す。

4.2 In vivo 実験

腹部外科手術用鉗子としての実用性を評価するため、気腹下において生体ブタを用い、専門医によるマニピュレータの使用感評価を行なった。臨床での条件に合わせるため、屈曲鉗子マニピュレータ、腹腔鏡、そして把持鉗子を3箇所ポートから肝臓表面へアプローチした (Fig. 11)。肝臓周辺の手術を想定し、マニピュレータ単独、またはもう1本の把持鉗子との連携により、肝臓表面組織の押し退け、把持、刺入、そして縫合を行なった (Fig. 12)。なおマニピュレータを扱うにあたり、術者には特別な訓練を行わず、事前に自由度と操作用インターフェー



Fig. 11 Situation of use of the manipulator by a surgeon in vivo experiment.

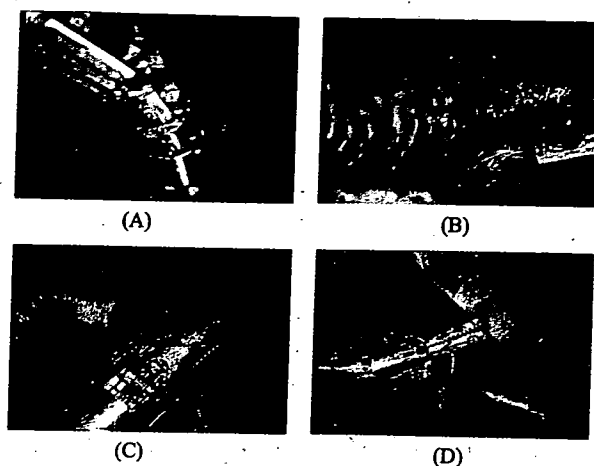


Fig. 12 (A) In case circumventing and thrusting the liver tissue, it was possible to operate the manipulator without transformation of elements of bending mechanism. (B) While grasping operation was unstable, forceps did not grasp tissue effectively. (C) Bending motion enabled stitching surface tissue. (D) The manipulator's 3-DOFs were appropriate to suturing the liver tissue with another forceps.

スのボタンとの対応のみ説明を行なった。実験中は気腹法を用いたことによるガス漏れ等の問題は無く、また製作したマニピュレータのサイズは従来の鉗子とほぼ同等であるため、Fig. 11のように両手に器具を持ち、処置を行なうことが可能であった。一方で把持の歯が閉じきらない不具合が見られたが、原因としては、把持機構を構成するリンク節へと組織や血液が混入したこと、そして屈曲時におけるワイヤの緩み補正が不十分であったことが考えられる。また、問題点として屈曲駆動用のリンクを伝い、体液が非滅菌部分である直動ユニット部に混入したことが挙げられる。

5. 考察

本研究では多節スライダ・リンク機構を用い、腹部外科手術用屈曲鉗子マニピュレータの開発を行なった。

性能評価実験では、本マニピュレータが広範な作業領域と高い再現性を有し、ヒステリシスも小さく、腹腔鏡下外科手術に適応できることを確認した。実際に得られた屈曲範囲は各自由度あたり $\pm 80^\circ$ 前後であったが、これは従来の機器の作業領域と比べても広く、より柔軟な作業が可能である。多節スライダ・リンク機構を用いることにより、動力伝達要素に伸びや曲げが生じることが無く、2自由度屈曲駆動における繰り返し誤差を 0.9° 程度に抑えることができ

た。またこれにより、全長400 mmの鉗子マニピュレータ先端の繰り返し誤差を1.0 mm以内に抑え、腹腔鏡下外科手術を行なうのに十分な精度を得ることができた。ヒステリシスは最大 9.0° であり、これは各リンクを連結するピンジョイントの遊びが主な原因であったが、再現性の高さを利用してキャリブレーションをかけることによって補正を行なうことができる。

ブタを用いた動物実験では、屈曲の発生力と姿勢の保持力の強さを利用した肝臓の持ち上げや押し退けが可能であった。性能評価実験では水平面での $+90^\circ$ 方向への屈曲と垂直面での $\pm 90^\circ$ 方向への屈曲における発生力が要求仕様を下回ったが、肝臓へアプローチする際に特に力の不足は感じられなかった。しかしリンク節のジョイント部分、DCモータと送りねじでの伝達効率の低さを改善することで、各屈曲方向の発生力を揃え、より繊細な作業を可能にできる。針を把持し刺入や縫合を行なう際には、針が軸周りに多少の滑りを起こすことがあったが、これは把持の歯の形状を変えることで解決できる。また、毛細管現象によって組織や血液がリンク部分に混入するのを防ぐため、気腹法でのガス漏れ対策に加え、適切なシールを追加する必要がある。インターフェースに関しては、誤操作を招くことはほとんどなかったが、より直感的な制御方法を追求し、手に持って操作する方式だけでなく、高い再現性と広い動作範囲という機械的性能を利用したマスタスレーブ方式への導入も充分可能である。さらに臨床への有用性についてはエンドエフェクタに把持鉗子だけでなく内視鏡や電気メス、レーザーメスなど多彩な機能を搭載した多自由度屈曲マニピュレータを開発することにより、従来の器具では不可能であった部位へとアプローチしての全く新しい術式も可能となる。

6. 結論

多節スライダ・リンク機構は高い再現性と大きな発生力という優れた機械的性能を有し、この機構を応用した腹部外科手術用の屈曲鉗子マニピュレータは、従来の器具と比較して広い屈曲範囲を実現した。今後はインターフェースを中心に操作性、制御性を向上させていき、臨床応用に向けて開発を進めていく。

謝辞：埼玉医科大学橋本大定先生、九州大学橋爪誠先生、東京工科大学篠原一彦先生、東京大学末松義弘先生、月原弘之先生にはブタ実験において、マニピュレータの評価にご協力いただいたことに感謝

致します。

本研究の一部は日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「外科領域を中心とするロボティックシステムの開発」(JSPS-RFTF99I00904), および2003年度産業技術研究助成事業(03A47051a)によるものである。

文献

- 1) Abbou C. C, Hoznek A, Salomon L, Olsson L. E, Lobontiu A, Saint F, Cicco A, Antiphon P, Chopin D. Laparoscopic radical prostatectomy with a remote controlled robot. *JOURNAL OF UROLOGY* 2001; 165: 1964-1966.
- 2) Charles S, Das H, Ohm T, Boswell C, Rodriguez G, Steele R, Istrate D. Dexterity-enhanced Telerobotic Microsurgery. *Proc of 8th International Conference on Advanced Robotics* 1997: 5-10.
- 3) 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. *Proc of 4th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*. 2001: 606-613.
- 4) Dario P, Carrozza M. C, Marcacci M, Attanasio S. D', Magnani B, Tonet O, Megali G. A Novel Mechatronic Tool for Computer-Assisted Arthroscopy. *IEEE Trans Inform Technol Biomed* 2000; 4: 1: 15-28.
- 5) Ikuta K, Sasaki K, Yamamoto K, Shimada T. Remote Microsurgery System for Deep and Narrow Space; Development of New Surgical Procedure and Micro-robotic Tool. *Proc of 5th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*. 2002: 163-172.
- 6) 西澤幸司, 岸 宏亮, 田島不二夫, 須藤憲一, 藤江正克, 高木眞一, 土肥健純. 手術用マニピュレータのための駆動ワイヤ非干渉型関節の開発. *ロボティクス・メカトロニクス講演会 '03 講演論文集*. 2003: 1P1-2F-D2(1).
- 7) Peirs J, Reynaerts D, Brussel H. Van. A miniature manipulator for integration in a self-propelling endoscope. *Sensors and Actuators A*. 2001: 343-349.
- 8) Kobayashi Y, Chiyoda S, Watabe K, Okada M, Nakamura Y. Small Occupancy Robotic Mechanisms for Endoscopic Surgery. *Proc of 5th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*. 2002: 75-82.
- 9) Rininsland H. ARTEMIS. A telemanipulator for cardiac surgery. *European Journal of Cardio-thoracic Surgery*. 1999; 16: 106-111.
- 10) 鈴木隆雄. *日本人のからだ; 健康・身体データ集*. (第1版). 東京: 朝倉書店, 1996.

13-143-4 経尿道的前立腺切除術のための管状組織低侵襲切除マニピュレータ

A Tubular Organ Resection Manipulator for Transurethral Resection of the Prostate

○橋本 隆二 金 大永 波多 伸彦 土肥 健純

東京大学 情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻

Ryuji Hashimoto, Daeyoung Kim, Nobuhiko Hata and Takeyoshi Dohi

Dept. of Mechano-Informatics, The University of Tokyo

1. 背景

前立腺肥大症は高齢男性に頻度の高い症例のひとつであり、おもな症状に夜間頻尿・排尿刺激症があげられる¹⁾。

現在治療法として経尿道的前立腺切除術 (Transurethral Resection of the Prostate, TUR-P) が一般的に行われている。これは電気メスと内視鏡を内装した切除鏡を経尿道的に挿入し、内視鏡画像の下、肥大前立腺を切除する手技である。開腹手術に代わる低侵襲な手技とされているが、尿道粘膜の損傷による尿路感染、長時間の手術によるTUR症候群などの合併症が問題視されている²⁾。さらにTUR-Pでは内視鏡の画像のみで手技を行うため、前立腺と電気メスの位置関係の把握が困難であり、前立腺被膜穿孔や腹腔内穿孔などの合併症を起こす可能性が高い。

これらの合併症を導く問題点を解決するため多くのデバイスが提案されてきたが^{3,4)}、これらを同時に解決する切除手法および切除デバイスは報告されていない。そこで本研究の目的は、尿道粘膜の損傷を抑え短時間で多くの前立腺組織を取り除く機構を有した、管状組織低侵襲切除マニピュレータの開発である。また画像誘導システムを開発し、安全に切除を行うシステムを構築する。

2. 管状組織低侵襲切除法

2.1 屈曲切除機構および灌流切除機構

尿道粘膜の損傷を抑え切除を行う機構として、屈曲切除機構を考案した (Fig.1)。マニピュレータ先端部にはアームとカッターが装備されている。先端部を経尿道的に挿入し、前立腺目的位置まで挿入した後バルーンカテーテルを膨らませ位置固定を行う。アームを屈曲させ患部組織を変位させ、その後カッターを直線的に挿入することで切除を行う。アームの屈曲角度とカッターの挿入量を変化させることで、一点の切開部を通じて広範囲の肥大前立腺組織を切除することが可能となる。また、一平面内の切除が完成した後、先端部を軸方向に回転させることにより、他平面内の肥大組織の切除が可能となり、これらの自由度によって3次的に低侵襲な切除をすることができる。

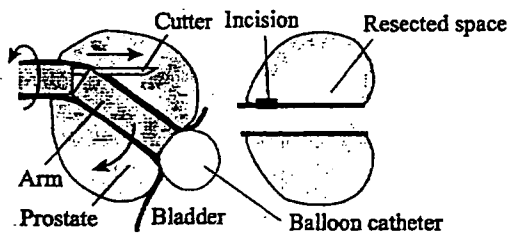


Fig.1 Prostate displacement mechanism

またカッター内部にはドリルと灌流管を内装しており、カッターが患部に挿入されるとドリルが回転し組織を切削、ローラポンプにより灌流液を流し込み、切除片と灌流液を同時に体外に取り除く。切除と吸引を同時に行うため短時間の切除が可能となる。

2.2 システム全体像

システム構成を Fig.2 に示す。本システムはマニピュレータ・術者操縦用コントローラ・画像誘導システムの3つからなる。始めにマニピュレータを経尿道的に患部に挿入し、マニピュレータを保持しているポイントセッターを固定する。術者は画像誘導を下にコントローラを操作し、マニピュレータを操縦し切除を行う。術者を誘導する画像には超音波画像を用いる。患部とマニピュレータ先端部を撮像し、術者に両者の位置関係を把握させ安全な切除を行わせる。

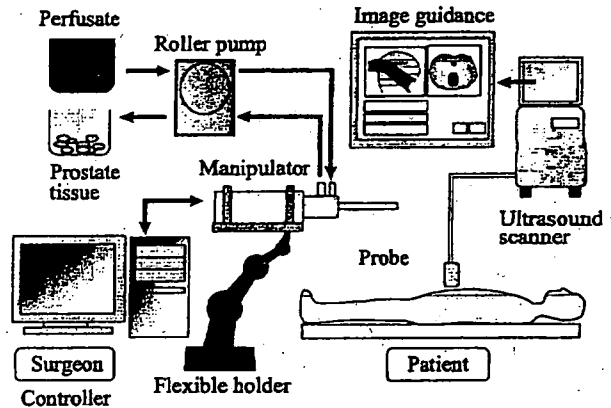


Fig.2 Conceptual model of the complete system

2.3 マニピュレータ詳細

製作したマニピュレータの先端部を Fig.3 に示す。マニピュレータ先端部はアーム・カッター・ドリルを持つ。搭載された自由度は4自由度であり、アームの屈曲・カッターの挿入・ドリルの回転・軸周りの回転を有する。

先端部の大きさは直径8mmであり、従来用いられている切除鏡の直径に等しい。アームの屈曲にはリンク屈曲機構を用い、確実な前立腺の屈曲を実現できる。アーム屈曲角度は最大45°、分解能は0.1°である。前立腺尿道部は人によって長さが異なるため、アームの長さはこれに対応できるように可変となっている。写真では40mmの長さのアームを取り付けてある。カッターの挿入ストロークは最大40mm、分解能0.1mm、本体軸方向の回転は±180°である。