

医療用ロボティクス

光石 衛

要 旨：国内外の手術ロボットの現状を記すとともに、著者らが開発している内臓系低侵襲手術支援ロボットシステムを紹介する。鉗子先端の2方向屈曲と把持動作とをワイヤを用いずリンク機構で行うこと、鉗子先端の力覚を強調して操作者に提示することを特徴とする。力覚強調提示によって対象物に与える負荷を30%程度低減した。開発したシステムを用いてブタを対象とした国内外を結んだ遠隔胆嚢摘出実験を行い、約90分で遂行可能であった。
(J Jpn Coll Angiol, 2006, 46: 759-767)

Key words: computer-integrated surgical system, surgical robot, minimally invasive surgery, augmented force feedback, telesurgery

はじめに

近年、各地の大学や研究所で医工連携が盛んになり、手術ロボットの研究開発が多く行われるようになってきた。手術をロボットで行うことの意義として次のことが挙げられる。①通常、手では困難な微細な手術、精度の高い手術、狭い領域や臓器の裏側に入り込んだ手術などが可能となる。②医師が通常ではみることのできない臓器や骨格などの裏側や内部の情報を参照しつつ行う手術が可能となる。③遠隔診断や遠隔手術が可能となる。

本稿では、ロボティック・サージェリの現状を記すとともに将来を展望する¹⁾。また、著者らが開発を進めている低侵襲手術支援システムの紹介を行う。

ロボティック・サージェリの現状と将来

内視鏡下手術支援ロボットとして有名なシステムに、Intuitive Surgical社のda VinciやZEUSなどがある。前者は、Salisburyらが開発したもので、ワイヤ駆動方式の低侵襲手術システムである²⁾。片手に7自由度を有し、先端部分は作業に応じて取り替え可能となっている。先端に作用する力をマスタ・マニピュレータに帰還可能となっているが、減速比が大きいため、例えば、軟組織

の操作では力は感じられない。後者は、手術台の横に複数本のマニピュレータを配置する形式であり、2001年に米仏間を結び遠隔手術を行っている。遠隔地に存在する医師が手術室に接続して動画・音声を共有し、手術の指導、音声操作可能な機器を動作させる遠隔共同作業システム(SOCRATES)につき、FDA(Food and Drug Administration：米国食品医薬品局)から認可を得ている。

力覚付き遠隔腹腔内手術システムについては生田らの研究がある³⁾。また、生田らは非干渉に3関節6自由度を操作可能な能動鉗子システムを開発し⁴⁾、藤江らは外径3mmで開閉を含め4自由度の低侵襲手術用鉗子システムを開発した⁵⁾。これによってすでに臨床実験を行っている。また、彼らは、屈曲機構を利用した脳神経外科スパチュラ用のロボット(外径2.4mm)を開発している⁶⁾。さらに、佐久間、土肥らはリンク機構を用いた多自由度屈曲鉗子を開発した⁷⁾。海外では、Taylorらが鉗子の構造として蛇腹型の機構を採用し、直径4.2mmにまで小型化を実現している⁸⁾。腹腔鏡を支持するマニピュレータの開発に関しては土肥らの5節リンク式マニピュレータの研究がある⁹⁾。この研究では内視鏡の挿入点で球面ジョイントを用いて固定し、内視鏡の他の点を患者の膝の間に置いた5節リンク機構を有するマニピュレータで2次元的に位置決めをす

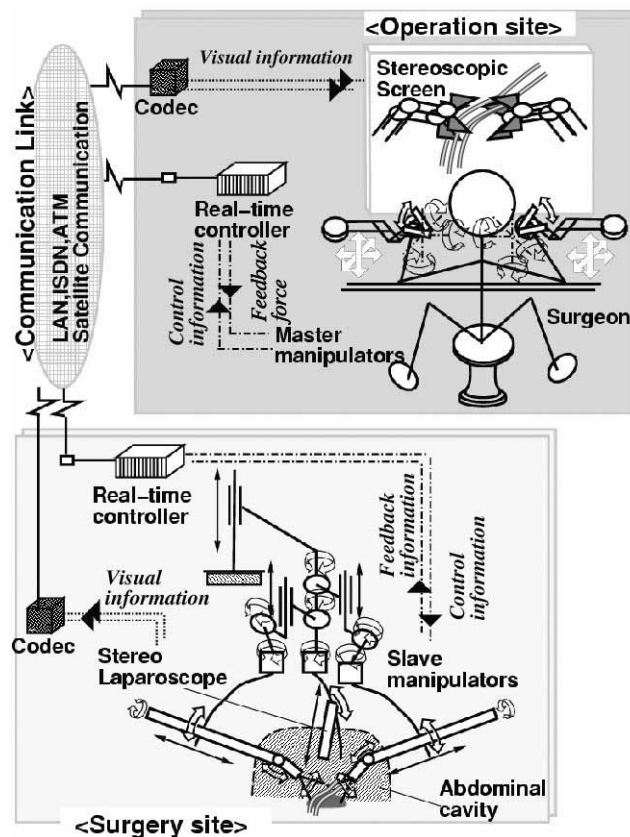


Figure 1 Overview of the developed system.

る。これにより、内視鏡は挿入孔を中心とした動作をする。この駆動機構は、挿入孔から離れた位置に設置可能であり、術者の作業領域を侵害しないとともに、駆動範囲が限定され予想外の動作を起こしにくい。また、松日楽らはマスタ・マニピュレータとスレーブ・マニピュレータとが一体化した腹腔鏡手術支援用システムを開発し¹⁰⁾、光石らは微細血管縫合システムを用いて、直径0.3mm程度のラットの頸動脈を縫合した¹¹⁾。

多関節を有し本体が腸の内部などを移動するロボットの研究としてBurdickらの研究¹²⁾、Darioらの研究¹³⁾、生田らの研究¹⁴⁾がある。最近では、Darioらによる独特のインチワーム駆動機構を用いた腸内マニピュレータの開発が突出している。

低侵襲手術支援システム

(1) システムの概要

ここでは、著者らの開発システムの紹介を行う。開

発した低侵襲手術システムは、2つのサイト(場所)により構成される。オペレーション・サイトは執刀医が存在し、操作を行う場所であり、一方のサージェリ・サイトは、患者が存在し、実際に手術が行われる場所である。これらの2つのサイトは、WAN(wide area network)、LAN(local area network)などのコンピュータネットワーク、あるいは、その他の種々の通信回線によって接続され、ロボット制御信号、映像、音声、バイタルサインなどが伝送される(Fig. 1)。マスタ・マニピュレータとスレーブ・マニピュレータとは、それぞれリアルタイム・マルチタスクOSであるTornado(ウィンドリバーシステムズ社)を用いて実時間制御され、制御周波数は1kHzとしている。マスタ・マニピュレータとスレーブ・マニピュレータとの間の制御信号の通信周波数は相互を結ぶ回線の通信帯域により変更可能であり、本稿に記す遠隔手術実験では10Hzと設定した。



Figure 2 Master manipulators.
 A: Overview of the operation site.
 B: Master manipulators, foot switches and a display.
 C: Translational motion part of the master manipulator.
 D: Rotational motion and grasp part of the master manipulator.

A	B
C	D

(2) オペレーション・サイト

執刀する医師は、オペレーション・サイトにおいて操作入力器であるマスタ・マニピュレータに対して入力動作を行う。医師によって入力された操作情報は、リアルタイム・コントローラによって絶対位置姿勢情報へと変更され、情報伝送システムを介してサージェリ・サイトに伝送される。マスタ・マニピュレータは左右2腕から成り、片腕につき並進3自由度、姿勢3自由度、手先の開閉1自由度の合計7自由度を有する(**Fig. 2**)。また、並進動作をさせたとき、先端部姿勢が変化しない3次元パラレルリンク機構を採用しており、実時間制御における計算量を機構面から減少させている。手元には、電気メスをオン・オフする押しボタン式のスイッチがある。また、フットスイッチにより、マスタ・マニピュレータからスレーブ・マニピュレータへのデータ伝送のオン・オフの切り替え、マスタ・マニピュレータからの信号を鉗子動作信号として用いるのか内視鏡動作信号として用いるのかの切り替え、マスタ・マニピュレータとスレーブ・マニピュレータとの動作倍率の切り替えを行う。

(3) サージェリ・サイト

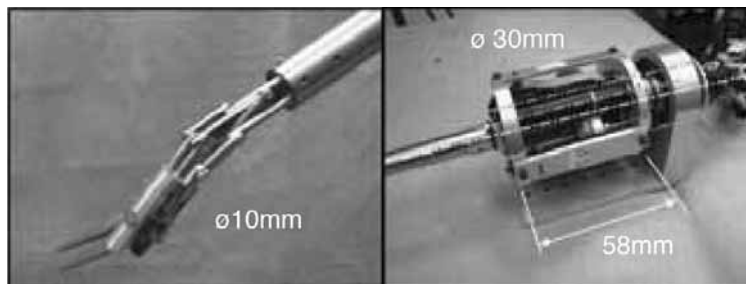
サージェリ・サイトではオペレーション・サイトより伝送された操作情報をもとに、スレーブ・マニピュレータが動作することによって手術が行われる。このとき、腹腔鏡映像、バイタルサイン、術場映像等の環境情報がオペレーション・サイトに伝送され、執刀医に提示される。また、オペレーション・サイトの執刀医の映像・音声はサージェリ・サイトへ伝送され、サージェリ・サイトの助手等へ提示される。

スレーブ・マニピュレータは、内視鏡用アーム1腕、手術ツール用アーム2腕の合計3腕から構成され、各アームは曲率ガイドを用いた機構的な不動点を回転中心とする回転2自由度、鉗子長軸方向の並進1自由度を有する(**Fig. 3**)。機構的な不動点をトロカールの位置と一致させることにより、患者への安全性を機構的に保証することが可能である。手術ツール用アームは、トロカール位置決定のために機構を並進させる3自由度を有する。また、3腕全体を鉛直方向に並進させる1自由度を有する。手術ツールとして通常はリン



A | B

Figure 3 Slave manipulators.
A: Left and right arms hold forceps.
B: Middle arm holds the endoscope.



A | B

Figure 4 Link-driven multi d.o.f. (degrees of freedom) forceps.
A: Bending part of the forceps.
B: Actuation part of the forceps.

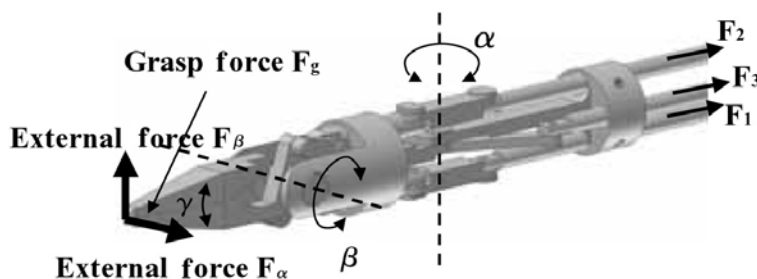


Figure 5 Tip structure of bending forceps.

ク駆動式多自由度屈曲鉗子を手術ツール用アームに装着しているが、電気メス等の既存の製品を装着することも可能となっている。リンク駆動式多自由度屈曲鉗子は外径が10mmであり、先端部に屈曲2自由度、開閉1自由度を有する(**Fig. 4**)。

(4) 力情報の検出と帰還

1) 検出方法の提案

低侵襲手術支援ロボットシステムにおいて、鉗子は体内に挿入されるため、術前に滅菌・洗浄を行う必要

がある。また、術中に電気メスと併用されることもある。そのため、把持力などの測定のために鉗子の先端に力センサを取り付けることは好ましくない。

本稿では、腹腔外にセンシング部を設け、鉗子の駆動部に作用する力を測定して、計算により先端部に作用する力を求める方法を提案する。鉗子の構造を**Fig. 5**に示す。**Fig. 5**から、駆動軸の引張力、圧縮力から把持力のみでなく、外力の検出も可能であることがわかる。駆動軸に作用する力に対し、鉗子の屈曲姿勢(α , β)、開閉角度(γ)に合わせて適切な計算を行い、先端

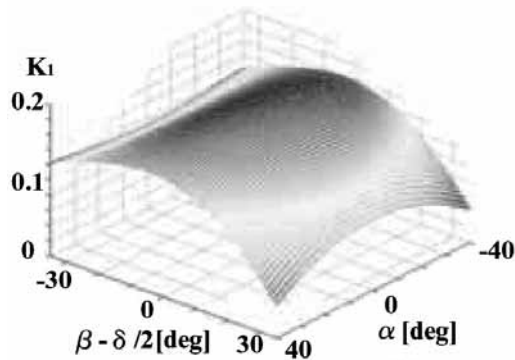
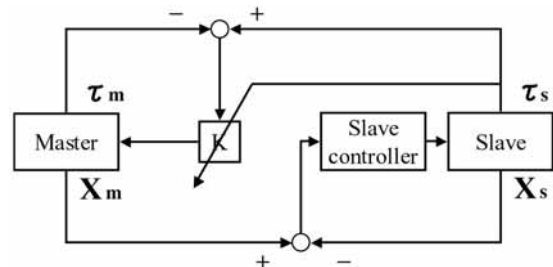
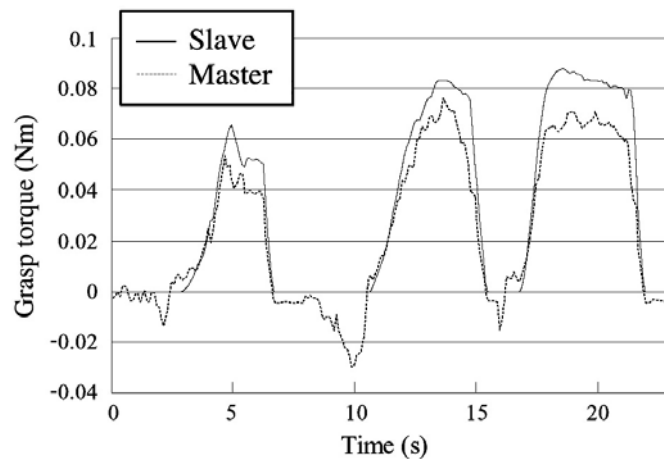
Figure 6 3D graph of K_1 .Figure 7 Block diagram for the conventional force feedback. X_m : master position, X_s : slave position, τ_m : master torque, τ_s : slave torque

Figure 8 Response of grasping force.

部に作用する力を求める。例えば、把持力は、

$$F_g = K_1(\alpha, \beta - \gamma/2) \cdot F_1$$

のように求めることができる。ここでは摩擦力などを無視し、理想的な力の釣り合いより求めた関数である(FIG. 6)。

2) 力帰還の実装

スレーブの把持力をマスタへ力覚提示し、把持トルクの応答を確認した。マスタ把持部の動作抵抗が大きいため、力帰還型の制御を行った。また、マスタとスレーブのトルクを近づけるため、把持トルクに合わせてゲインが大きくなるような制御を行った(FIG. 7)。把持トルクの応答をFIG. 8に示す。実線がスレーブでの把持トルク、破線がマスタで提示されているトルクであ

る。FIG. 8よりスレーブ側で検出された把持力がマスタを介して操作者に提示されていることが確認できる。

3) 力強調提示方法

臓器との接触情報を強調提示可能な制御系の設計を行った(FIG. 9)。本制御システムは、バイラテラル制御の一つである力逆走型制御のダンパ要素を付加したものである。マスタ側のダンパ要素 D_m は、 $D_m = G_d F_s$ で与えられ、 G_d はスレーブに作用する力 F_s とダンパ係数との変換のための定数である。これにより、スレーブに対象物との接触により力が作用したとき、マスタに粘性のインピーダンスを発生させる。本制御手法の特徴は、ダンパ要素を用いるため、マスタの動作を伴う能動的な接触のみを強調して力提示することである。したがって、能動的な把持動作を伴う対象物との接触に

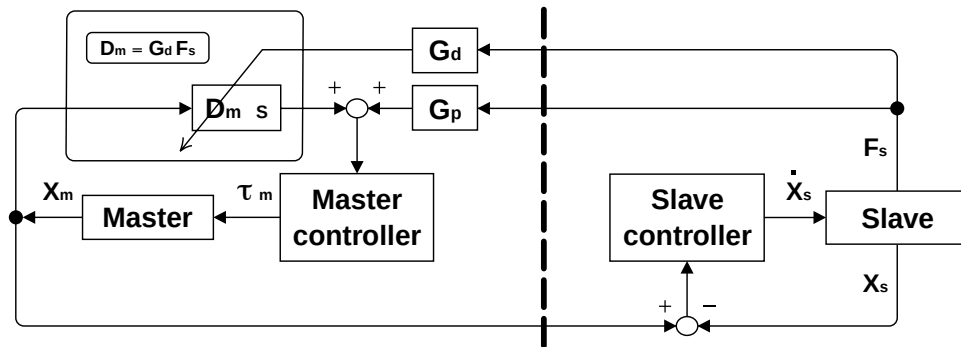


Figure 9 Block diagram for the augmented force feedback.
 X_m : master position, F_m : master force, G_p : gain of P control, G_d : parameter of D_m , X_s : slave position,
 F_s : slave force, D_m : damper element, τ_m : display torque

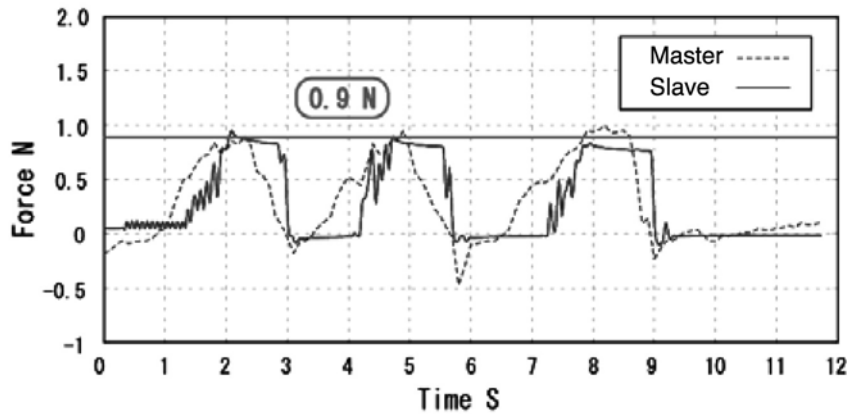


Figure 10 Force applied to the target when the conventional method was adopted.

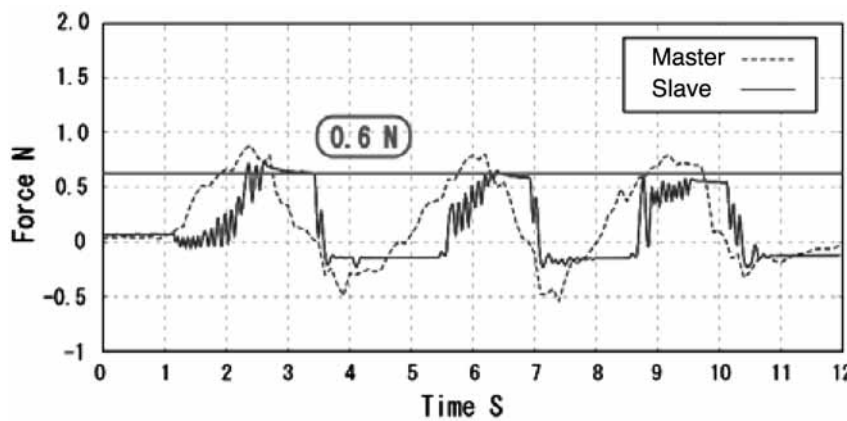


Figure 11 Force applied to the target when the augmented force feedback method was adopted.

ついでのみ、接触力を強調して提示することになる。 G_d は操作者の感覚と把持対象物の物性を考慮して設定を行う。

4) 力強調提示実験結果

ある被験者における力逆走型バイラテラル制御の場合と力強調提示制御の場合とについての力の測定結果をFig. 10, Fig. 11に示す。マスタの把持力から、力逆

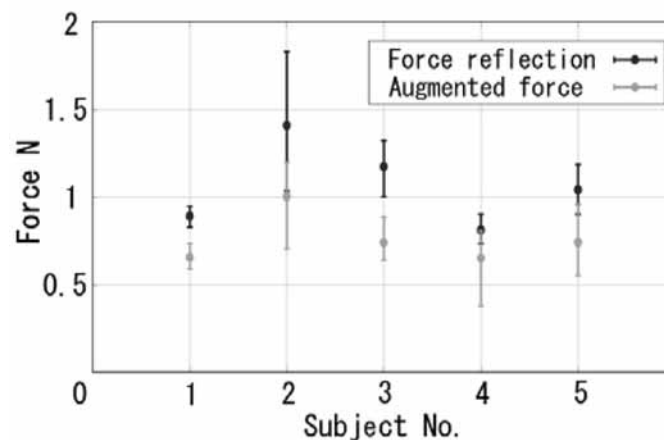


Figure 12 The effect of the augmented force feedback method.

走型バイラテラル制御の場合でも、力強調提示制御の場合でも約1.0Nの把持力で操作者は接触を感知している。スレーブで発生している力は力逆走型バイラテラル制御の場合には最大で0.9N程度であり、力強調提示制御の場合には最大で0.6N程度であった。このことより、力強調提示制御の場合には、スレーブが発生する力が小さくても操作者は把持力を検知しており、また、把持対象に与える負荷も小さいことがわかる。5人の被験者について実験を行ったところ(Fig. 12)、感知に必要な把持力は、力逆走型バイラテラル制御と力強調提示制御とで比較すると、その減少率は平均で28%であった。このことから、本研究で開発した力覚強調制御により、臓器への負荷が約3割低減可能であった。

5) 遠隔手術実験

① 遠隔手術実験システムの構成

韓国漢陽大学にマスタ・マニピュレータを、九州大学にスレーブ・マニピュレータを設置した。両者の直線距離は、およそ540kmである。内視鏡として立体視可能なものを用い、両眼の情報を伝送することによって遠隔の術者が術野を立体視可能とした。また、九州大学にカンファレンス・サイトを設け、術中、韓国・日本双方の医師が手術手技についてディスカッションすることを可能とした。

② 情報伝送経路

映像、音声、ロボット制御信号は、いずれも次に記すコンピュータ・ネットワークを通して伝送した(Fig.

13)。ネットワーク伝送経路は、漢陽大学LAN(HYU: Hanyang University Local Area Network)から、韓国学術ネットワークKOREN(Korea Advanced Research Network)、韓国と日本とを結ぶギガビットネットワークであるKJCN(Korea-Japan Cable Network)を経由し、九州大学LAN(KITE: Kyushu University Integrated Information Transmission Environment)である。マスタ・マニピュレータの位置情報は、マスタ側リアルタイム・コントローラとスレーブ側リアルタイム・コントローラとの間で、TCP/IPネイティブ・ソケット通信を確立し、100m秒ごとに伝送した。また、映像・音声情報は、DV(digital video)品質の映像・音声を非圧縮で伝送するDVTS(digital video transfer system)を用いた。九州大学側では、ハードウェアタイプ、および、ソフトウェアタイプのDVTSを使用し、漢陽大学側では、ソフトウェアタイプを使用した。DVTSによる映像伝送は、通常1系統につき約30Mbpsの帯域を使用するが、フレームレートを調整することによって使用帯域を低減させることが可能である。本稿における実験では、立体視内視鏡の左右の映像を、マスタ・サイトからスレーブ・サイトに、それぞれ10Mbpsで伝送した。また、カンファレンスのために1方向15Mbpsを確保した。したがって、合計で4系統、50Mbpsで映像・音声を伝送した。

③ 遠隔手術実験結果

実験では、ブタを用いた胆嚢摘出術を選択し、屈曲鉗子、および、電気メスを遠隔操作した。

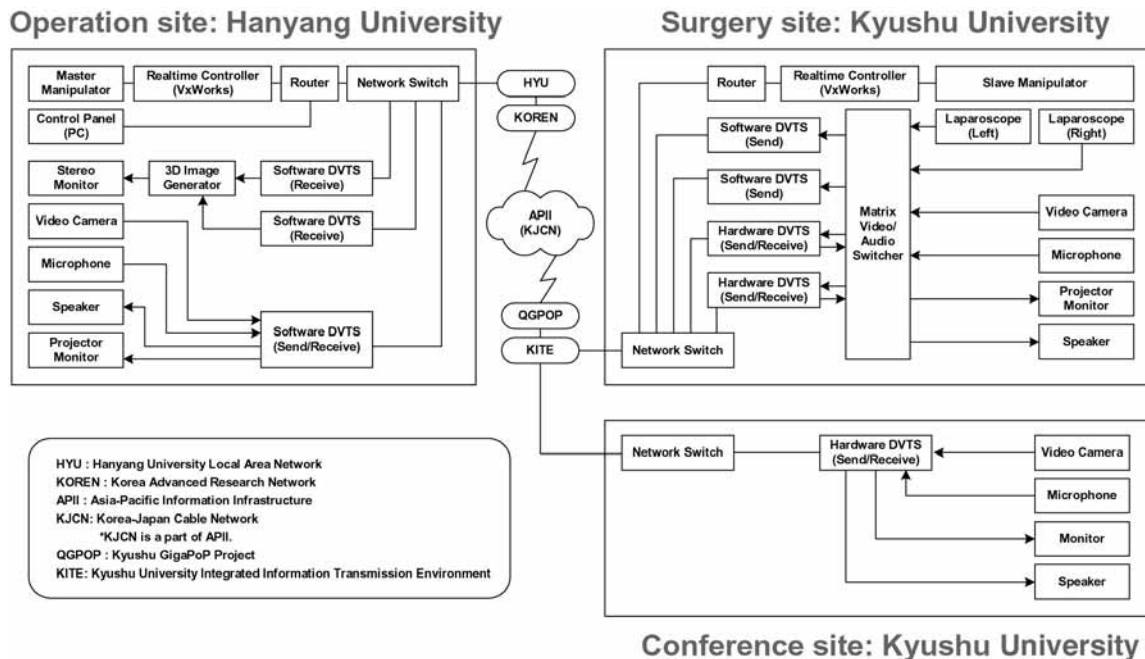


Figure 13 Information network for the telesurgery experiment between Korea and Japan.

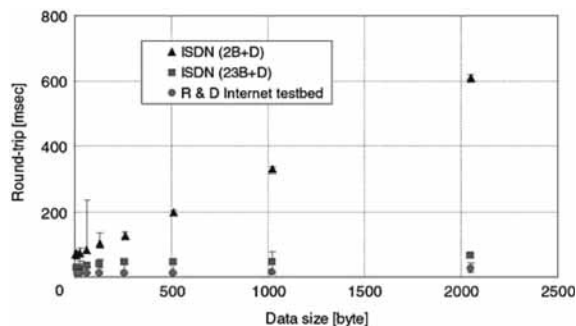


Figure 14 Measurement result of time delay.

a. 手術の遂行

三次元内視鏡映像を見ながら、マスタ・マニピュレータを操作することによって、胆嚢摘出術を遂行可能であった。マニピュレータの操作のみならず、電気メスの遠隔操作も可能であった。手術に要した時間は、約1時間であり、通常の胆嚢摘出術に要する時間と変わらない。

b. 伝送時間遅れ

pingコマンドによる往復の時間遅れを測定した結果 (Fig.14), 13m秒 (パケットサイズ144byte) であった。

DVTSによる映像伝送の遅れを、ストップウォッチ映像をループバックし、10フレームの平均を求める方法で測定した。回線には、10Mbpsのものを用了。往復の時間遅れは、871.0m秒であった。本実験で用いたネットワーク回線の時間遅れは、約30秒ごとに通常の3~5倍程度発生することが測定された。原因の解析は、今後の課題である。

おわりに

本稿では、コンピュータ統合手術ロボット技術の現状と今後の課題について述べた。また、遠隔手術システムの構築法を示した。

さらに、日本-韓国を結ぶKJCNを用い、低侵襲手術支援ロボットシステムによるブタを対象とした遠隔での腹腔鏡下胆嚢摘出手術に成功した。本実験で用いたようなインターネット回線による遠隔手術実現の可能性を示した。ロボット動作情報通信はプリミティブな通信様式であることから、回線品質に大きく依存し、映像通信はCODEC性能の向上により改善する可能性がある。

論文の一部はすでに『BPES 2006 第21回生体・生理工学シンポジウム論文集』に掲載されている。

文 献

- 1) 光石 衛：ロボットによる手術支援．第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集，1998，1071-1072.
- 2) <http://www.intuitivesurgical.com>
- 3) 生田幸士，島田隆之，石塚健次 他：力覚付き遠隔腹腔内システムの研究．第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集，1999，679-680.
- 4) 生田幸士，題府慎一，長谷川貴彦 他：腹腔内ハイパーフィンガーの研究(第4報)高機能臨床モデルと動物実験による検証．第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集，2001，621-622.
- 5) 河合俊和，菅 和俊，藤江正克 他：微細マニピュレータ用交換可能微細鉗子の動特性向上．第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集，2001，959-960.
- 6) Yoshizawa A, Okamoto J, Yamakawa H et al: Robot surgery based on the physical properties of the brain. ICRA '05, 2005, 916-923.
- 7) 山下紘正，金 大永，波多伸彦 他：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．日本コンピュータ外科学会誌，2004，5：421-427.
- 8) Simaan N, Taylor R, Flint P: High dexterity snake-like robotic slaves for minimally invasive telesurgery of the upper airway. MICCAI 2004, 2004, Lecture Notes in Computer Science **3217**: 17-24.
- 9) 小林英津子，金子雅子，正宗 賢 他：腹腔鏡下手術支援用内視鏡マニピュレータシステム．第36回日本ME学会大会論文集，1997，242.
- 10) 砂押貴光，神野 誠，宮川豊美 他：腹腔鏡下手術支援用一体型マスタスレーブマニピュレータの開発．第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集，2001，957-958.
- 11) Mitsuishi M, Tomisaki S, Yoshidome T et al: Tele-microsurgery system with intelligent user interface. Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000, 1607-1614.
- 12) Slatkin AB and Burdick J: The development of a robotid endoscope. IROS '95, 1995, **2**: 162-171.
- 13) Phee L, Accoto D, Menciassi A: Analysis and development of locomotion devices or the gastrointestinal tract. IEEE Trans Biomed Eng, 2002.
- 14) 生田幸士，佐藤正浩，中西 彰 他：ポータブル力覚付バーチャル内視鏡システムの研究(第10報)一定量評価システムとNリンク内視鏡モデルの開発による高難度挿入訓練の実現．第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集，2006,(2J16).

Medical Robotics

Mamoru Mitsuishi

Department of Engineering Synthesis, Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

Key words: computer-integrated surgical system, surgical robot, minimally invasive surgery, augmented force feedback, telesurgery

The manuscript describes the current state of the art of research and development in surgical robots. It also introduces a minimally invasive surgical robotic system for internal organs developed by the author's group. The system features a link-driven, multi-degree of freedom forceps with augmented force feedback to the operator. The control method employed reduces the applied force to the target by an average of 30% below that achieved with a conventional control method. Using the developed system, a cholecystectomy was successfully performed on a pig from a remote operation site.

(J Jpn Coll Angiol, 2006, **46**: 759-767)