

内視鏡などによる低侵襲高度手術支援システム

Advanced Support System for Endoscopic and Other Minimally Invasive Surgery

南部 恭二郎
NAMBU Kyojiro

神野 誠
JINNO Makoto

松日楽 信人
MATSUHIRA Nobuto

関谷 尊臣
SEKIYA Takaomi

低侵襲手術は、患者の術後QOL(Quality Of Life)の向上、医療費削減などから理想的な手術法であるが、外科医には従来の手術以上に高度な技能が要求される。ここでは、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託研究である“内視鏡等による低侵襲高度手術支援システムの研究開発”プロジェクト(2000～04年度)の概要と初年度の成果について述べる。このプロジェクトでは、安全かつ確実に低侵襲手術を実施できる手術支援システムの開発を目指し、“DVT(Digital Volume Tomography)撮影システム”、“高性能内視鏡”、“高操作性マニピュレータ”、“手術誘導システム”から構成され、多様な手術に対応可能な手術支援環境を開発する。

Minimally invasive surgery (MIS) is an ideal surgical operation method because it can improve the quality of life (QOL) of patients and reduce medical costs. However, it requires higher surgical skills for surgeons than in the case of conventional operations.

This paper introduces the “Advanced Support System for Endoscopic and Other Minimally Invasive Surgery” project of the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) for 2000-2004, and describes the results for fiscal year 2000. A goal of this project is to develop a surgical support system for MIS to ensure safety and reliability, consisting of a digital volume tomography (DVT) X-ray imaging system, a high-performance endoscope system, a dexterous manipulator, and a surgical navigation system, which can be applicable to various surgical operations.

1 まえがき

“内視鏡等による低侵襲高度手術支援システムの研究開発”プロジェクトの概要について述べる。これは、NEDO委託研究として2000～04年度の5か年計画で行っている新規の外科用機器から成る低侵襲手術支援システムの研究で、図1に示すように四つのサブシステムから構成されている。

- (1) DVT撮影システム(東芝 医用システム社)
- (2) 高性能内視鏡(旭光学工業(株))
- (3) 高操作性マニピュレータ(東芝 研究開発センター)
- (4) 手術誘導システム(東芝 医用システム社)

低侵襲手術(Minimally Invasive Surgery)とは、胸腹部の場合は最小限の傷口とすること、脳などの場合は正常な組織を確実に保護することによって、患者の身体的負担と入院期間の短縮、術後QOLの向上などを図る手術法全般を指し、その医学的・医療経済的効用が広く認められて急速に進歩している。

しかし、これは、従来はやさしかった手術が難しくなる、ということをも意味している。安全かつ確実な手術を行うには、外科医が手術中に必要とする様々な支援、例えば手術操作機能や判断支援情報を適切に提供する機器など、いわば“外科医の新しい目と手”が必要である。単に新規技術を導入したり、逆に医師の要求に合わせて改良を加えていくのでは不足で、むしろ医学と工学が協調して進歩し、あくまでも臨床的有効性を目的として、外科手術の方法自体を変

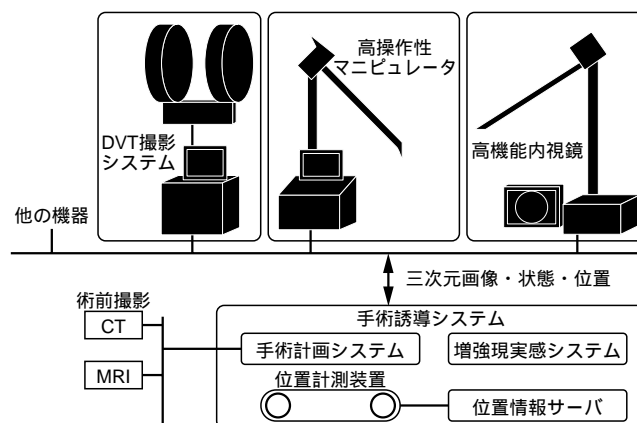


図1. 低侵襲高度手術支援システムの全体構成 DVT、内視鏡、マニピュレータ、誘導システムの四つのサブシステムから成る。
Schema of surgical support system for minimally invasive surgery

えていくのでなくてはならない。

東芝は、もっとも効果的な判断・治療手段を追求して新しい機器を開発する工学体系である“外科学”と、もっとも合理的な手術法を開発して必要な機器を要求し使いこなしていく医学体系である“先端工学外科学”を構想し、東京大学工学部、東京女子医科大学などと協力してその重要性を提唱し、多くの理解者を得てきた。特に、2001年4月、東京女子医科大学大学院に先端工学外科学専攻科の新設が認可されたのは画期的で、医師だけでなく、多彩なメーカーから上級技術者が参加している。

先端工学外科学においては、医師の経験、直感、技能の差をできるだけ排除し、一定の訓練を受けた医師ならばだれでも高い品質の手術ができるような術式体系の構築を追求する。特に、位置情報の利用と、目視では判断できない機能などの可視化は重要な柱である。

外科学においては、外科手術という用途に最適な機能・情報を提供する、トータルシステムの構築が意識されている。また、侵襲性や安全性の考え方も、家電や産業用機器などの、一般常識から漠然と推測されるものとはかなり違うということが明らかになってきている。

ここで概説するプロジェクトもまた、外科学、先端工学外科学の実践そのものである。

2 DVT 撮影システム

手術中に手術部位(術野)の三次元的撮影を行うことの重要性が認識されつつある。既に、術中のCT(Computed Tomography)、MRI(Magnetic Resonance Imaging)が試みられているが、手術を長時間中断しなくてはならず、また、コスト的に導入が難しい。DVTは、手術中いつでも簡便に撮影でき、しかも安価で導入しやすい術中X線三次元撮影装置として、本島記念病院脳神経外科などと共同で構想し開発を行っている。このまったく新しいモダリティは、東芝が現在製品化を進めている固体X線検出器(FPD: Flat Panel Detector)を用いることによって初めて可能になった。

DVTは図2に示すように、二つのユニットで患者を挟むオープン型構造をしている。患者の上部の空間は広く空いているので、手術器具をセットしたままでも、あるいは手術しながらでも撮影を行え、また可動部がないので安全性が高い。これらは、術中撮影装置として必須の条件である。

この装置は、CTとは異なる原理を用いて三次元画像を得るので、理論・技術的にまだ未知の部分も多い。そこで、

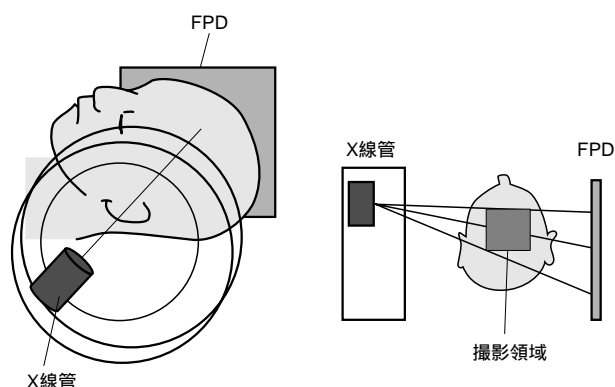


図2 . DVT の概念 患者の上方が空いているオープン型であり、術中撮影が容易・安全に行える。
Conceptual view of DVT

DVT機能試作機を製作して原理を確認した。図3に示すように、CTなどに比べて解像度が高く、細い血管、器具などの位置・形状を正確に示す三次元像が得られるので、手術計画の立案や方向感覚の誘導にもっとも適している。

術中撮影用だけでなく、整形外科診断用、乳がん検診用、歯科用、耳鼻科用など撮影の目的や部位に特化した専用機の開発も検討している。

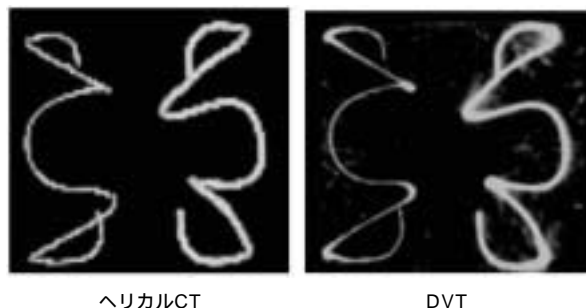


図3 . 画像解像度の比較 DVTは高解像度で正確な形状が得られる。
Image comparison between helical CT and DVT prototype

3 高機能内視鏡

このサブシステムでは、新しい腹腔鏡下手術用硬性鏡である“多機能内視鏡”と、超高倍率で近接拡大観察が可能な硬性鏡である“高性能顕微内視鏡”の2種類の内視鏡を開発する。

3.1 多機能内視鏡

低侵襲手術において、医師の眼となる内視鏡で問題となっているのは“方向感覚の喪失”である。70度程度の視野角で観察される術野領域は狭く、患部周辺の状態や術具の進入・退避状況などを同時に観察することは困難であり、手術対象領域外で生ずる合併症などにすばやく対処できない。

視野角を大きくすれば周辺まで観察できるが、患部の倍率が小さくなる。また、内視鏡の方向を変えて周辺を観察したり、倍率を変えるために内視鏡を前後させたりする場合、助手が内視鏡を動かさざるを得ず、意思疎通は容易でない。この操作を代替する音声認識ロボットもあるが⁽¹⁾、装置が大きくなるなど、様々な問題が残っている。以上は腹腔鏡下手術の場合であるが、脳外科や耳鼻科では、そもそも内視鏡を動かせる空間がほとんどない。

多機能内視鏡は、広角視野(全景)と、その視野内の任意の部分を選んで拡大した可変倍率の拡大視野(手術部位)とを同時に提供する新しい内視鏡である。広角視野で監視している周辺部で問題が生ずれば、内視鏡自体を動かすことなく、拡大視野を移動させてその場所を詳細に観察することができる。

拡大視野を自由に移動させる光学的機構には前例がなく、新規に“像反転プリズム移動方式”を開発した。特殊なプリズムを上下左右に±2 mm程度平行移動するだけで広角視野内を移動でき、プリズム自体も小型にできる方式である。図4は、この方式の動作原理を確認するために製作した多機能内視鏡の機能試作モデルである。視野角140度の広角視野内をズーム比7倍の拡大視野が滑らかに移動し、模擬手術実験においてその有効性を実証した。今後は、照明光学系の検討、立体視光学系の組込み、使用する部位(腹腔(ふくこう)、脳、鼻腔など)に応じたサイズや機能を持った複数の試作機の製作を進めていく。

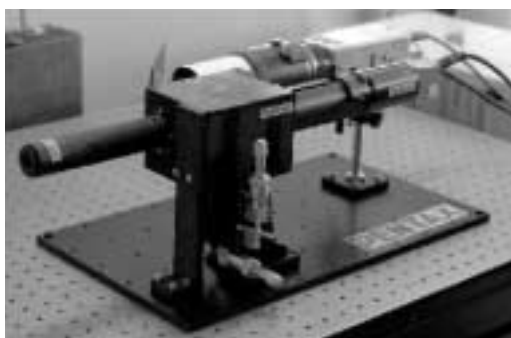


図4．多機能内視鏡の機能試作モデル 視野角140度の広角視野内を、ズーム比7倍の拡大視野が滑らかに移動できる。
Prototype model of multifunctional endoscope

3.2 高性能顕微内視鏡

現在の拡大内視鏡は、消化管用軟性鏡の場合、14インチモニタ画面上で100倍程度である⁽²⁾。粘膜の状態を観察するには適当であるが、毛細血管の状態や繊毛の動きなど顕微鏡的な観察を行うことはできない。

高性能顕微内視鏡では、in vivo(生体内)での顕微鏡的観察を目指し、20インチモニタ上で拡大率300倍という超高倍率を目標として設計を進めている。また、患部を鑑別するための蛍光観察や、組織内部の血管走行状態を見る赤外観察など、組織機能計測のプロープとして活用できる機構を盛り込む予定である。更に、機能計測の結果をCG(Computer Graphics)化して多機能内視鏡の画像上にマッピング表示するなど、他の機器と連携させていく計画である。

4 高操作性マニピュレータ

患者の腹部に開けた小さな穴から内視鏡と鉗子(かんし)を挿入して行う腹腔鏡下手術は、術者(医師)に高度な技能を要求する。その難しさは、主に鉗子の自由度が不足していることに由来する。そこで、ロボット技術を適用して鉗子を高機能化した一体型マスタスレーブマニピュレータ(以下、

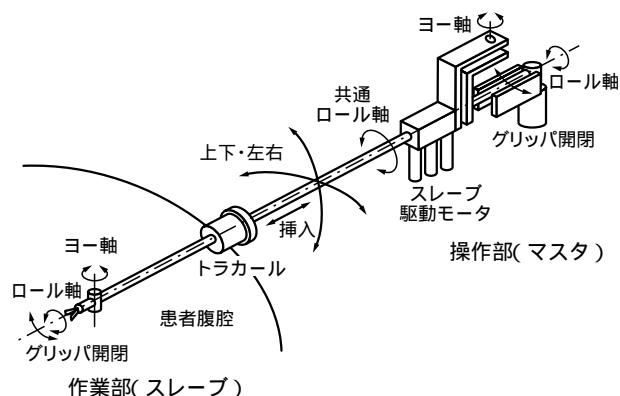


図5．一体型MSM 術者は、操作部(マスタ)を把持して作業部(スレーブ)の位置姿勢を自由に誘導することができる。
Master-slave combined manipulator for laparoscopic surgery

一体型MSMと表記、図5)を提案し、慶応義塾大学と共同開発している⁽³⁾。一体型MSMは、マスタスレーブ型ロボット鉗子の操作部と作業部(鉗子先端部)を一体化することによって、従来の鉗子の利点である“術者が行ったほうが簡単で確実な大きくすばやい操作”と、マニピュレータの利点である“微細な作業や難しい角度からの操作”の両方を有機的に組み合わせられるようにした。

遠隔操作型手術ロボットと比較すると、システムの簡便さ、コンパクトさ、及びコストの点で有利である。更に、従来の手術器具との組合せが自由、患者の近くで操作することから出血など緊急時に速やかに対応できる、という特長もある。

一体型MSMでは、従来の鉗子では難しい手技であった縫合作業が容易に行える。図6に示すように、彎曲(わんきょく)針で縫合作業を行う場合、グリッパは正確な円弧軌道を描くことが要求される。そこで、任意の姿勢において最先端軸だけを回転させることで彎曲針を円弧軌道に容易に誘導できるよう、ロール軸(回転)を最先端軸に配置している。

一体型MSM機能モデルによる縫合作業実験の様子を図7に示す。彎曲針を用い、スポンジ製の臓器の模型に対して実施した。従来の鉗子では軸回りにしか自由度がないため、限られた方向からしか縫合できなかったが、一体型MSMではヨー軸(曲げ)を利用して最大±90度の方向から縫合が行える。縫合から1回結紮(けっさつ)まで(1針縫って結ぶま

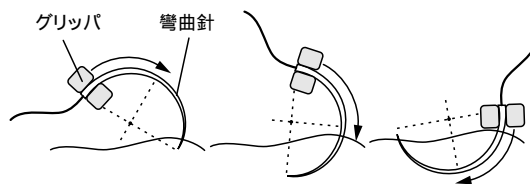


図6．彎曲針による縫合作業 彎曲針には円弧軌道が要求される。
Suturing task by circular needle

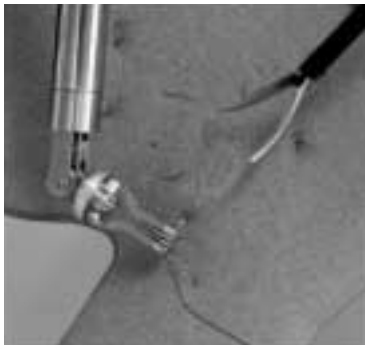


図7. 一体型MSM機能モデル(左側)による縫合作業実験 先端の自由度により従来の鉗子では不可能な方向からの縫合ができる。
Experimental suturing task by developed manipulator (left)

で)に要する時間は約1分で、これは従来鉗子とおおむね同程度である。今後は、軽量化、操作性向上、滅菌洗浄性の検討などを行う。

5 手術誘導システム

手術誘導システムは、手術に必要な情報を収集・整理し、これらを集約して術者に提供するための統合情報システムである。

DVTや内視鏡、術中MRIなどで得られる術中画像を取り込んで即座に手術計画図を作成し、手術用双眼ビデオ顕微鏡で得られる術野の立体映像上に、手術計画図をCGとして重ね合わせて表示する“増強現実(Augmented Reality)”機能を持つ。術者は術野から目を離さずにCGを参照でき、しかもその意味が直感的に了解できる。

更に、マニピュレータや撮影機器を含むあらゆる手術器具の位置を計測して、患者固有の統一座標系で管理しており、この機能を使って、例えば内視鏡像とDVT像を位置的に対応付け、両者を組み合わせて手術計画の立案を行える。

このシステムは、1995から99年度までのNEDO委託研究と

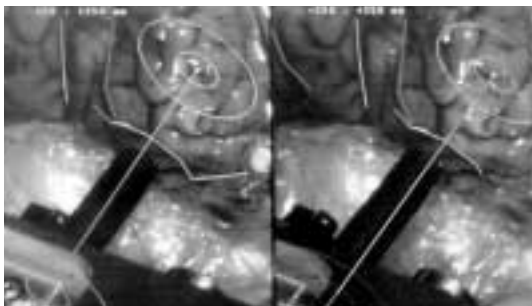


図8. HivisCASにおけるAugmented Reality 実写立体映像上にCGで手術計画図が表示される。
Augmented reality in HivisCAS

して、東京大学工学部、東京女子医科大学医学部(財)NHKエンジニアリングサービスなどと共同で開発を続けてきた手術支援用総合情報システムHivisCAS(High definition visual Computer Aided Surgery system⁽⁴⁾、図8)をベースにしており、そのコンセプトの妥当性は、既に臨床適用によって実証できている。今後も様々な機器を連携させる手術情報プラットフォームとして拡張していくとともに、その一部の機能だけを手術ナビゲータなどの製品にまとめることも検討している。

6 あとがき

低侵襲高度手術支援システムについて、その概要と2000年度の成果について述べた。2001年度はその成果に基づき、各サブシステムについて1次試作機の開発を行う。

謝辞

東京女子医科大学 高倉公明学長を委員長とするプロジェクト開発委員会の先生方のご指導に感謝の意を表します。

文献

- (1) 例えば、東京女子医大医用工学研究施設編“NEWTONムック 21世紀を切り開く先端医療”1999, p.158-159.
- (2) 特集：新世代の拡大内視鏡・消化器内視鏡. 13, 3, 2001, p.458-487.
- (3) 松日楽信人, ほか.“腹腔鏡下手術支援用マニピュレータの提案”. 日本ロボット学会第18回学術講演会. 2000, p.839-840.
- (4) 例えば、伊関 洋, ほか.“医療情報の可視化と先端工学外科学”. 電子情報通信学会技術研究報告 PRMU99-17, MI99-12: 1999, p.41-46.



南部 恭二郎 NAMBU Kyojiro

医用システム社 医用機器・システム開発センター 戦略技術開発部主査。医用機器の開発に従事。日本脳神経外科学会、日本放射線技術学会会員。

Medical Systems Research & Development Center



神野 誠 JINNO Makoto, D. Eng.

研究開発センター 機械・システムラボラトリー主任研究員、工博。ロボット技術の研究・開発に従事。日本機械学会、日本ロボット学会会員。

Mechanical Systems Lab.



松日楽 信人 MATSUHIRA Nobuto, D.Eng.

研究開発センター 機械・システムラボラトリー研究主幹、工博。ロボット技術の研究・開発に従事。日本機械学会、日本ロボット学会、計測自動制御学会会員。

Mechanical Systems Lab.



関谷 尊臣 SEKIYA Takaomi, D.Eng.

旭光学工業(株) 研究開発センター 光学研究部主任、工博。デジタル画像処理、医用機器光学設計に従事。日本光学会、日本写真学会会員。

Asahi Optical Co., Ltd.