

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (C)  
研究期間：2007～2009  
課題番号：19500425  
研究課題名（和文） 腹腔内内視鏡手術のための訓練用マスタスレーブ型シミュレータシステムの構築  
研究課題名（英文） Construction of master-slave training simulator for endoscopic surgery

研究代表者  
小山 浩幸 (KOYAMA HIROYUKI)  
芝浦工業大学・システム理工学部・教授  
研究者番号：40052881

## 研究成果の概要（和文）：

腹腔内内視鏡手術はモニターで腹腔内を見ながらの手術を行うため情報が少ないことと、長い鉗子を使うため事故も発生しており、術者は多くの経験が必要とされる。

本研究は、腹腔内内視鏡手術のための訓練用マスタスレーブ型シミュレータの開発として、経験豊富な医師が操作するマスタシミュレータの鉗子の動作と鉗子が把持する力や開いたときの臓器に接触する力の加え方を複数の生徒側のスレーブシミュレータにフィードバックさせて、同時にそのまま伝えるシステムの構築を目的とする。このマスタスレーブ型シミュレータは、鉗子の微細な動きの再現と、生徒が鉗子に触れることであたかも自分が鉗子を操作しているような感覚を与えるマスタスレーブ型の訓練シミュレータである。さらに、訓練の初期段階として、マスタスレーブと同型のシミュレータを製作し、そのシミュレータによる縫合、切除等の手術訓練を行える訓練システムを構築した。

## 研究成果の概要（英文）：

Recently, there have been several cases of mistakes during endoscopic surgery. In general, 89.[%] of the medical errors in endoscopic surgery is due to skill shortage of the doctor. There are training machines for endoscopic surgeries that are being used today. However, with the current training methods it is difficult to acquire the appropriate skills for a correct usage of the forceps. Because they can't train how to use the forceps in the right way, the doctors have to depend on their senses. Therefore, a robot for learning how to use the forceps is needed. This research describes new training simulators for endoscopic surgery which are using the master-Slave system. The system consists of a master robot which an experienced doctor controls and a Slave robot which the trainees use. The experienced doctor controls the master robot and the Slave robots work in the same motion as the Master robot. The trainees just put their hands on the Slave robot and thus, they can experience a sensation of controlling the forceps by themselves.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用システム

キーワード：医用支援，内視鏡手術，手術訓練，シミュレータ，マスタスレーブ，力覚鉗子

1. 研究開始当初の背景

(1) 腹腔内内視鏡手術などに代表される低侵襲手術は、切開を最小限にとどめて痛みや早期離床が期待できる術式である。しかし、モニタで腹腔内を見ながらの手術を行うため情報が少ないことと、長い鉗子を使うため事故も発生しており、術者は多くの経験が必要とされる。多くの経験を積むために動物実験やシミュレータでの訓練があるが、動物実験は倫理的な問題から多くを経験できない。

訓練用のシミュレータも開発されているが、擬似鉗子を操作して鉗子の動作と臓器をCG画像で再現しており、実際の長鉗子と比べて鉗子形状や長さには違和感がある。熟練医師の鉗子の動きをビデオで再生して、その画像を見ながら鉗子を動作させて縫合や切除の訓練を行うシミュレータでは、実際の長鉗子を使用するものの熟練医師の鉗子の微細な動き生徒側にはわからない。また、豚の腸を使った切除や縫合の訓練では熟練医師の鉗子に加える力も重要であるが、どの程度の力を加えればよいかは画像情報だけでは判断できない。

(2) 国内の研究動向は、内視鏡手術用ロボットに関する研究や、ロボットと内視鏡トロ

ッカーの関係について検討した研究のみで手術ロボットを対象とした研究である。また、内視鏡手術を目的として鉗子の研究があるが、鉗子自体に自由度を持たせた研究があるが、訓練のための鉗子ではなく手術を目的としたものである。

(3) 国外の研究動向は、内視鏡手術用ロボットのための縫合訓練の成果を統計処理した研究があるのみで、内視鏡手術用鉗子の研究や訓練に関する研究はほとんどないことから本研究を行う意義がある。

2. 研究の目的

本研究は、腹腔内内視鏡手術のための訓練用マスタスレーブ型シミュレータの開発として、経験豊富な医師が操作するマスタシミュレータの鉗子の動作と鉗子が把持する力や開いたときの臓器に接触する力の加え方を複数の生徒側のスレーブシミュレータにフィードバックさせて、同時にそのまま伝えるシステムの構築を目的とする。このマスタスレーブ型シミュレータは、鉗子の微細な動きの再現と、生徒が鉗子に触れることであたかも自分が鉗子を操作しているような感覚を与えるマスタスレーブ型の訓練シミュレ

ータである。さらに、訓練の初期段階として、マスタスレーブと同型のシミュレータを製作し、そのシミュレータの動作に力覚を持たせた縫合、切除等の手術訓練を行える総合的な訓練システムを構築することを目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) マスタスレーブシミュレータの開発

要求条件は九州大学医学部附属病院の内視鏡トレーニングセンターが使用しているトレーニングシミュレータによる縫合、ブタの臓器による剥離の訓練から調査した。要求条件は縫合・臓器の剥離の訓練を行うシミュレータであること、違和感のない操作性の実現、及び精度は1 [mm]程度と設定した。鉗子先端の可動範囲は縦 140[mm]、横 180[mm]、高さ 80[mm]とする。この可動範囲は九州大学トレーニングセンターにあるトレーニング機器を参考にして開発する。

(2) マスタスレーブ間の動作制御系の構築  
マスタスレーブ機構の自由度構成より、6軸同時制御システムを構築する。

#### (3) 力覚付き鉗子の開発

シミュレータに搭載する鉗子はディスポーザブルタイプである。この鉗子に開閉力、押し付け力を測定できる機構を取り付ける。

#### (4) CG 画像による手術訓練システム

マスタスレーブシミュレータによる縫合、切除等の訓練だけでなく、同型のマスタシミュレータの鉗子の動作により操作感覚をマスタシミュレータにフィードバックさせる訓練システムを構築する。

### 4. 研究成果

#### (1) 内視鏡訓練シミュレータシステム構成

内視鏡訓練シミュレータのシステム構成を図1に示す。システムは、[1]マスタスレーブシミュレータ、[2]制御PC、[3]システムコントローラ[制御装置]から構成される。マスタシミュレータを手本となる講師が操作

することにより、生徒側に置かれたスレーブシミュレータが、マスタシミュレータの動作を再現し、縫合や臓器の剥離、腫瘍の切除など訓練を立体的に見てスレーブ側鉗子の動作を体験できる。

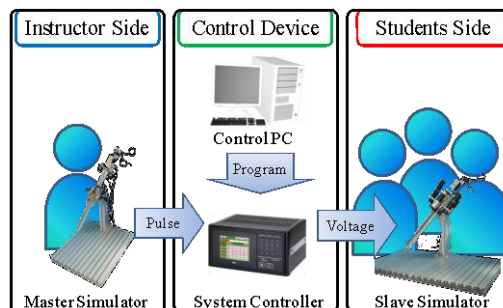


図1 訓練用シミュレータシステム

#### (2) 鉗子動作

鉗子の動きは図2に示すように、前後、左右、抜き差し、回転開閉である。これらの動きの組み合わせで切除や縫合、結紮、剥離を行う。

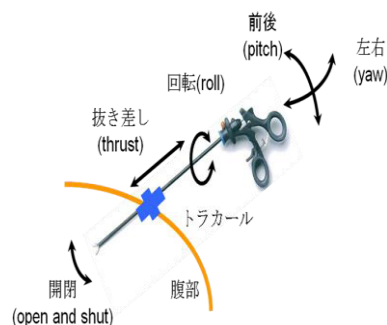


図2 鉗子動作

#### (3) マスタシミュレータ

##### ① 機構選定

機構選定はボックス型モデル、多軸型モデル、トラックボール型モデルを考案した。この3機種から鉗子の可動範囲、トレーニング対象物の移動が容易であるか、機構の大きさ、スレーブと同じ機構が可能であるかなどの項目を検討し、多軸型を機構として採用した。

##### ② Motion 番号

多軸型の各動作に対して Motion 番号を振り分けた。鉗子ロッドの回転 (Motion1)、上

下運動(Mtion2), 左右(Mtion3), 前後への移動(Mtion4), 鉗子先端の開閉動作(Mtion5), 鉗子ハンドル部の回転(Motion6)が必要となる。シミュレータの自由度は図3のように6自由度構成となる。また, 内視鏡手術では, 腹壁にあける穴を軸中心としているため各Motionがその中心を通る必要がある。

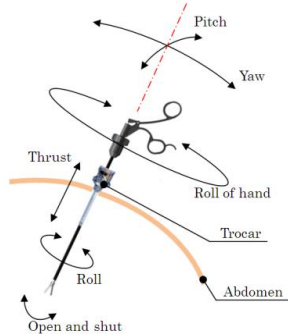


図3 多軸型シミュレータのMotion番号

マスタシミュレータの各動作はエンコーダの信号をスレーブ側に伝達する。鉗子には鉗子先端および鉗子ロッド部を回転させる回転ダイヤルがついている。ハンドル部の回転中心から位置情報を検出する方法として, 鉗子ロッド部の延長線上に軸を設けハンドルに軸を追加する方法とハンドルにカバーなどを取り付け, 回転運動を伝達できる機構がある。図5に示すマスタシミュレータを設計製作した。



図4 マスタシミュレータ

(4) スレーブシミュレータの開発

①スレーブシミュレータ機構及びモータ選定

同型は実際に行われている手術と同じ自由度であるため問題点はない。このことから, スレーブシミュレータは同形型とした。

モータ選定を行うにあたり, 鉗子ハンドル部には人の手の重さも作用してくるため, その重量を求めた。手, 下腕質量が全て鉗子に掛かるとは考えにくい要因の1つが, 手, 下腕質量は, 肘と鉗子に重量を支えられていると点である。図5のように両端支持として考えると, それらの質量が鉗子に影響を与える重量は, 理論値に対して半分であると言える。体重別に人の手, 下腕を計算した結果, 人の手を導くと点に重点を置いているため, 今回使用する値は, 体重が60[kg]の人の手の重さである。また, スレーブロボットの概算重量を考慮した要求条件となっている。また, Motion3, 4は慣性モーメントが大きくなるため, モータに働く慣性モーメントと角加速度からトルクを求めた結果からモータ選定を行った。

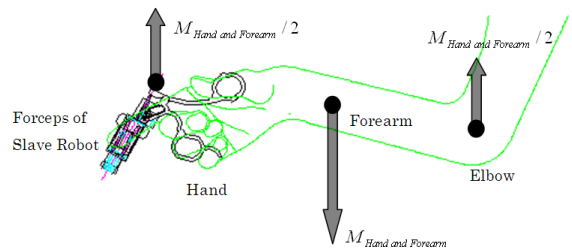


図5 鉗子と腕のモーメント

各モータを評価するために, モータの立ち上がり時間を計算し, それらの結果をMatlabから算出した。

$$\ddot{\varphi}_1 = -a_1 \dot{\varphi}_1 - a_2 \varphi_1 + bU(t) \quad (\text{式1})$$

式1をブロック線図で表記すると図6のようになる。

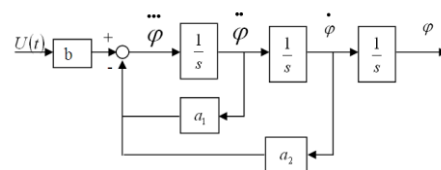


図6 モータ制御ブロック線図

③ スレーブシミュレータ

製作したスレーブシミュレータを図6に示す。



図6 スレーブシミュレータ

(5) マスタスレーブシミュレータの制御系 System Controller で、マスタスレーブの位置情報を読み取り、その情報を各 Motor Driver に送信する。スレーブロボットに搭載されているモータの位置情報は Motor Driver にフィードバックされ、Motor Driver 上で PID 制御を行う。各軸の動作によって適正な周波数、ゲインに調整したことにより、動作を同時制御することができた。時間遅れは Motion1 で 29.5 [ms], Motion2 で 141.6 [ms], Motion3 で 118 [ms], Motion4 で 59 [ms], Motion6 で 29.5 [ms] となった。距離誤差として追従最大誤差は Motion1 で 0.05 [mm], Motion2 で 0.03 [mm], Motion3 で 0.79 [mm], Motion4 で 0.75 [mm], Motion6 で 0.41 [mm] となり、各 Motion の追従誤差は 1[mm] という要求条件を満たした。

#### (6) 力計測型鉗子

鉗子の動作は先端のはさみの開閉力と臓器を押し付ける力の計測が必要である。図7に示すような開閉力と押し付け力を同時に計測する鉗子を開発した。

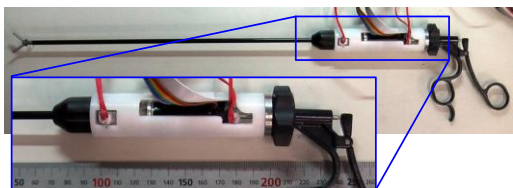


図7 力計測型鉗子

力覚提示制御方法はシステムの構成上、位

置制御を行うこととなるので、制御方式としてアドミッタンス制御方式とした。

(7) スレーブシミュレータの制御システム マスタとスレーブに各システムコントローラを設置するために、回路を設計製作した。各コントローラ間の互換性を持たせるため開発環境は MATLABSimulink を用いコントローラとモータドライバの設定は GUI を用いた。モータは各軸ともサーボモータを使用しており PID 制御を行う。

(8) マスタスレーブシミュレータ総合動作 総合動作の検証はマスタスレーブシミュレータの6軸同時制御を検証するため、マスタシミュレータを動作させたときのスレーブシミュレータの追従動作を行った。図9は動作している状況を示す。遅れ時間は人が遅れを感じないとされる 10~20[ms]以下とした。また、追従誤差は縫合動作より 1[mm]程度とした。遅れ時間は、各軸とも要求条件を満たすことができなかった。これはモータドライバの PID 係数が考えられる。追従誤差は要求条件を満たした。共同研究者の医師による総合動作評価は、動作にはまったく問題ないとのコメントが得られた。



図16 マスタスレーブシミュレータの総合動作

#### (9) まとめ

開発した内視鏡外科手術訓練用シミュレータシステムにより、各 Motion の同時制御に成功した。しかし、動作中に Motion4 で振動が確認されたため、他のモータを使用し Motion4 の問題点の確認を行ったが、他のモ

ータでも同じような挙動を示した。このことから、モータに問題があるわけではなく、モータに接続されている軸、または制御しているプログラムに問題がある可能性がある。

内視鏡外科手術は低浸襲手術であることから、入院期間を短くすることができ、患者の体力面での負担軽減だけでなく、患者が負担する金額を少なくすむことになる。特に、高齢者は医療制度の改革により自己負担が増えており、体力面からもますます低浸襲手術が行われるようになると考えられる。本訓練用シミュレータは、医療事故を防ぐだけではなく、医師の内視鏡技術力を高めることとともに、患者側においても負担軽減だけではなく患者のQOL向上につながると考える。5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

**S.Yoneyama,H.Koyama,T.Komeda,S.Yamamoto:**  
Development of endoscopic surgery training simulator, European Medical and Biologiccal Enginnering Congress pp.1691-1694, 2008.11

[学会発表] (計 4 件)

- ① 西村省平, 小山浩幸, 米田隆志, 他 3 名  
内視鏡外科手術トレーニングシミュレータ, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, 1P1-G12, 2007. 秋田
- ② 井出勝, 米田隆志, 小山浩幸, 他 5 名:  
カテーテル誘導用トレーニングシステムの開発, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2008AC2K1-07. 2008. 9. 神戸
- ③ **S.Yoneyama,H.Koyama,T.Komeda ;**  
Development of endoscopic surgery for training simulator, 3th South East Asian University Consortium Symposium pp.407-408. 2009.2.26. Johor Bahru
- ④ 佐野翔麻, 小山浩幸, 米田隆志, 山本紳

一郎, 内視鏡外科手術トレーニングシミュレータの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, pp. 2A1-M03, 2009. 5. 26. 福岡

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○ 出願状況 (計 0 件)

○ 名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日国内外の別

: ○取得状況 (計 0 件)

名称: 発者:

権利者:

種類: 番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小山 浩幸 (KOYAMA HIROYUKI)

芝浦工業大学・システム理工学部・生命科学科・教授

研究者番号: 4 0 0 5 2 8 8 1

### (2) 研究分担者米田 隆志 (KOMEDA TAKASHI)

芝浦工業大学・システム理工学部・生命科学科・教授

研究者番号: 9 0 0 1 1 0 3 0

足立吉隆 (ADACHI YOSHITAKA)

芝浦工業大学・システム理工学部・機械制御システム学科・教授

研究者番号: 7 0 4 0 7 2 2 9

### (3) 連携研究者