

機関番号：32675
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20500183
 研究課題名（和文）MRI 環境対応外科手術ロボットに対する医療ミス回避制御システムの構築
 研究課題名（英文）Construction of a regulating system for avoiding malpractice for robotic surgical support systems
 研究代表者
 石井 千春（ISHII CHIHARU）
 法政大学・理工学部・教授
 研究者番号：80296079

研究成果の概要（和文）：本研究では、全方位の屈曲動作に対して力覚の伝達が可能な低侵襲外科手術用多自由度ロボット鉗子システムを開発し、遠隔操作において発生する通信時間遅れに対して安定性を保証するバイラテラル制御系を構成した。また、内視鏡下手術における手術手技に対して、鉗子の操作量から手術手技を識別し、さらに自己組織化マップを用いて、識別された手術手技を操作者の表面筋電位により、通常操作と特異操作に分類する方法を提案した。

研究成果の概要（英文）：In this research, a multi-DOF robotic forceps manipulator has been developed, and a bilateral control scheme which assures stability of the master-slave system in the presence of time varying communication delay between the master device and the slave device was proposed for omnidirectional bending motion of the developed robotic forceps. In addition, a method of identifying a surgical operation automatically and distinguishing the singularity of the identified surgical operation was also proposed. Based on the measurements of behavior of the forceps, the kind of surgical operation was identified. As for distinction of the singularity in surgical operation, the features were extracted from operator's surface electromyogram signals, and the identified surgical operation was classified into normal or singular using the self-organizing map.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：制御工学、ロボット工学

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：感覚行動システム、外科手術用多自由度ロボット鉗子、バイラテラル制御

1. 研究開始当初の背景

(1) 内視鏡下手術において、マスタ・スレイブ型で操作を行う低侵襲外科手術用手術支援ロボットシステムの実用化が期待されており、今後は特に患部の状況を MR 画像で確認しながら手術を行える MRI 対応手術支援ロボットシステムの開発が求められている。

(2) 一方、手術支援ロボット導入のリスクに関して、ヒューマン・エラーやテクノロジー・エラーによりロボットの機能が回復不可能になる可能性を秘めている。今後、日本においてロボットによる手術支援が本格的に普及するためには、臨床的な立場から複数の

対策による多面的な安全性、いわゆる多重安全性を手術支援環境全体に確保することが不可欠である。

2. 研究の目的

(1) 本研究の1つ目の目的は、これまでに考案した多自由度ロボット鉗子に力覚センサを搭載し、力覚の伝達が可能な外科手術ロボット鉗子システムを開発し、これをMRI対応化することである。さらに、遠隔操作において発生する通信時間遅れに対して安定性を保証し、操作性と安全性を向上させるバイラテラル制御系を構成する。

(2) 2つ目の目的は、低侵襲外科手術において医療ミス回避する制御システムを構築することである。治療動作における鉗子の位置情報と力覚情報、および術者の筋電位信号を測定し、周波数に依存した特徴ベクトルを形成して特異動作を抽出することにより、経験の浅い医師の手術中の不要な動作により生じる手術ロボットの挙動を抑制し、医療ミスを防ぐ制御システムを構築する。

3. 研究の方法

(1) 1つ目の目的に対しては、力覚の伝達が可能な多自由度ロボット鉗子を製作し、遠隔操作型外科手術ロボットにおけるマスタ側とスレイブ側の時変の通信時間遅れに対して制御系の安定性を保証し、かつ術者のマスタ側操作に対してスレイブ側の鉗子の動きを縮小できる、モーションスケール機能を有するバイラテラル制御系を導出する。また、これを製作した多自由度ロボット鉗子の全方位屈曲動作に適用してシミュレーション、および制御実験を行い、その有効性を検証する。

(2) 2つ目の目的に対しては、鉗子の操作を把持・剥離・圧排・牽引の4動作に限定し、鉗子に貼り付けたひずみゲージの測定値からこれらの動作の識別を行い、さらに筋電位による測定データから周波数に依存した特徴ベクトルを構成し、特異な動作を抽出することにより、経験の浅い医師が鉗子操作したときに生じる特異な動作を識別する。また、提案した手法を内視鏡下手術シミュレーターに適用し、経験の浅い医師の手術中の不要な鉗子操作に対して警告を発する「医療ミス回避制御システム」を構築する。

4. 研究成果

(1) 力覚の伝達が可能な遠隔操作型外科手術用多自由度ロボット鉗子システムに関して

① 本研究で製作した多自由度ロボット鉗子の全体図を図1に、屈曲部の拡大図を図2に

示す。

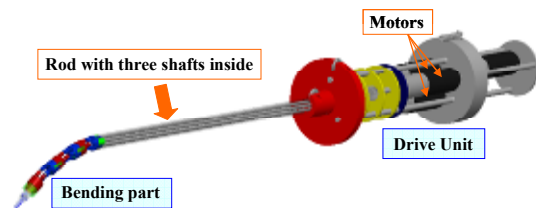


図1 多自由度ロボット鉗子全体図

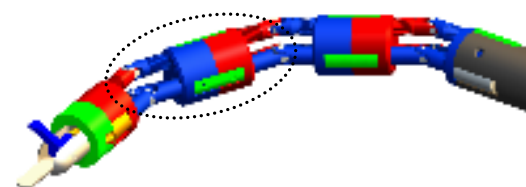


図2 多自由度ロボット鉗子屈曲部

図2の点線で囲まれた部分が1つのブロック（関節）である。この機構は、駆動ユニバーサルジョイント、ねじ穴付スプラインから成る2本の屈曲リンクと、支点ユニバーサルジョイント、継ぎ手から成る把持リンクを備えている。駆動ユニバーサルジョイントは片側が左ネジ、もう一方が右ネジになっており、それぞれ左ネジプレート、右ネジプレートに螺合し、屈曲リンクを一方向へ回転させると連結された本ブロック同士が近接し、他方向へ回転させたときには互いに離間する。これによりブロックに傾きが生じて全体が屈曲する。屈曲リンクは2本存在し、それらの回転量を制御することにより任意の方向に全方位屈曲可能である。また、把持リンクは先端のグripperの回転に使用される。駆動用モータからの駆動力はシャフトを介して各リンクに伝達される。

さらに、製作した多自由度ロボット鉗子を遠隔操作するためのジョイスティック型マスタマニピュレータも製作した。遠隔操作システムを図3に示す。スレイブの屈曲力はロッドに貼り付けたひずみゲージで検出し、操作者に伝える反力は、ジョイスティックの軸に取り付けたモータにより発生させる。

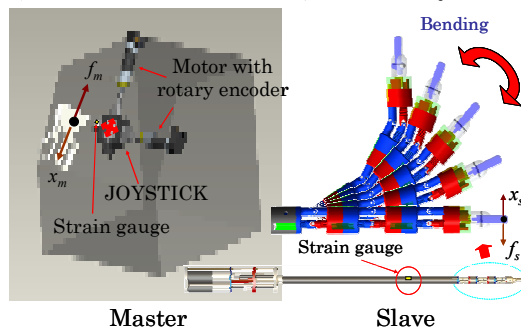


図3 遠隔操作システム

② 手術支援ロボットにおいて、術者に臓器の反力などの力覚を伝える事ができれば、より安全に手術を行う事ができると考えられる。また、通信手段としてインターネットなどが用いられる場合、マスタとスレイブ間の通信時間遅れは時間毎に変化し、制御系が不安定に陥ってしまう可能性がある。そこで本研究では、開発した全方位屈曲型多自由度ロボット鉗子に対して、安全性のために術者の操作量に対して鉗子の動きを縮小・拡大できるモーションスケールリングを有し、手術支援ロボットの遠隔操作における時変の通信遅延に対して制御系の安定性を保証するバイラテラル制御系を設計した。

はじめに、1自由度のマスタスレイブロボットに対して時変の通信遅延が存在しても操作の安定性を保証するバイラテラル制御則を提案した。次に、このバイラテラル制御則を独立に2つ構成し、座標変換を用いることにより、ロボット鉗子の屈曲動作および力覚の検出を2自由度に拡張し、全方位屈曲動作に対するバイラテラル制御系を提案した。時変の通信遅延が存在する遠隔操作型ロボット鉗子システムに対して、ロボット鉗子を屈曲させて100gのペットボトルを持ち上げ、その後、ロボット鉗子の先端が反時計回りに円軌道を1/4周描くように回転させてペットボトルを床に着地させる制御実験を行った。実験の外観を図4に、全方位屈曲動作の実験結果を図5に示す。

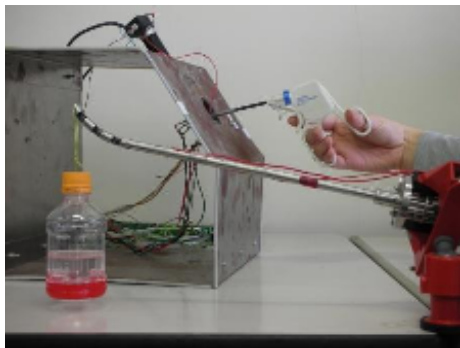


図4 実験の外観

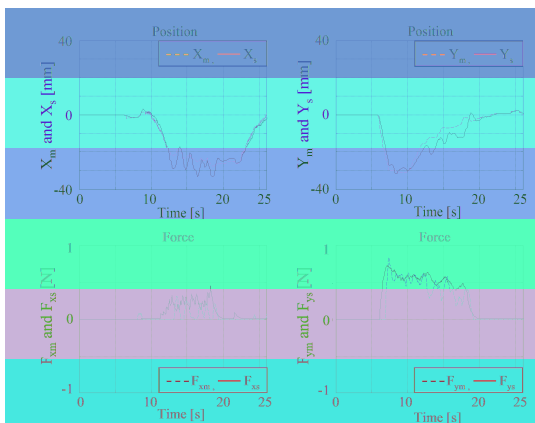


図5 バイラテラル制御実験結果

実験結果より、若干の追従誤差は見られるが、x, y両方向からの反力を力覚としてマスタマニピュレータに再現することが出来た。これより、提案したバイラテラル制御系の有効性を確認することができた。

なお、本研究で得られた成果は、国内の学会：計測自動制御学会 SI 2009、日本機械学会 ROBOMECH 2010、および国際学会：IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL 2010)などにおいて公表した。特に、ICAL 2010では、発表を行った大学院生が Best Student Paper Award を受賞し、本研究の独創性および学術性は国際的にも評価されている。

予算の都合により、MRI 対応化した多自由度ロボット鉗子を製作することはできなかったが、MR compatibilityを満たすように、ロボット鉗子の構造部材には非磁性材料であるエンジニアリングプラスチックを使用し、アクチュエータおよびセンサも非磁性エンコーダ付非磁性タイプ超音波モータを用い、力覚のセンシングも光ファイバー圧力センサを用いることにより、提案した力覚の伝達が可能な外科手術ロボット鉗子をMRI 対応化することが可能である。

(2) 医療ミス回避制御システムの構築に関して

① 手術支援ロボットなどの作業機器において、術者の操作の適正を判断し、不適切な操作を抑制するシステムの開発が要求される。本研究では、そのようなシステムを構築するため、術者の鉗子の操作量から手術手技における操作の識別を行い、さらに操作時の術者の筋の状態に着目し、表面筋電位を用いて特定の操作に対して通常動作と異なる特異動作を抽出し、操作の適正を判断する手法を提案した。さらに、提案した手法を内視鏡下手術用シミュレーターに適用し、特異動作が検出された際に術者に警告する医療ミス回避制御システムを構築した。実験で使用した内視鏡下手術用シミュレーターを図6に示す。

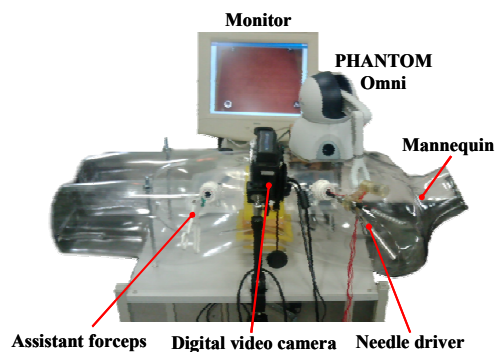


図6 内視鏡下手術用シミュレーター

鉗子は持針器と補助鉗子を用い、持針器には加えられた力をセンシングするために4箇所にはひずみゲージを貼り付けた。また、持針器には力覚デバイス PHANTOM Omni が接続されており、PHANTOM Omni を用いて持針器の位置センシングを行った。さらに、表面筋電位は術者の利き腕の活動を観測したい筋上に貼り付けた3箇所の表面電極を用いて測定した。対象とする操作は手術針を組織へ刺入する手術手技（刺入手技）とし、主に持針器に注目して操作の分類、特異動作の判別を行った。

② 手術手技の識別においては、本研究では、特に繊細な手技が必要とされる縫合作業に着目し、手術手技を縫合作業に主に使用される以下の6種類に分類した。(a)把持：持針器のグリップを閉じた把持状態、(b)接触：持針器が他の物に接触している状態、(c)牽引：縫合針（または他の対象物）を持ちながら物に触れている状態、(d)刺入：縫合針を刺入する状態、(e)拔出：縫合針を刺入から戻す状態、(f)中立：何も操作していない状態、である。手術手技の識別には、ひずみゲージおよび PHANTOM Omni による鉗子操作の測定値に対する平均値を特徴量として用い、各特徴量に対してそれぞれに設けた閾値により、刺入手技操作を識別した。実験により、52回の刺入手技を実施した中で、正しく識別できた確率は84.6%であった。

③ 特異動作の判別においては、自然に操作を行う(i)通常操作(Normal)と特殊な状態で操作を行う(ii)特異操作(Singular)を考え、特異操作には、(a)姿勢(Posture)：肘を広げた状態で行う操作、(b)力み(Straining)：力んだ状態で行う操作、(c)突発(Sudden)：突発的な荒い操作、を想定した。術者の前腕部3箇所の表面筋電位から各電極の絶対平均値、重心値、スペクトル比を特徴量として算出し、これらを要素に持つ特異性特徴ベクトルを定義し、自己組織化マップ(SOM)を用いて特定の手術手技を通常操作・特異操作に判別し、特異操作の場合には各状態へ分類した。通常操作と特異操作それぞれにおいて縫合作業を繰り返し行い、刺入手技を対象として特異操作の判別を試みた。学習したSOM上に、実験での手技により得たデータ(六角形形状)を分布させた図を図7に示す。また、各状態で正しい領域に分布した確率を表1に示す。

表1より、刺入手技操作に対して通常操作と特異操作とともに約8割の確率で判別する事ができた。しかしながら、特異操作において各状態に分類する識別率は約3割と低い値になっており、今後の改善を要する。

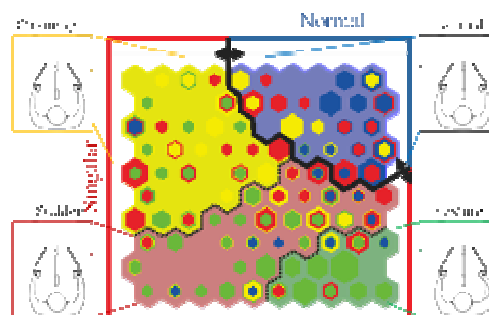


図7 学習後のSOMと実験による分布

表1 分布の正答率

	Recognition rate[%]	
Normal	76.5	(39/51)
Singular	81.8	(193/236)
Posture	30.8	(24/78)
Straining	33.3	(23/69)
Sudden	25.8	(23/89)

④ 現在、図8に示すように、手術手技中に特異操作を検知した場合に、モニタ画面の下部に赤のラインバーで視覚的に、また警告音を鳴らして聴覚的にオンラインで術者に特異操作を警告する医療ミス回避制御システムを構築できている。



図8 医療ミス回避制御システム

本研究で得られた研究成果の一部に対して、発表を行った大学院生が電気学会産業計測制御技術委員会優秀論文発表賞、および電気学会優秀論文発表賞を受賞しており、本研究の独創性および新規性が評価されている。今後の展望として、まず被験者を増やして実験を行い、より客観的な実験データに基づいて本提案システムの有効性を検証することが挙げられる。また、オンライン実験についても、専門家からの評価に基づく検証を行う必要がある。さらに、これらの検証により得られた成果を国際学会で発表し、内視鏡下手術に対する安全性対策の新しい手法として本システムを世界に発信していく。

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3件)

- ① 石井千春、小林宏輔、西谷要介、中荃隆、DOUBLE-SCREW-DRIVE機構を用いた低侵襲手術用多自由度ロボット鉗子、日本機械学会論文集C編、査読有、Vol. 76, No. 771, 201, pp. 3042-3050
- ② C. Ishii, K. Kobayashi, Y. Kamei and Y. Nishitani, Robotic Forceps Manipulator with a Novel Bending Mechanism, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 査読有, Vol. 15, No. 5, 2010, pp. 671-684.

[学会発表] (計19件)

- ① Y. Nakaya, C. Ishii, T. Nakakuki and M. Hikita, A Practical Approach for Recognition of Hand Gesture and Distinction of Its Singularity, 2010 IEEE International Conference on Automation and Logistics, August 18, 2010, Hong Kong, China.
- ② H. Mikami, C. Ishii, Y. Nishitani, M. Hikita and H. Hashimoto, Bilateral Control for Omnidirectional Bending Motion of the DSD Forceps Teleoperation System with Time Varying Delay, 2010 IEEE International Conference on Automation and Logistics, August 16, 2010, Hong Kong, China.
- ③ 中屋友佑、石井千春、中荃隆、疋田光孝、表面筋電位を用いた手指の動作識別とその特異性の判別手法の提案、日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会、2010年6月16日、旭川。
- ④ C. Ishii, Y. Nishitani and H. Hashimoto, Lyapunov Function Based Bilateral Control for Teleoperation System with Time Varying Delay, IEEE International Conference on Industrial Technology 2010, March 15, 2010, Viña del Mar, Chile.

[図書] (計2件)

- ① C. Ishii, Robust Control, Theory and Applications, Chapter 25, "Robust Bilateral Control for Teleoperation System with Communication Time Delay - Application to DSD Robotic Forceps for Minimally Invasive Surgery -", INTECH, 2011, pp. 543-560.
- ② C. Ishii, K. Kobayashi, Y. Kamei, Y. Nishitani and H. Hashimoto, Theory and Applications of Complex Systems and Robust Control, Part I, "Passivity Based Bilateral Control for

Double-Screw-Drive Forceps
Teleoperation System with Constant
Time Delay", Tsinghua University Press,
2010, pp. 191-205.

[その他]

ホームページ等

<http://www.k.hosei.ac.jp/mwrlab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井 千春 (ISHII CHI HARU)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：80296079