

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 30 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360114

研究課題名（和文）

遠隔治療対応型手術ロボットシステムの通信遅れを考慮した制御と安全性評価

研究課題名（英文）

Control of surgical robot system for tele-operation considering the communication delay and its safety assessment

研究代表者 川嶋 健嗣（KAWASHIMA KENJI）

東京工業大学・精密工学研究所・准教授

研究者番号：40300553

研究成果の概要（和文）：低侵襲手術を支援する遠隔治療対応型ロボットシステムにおいて、空気圧ゴム人工筋を駆動に用いた先端で2つの関節を有する鉗子マニピュレータを設計、製作し、鉗子先端での外力の推定精度を1.0Nから0.5Nに高めた。また、遠隔治療への適用のために、通信遅れを考慮した位置と力をフィードバックする制御方法を提案、システムに実装し、日米間の遠隔制御実験他によって安全性と有効性を評価した。

研究成果の概要（英文）：Forceps manipulator driven by pneumatic artificial rubber muscles (PARM) having 2 degrees of freedom at the tip was developed for minimally invasive tele-surgery. Estimation of force at the tip from the model of PARM has improved the accuracy to 0.5N from 1.0N (former type) by light weight. Master-slave system with the forceps was developed and a proposed bilateral control was implemented to the system. The safety and effectiveness of the system was confirmed with experiments including Japan-US tele-operation.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2010年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2011年度	3,000,000	900,000	3,900,000
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：

## 1. 研究開始当初の背景

高齢化社会を迎え、遠隔操作可能なロボットシステムの必要性が増していた。特に、遠隔診断、治療、手術などは、ロボット技術と情報通信技術の発展に伴って、国内外で非常に盛んとなり、海外と日本の間での遠隔手術ロボットでの動物実験に成功した事例等が報告された。

遠隔操作は位置情報に頼ったものがほとんどであり、より安全性を高めかつ臨場感のある遠隔操作において、力覚の有効な提示、通信遅れ、情報の欠落に対する問題、位置と

力をフィードバックする遠隔制御方法の探究等が研究課題であった。

## 2. 研究の目的

申請者らが開発を進めている鉗子マニピュレータは、空気圧駆動を用いることで、鉗子先端での外力を根元駆動部の空気圧から推定する機能を有している。この強みを活かし、主に以下の3項目を研究の目的とした。

(1) 新たな鉗子マニピュレータの開発と外力推定精度の向上

(2) マスタ・スレーブシステムを構築し、遠隔治療への適用のために、通信遅れを考慮した位置と力をフィードバックする制御方法の提案

(3) 安全性を *in vitro* 実験, *in vivo* 実験および日米間他の遠隔制御実験によって評価.

### 3. 研究の方法

(1) 鉗子先端部に空気圧アクチュエータを組み込むことで、自由度間の干渉や動力伝達の問題を解消した多自由度鉗子を提案した。また、外力推定精度の向上のために、鉗子駆動部の軽量化、また空気圧シリンダで問題となる低速駆動時のスティックスリップ現象を低減するために、駆動部に空気圧ゴム人工筋を用いた鉗子マニピュレータを設計した。

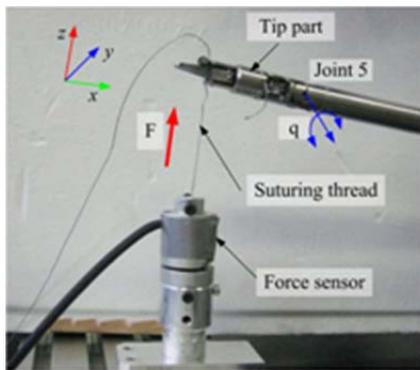


図1 外力推定精度の評価実験

鉗子の性能評価実験としては、図1に示すように、試作した鉗子マニピュレータで力センサに取り付けた縫合糸を引っ張る実験を行った。空気圧ゴム人工筋部分の圧力と変位から推定した外力と、力センサの値を比較し、推定精度を評価した。

(2) 図2の模式図に示すようにマスタとスレーブがばねとダンパで結合されているマスタ・スレーブシステムを構築した。両者間のデータの転送にはインターネット回線UDP/IPを用いた。

まず、マスタ側粘性(図2中の $B_m$ )の適切なパラメータ設定を定量的に評価すべく、東京医科歯科大学の協力を得て、対象物を移動させる実験を実施した。また、軌道、作業時間等を定量的に評価した。

次に、通信遅れを考慮した位置と力をフィードバックするバイラテラル制御において、手術ロボットに適した方法として、力の同期に重点を置いた方法を提案した。提案手法をシステムに実装してその有効性を実験的に評価した。

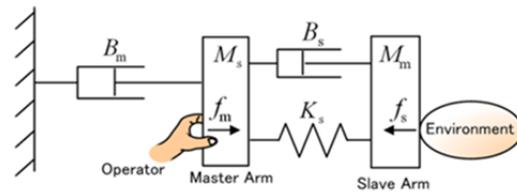


図2 システムの模式図



図3 *in vivo* 実験



図4 日米間の遠隔操作実験風景

(3) 開発したシステムがスレーブ側での接触力が提示、計測可能である利点を活かし、東京医科歯科大学の協力を得て *in vitro* (対象物移動実験, 模擬縫合実験等) と *in vivo* (図3に示す動物実験) を実施し、作業における、鉗子先端の軌道、接触力等を計測し、安全性を評価した。

また、開発したロボットシステムの遠隔操作の有効性を確認するために、国内間および米国シアトルのワシントン大学の協力を得て、日米間で遠隔実験を実施し、システムの有効性の確認、安全性を評価した。図4に日本のマスタデバイスで、米国のスレーブ鉗子进行操作する実験中の写真を示す。

### 4. 研究成果

(1) スレーブ側鉗子先端の把持駆動のために、空気圧アクチュエータを先端部に組み込んだ鉗子マニピュレータ (IBIS IV と命名) を試作した。鉗子の外径が 10mm のため空気圧シリンダの受圧面積だけでは十分な把持

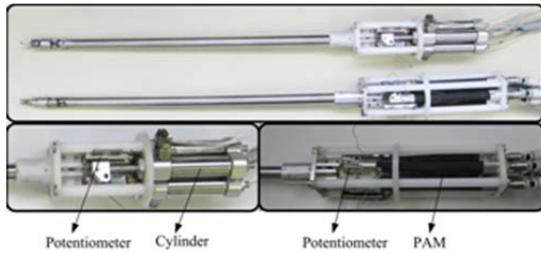


図5 試作した空気圧ゴム人工筋  
駆動鉗子マニピュレータ

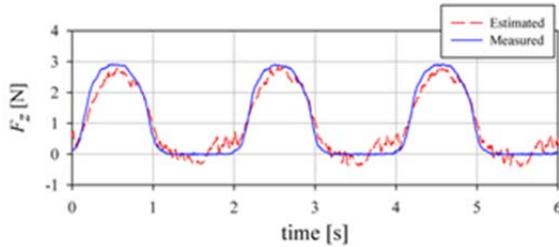


図6 外力推定実験結果

力を得られないことから、スライダクランク機構によって特異点近傍を活用することで、20mNm以上の把持トルクを発生可能とし、針を掴むために十分なことを確認した。空気圧配管で動力を伝達することから、他の関節の干渉を受けない利点を有している。

また、スレーブ側鉗子の駆動部分の軽量化のため、空気圧シリンダ部の材質を変更したものと、駆動部分を内径3mmの空気圧ゴム人工筋に変更した2つの鉗子を新たに設計製作した(図5)。

図1の実験装置を用いて図5に示した空気圧ゴム人工筋を用いた鉗子マニピュレータで縫合糸を引っ張る実験を行った結果の一例を図6示す。図中の実線が力センサの値、点線が推定した値を表す。

実験結果より、鉗子先端での力覚の推定可能な最小力を従来のシリンダを用いた場合の1.0Nから0.5Nに向上させることに成功した。実験で試作した鉗子の有効性を確認した。

(2) 図7に示すマスタ・スレーブシステムを構築し、マスタ側粘性 $B_p$ の適切なパラメータ設定を定量的に評価すべく実験を行った。実験は上述した対象物移動実験によって評価した。

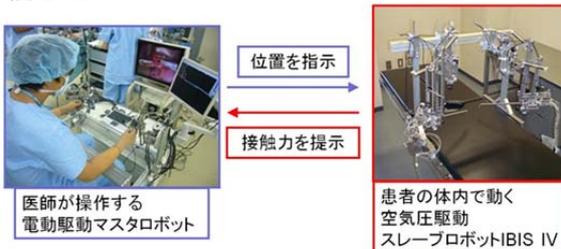


図7 構築したマスタ・スレーブシステム

実験結果より、医師と医師以外では有意な差は見られないことが分かった。本装置に慣れているか否かによって有意な差が見られた。また、粘性を適切( $1/B_p=160 \text{ mm}/(\text{Ns})$ )に設定することで、操作性が向上することが明らかとなった。また、軌道や先端の速度を測定し、適度な操作速度において良い結果が得られることが分かった。

次に、遠隔手術における通信遅れを補償した制御システムの提案として、従来の位置と力情報を混ぜて相手側に送信する方法を改良した方法を提案し、試作したロボットシステムに実装した。実際のネットワーク回線を用いて、約30Km離れた区間での遠隔制御実験を実施した。さらに、通信遅れの影響を考察するため、疑似的な遅れを挿入した実験を行い、模擬縫合作業を複数の被験者で実施した。その結果、提案する制御方法が位置と力の安定性に優れ、特に力の振動が抑制されることが示された。また、往復の通信遅れが200ms以上では、提案する方法が従来の方法より優れていることを明らかにした。しかし、力の位相にずれが生じる問題が残った。

そこで、マスタ側に仮想的なスレーブを配置し、スレーブ側の情報リアルタイムに推定する方法を提案した。仮想スレーブから算出される力を用いて安定性の指標となる受動性を計算し、システムが不安定に向かう場合にはマスタ側の粘性を高めることで、力の同期性が高くかつ通信遅れが生じても安定性を確保できる制御である。1軸の実験によってその有効性を明らかにし、過度な力を抑える効果を確認し、安全性に寄与できることが分かった。

(3) システムの安全性評価として、豚を用いたin vivo実験を合計5回実施し、本システムを用いて縫合作業が安全に行えることを確認した。医師へのヒアリング、実験データを取得し、力覚提示有無の差を定量的に評価し、力覚有では縫合時に過度な力が加わらないことを確認した。実験結果の一例を図8に示す。

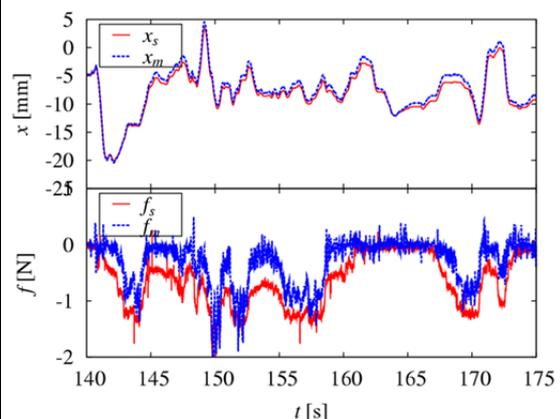


図8 in vivo 実験における力測定結果

また、日米間でインターネット回線を用いた遠隔制御実験を実施した。通信には UDP/IP を用い、異なるロボット間で操作が実施できるように、座標および信号の送信方法を統一した。将来の規格化につながる成果を得た。実験結果より、横浜 シアトル間の通信遅れは 0.14 秒程度であることが分かった。対象物の移動実験によって、通信方法および手術ロボットシステムの有効性を示した。

#### 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)

Hongbing Li, Kotaro Tadano, Kenji Kawashima, Achieving Haptic Perception in Forceps Manipulator using Pneumatic Artificial Muscle, IEEE/ASME

Transactions on Mechatronics (TMECH) 査読有(Accepted)

Kotaro Tadano, Kenji Kawashima, Kojima Kazuyuki, Tanaka Naofumi, Development of a pneumatic surgical manipulator IBIS IV, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Vol.22 No.2, 2010, pp.179-187

Kotaro Tadano, Kenji Kawashima, Development of a Master Slave System with Force-Sensing Abilities Using Pneumatic Actuators for Laparoscopic Surgery, Advanced Robotics, 査読有, Vol.24, No.12, 2010, pp.1763-1783

[学会発表](計8件)

Kenji Kawashima, Kotaro Tadano, Master Slave Robot System for Laparoscopic Surgery with Haptic Perception using Pneumatic Actuators, Proceedings of the 8th JFPS International Symposium on Fluid Power, 査読有, 2011年11月26日, pp.9-14, Key Note Speech

川嶋健嗣, 只野耕太郎, 術者が力覚を感じる内視鏡手術ロボット, 日本泌尿器科学会雑誌, 2011年4月24日, Vol.102, No.2, pp.215,

Hongbing Li, Shameek Ganguly, Sumire Nakano, Kotaro Tadano, Kenji Kawashima, Development of a light-weight Forceps Manipulator using Pneumatic Artificial Rubber Muscle for Sensor-free Haptic Feedback, 1st International Conference on Applied Bionics and Biomechanics, 査読有, 2010年10月16日, CDROM,

川嶋健嗣, 只野耕太郎, 中野すみれ, 小嶋一幸, 田中直文, 空気圧ゴム人工筋をスレーブ駆動に用いた腹腔鏡手術用マスタースレーブシステム. 日本医工学治療学会第26回学術大会, 2010年4月3日, p.81

Kenji Kawashima, Kotaro Tadano, Mustapha Fofana, Bilateral Teleoperation with Time Delay using Modified Wave Variable Based Controller, ASME IMECE09, 査読有, 2009年11月18日, CDROM

Kenji Kawashima, Robotics Systems using Pneumatic Actuators for Teleoperation, ASME IMECE09, 査読有, 2009年11月18日, CDROM, Plenary Talk. H. Hawkeye King, Kotaro Tadano, Regina Donlin, Diana Friedman, Mitchel J. H. Lum, Victoria Asch, Cong Wang, Kenji Kawashima, Blake Hannaford, Preliminary Protocol for Interoperable Telesurgery, Proceedings Intl. Conf. on Advanced Robotics, (ICAR09), 査読有, 2009年6月23日, CDROM,

Kenji Kawashima, Kotaro Tadano, Cong Wang, Ganesh Sankaranarayanan, Blake Hannaford, Bilateral Teleoperation with Time Delay using Modified Wave Variable Based Controller, Proc. of IEEE ICRA, 査読有, 2009年4月16日, pp.4326-4331

[産業財産権]

出願状況(計1件)

名称: 力算出システム

発明者: 川嶋健嗣, 只野耕太郎, 原口大輔

権利者: 東京工業大学

種類: 特許

番号: 特許願 2011 098178,

PCT/JP2012/60731

出願年月日: 平成 23 年 4 月 26 日(国内出願)

平成 24 年 4 月 20 日(国際出願)

国内外の別: 国内, 国外

[その他]

ホームページ等

<http://www.k-k.pi.titech.ac.jp/researches/robots/>

川嶋健嗣, 只野耕太郎, 佐藤慶明, 手術支援ロボ小型化, 日刊工業新聞, 平成 22 年 11 月 10 日 16 面

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

川嶋 健嗣 (KAWASHIMA KENJI)

東京工業大学・精密工学研究所・准教授

研究者番号: 40300553

(2)研究分担者

只野 耕太郎 (TADANO KOTARO)

東京工業大学・精密工学研究所・助教

研究者番号: 90523663