

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：26402

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630078

研究課題名(和文)力覚とウェアラブル操作部を有し拍動する心臓に対応可能な次世代内視鏡手術ロボット

研究課題名(英文)A new endoscopic surgical robot applicable for beating heart surgery with force sensing and wearable controller

研究代表者

井上 喜雄(Inoue, Yoshio)

高知工科大学・工学部・教授

研究者番号：50299369

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：da Vinciが対応できない力覚，血液中での視界，拍動への対応などの課題を解決し，価格を抑えた心臓手術用のロボット開発のための基礎技術として，研究代表者らが開発した2台のDCモータを接続したマスタースレーブを応用したシステムについて検討した．ロボットの設計のための計算プログラムを作成し，基礎実験で妥当性を検証したのち，肘，手首，把持の3自由度についてマスターモータを術者に装着し，力覚を持ち術者と相似形のスレーブロボットを操作する手術ロボット実験装置を試作し，その基本性能を確認した．血液中での画像を得るためのエコーガイドを用いる技術，拍動下での安全性確保のための制御技術についても検討した．

研究成果の概要(英文)：In order to solve the research issues concerning to the force sensing, vision of the heart surgery in the blood atmosphere and low cost which the well-known surgical robot da Vinci could not solve, we have carried out fundamental research on new surgical robot for the heart surgery by using the master-slave system composed of two DC motors which we have already developed. Numerical simulation program for designing the test equipment has been developed and the accuracy of the developed program has been confirmed. Next, we have built the experimental equipment of the 3-degrees-of-freedom surgical robot system in which master motors are attached on the operator's body and slave motors are attached on the robot with force sensing, and the performance of the robot has been examined. Furthermore, the echo guide to obtain the vision of the heart surgery in the blood atmosphere and the control algorithm for safety of the surgery of the pulsative heart have been discussed.

研究分野：機械力学制御

キーワード：機械力学・制御 手術ロボット マスタースレーブ 力覚 心臓

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初は、内視鏡手術が患者の負担が軽減されることから注目をあびており、図1のような比較的簡単な構造の鉗子を用いる方法が広く用いられていた。また、7自由度のロボットアームと光学式のカメラによる3D画像を用いて鉗子と比べて操作性が大幅に向上する手術ロボット da Vinci (米国製、図2) が世界中で高い評価を得ており、国内でも急速に普及しはじめていた。しかし、da Vinci も万能ではなく多くの問題を抱えていた。力覚がなく臓器の損傷などの重大事故の可能性があること、近年ニーズが増加している心臓を停止させず行う手術のように血液環境下や拍動する臓器への対応ができないことなど、da Vinci にも多くの問題があった。さらに、価格が数億円であり、大病院などの特定の機関以外への普及が容易でないと考えられた。



図1 鉗子



図2 da Vinci

2. 研究の目的

困難ではあるが、da Vinci の操作性とは異なった一歩先の操作性を目指し、da Vinci が対応できない力覚や血液循環環境下や拍動への対応ができないことなどの課題を解消し、da Vinci と比べ価格を大幅に抑えた次世代手術ロボットの基礎技術を、力覚を有するウェアラブルな操作部を用いたマスタースレーブの概念を導入して創出することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

スレーブが術者自身の上肢であるかの感覚で自然な形の手術が可能な装置を創出する。術者がウェアラブルなマスター部を装着し通常の手術動作をすれば、術者の上肢と同じ形をしたスレーブが術者と同じ動きをし、モニター画像に映る臓器と自身の上肢を模擬したスレーブを見ながら、術者が通常の手術をする時に受ける反力を自身の関節で感

じながら手術するという操作法を開発する。かなりの訓練が必要な da Vinci の操作法と比べて、本操作法は da Vinci とは異なるより自然な次世代手術ロボット操作法になると考えられる。

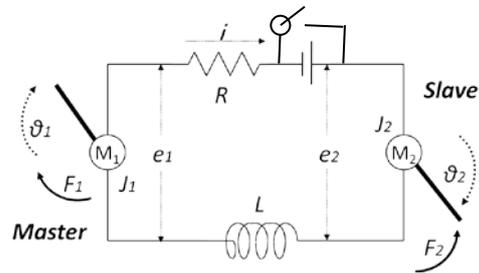


図3 エネルギー回生型マスタースレーブ

これを達成するために、研究代表者が開発した図3のような「2台のDCモータを配線で接続し外部から不足分のエネルギーを供給するシンプルな構造のマスタースレーブ」を核に新しい概念の操作法を開発する。図4のように術者の上肢と相似形のスレーブを作成し、術者の1つの関節にマスターモータ、スレーブの対応する関節にスレーブモータを装着し配線で結合して相対位置をフィードバックして制御すると、2つの関節は同じ動きをする。また、図3に示すように2つのモータでは電流が共通でありモータトルクは電流に比例するので、スレーブ関節の負荷は力センサなしでも直接術者の関節に比例する形で伝わる。しかもモータの定数の選び方により減速機なしで力覚の拡大・縮小が容易に行えるので、微小な反力でも術者は拡大して感じる事ができる。さらに制御ゲインの調整により等価なばね定数を変えることにより安全性を向上させることをねらう。独立したマスタースレーブを各関節に装着し、術者が普通の手術動作をすれば、スレーブ全体が同じ動きをすると同時に、術者の各関節はスレーブの負荷を手術している場合のように直接感じるようになる。以上のように非常にシンプルな装置により自然な操作が可能になる。

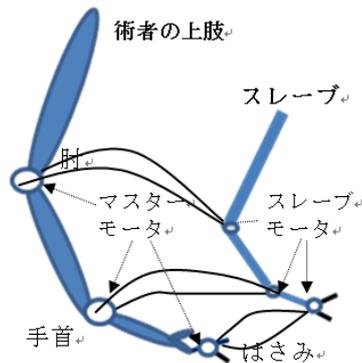


図4 術者の上肢とスレーブ

心臓の手術は、人工心肺を用い心臓を停止させての手術が一般的であったが、患者の負担低減のため心臓を停止させない手術が始まっている。しかし心臓内の手術は血液の存在により光学式では十分な画像が得られないので安全を確保することが必要となる。

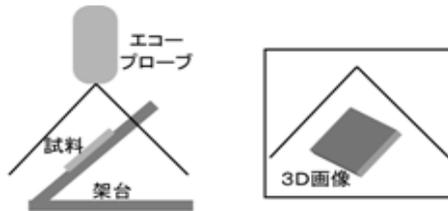


図 5 エコーガイドによる画像

このような問題を解決するために、図 5 のようなエコーガイド技術を核に開発を進める。まず、血液環境下でのエコーによる画像を確認するとともに、拍動の動きあっても、力覚と操作中での制御によるばね定数変更なども駆使して、血液が存在し拍動する臓器に対する手術でも十分安全性を担保できるような制御の基礎技術を確立する。

4. 研究成果

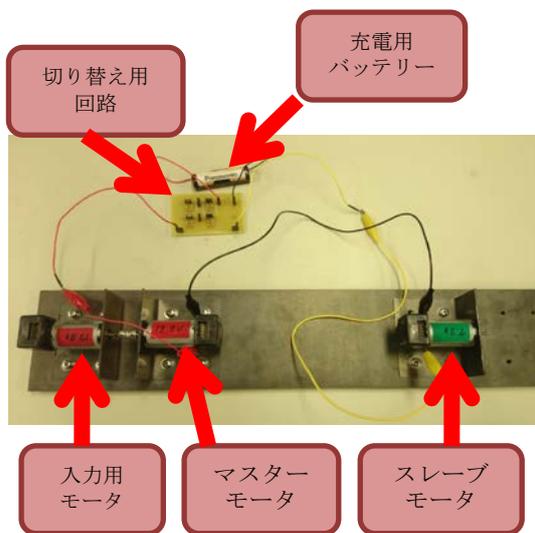
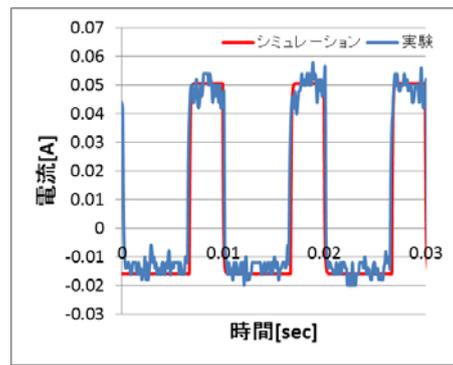
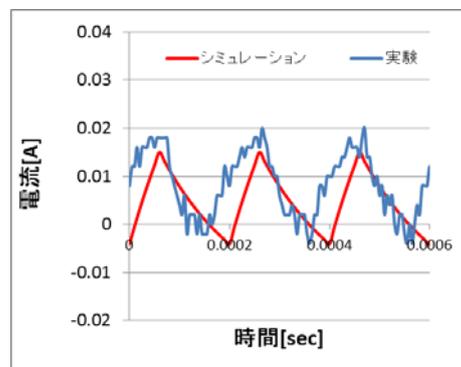


図 6 基礎実験装置

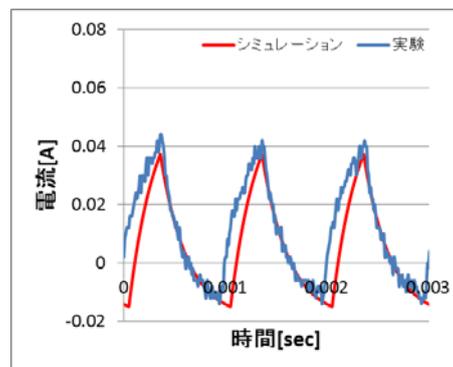
エネルギー回生型マスタースレーブを手術ロボットに適用するに際して、マスタースレーブの基本性能の検討のために、電気回路の昇圧チョップや詳細な要素を含んだシステムに関する数値シミュレーションプログラムを開発し、それを用いて基礎実験装置を設計して、そのプログラムによる計算結果と実験結果と比較検討した。比較結果の一例を図 7 に示すが、両者は比較的良好に一致しており計算プログラムが妥当であることを確認した。



(a)1000rpm,0.1kHz,1mH



(b)1000rpm,5kHz,2.5mH



(c) 1000rpm,1kHz,3.9mH

図 7 実験と計算の電流値の比較

次に、拍動する心臓に手術ロボットが十分追従できなかった場合に、ロボットの先端が臓器と強く接触しても大きい力が加わらないようにするため制御により弾性を持たせるとともに、上限として設定した値よりも力が大きくならないような制御法について検討した。図 8 にトルクの上限を設定した制御実験を行った場合の電流値を示している。

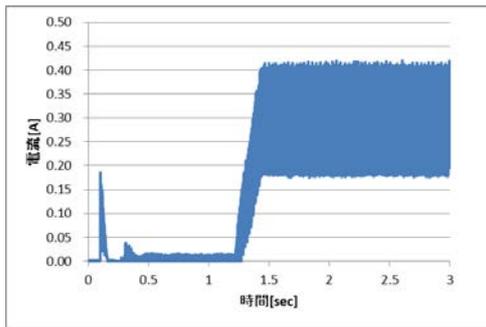


図8 トルク（電流）リミッタ実験結果

次に、3章の図4においてその概念を示した、肘、手首、把持について、それぞれ独立した自由度を有するマスタースレーブから構成される図9に示すような3自由度の手術ロボットの実験装置を試作した。

術者が、実際に手術を行っているような動作を行い各自由度にとりつけたマスターモータを動かせば、スレーブであるロボットがそれぞれの自由度において術者と同じ動きをするように制御を行った。装置の可動部の質量が大きくなってしまったため、動作が多少鈍くなったものの、3自由度については術者の動作をロボットが再現することを確認した。

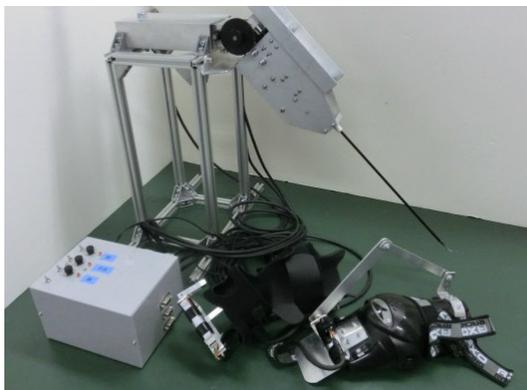


図9 3自由度手術ロボット実験装置

それぞれの自由度ごとに3章の図3に示したように術者に装着したマスターモータとロボットに内蔵したスレーブモータの電流は共通でありモータトルクは電流に比例するので、ロボットのスレーブモータに加わる負荷は、2つのモータの配線を通して伝達されるので、それにより術者は負荷を力センサなしでも感じる構造になっているため、ロボット先端部が何かに当たり、それによってロボットのスレーブモータにトルクが生ずれば、それに対応してマスターモータにもトルクが生ずるので術者はそれを力覚として捉えることができた。ただし、トルク不足を補うために挿入した減速機のメカロスが想定していたよりも大きかった

ため、メカロスよりも小さい微細な負荷変化を明確に感じるレベルまでには至らなかった。ここでは、そのような状況でも、安全性を確保するために、制御による弾性の調整や上限トルクの設定を行ったが、スレーブモータ一部減速機のメカロスには対応できないため、今後、スレーブモータ部のメカロスを減らすことが必要となると考えられる。

また、マスター側とスレーブ側のトルクの比をモータや減速機を取り換えずに電気的な手段で変更可能にするための方法として、シャント抵抗を用いる方法について検討した。その妥当性を調べるため図10、11のように可変の抵抗を付け加えた基礎実験装置を用いてトルクを計測する実験を行った。

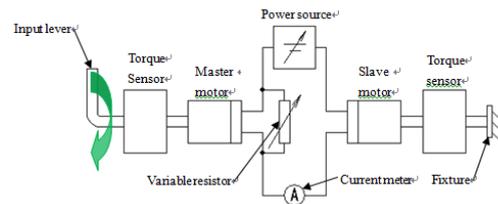


図10 トルク実験装置のブロック線図

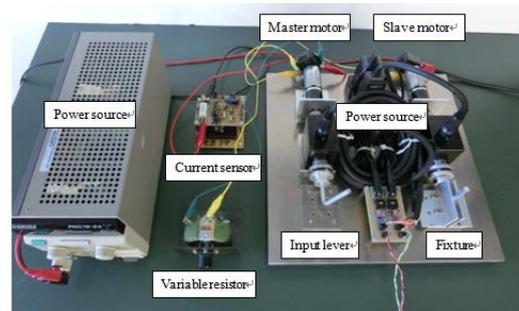


図11 トルク実験装置の外観

実験結果の一例を図12に示すが図よりシャント抵抗の変化によりトルクも変化していることが確認できた。

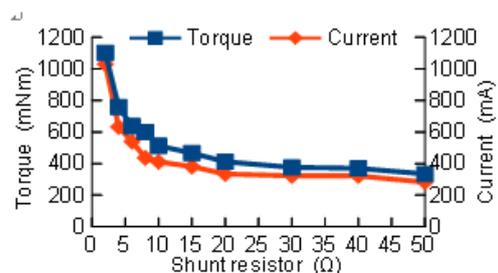


図12 抵抗変化によるトルクの変化

血液環境下での手術のために、血液があっても画像を確保するために光学式のカメラではなくエコーガイドの応用を検討し、エコ

ーガイドでもある程度の速度でデータを取り込めることが確認できた。また、エコーガイドではステンレス製の機器の認識が難しかったことに対して、和紙のような凹凸のある表面を用いれば改善できることを実験により確認した。

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)

[学会発表] (計4件)

(1)赤島成信, 井上喜雄, 芝田京子, 明神拓斗, 米田 圭佑, 秋山 慶太, 横田 正堯, DC モータを用いたマスタースレーブの力覚に関する実験的検討, 日本機械学会中国四国支部第53期総会・講演会, 2015年3月6日, 広島.

(2)明神拓斗, 井上喜雄, 芝田京子, 赤島成信, 秋山慶太, 米田圭佑, 横田正堯, 力覚を有する手術ロボット把持部の開発, 日本機械学会中国四国支部第53期総会・講演会, 2015年3月6日, 広島.

(3)横田正堯, 井上喜雄, 芝田京子, 秋山慶太, 米田圭介, エネルギー回生型マスタースレーブシステムの基本特性の検討 (負荷トルクによる影響の推定), 日本機械学会中国四国学生会第45回学生員卒業研究発表講演会, 2015年3月5日, 広島.

(4) 立花邦彦, 井上喜雄, 渡橋和政, 直列接続型マスタ・スレーブアクチュエータのバイラテラル制御, 日本機械学会 D&D2015, 2015年8月25-28日 (講演決定), 青森.

6. 研究組織

(1)研究代表者

井上喜雄 (Yoshio INOUE)
高知工科大学・工学部・教授
研究者番号: 50299369

(2)研究分担者

渡橋和政 (Kazumasa ORIHASHI)
高知大学・臨床医学部門・教授
研究者番号: 70204295