

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：12602

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13725

研究課題名（和文）医療機器のための遠隔精密バイラテラル制御の研究

研究課題名（英文）Precise bilateral tele-operation control for medical devices

研究代表者

菅野 貴皓（Kanno, Takahiro）

東京医科歯科大学・生体材料工学研究所・准教授

研究者番号：50714234

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、遠隔手術ロボットをはじめとする遠隔操作型ロボットを精密に動作させ、かつオペレータへの力覚のフィードバックが可能なバイラテラル制御の開発に取り組んだ。任意長の通信遅延に対して安定性が保証される「波変数」の手法をもとに、機械学習の手法であるLSTMを用いて、オペレータの100ミリ秒先の操作を予測し、通信遅延の影響を低減する方法を提案した。また、力覚フィードバックのあるロボットの力制御を精密に行うため、空気圧駆動の低摩擦ソフトアクチュエータの圧力と出力の関係についてモデル化を行った。さらに、遠隔制御のセキュリティを確保するため、暗号化制御を空気圧サーボシステムに適用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在実用化されている手術ロボットはネットワークを介した遠隔手術を行うことができていないが、本研究の成果を用いることで今後遠隔手術が可能になることが期待される。また、本手法は手術ロボットだけでなく、様々な電動または空気圧駆動のロボットシステムに対して適用可能である。特に、空気圧駆動システムの遠隔制御について制御系設計の知見が得られたことにより、これまで電動ロボットでは作業が難しかった環境への応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a bilateral control system, which enables precise operation of teleoperated robot such as surgical robot, and feeds back the force to the operator.

We proposed a method to estimate the operator's trajectory 100 milliseconds later to reduce the effect of time delay in the network. We used a machine learning method LSTM. The method. We also developed a pneumatic soft actuator for precise force control. The soft actuator does not have sliding parts and it has low friction. We modeled the relationship between the air pressure and the output force of the actuator, based on the strength of materials.

Furthermore, we implemented a ElGamal encryption in the pneumatic servo controller to enhance the cyber-security of the teleoperation system.

研究分野：ロボティクス

キーワード：遠隔制御 手術支援ロボット 空気圧サーボシステム 暗号化制御

1. 研究開始当初の背景

近年、効率の良い手術を目指して、様々な手術支援ロボットが開発されており[1]、Intuitive Surgical 社の da Vinci は既に世界で 3,000 台以上が導入されている。手術支援ロボットは、医師が操作するマスタームと患者の体内で作業をするスレーブアームに分かれており、医師がマスタームを操作するとその手の動きをマスタームが読み取り、精密に制御されるスレーブアームは医師の手と同じ動きを行う。

現在実用化されている手術ロボットは、マスタとスレーブの双方が手術室内に存在しているが、理論上はマスタとスレーブをインターネットを経由して接続することで、遠隔手術を行うことが可能である。しかしながら、バイラテラル制御(力覚フィードバックのあるマスタ・スレーブ制御)を用いる場合、インターネットなどの計算機ネットワークを介すると、通信の遅れにより制御系が不安定になることが知られている。

Anderson と Spong は、受動性の概念にもとづいて通信遅延のあるマスタ・スレーブシステムを安定に動作させる手法を提案し[2]、散乱変換を用いることによって、時間遅れに対して安定性を保証する制御手法を提案した。この手法は、後に Niemeyer と Slotine によって「波変数」として定式化が行われた[3]。波変数は、通信遅延を「波の伝播」に見立てる制御方式で、マスタアームとスレーブアームとの間をバネと質量が連なる柔軟な棒で繋いだような動特性を制御により再現する。これにより、遅延に対する安定性を保証しながら、オペレータがシステムの挙動をある程度直感的に予測できる系を実現している。このバネ状の動特性は、スレーブの位置応答がオーバーシュートを起こすなどの理由から精密な位置決めは難しい。したがって、医療ロボットなどの精密作業を遠隔で行うことは極めて困難と言える。

また、遠隔手術の使命は、全国に点在する医師とロボットを自在に接続し地方病院の人手不足を解消することであるが、実用面を考慮するとサイバーセキュリティの問題やユーザビリティの問題など数多くの課題が残っている。

2. 研究の目的

本研究では、効率的なロボット遠隔医療を実現するための制御手法を確立することを目的として、下記の2つの課題に取り組む。

- (1) オーバーシュートを低減した精密バイラテラル制御手法の開発
 - (2) 任意の医療ロボットと操縦装置を接続するソフトウェア・アーキテクチャの開発
- 上記の課題それぞれについて、制御手法とソフトウェアを実機またはシミュレーションに実装し制御性能などを確認する。

3. 研究の方法

(1) オーバーシュートを低減した精密バイラテラル制御手法の開発

精密なバイラテラル制御を実現するためには、バイラテラル制御において遅延の影響を小さくすることや、精密な力制御が可能なアクチュエータなどが求められる。本研究では、

- (1-1) 長・短期記憶(Long-Short Term Memory: LSTM)を用いたマスタ側軌道の予測
- (1-2) 低摩擦ソフトアクチュエータの開発と力学モデル構築を実施した。

(2) 任意の医療ロボットと操縦装置を接続するソフトウェア・アーキテクチャの開発

実際のネットワークを利用したバイラテラル制御では、セキュリティを確保することが重要となる。そこで、本研究では、空気圧駆動の手術支援ロボットについて、暗号化制御の導入について検討した。

4. 研究成果

(1-1) 長・短期記憶(Long-Short Term Memory: LSTM)を用いたマスタ側軌道の予測

波変数に基づくバイラテラル制御は、任意長の通信遅延に対して安定性が保証される反面、遅延時間が増大するとマスタ・スレーブ間の結合が柔らかくなり、オーバーシュートが生じやすくなる。手術ロボットなど精密動作が要求される用途に適用できるよう、本研究では図 1 に示す軌道予測器を導入する方法によって遅延による制御性能の低下を補償する手法を提案する。図 1 上のフィードフォワード部分に示すように、従来の波変数変換に機械学習を用いたマスタアームの軌道予測器を追加する。スレーブアームに機械学習により予測されたマスタアームの未来の位置情報を送信することで目標位置に対するオーバーシュートを抑制する。

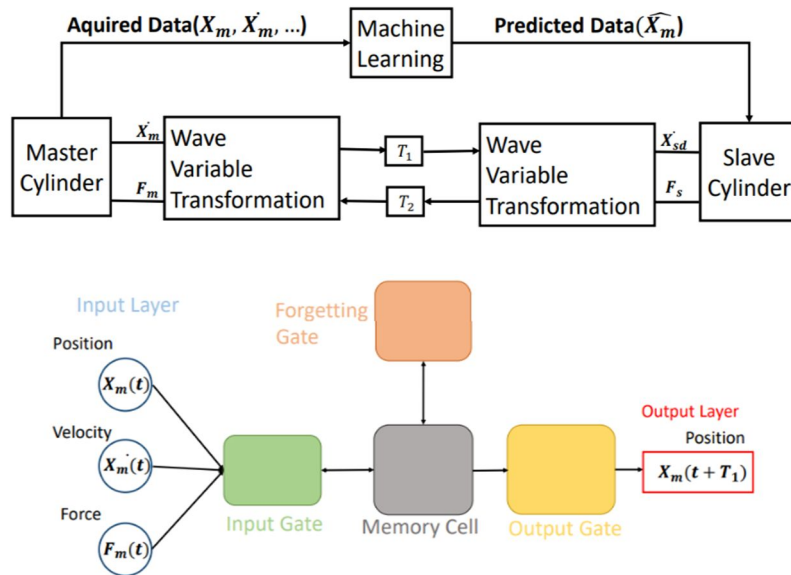


図1 波変数に基づくバイラテラル制御と機械学習を用いた軌道予測器

本研究では、機械学習の手法として時系列データの予測に適した長短期記憶 Long Short Term Memory (LSTM)を用いた。

手術ロボットの操縦装置（マスタアーム）を人が操作し、それを LSTM により予測する実験を行った。本実験では 100[msec]後のマスタの位置を予測する。操作者がマスタ側のシリンダに任意の波形を入力した。データ取得のサンプリング周期は 50[msec]とし、取得データ約 5000 個のうちの 4500 個を学習データ、残りの 500 個を検証データとした。また、再度実験したデータ約 1500 個をテストデータとし、予測精度を確認した。なお、重み更新のためのバッチサイズは 10、エポック数は 30 とした。制御のサンプリング周期が 1[msec]であるが、予測器のサンプリング周期を 1[msec]とすると 100 サンプル先を予測する必要がある。予測器のサンプリングを 50[msec]に間引くと、2 サンプル先を予測すれば十分になるため、精度よく予測できると考えられる。

図2に軌道予測の結果を示す。予測値の絶対平均誤差は 0.5[mm]であった。

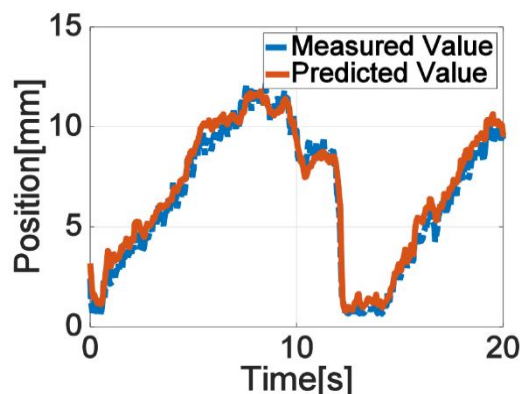


図2 LSTM により予測した軌道

(1-2) 低摩擦ソフトアクチュエータの開発と力学モデル構築

マスタとスレーブとの間で位置と力を同期させるバイラテラル制御システムにおいては、オペレータに正確な力を提示するために正確な力制御が可能なアクチュエータを用いることが重要となる。

著者らはこれまでにシリコンゴムと金属コイルバネを用いたソフトアクチュエータを開発している。このアクチュエータは摺動部を有していないため、従来のアクチュエータと比較して低摩擦であり、精密な力制御を行えると期待される。ソフトアクチュエータの構造と製造方法をそれぞれ図3と図4に示す。

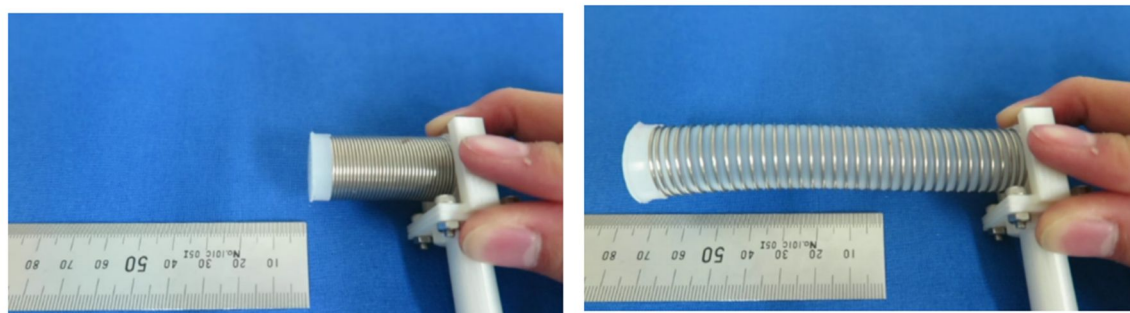
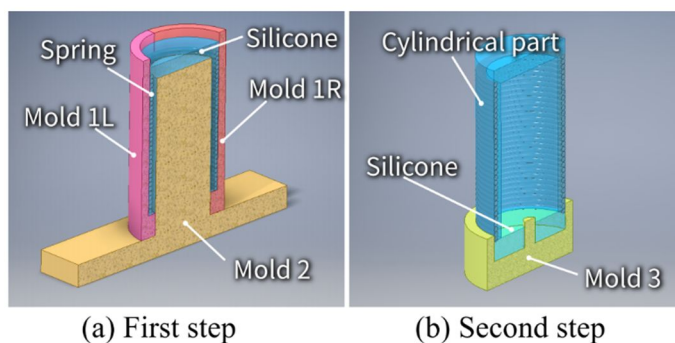


図3 ソフトアクチュエータの構造



(a) First step

(b) Second step

図4 ソフトアクチュエータの製造方法

一般に、空気圧アクチュエータの出力は圧力と受圧面積の積となる。しかしながら、著者らがソフトアクチュエータの出力を計測したところ、圧力と受圧面積の積よりも大きい出力が得られることが分かった。

そこで、ソフトアクチュエータを厚肉円筒としてモデル化し、材料力学的な解析を行った。その結果、ソフトアクチュエータの場合はアクチュエータの構造に使われているゴム材料自体が軸方向に圧力を伝えることが分かった。この伝達量はゴム材料のポアソン比に依存し、ポアソン比が0.5の場合はゴム材料の断面積に円筒内部の圧力を掛けたものに等しい。

ポアソン比と出力の関係を図5に示す。横軸にゴム材料の内径と外径の比を、縦軸に圧力伝達率（出力をゴム材料の断面積で割ったもの）を示している。

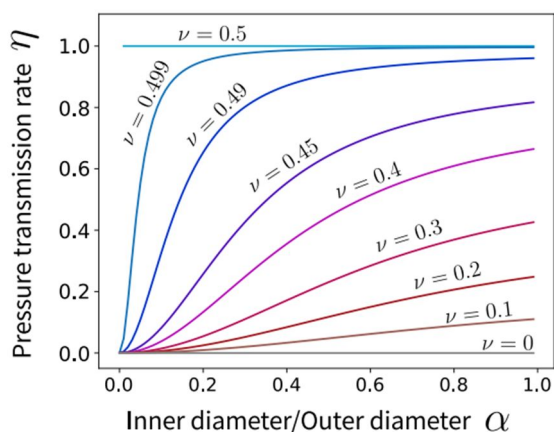


図5 ソフトアクチュエータの出力とポアソン比の関係

(2) 手術支援ロボットの暗号化制御

公共のネットワークを利用して遠隔操作を行うロボットは、サイバーセキュリティを確保することが重要となる。制御信号を改ざんする攻撃だけでなく、制御系そのものを改ざんして不安定極を持たせるといった攻撃のリスクがある。この課題に対して、従来のように通信経路を暗号化するだけでなく、制御システムのゲインなどのパラメータを秘匿化するという方法が小木曽らにより提案されている[4]。

本研究では、著者らが開発している空気圧駆動の手術支援ロボットについて、暗号化制御の導入について検討する。本研究期間においては、手術支援ロボットの制御系の一要素である空気圧サーボシステムの暗号化制御を実装し、実験により制御性能の検証を行った。

暗号化の手法として ElGamal 暗号を用いる。ElGamal 暗号は積に関する準同型性を有している。すなわち、暗号空間上で暗号文同士の積を求めて復号化すると平文の積と同じ値となる。この性質を利用して、制御系の観測信号とゲインの双方を暗号化したまま制御入力を求めることができる。図6に空気圧サーボ系の暗号化制御のブロック線図を示す。図6において、Encが暗号化、Decが復号化を表している。Encrypted Controllerは図7に示すカスケード制御系を暗号文で演算するものである。微分、積分、加減算は平文で行い、信号とゲインの乗算を暗号空間上で行う。

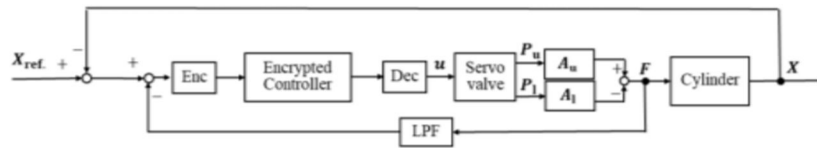


図6 空気圧サーボ系の暗号化制御

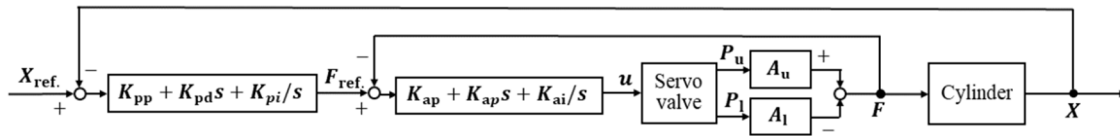


図7 位置と空気圧のカスケード制御系

実験システムを図8に、実験結果を図9に示す。図9は青線が空気圧シリンダの目標変位、橙線がセンサで計測したシリンダ変位である。図から、暗号化制御を適用しても十分な制御性能が発揮されており、空気圧サーボ系に暗号化制御が適用可能であることが示された。

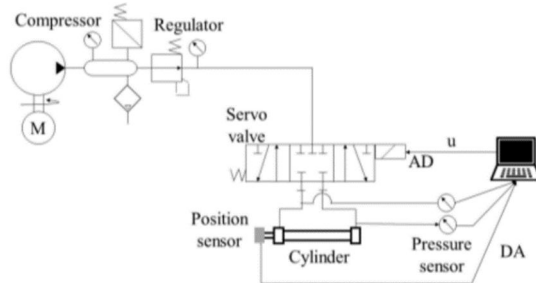


図8 実験システム

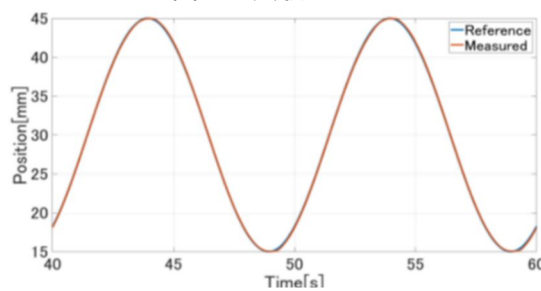


図9 位置制御の実験結果

参考文献

- [1] Russell H. Taylor and Dan Stoianovici, "Medical Robotics in Computer-Integrated Surgery", IEEE Transaction and Robotics and Automaiton, vol.19, No.5, October 2003.
- [2] Anderson, R.J. and Spong, M.W., "Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 34, No. 5, 1989.
- [3] Niemeyer, G. and Slotine, J.J.E, "Stable Adaptive Teleoperation," IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol. 16, No. 1, 1991.
- [4] Kiminao Kogiso and Takahiro Fujita, Cyber-Security Enhancement of Networked Control Systems Using Homomorphic Encryption, 2015 IEEE 54th Annual Conference on Decision and Control (CDC), December 15-18, 2015. Osaka, Japan.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kanno Takahiro, Ohkura Shunya, Azami Osamu, Miyazaki Tetsuro, Kawase Toshihiro, Kawashima Kenji	4. 巻 9
2. 論文標題 Model of a Coil-Reinforced Cylindrical Soft Actuator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 2109 ~ 2109
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.3390/app9102109	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 井上裕矢
2. 発表標題 波変数に基づくバイラテラル制御における機械学習を用いた遅れ補償
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuya Inoue
2. 発表標題 Application to Pneumatic Servo System in Bilateral Control Based on Wave Variable
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----