

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01433

研究課題名（和文）スレーブ側に一切センサーを持たないリアルハプティクスシステムの実現

研究課題名（英文）Real haptics system without any sensors at slave side

研究代表者

大西 公平（Ohnishi, Kouhei）

慶應義塾大学・グローバルリサーチインスティテュート（三田）・特任教授

研究者番号：80137984

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,900,000円

研究成果の概要（和文）：遠隔側の環境によっては位置検出器も省略して力触覚伝送を行いたい要求がある。DCサーボモータを用いる場合は電機子回路の電流・電圧信号を用いて力触覚信号の推定が可能であることを示した。ただし、位置推定に定常誤差を生じるので、機械的な参照位置が必要になる。DCブラシレスモータの場合は磁極信号に基づき、力触覚信号が推定可能になる。特に定常状態では位置、力ともほとんど誤差が無く実用上十分な精度を持つ。過渡状態では多少の誤差が見積もられるが、この誤差は制御サンプル時間の数倍の時間内で0に収束する。バイラテラル制御実験では問題なく力触覚伝送が可能であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

力触覚伝送はHadamard変換と加速度制御を組み合わせることで可能になる。従って、本質的には力検出器は不要であるが位置検出器を必要とする。遠隔側の環境が高温、高圧といった厳しい場合は位置検出器も省略したいという実用上の要求がある。これに対し、本提案手法はアクチュエータの特性を利用して力触覚信号と位置信号を推定することで、センサが無くても力触覚を有する遠隔操作が可能であることを示したもので、将来の深海、宇宙などにおける遠隔操作ロボットの応用に道を拓くものである。

研究成果の概要（英文）：There are practical requirements on transmission of haptic sensation without the position sensor at the remote side. In case of using dc servo motor at the remote side, it is possible to estimate the haptic sensation by the signal of voltage across the inserted inductor at the armature circuit, however the estimation includes drift. In the case of brushless dc servo motor, the reluctance at the d-axis can be utilized and it is possible to avoid the drift. According to the experiments, there are almost no error in steady state for estimated position and estimated force by employment of the proposed algorithms. There are up to 50% error for estimated position as well as 20% error of force in the transient state. These transient errors are immediately converged to zero after several sampling times of the controller. If the engineering environment at the remote side is not suitable for teleoperation the proposed method will solve the problem by saving any sensors at the remote side.

研究分野：電気電子工学

キーワード：ハプティクス センサレス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

力触覚における刺激は力を速度で割った瞬時値で定義できる。繊細な力触覚信号は力情報と速度情報の時間の一致性に依存することが多くの研究から明らかになっている。力触覚の精確な伝送には力と速度の独立した制御性と両信号の同時性が求められるが、これは Hadamard 変換と加速度の制御により可能であることが研究代表者らの研究から明らかになっている。一方で実際においては、作業環境が厳しいために力触覚のある遠隔操作が希求される例が増えており、その場合はスレーブ側のセンサを有しない構造が必要条件になる。その場合、必要な情報は加速度となるので、力検出器は不要であるが、位置検出器は必要であるため、これを省略できれば実用的な要求に応えられるであろう。以上より、スレーブ側にセンサを有しなくても加速度が制御できて、力触覚が伝送できる制御系が求められていた。

2. 研究の目的

操作者が通常的环境中でマスターを操作し、人間が直接アクセスできない宇宙、深海、災害現場、高放射線下などの極限環境で遠隔操作を行いたいという要求が高まっている。力触覚を有することでスレーブ側における操作性が高まり、安全かつ器用でやさしい操作が可能になるが、極限環境下ではスレーブ側の力検出器や位置検出器に依存する制御は採用できない。スレーブ側にこのようなセンサを搭載せずに、極限環境下にある操作対象の軟らかさや硬さをマスター側に伝送し、安全な遠隔作業を可能にする基本技術を確認し、実機による実証を行うのが本研究の目的である。

3. 研究の方法

スレーブ側にセンサを持たなくても加速度を制御可能にするにはアクチュエータの特徴を把握して、スレーブ側で使用できるかどうかを実証する必要がある。ここでは、実用上多用される DC モータとブラシレス DC モータにアクチュエータを限定する。この他に誘導電動機や誘導子電動機をサーボシステムに使う方法も考えられるが、実適応例は殆ど無いので、DC サーボモータと BL モータに限っての研究で十分であると考えられる。

永久磁石界磁による DC サーボモータの場合は二種類の方法が考えられる。第一の方法は電機子回路にインダクタを挿入し、その電圧から加速度を求める方法で、第二の方法は電機子電流から加速度を求める方法である。前者ではインダクタの抵抗値が小さいほど誤差が小さい。第一の方法では電機子回路方程式から得られる加速度推定式を用いる。実装には直列インダクタの両端電圧が必要である。推定加速度信号は過渡状態でも用いることができるが、位置信号は加速度推定式から得られる速度信号を積分するので定常誤差の増大を免れることは出来ない。そのため、機械的なランドマークを設置し、遠隔操作の開始前に基準位置を確定することが必要になる。実際の工作機械ではしばしばこのようなアクションが取られることが多く、その場合は実用上の問題は少ない。電機子電流値から加速度を推定するのが後者の方法である。この方法は推定式に電機子抵抗値を用いるのでその変動が誤差を生む要因になる。従ってこの場合も機械的なランドマークを必要とする。

これに対しブラシレスモータ (BL モータ) の場合はモータ自身の持つ磁極信号を用いて加速度を得ることができる。三相の場合は、磁極信号は $6p/r$ のエンコーダと同様になるので極低精度位置検出信号から加速度の推定がどれだけ可能かという問題に帰着する。推定式にはパルス間の補間式を組み入れて位置速度の推定精度を高める工夫がなされている。磁極位置から AB 信号を取り出す電子回路を考案し、 $6p/r$ 信号に直し、パルス間を補間した場合と $256p/r$ のエンコーダを取り付けた場合を比較検討し、 $6p/r$ でも十分な性能が得られるかどうか実験的に確認する。 $6p/r$ のような極低精度パルス信号による力触覚をフィードバックして制御系を構成すると、低精度というだけでなく時間遅れが発生し、位相遅れによる不安定性が問題になる。これは、手元から遠隔側に伝達される力信号が t_1 遅れ、次に遠隔側から手元に伝達される速度信号が t_2 遅れると、操作者が感じるインピーダンスは本来感じるべき時間より $t_1 + t_2$ 遅れた力信号となり、本来感じるべき時間より t_2 遅れた速度信号の周波数領域の比になってしまう。このような時間遅れは利得 0 dB で位相だけが回転するシステムとなり、系全体が最小位相推移系ではなくなる。この遅延がシステムに直列に挿入されると、システム全体の位相余裕が失われ系の不安定化につながる。つまり、推定精度が良くても時間遅れがあると性能は劣化することを意味する。本研究ではサンプリング時間が速いので (0.2msec)、位相遅れが問題になるかどうかを実験的に確認し、Smith 予測子のような補償法が必要かどうかについても検討する。これらの方法を通じてスレーブ側のセンサを省いても力触覚伝送と遠隔操作が可能であることを実証する。

4. 研究成果

DC サーボモータでは電機子にインダクタを挿入して、加速度を求めるアルゴリズムにおいても電機子電流から加速度を求めるアルゴリズムも外乱オブザーバとの併用で機械的なランドマー

クが利用できる場合は実用上問題のない制御性を得た。ただし、電機子抵抗や電機子に直列に挿入するインダクタの抵抗値が変動すると位置誤差が発生するので、基準位置を機械的に設けるなどの補正が必要である。

ブラシレスモータは磁極検出信号(ホールデバイス信号)により極低精度エンコーダとも考えられる。位置誤差が低いので加速度推定にも誤差が出る。そこで、パルス間補間式を位置、加速度の推定式と併用することで精度の向上を図った。

実例としてセンサレスで駆動する把持鉗子を先端部に備えた細径軟性鉗子ロボットを開発し、力触覚伝達を可能とするバイラテラル制御による性能評価をおこなった。把持鉗子の駆動部を小型ブラシレスモータと減速機のみで構成し、駆動部を先端に搭載した装置を細径化して狭小な空間における把持行為を可能とする応用例である。先端部に搭載した小型把持鉗子と、把持鉗子の後端部に接続される軟性管で構成される。把持鉗子はエンドエフェクタと駆動部を備え、臓器や血管、縫合針等の接触対象物(環境)に対する把持行為をおこなう。エンドエフェクタである片開き式のグリッパは駆動側の爪の先端が2本に分割された3爪形状である。これにより安定な把持行為が可能になる。駆動部は直径4mmのブラシレスDCモータと遊星歯車機構の減速機で構成される。ブラシレスDCモータが発生する駆動力は、減速機の出力軸に取り付けた小歯車からグリッパの駆動爪の一部である冠歯車に伝達され、グリッパの開閉運動に変換される。ロボットの運動制御においてエンコーダによる高精度な位置情報の取得は性能向上のために重要であるが、エンコーダを備えた鉗子ロボットは小型化が困難である。軟性鉗子ロボットはエンコーダレスの駆動部を用いることで細径化を実現する。位置情報の取得にはブラシレスDCモータ内のホールデバイスを用いる。駆動部は金属筒に収納されており、ロボットの外径は約6mmである。軟性管は柔軟に屈曲可能なフレキシブルチューブと電線で構成され、一端は把持鉗子後部、他端は制御装置に接続される。フレキシブルチューブ内を通過する電線は制御装置から駆動部に電力を供給し、ブラシレスモータ内のホールデバイスの信号を制御装置に伝達する。本論文の軟性鉗子ロボットは先端部の把持鉗子の内部のみに動力伝達機構を有するため、軟性管の屈曲の度合いに影響を受けない把持行為が可能である。ブラシレスモータのホールデバイスは120度間隔で配置され、角度に応じて変化する3相パルス信号が得られる。これを2相パルス出力に対応したインクリメンタルエンコーダ用カウンタで取得するため、独自に考案した論理回路で3相パルス信号を2相パルス信号に変換した。考案した論理回路はNOT回路にシュミットトリガインバータを使用し、OR回路をNOR回路、AND回路をNAND回路で構成する等のハードウェア上の工夫がなされている。結果的に1.5P/Rの分解能の等価位置情報を得る。これを256p/rのエンコーダ搭載のブラシレスモータと比較実験を行い、精度や性能の比較を行った。実験では位置と力にそれぞれ正弦波指令を与えるという実験を行った。どちらも方向が反転するところで誤差が最大になる。速度制御では振幅1rad/sec、回転角速度 rad/sec(=0.5Hz)で最大位置誤差はセンサレスの場合で0.021rad、256p/rのエンコーダによる制御では0.014radとなった。同じく力制御では振幅0.00802Nmのトルク指令、周波数は rad/sec(=0.5Hz)の場合で、センサレスの場合と256p/rのエンコーダでは0.00063Nmの最大誤差があった。この誤差は速度反転による摩擦の大きな変化が起きるときにパルスの出現することが特徴であり、直ちに0に収束する。なお、定常的には両者はほぼ一致している。これらの結果はセンサレスでも実用上問題ない精度で位置と力が推定できることを示している。

次に、バイラテラル制御による力触覚伝達についても実験を行った。マスターとしてDCモータのギアヘッドの出力軸にエンドエフェクタを取り付けた入力装置を用いた。スレーブとして上記のセンサレスシステム(1.5p/rの位置分解能相当)を用いたマスタースレーブ軟性鉗子システムを構成し、マスタースレーブ双方にバイラテラル制御による力触覚伝達機能を実装した。マスターの位置情報取得には1024P/Rの分解能を有するエンコーダを使用し、マスターおよびスレーブのセンサの情報はいずれも四通倍して読み込みをおこなった。従って、スレーブ側は6p/r相当になる。把持行為の対象として硬い環境には直径4mmの金属のロッド、やわらかい環境には腸管モデルを用いた。環境に対して約3秒程度の把持行為を2度おこなった。位置スケールリング値は1、カスケールリング値は1.23に設定した。カスケールリング値はマスターおよびスレーブのモータやモータドライバ、電源装置の最大出力を考慮して設定したものである。実験で硬い環境とやわらかい環境把持について位置情報、力情報の応答値を観測した。環境の硬さに関わらず、マスターの位置にスレーブの位置が追従し、スケールリングにより増幅されたスレーブの力情報と逆方向で同じ大きさの力情報がマスターにおいて推定された。したがって、スケールリングを含むバイラテラル制御の目標が達成され、環境の硬さが伝達されたことが実証できた。つまり、硬い環境に対する把持行為では、環境に接触後の位置情報の変化が微小であるが、力情報は接触後も変化する一方、やわらかい環境に対する把持行為では、環境に接触した際の位置情報の変化に応じて力情報が変化するという結果が得られたことになる。実験結果の力触覚情報では硬い環境とやわらかい環境が判別可能であることが確認でき、十分な実用性を有していることが確認できた。これは低精度エンコーダをループ内に持っていて、制御系のサンプリング時間が0.2msecと短く外乱抑圧遮断周波数も100rad/sec程度で設計できるため、結果的にロバスト性が高く、低精度ゆへの時間遅れに対しても特別な考慮をしなくても良いということを示していると考えられる。

以上のように、スレーブ側に用いるブラシレスモータやDCモータに位置センサが無くても、推定計算で位置情報を推定することが可能で、ブラシレスモータでの性能は1.5p/r(4通倍す

れば $6p/r$) とほぼ等価である。この場合は、制御系のロバスト性を高くすることで $256p/r$ 程度と同程度の力触覚伝送は可能であることが実際に実証できた。小型軟性鉗子のようなスレーブの大きさに制限のあるシステムを実際に試作し、その性能を検証し実用に供することが可能であることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Matsunaga Takuya, Ohnishi Kouhei, Wada Norihito, Kitagawa Yuko	4. 巻 139
2. 論文標題 Development of Small-Diameter Haptic Flexible Gripping Forceps Robot	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 966～972
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejias.139.966	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 -
1. 著者名 Wang Dangxiao, Ohnishi Kouhei, Xu Weiliang	4. 巻 67
2. 論文標題 Multimodal Haptic Display for Virtual Reality: A Survey	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 610～623
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIE.2019.2920602	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 該当する
1. 著者名 Sariyildiz Emre, Oboe Roberto, Ohnishi Kouhei	4. 巻 66
2. 論文標題 Disturbance Observer-based Robust Control and Its Applications: 35th Anniversary Overview	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 1～1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIE.2019.2903752	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 該当する
1. 著者名 大西 公平、溝口 貴弘、下野 誠通	4. 巻 47
2. 論文標題 力触覚のあるロボット	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 人工臓器	6. 最初と最後の頁 52～57
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11392/jsao.47.52	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takuya Matsunaga, Tomoyuki Shimono, Hiroshi Asai, Kouhei Ohnishi
2. 発表標題 Force Sensorless Haptic Probe Driven by Large Circular Linear Motor for Haptic Rendering
3. 学会等名 IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kouhei Ohnishi, Takahiro Nozaki, Yuki Saito, Tomoyuki Shimono, Takahiro Mizoguchi
2. 発表標題 Haptics-Led Innovation for Coming Society
3. 学会等名 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuya Matsunaga Tomoyuki Shimono, and Kouhei Ohnishi
2. 発表標題 Development of Multi Degree of Freedom Haptic Forceps Robot with Multi Actuated Fingers
3. 学会等名 The 5th IEEJ International workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Marina Indri, Roberto Oboe, Kouhei Ohnishi	4. 発行年 2021年
2. 出版社 CRC Press	5. 総ページ数 280
3. 書名 Mechatronics and Robotics New Trends and Challenges	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 検体検査システム、検体検査方法及びプログラム	発明者 大西公平、下野誠 通、溝口貴弘、山口 直希	権利者 慶應義塾大学、 横浜国立大学、 モーションリブ
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-146423	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------