

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K06251

研究課題名(和文) ロボットの力制御を統合的に扱う拡散パラメータ型マルチスケール・マルチラテラル制御

研究課題名(英文) Multi-scale and multi-lateral controller based on scattering parameters for force control of robots

研究代表者

神永 拓 (Kaminaga, Hiroshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員

研究者番号：90571571

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ロボットの使用する大きな目的の一つは人の作業の代替である。人の行う作業はジェスチャーや会話など接触を伴わないものもあるが、多くの作業な物理的な接触を伴う。接触の制御はすなわち接触力の制御である。ところが、力を制御することと位置を制御することは両立せず、どのようにこれらを調停するかは一つの問題であった。本研究では、力制御を含む制御系を構成する上で、システムへの入力をエネルギーの一種ととらえ、その相互作用を考えた設計を行うことを目的とする。そのために、遠隔操作で用いられる波変数、すなわち、高周波電気工学の分野で用いられるSパラメータのアナロジーを用いて相互作用力を記述する方法を研究した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、Sパラメータの機械システムでの利用の可能性が示された。Sパラメータを用いることで、モータ電流や速度といったモータ側の量の計測すれば、接触状態の計測を有無の2値判定でなく、程度も含めて検出できるようになり、接触を伴う機械システムの可能性を広げた。また、負荷の状態に応じて効率的にエネルギーの伝達が行われているかを知ることが可能になり、将来的には機械システムの効率化に寄与することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：One of the big interest in robotics is the replacement or supplement of labor. The tasks that humans perform includes both the non-contact tasks, such as gestures and speeches, and tasks with contacts, that are vast majority of the labor tasks. Controlling contact is almost identical to controlling contact forces. The problem of contact control was that the controlling force and controlling position were often contradicting. In this research, we aim to model the system as a kind of energy that include both the position and force information. We used a method in high frequency electronics called scattering parameters (S-parameters) to model the mechanical systems analogous to electric systems and utilize the method to detect the load and contact condition of the mechanical systems by monitoring reflection of energy.

研究分野：ロボティクス

キーワード：力制御 Sパラメータ

1. 研究開始当初の背景

研究開発当初、ロボットの制御は主に位置で行われることを意図していた。位置で制御することはロボットが自由な空間で、既知の物体と接触する際には都合がよく、解析力学の知識を用いた動作の制御が可能であった。ところが、ロボットが人の動作を行い、その動作をロボットが行うようなロボットの使い方をする場合、位置の再生は人からロボットへの一方向の情報の伝達となり、真のインタラクションを実現しない。

このような双方向の制御の問題はマスタースレーブやバイラテラル制御と呼ばれ、遠隔地のコンピュータと人の動きを合わせつつ力も一致させることを目的としている。この場合、制御する目的は位置・力を分離して考えることはできない。

2. 研究の目的

ロボットの使用する大きな目的の一つは人の作業の代替である。インタラクションを行うロボットの制御の問題の難しさの一つは、位置と力を分離して考えることができないことである。接触現象は本質的にはエネルギーの授受であるため、このような問題を記述するためにはエネルギー、もしくは準じる量による記述が適当であると考えられる。本研究では、このような接触を伴うロボットの問題をロボットのレベルだけでなく、駆動系のレベルでも考えるために、着目する変数を伝達するエネルギーとして考えた。そのために、高周波電気工学の分野で用いられる S パラメータのアナロジーを用いて相互作用を記述する方法を研究することとした。エネルギー伝搬の問題として考えることで力・位置双方を考慮した設計が可能になることが期待できる。

3. 研究の方法

(1) システムのモデル化

機械システムは、解析力学的表現においてシステムへの入力是一般化力 f 、出力は一般化座標 x と取る。インピーダンス制御など、電気システムのアナロジーを使った機械システムの解析を行う場合、入力 f を電圧 V に、出力の変化率 \dot{x} を電流 i になぞらせる。このアナロジーを用いると、高周波電気回路における S パラメータのアナロジーも可能である。

本研究ではこの電気システムのアナロジーを用いて機械システムを記述することによりどのようにエネルギーの授受が行われるかを解析する。なお、力制御において興味深いのは負荷システムから見たモータ側の S パラメータであり、 $s = -1$ となるときは完全にバックドライバブルな駆動系を意味し、逆に、 $s = 1$ のときは完全に非バックドライバブルな駆動系を表すことになる。駆動系の効率の観点では、負荷システム側が $s = 0$ のときは反射がない、すなわちインピーダンスマッチングが起きている状態であり、最も効率的に動力を伝達できることを意味する。

(2) 大規模なセンサ・駆動系の実時間制御システムの構築

本研究では、電気静油圧アクチュエータの制御に S パラメータを用いた設計を行うことを目指したため、モータの電流制御、複数の圧力センサの計測、出力軸エンコーダの計測が必要である。そこで、本研究では様々なセンサのデータやモータの制御を統合的に行うために EtherCAT と呼ばれるフィールドバスを使用する。EtherCAT を用いたシステムのラピッドプロトタイプングを可能にするために Simulink を用いシステム構築を行うこととし、そのためのソフトウェア基盤を開発する。

(3) 力感受性を高めた油圧駆動系の設計

力感受性は、S パラメータの観点では外力に対する速度の影響を大きくすることであるため、 $s = b/a$ を小さくすることと等価である。これは、(1)の結果から、油圧駆動系においてはシリンダの摩擦を小さくすることに他ならない。本研究ではこの視点に基づいた機構設計を行った。さらに、波の計測を高精度で行う基板および力計測システムの開発を行った。

4. 研究成果

(1) システムのモデル化

機械システムの入射波、反射波はそれぞれ以下のように定義できる。

$$a = 1/2(f/\sqrt{Z_0} + \dot{x}\sqrt{Z_0})$$

$$b = 1/2(f/\sqrt{Z_0} - \dot{x}\sqrt{Z_0})$$

ここで、 Z_0 は特性インピーダンスである。機械システムでは一般に歯車を用いることが多いこと、EHA をはじめとする油圧システムでは出力にはシリンダを用いることが多いことを考えると、モータのトルクとシリンダの推力はそれぞれいずれかの単位に合わせて考えたほうがよい。

当初、電気系も含めた連成システムのモデル化を試みたが、電気系では電圧を表す V が、機械系では速度を表す \dot{x} と比例すること、逆に電気系で流れを表す電流 I が機械系では力 f とトルク定

数を介して比例するという逆転関係になっており、連成させ、モータを伝送線路のように扱うことが困難であることが分かった。

次にEHAのモデルを、電気系シミュレータを用いて解析した。負荷側の粘性抵抗を0から非常に大きな値に変化した際のSパラメータの変化を観測した。抵抗値の変化パターンと、その時のSパラメータの変化を図1 負荷の粘性抵抗値に応じたSパラメータの変化図1に示す。なお、トルク入力には100Hzの正弦波とし、パワーの評価は電圧、電流それぞれのパワーを狭帯域、すなわち特定周波数（本研究では100Hz）におけるスペクトルのパワーとして計測した。

シミュレーションの結果、ポンプ側の推力と速度からSパラメータを計算することで負荷側の状態が無負荷なのか固着状態なのかを、その程度を含めて評価できることが確認された。

さらに、この評価結果から、負荷側の抵抗をバイパス弁などにより意図的に制御することでSパラメータに応じたインピーダンスマッチングが行える可能性が示唆された。

一方で、手法の課題として残ったのが、波のパワーの計測が狭帯域で行わないと精度が低かったことである。そのために本研究では入力を特定周波数の正弦波もしくは矩形波にし、狭帯域計測に対して十分なパワーを供給できるようにした。

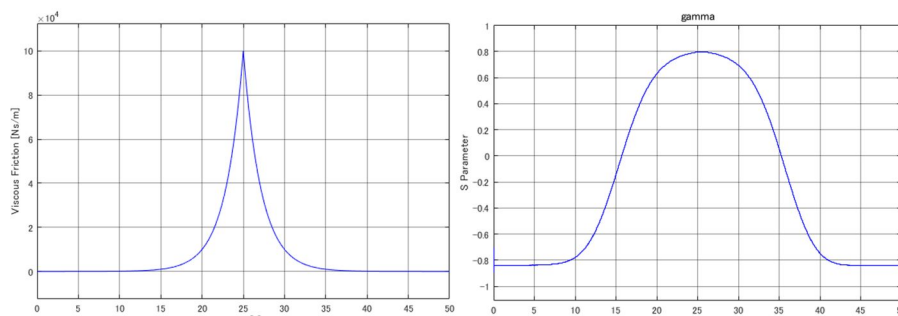


図 1 負荷の粘性抵抗値に応じた S パラメータの変化

(2) 大規模なセンサ・駆動系の実時間制御システムの構築

本研究ではと呼ばれる状態遷移記述ツールを用いて、EtherCAT デバイスの状態遷移の推定とその状態に応じたふるまいを記述し、イベントドリブンな状態遷移後、定期的な制御プログラムに移行するシステムを開発した。

(3) 力感受性を高めた油圧駆動系の設計

力感受性は、Sパラメータの観点では外力に対する速度の影響を大きくすることであるため、反射係数を小さくすることと等価であり。油圧駆動系においてはシリンダの摩擦を小さくすることに他ならない。さらに、制御の質を高めるには位置・力の計測の質を高めることが重要である。

設計したシリンダは、摺動面にオイルスペアリングを用いることで低摩擦性と負荷容量の増大を図ったほか、グランド面にはオイルシールの摩擦を低減するバフ加工などを行った。

また、力に敏感な制御を行うためには感度の良く力もしくは力に関連した量を計測することが重要である。本研究では圧力センサの計測を主眼に置いた小型高分解能ひずみゲージ AD 変換器の開発と、分布型力センサを用いて外力を計測する手法の開発を行った

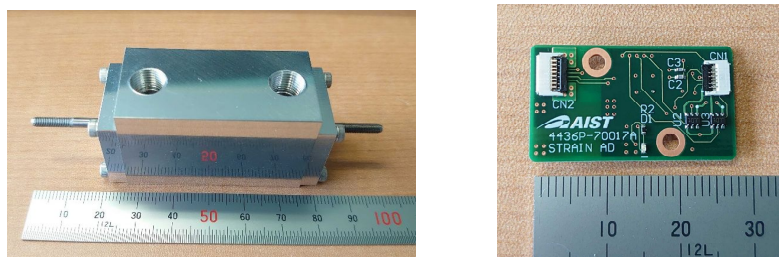


図 2 開発した低摩擦シリンダ（左）と高分解能ひずみゲージ AD 変換基基板

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 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Chefchaouni Moussaoui Selim, Cisneros-Limon Rafael, Kaminaga Hiroshi, Benallegue Mehdi, Nobeshima Taiki, Kanazawa Shusuke, Kanehiro Fumio	4. 巻 23
2. 論文標題 Spatial Calibration of Humanoid Robot Flexible Tactile Skin for Human Robot Interaction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 4569 ~ 4569
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s23094569	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

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 R. Cisneros, A. Dallard, M. Benallegue, K. Kaneko, H. Kaminaga, P. Gergondet, A. Tanguy, C. Fournier, R.P. Singh, Y. Chen, S. Chefchaouni, G. Lorthioir, Y. Osawa, M. Tsuru, L. Sun, M. Morisawa, G. Caron, M. Ono, K. Shirasaka, S. Wada, H. Wada, F. Kanehiro, A. Kheddar
2. 発表標題 Enhancement of Team JANUS' cybernetic avatar system for exploration and skill transfer
3. 学会等名 2nd Workshop Toward Robot Avatars, IEEE International Conference on Robotics and Automation（国際学会）
4. 発表年 2023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

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		
フランス	CNRS		