

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760184

研究課題名(和文)多自由度油圧アームのカシミール関数に基づくインピーダンス制御

研究課題名(英文)Casimir based impedance control for N-DOF hydraulic robots

研究代表者

酒井 悟(SAKAI, Satoru)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号：90400811

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：油圧ロボットは、電動ロボットと比較して、1) 一般環境における出力荷重比が高い、2) 重力環境における姿勢静止のためのエネルギー効率が低い、などの利点を有するため、建設、災害救助、農業、地雷除去における高度な作業支援が期待されている。本研究では油圧ロボットがヒトや物体を損傷させずに接触するための新しいインピーダンス制御手法を提案した。提案手法によって、未知のパラメータ変動のもとで閉ループ系はロバスト安定性だけでなく、ロバスト構造という新しい性質を達成するためインピーダンスを有する。2自由度油圧アームの数値モデルと実験装置を用いて、提案手法の有効性を数値的かつ実験的に示した。

研究成果の概要(英文)：Hydraulic robots are expected to perform construction, agriculture, rescue, and de mining due to the advantages with respect to the power weight ratio in the general environment and the energy efficiency in the gravity environment. In this project, we propose a new impedance control by which the hydraulic robots can contact with human and objects without (or with less) damage. The proposed control can achieve not only robust stability but also robust structure which is a new concept that the closed-loop system can be another mechanical in the presence of parameter perturbations. The validity of the proposed control is confirmed by the numerical simulations and the experiments in 1-DOF or 2-DOF cases.

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：油圧ロボット モデリング ロバスト制御 ハミルトン系

1. 研究開始当初の背景

油圧アームは、電動アームと比較して、1) 一般環境において手先発生力が高い、2) 重力環境において姿勢静止のためのエネルギー効率が高い、などの利点を有するため、建設、災害救助、農業、地雷除去などにおける高度な作業支援が期待されている。

そこで、経験に基づくモデルフリー制御だけではなく、油圧アームのための力学に基づく広義のモデルベース制御の体系を構築することが必要かつ重要である。

2. 研究の目的

研究目的は、多自由度油圧アームのインピーダンス制御問題の理論的かつ実験的な解決である。乱暴に言って、インピーダンス制御は望ましい外乱応答や挙動を生成できる仮定の機械系に制御対象を変換することを目的としており、作業支援ロボットや震動台の一部に実装されている。提案手法による閉ループ系は未知環境のもとでロバスト安定性を達成するだけでなく、全てのパラメータが摂動しても機械系と等価な構造を保存する、つまり、インピーダンス制御系として機能できるという新しい性質を有する。例えば、手先負荷だけでなく油温が変化する場合でも、直感的なゲイン調整が常に可能となる。

3. 研究の方法

[S1] エネルギー源を考慮したロボットのモデリングと同定

N 自由度油圧アームのパラメータ同定法を提案した。一般のロボットのパラメータを、リンク質量など関節番号に依存するパラメータと、重力加速度のように関節番号に依存しないパラメータ(リンク共通パラメータ)に分類した。1 自由度油圧アームや N 自由度電動アームの場合、リンク共通パラメータの値は既知であるため、従来の逐次同定法を用いて全パラメータは一意に同定される。しかし、多自由度油圧アームの場合、(エネルギー源である油圧ポンプや油圧タンクは全リンクによって共有されるので)リンク共通パラメータの値は未知であるため、従来の逐次同定法を用いても一意に同定されないという問題が生じる。

そこで、多自由度油圧アームの全パラメータを一意に同定するため、射影定理の観点から従来の逐次同定法を再考して修正する手法を提案した。

[S2] 多自由度油圧アームの Casimir 関数に基づくインピーダンス制御法と制御工学的実験

[S1]の手法を用いて多自由度油圧アームの(パラメータの値を含む)非線形モデルを構築することが初めて可能となる。多自由度油圧アームの新しい構造的な特徴である Casimir 関数を活用したインピーダンス制御手法を提案した。

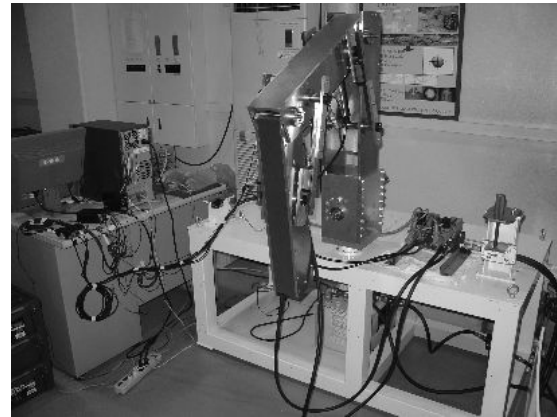


Figure 1 実験装置

さらに提案手法を非線形モデルに適用して設計された制御器と制御対象から構成される閉ループ系を数値的に構築して、外乱応答などの観点から提案手法の有効性を数値的に検証した。

[S3] 多自由度油圧アームの Casimir 関数に基づくインピーダンス制御法とロボット工学的実験

[S2]と同様に、提案手法を非線形モデルに適用して設計された制御器と制御対象から構成される閉ループ系を実験的に構築して、pick & place 作業性能などの観点から提案手法の有効性を実験的に検証した。

[S4] Casimir 関数に基づくインピーダンス制御法の理論展開

A: 多自由度油圧アームの入出力関係を Casimir 関数を用いて正準形式に変換するだけではなく、Hamilton 関数に 2 重積分を用いる表現を提案した。多自由度油圧アームの新しい表現に基づく順動力学計算の高速化について部分的に考察した。

B: 多自由度油圧アームのカシミール関数の対称性と同時に、油圧アームと結合される視覚器の空間対称性について考察した。

4. 研究成果

[S1] エネルギー源を考慮したロボットのモデリングと同定

提案手法を実験装置 (Figure 1, 2 自由度油圧アーム, 7 MPa) に適用して、実験装置の応答と(パラメータの値を含む)非線形モデルの応答を比較したところ、2 関節を同時運動させても両者の応答は十分に一致した。さらに、手先負荷を変化させたところ、エネルギー源を共有する流体パラメータ(体積弾性係数など)はほぼ反応せず、機械パラメータ(質量など)のみが変化した。

以上から提案手法の有効性が実験的に確認された(学術雑誌論文, 学術雑誌論文)。

[S2] 多自由度油圧アームの Casimir 関数に基づくインピーダンス制御法と制御工学的

実験

仮想バネ係数，仮想質量などを変化させたところ，外乱応答は十分に直感的に変化した．手先負荷はステップ外乱である．

以上から提案手法の有効性が数値的に確認された（国際会議発表論文，国際会議発表論文，国際会議発表論文）．

[S3] 多自由度油圧アームの Casimir 関数に基づくインピーダンス制御法とロボット工学的実験

仮想バネ係数，仮想質量などを変化させたところ，鉛直方向の pick & place 作業性能 (Figure 2, ロボットによる pick & place の成否) は直感的に変化した．具体的には，専用ハンド（電気電子要素を用いることなく指先の開閉を反復する機械要素とメカニカルグリップから構成されたハンド）を機能させるために必要な一定の接地反力が不適切な仮想バネ係数では生成されないが，適切な仮想バネ係数では十分に生成されて pick & place が達成された．pick における手先負荷は専用ハンドとコンテナ，place における手先負荷は専用ハンドのみである．

以上から提案手法の有用性が実験的に確認された（国際会議発表論文）．

[S4] Casimir 関数に基づくインピーダンス制御法の理論展開

A: 2自由度アームに対して非凸最適設計問題を設定して，順動力学計算の高速化を達成すること，つまり，新しい表現が高い工学的価値を十分に有する研究対象であることを確認した（国際会議発表論文）．よって新しい表現について微分幾何学的な観点・理論物理学的な観点から議論することが今後の課題である．

B: 行列空間について空間対称性を有する正規直交基底を提案して，簡単化されたケースについて有効性を数値的・実験的に確認した（国際会議発表論文，学術雑誌論文，学術雑誌論文）．さらに，多自由度油圧アームと視覚器の新しい結合を提案した．1自由度油圧アーム，履帯車両(学術雑誌論文)，カメラから構成される全身ロボットを用いて提案結合の有効性を実験的に確認した．

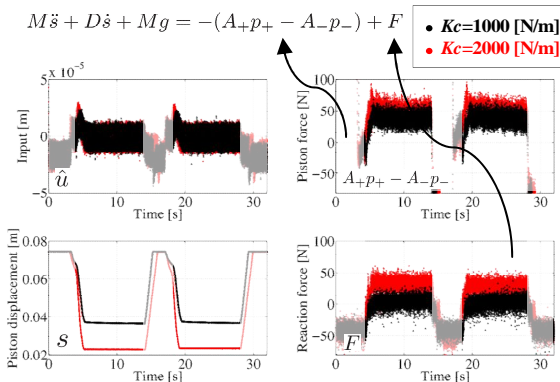


Figure 2 実験結果（インピーダンス制御実験）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

Satoru Sakai, Masakazu Sato, Visual systems & control on polynomial space and its application to sloshing problems, IEEE Transaction on Control Systems Technology, DOI:10.1109/TCST.2014, 2309615, 2014, フルペーパー査読有.

佐藤正和, 永井和幸, 酒井 悟, 視覚を用いた多項式空間上の受動性に基づく液面振動制御実験, 計測自動制御学会論文集, Vol.50, No.1, pp.75-81, 2013, フルペーパー査読有.

前島祐三, 酒井 悟, 鉛直多関節油圧マニピュレータのパラメータ同定法とモデル検証, 計測自動制御学会論文集, Vol.50, No.1, pp.91-100, 2013, フルペーパー査読有. 酒井 悟, 油圧アームのパラメータ同定法とポートハミルトン形式の新しい機械力学, 日本フルードパワーシステム学会誌, 44, E1-E5, 2013, フルペーパー査読有.

Kenji Fujimoto, Satoru Sakai, Toshiharu Sugie, Passivity based control of a class of Hamiltonian systems with nonholonomic constraints, Automatica, Vol.48, No.12, pp.3054-3063, 2012, フルペーパー査読有.

〔学会発表〕(計5件)

Satoru Sakai, Casimir based fast computation for hydraulic robot optimizations, Proc. IEEE/RSJ IROS (IROS2013), pp.2874-2881, 2013/11-05, Tokyo, Japan, フルペーパー査読有.

Ito Miki, Satoru Sakai, A Design and Analysis of Casimir Based Impedance for Experimental Hydraulic Arms, Proc. of SICE (SICE2013), pp.2172-2173, 2013/09-17, Nagoya, Japan, フルペーパー査読有.

Kazuyuki Nagani, Satoru Sakai, A Visual Feedback Design on Matrix Space for a Liquid Sloshing Experiment, Proc. of SICE (SICE2013), pp.2088-2093, 2013/09-17, Nagoya, Japan, フルペーパー査読有.

Satoru Sakai, Fast Computation by Simplifications of a Class of Hydro-Mechanical Systems, Proc. of IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control (IFAC LHMNC2012), pp.7-12, 2012/08-29, Bertinoro, Italy, フルペーパー査読有.

Satoru Sakai, Stefano Stramigioli, Casimir Based Impedance Control, Proc. of IEEE International conference on Robotics and Automation (ICRA2012), pp.1384-1391, 2012/05-15, Minnesota, USA, フルペーパー査読有.

〔産業財産権〕

出願状況（計 1 件）

名称：鉛直多関節油圧マニピュレータのパラメータ同定法、同定装置および同定用プログラム

発明者：酒井 悟，前島祐三

権利者：信州大学

種類：特許

番号：特願 2013-215178 号

出願年月日：2013/10/16

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://soar-rd.shinshu-u.ac.jp/profile/ja.upymghye.html>

6．研究組織

(1)研究代表者

酒井 悟(SAKAI, Satoru)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号：90400811