

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420173

研究課題名(和文) 多自由度油圧アームの新しい表現に基づく高速動力学計算と全エネルギー制御

研究課題名(英文) New modeling, fast dynamics simulation, and total energy control of N-DOF hydraulic arms

研究代表者

酒井 悟 (SAKAI, Satoru)

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：90400811

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：油圧ロボットには、電動ロボットと比較して、高い出力荷重比など複数の利点があるため、建設、農業、災害救助、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。経験に基づくモデルフリー制御だけではなく、事故の合理的な防止・調査や長期的なコストなどの観点から、モデルベース制御が必要かつ重要である。

研究代表者が過去に開発した高速計算モデリングに対して、理論的・実験的側面から改良を加えた新しいモデリングを提案して、全エネルギーを考慮した機構解析のための順動力学計算の大幅な高速化、および、機械摩擦と外部漏れの増因となる和圧の抑制機能を有する非線形位置制御などが達成できることを数値的・実験的に示した。

研究成果の概要(英文)：Hydraulic robots are superior to electric robots with respect to the power to weight ratio. It is strongly expected that hydraulic robots achieve higher control performance in the field of construction, agriculture, rescue, demining, and so on. In addition to model free control, model based control should be established as a set of methodologies to guarantee the safety and to reduce the development cost.

In this project, modeling for hydraulic robots is our first focus. The old version of our modeling is updated in terms of control theory and control experiment. Numerically and experimentally, it is confirmed that the new version achieves a much faster forward dynamics computation taking the total energy into account, and also a very new position control with the sum of pressures suppression by which the mechanical frictions and the external leakages are reduced.

研究分野：油圧ロボットのモデルベース制御

キーワード：油圧ロボット 動力学 モデリング 数値シミュレーション 制御 制御理論 機械力学 最適化

1. 研究開始当初の背景

油圧ロボットには、電動ロボットと比較して、出力荷重比が高いなど複数の利点があるため、建設、農業、災害救助、地雷除去における高度な作業支援が期待されている。経験によるモデルフリー制御だけでなく、事故の合理的な事前防止と事後調査や長期的な開発コストなどの観点から、油圧ロボットのモデルベース制御は必要かつ重要である。本研究を含む全体構想は、既存の制御理論の限界を超えるための、油圧ロボットに固有の構造的特徴を踏まえた広義のモデルベース制御の体系化（モデリング、制御系設計解析、数値シミュレーション、実装実験の各段階を接続可能とすること）である。

2. 研究の目的

全体構想の前半段階として、本研究ではモデリングと数値シミュレーションの基盤を重点整備する。一般に油圧ロボットは、複雑な非線形性と高次元のパラメータ空間を有するため、従来モデリングだけでは、アーム・油圧回路・エネルギー源を厳密に考慮した全身モデルの構築が非常に困難となる。本研究の目的は、研究代表者が過去に開発した高速計算モデリング（改良前のモデリング）に対して、理論的側面と実験的側面の双方から改良した新しいモデリングを提案して、全エネルギーを考慮した高速計算（機構解析）と制御器設計にて評価することである。

3. 研究の方法

[S1]高速計算モデリングの改良：

研究代表者が過去に開発した高速計算モデリングに対して、理論的側面から

[S1-1]状態空間における厳密な簡単化、

[S1-2]パラメータ空間における厳密な簡単化（特殊な無次元化）、
 についての改良を提案する。さらに、実験的側面から

[S1-3]オンラインパラメータ同定法、

[S1-4]非線形静的要素（摩擦要素および流量ゲイン要素）の入出力同定法

についての改良を提案する。同時に、[S1-3][S1-4]にて提案された新しいモデリングを数値的・実験的に評価する。

[S2]高速計算（機構解析）：

パラレル回路またはタンデム回路を有する機構解析に応用するための全エネルギーを考慮した順動力学計算の高速化を実現して、[S1-1][S1-2]にて提案された新しいモデリングを数値実験的に評価する。

[S3]制御器設計：

全エネルギーを考慮した新しい非線形位置制御器と新しい非線形力制御器を設計して、[S1-1][S1-2]にて提案された新しいモデリングを数値的・実験的に評価する。

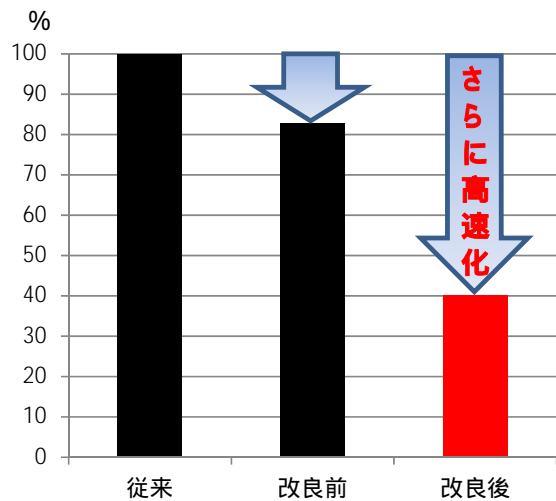


Figure 1 順動力学計算の高速化(油圧シリンダの場合)

4. 研究成果

[S1] 高速計算モデリングの改良：

[S1-1]状態空間における厳密な簡単化

4次元の状態を有するオリジナルの動特性に対して、従来の高速計算モデリングでは適用されなかった新しいカシミール関数を用いた座標変換と適当な入力変換を施し、位置と速度（運動量）と適当な力（新しいカシミール関数）の3次元の状態を有する動特性（以下、上流動特性）、および、上流動特性に対して影響を与えることの無い1次元の動特性（以下、下流動特性）から構成される新しい表現（カスケード表現とは異なる）を近似することなく厳密に導出した。

つまり従来の制御器設計問題では下流動特性を厳密に無視でき、油圧アームの低次元化モデルの構築が可能となった。

[S1-2]パラメータ空間における厳密な簡単化（特殊な無次元化）

8次元(10次元)のパラメータを有するオリジナルの動特性に対して、パラメータ構造を保存する特殊な時間変換と状態変換と入力変換の組を施して、3次元(5次元)のパラメータを有する無次元動特性を厳密に導出した(雑誌論文)。

つまり一般性を失うことなく5次元のパラメータの全てを1と仮定した制御器設計、数値シミュレーションなどが可能となった。

[S1-3]オンラインパラメータ同定法

8次元のパラメータを有するオリジナルの動特性に対して、実時間（オンライン）で入力と出力から物理パラメータを同定する手法（グレーボックスモデリング）を提案して、提案手法の有効性を多自由度油圧アーム実機を用いて数値的・実験的に示した(雑誌論文)。

つまり慣性、摩擦係数（粘性摩擦係数とクーロン摩擦係数）、体積弾性係数、流量係数（CAP, ROD）、漏れ係数（CAP, ROD）を運動する油圧アームから時々刻々に同定する（運転者に画面表示する）ことが可能となった。

[S1-4]非線形静的要素の入出力同定法

同一初期状態と同一入力のもとで計算出力と実験出力の差が大きな傾向を示す摩擦要素と流量ゲイン要素について、空間対称性を有する特殊なWalsh基底による行列空間上の最適化を、産業界で多用されるルックアップテーブルに施す新しい入出力同定法(ブラックボックスモデリング)を提案して、提案手法の有効性を多自由度油圧アーム実機を用いて実験的に確認した(雑誌論文, 雑誌論文 S. Sakai et al.: IEEE Transactions on Control Systems Technology, Conditionally Accepted, 2017)。

つまり計算機の記憶容量に応じて、厳密な物理モデリング(ホワイトボックスモデリング・グレーボックスモデリング)が非常に困難な流量ゲイン要素の出力を油圧アームの状態から再現することが可能となった。

[S2]高速計算(機構解析):

研究代表者が過去に開発した高速計算モデリング(改良前のモデリング)と[S1-1][S1-2]によるモデリング(改良後のモデリング)を機構解析(20-sim ver.4.1)のための順動力学計算時間を用いて評価して、同一の計算結果を達成しながら大幅な高速化が達成されることを数値実験的に確認した(油圧シリンダの場合,改良前のモデリングでは約80%,改良後のモデリングでは約40%の短縮, Figure 1)。

[S3]制御器設計:

[S1-1][S1-2]によるモデリング(改良後のモデリング)を[S1-3]で同定した多自由度油圧アーム実機に適用して、全エネルギーを考慮した位置制御器を設計して、機械摩擦と外部漏れの増加要因となる和圧を抑制しながら目標位置に整定する非線形位置制御性能、指数安定化を達成する非線形力制御性能が達成されることを多自由度油圧アーム実機(7Mpa, Figure 2)を用いて数値的・実験的に確認した(学会発表)。

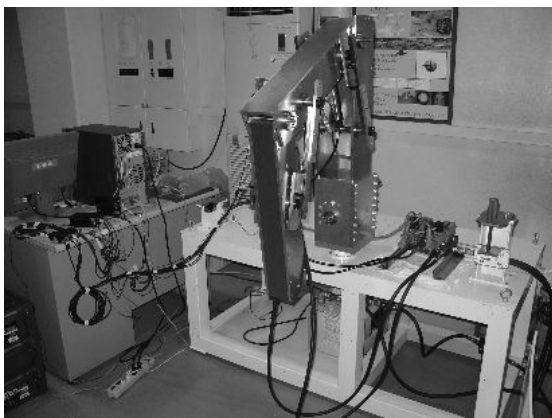


Figure 2 多自由度油圧アーム実機

以上、油圧ロボットのモデルベース制御の体系化を全体構想として、モデリングと数値シミュレーションの基盤は、一部を残して、整備された。残る一部についても、解析と追加実験などの補完は一定期間の後に終了すると考えられる。その後、全体構想の後半段階として、特に[S3]の成果を起点とした制御系設計解析の基盤を重点整備することが課題となる。そこでは、油圧ロボットの動特性を微分幾何学的・理論物理学的な観点から調べるに際して、[S1-1][S1-2]の厳密な単純化が油圧ロボットに固有の構造的特徴を踏まえた強力なツールとして期待される。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計5件)

Satoru Sakai, A structure preserving nondimensionalization of hydraulic rotational joint, Proc. of IEEE ICRA (ICRA2017), pp.26-32, フルペーパー査読有. 松本優司, 酒井 悟, 油圧アームのオンライン物理パラメータ同定, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.47, No.5, pp.31-37, 2016, フルペーパー査読有.

Satoru Sakai, Yusuke Nabana, Optimal Non-Bernoulli modeling method for experimental hydraulic robots, Proc. of IEEE/RSJ (IROS2016), pp.2954-2959, フルペーパー査読有.

Satoru Sakai, Yuzo Maeshima, A new method for parameter identification for N-DOF hydraulic robot, Proc. of IEEE ICRA (ICRA2014), pp.26-32, フルペーパー査読有.

Satoru Sakai, Masayuki Ando, On the visual systems & control on matrix space, Proc. of IEEE CDC (CDC2014), pp.2173-2178, フルペーパー査読有.

(学会発表)(計10件)

Hiroki Momoshima, Yusuke Nabana, Satoru Sakai, A force control of hydraulic arms with unknown bulk modulus, SICE ISCS2017, pp.884-887, 2017/3/6-9, Okayama, Japan.

Cheng Hongsheng, Satoru Sakai: On the Fast Computational of Hydraulic Dynamics with Pipeline Effects, SICE AC2016, pp.87-89, 2016/9/20-23, Tsukuba, Japan.

Yusuke Nabana, Satoru Sakai, On the Non-Bernoulli Modeling of Experimental Hydraulic Robots, SICE AC2016, pp.1610-1612, 2016/9/20-23, Tsukuba, Japan.

Shunsuke Kobashi, Satoru Sakai. A Camera based basis generation on polynomial space for non-planar sloshing. SICE AC2016, pp.1607-1609, 2016/9/20-23, Tsukuba, Japan.

Takumi Nishiwaki, Toshinori Shintani, Satoru Sakai, On the Casimir based position

and total pressure control of hydraulic arms, SICE ISCS2016, pp.1178-1179, 2016/3/7-10, Nagoya, Japan.

Yuji Matsumoto, Satoru Sakai: On the on-line parameter identification for 1-DOF hydraulic arms, SICE ISCS2015, pp.98-101, 2015/3/4-7, Tokyo, Japan.

Toshinori Shintani, Miki Ito, Satoru Sakai: On the pick-and-place by Casimir based impedance control for 1-DOF hydraulic arms, SICE ISCS2015, pp.102-106, 2015/3/4-7, Tokyo, Japan.

Ando Masayuki, Satoru Sakai, A modeling and visual feedback on matrix space without geometric feature extraction, SICE AC2014, pp.1372-1377, 2014/9-12, Hokkaido, Japan.

〔その他〕

ホームページ等

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

6 . 研究組織

(1)研究代表者

酒井 悟(SAKAI, Satoru)

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：90400811