

科学研究費補助金研究成果報告書

平成22年5月29日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19760148

研究課題名 (和文) 多自由度油圧アームの受動性に基づく制御と設計に関する研究

研究課題名 (英文) Passivity based control and design of hydraulic robot manipulators

研究代表者

酒井 悟 (SAKAI SATORU)

千葉大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90400811

研究成果の概要 (和文) : 油圧ロボットアームの受動性に基づく制御と機構に関する新しい制御理論と実験手法を提案し, 有効性を示した. 主結果として, 1) 有限次元連続式を一般化した一般化連続式を提案し, 油圧ロボットアームの厳密な物理モデルと新しい正準形を導出した. 2) ループの開閉, 遠心・コリオリ力の有無を選択できる新しい油圧ロボットアームの標準試験機を提案した. 3) 積分制御, 適応制御, 出力フィードバック制御など動的な受動性に基づく制御手法を新たに提案した.

研究成果の概要 (英文) : Passivity based control and design of hydraulic robot manipulators are studied theoretically and experimentally. 1) The continuity law is generalized as a new dynamic constitutive law in order to derive a new canonical expression for hydraulic robot manipulators. 2) A new standard experimental setup is proposed to switch between open link and closed link and also to select joint-interferences such as centrifugal/Coriolis effects. 3) A new passivity based dynamic controls are proposed to achieve disturbance rejection, adaptive stabilization and output feedback stabilization.

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	0	1,900,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,100,000	360,000	3,460,000

研究分野：ロボット工学

科研費の分科・細目：機械工学 機械力学・制御

キーワード：油圧ロボット 非線形制御 モデリング 機構設計 ロバスト制御 ハミルトン系 受動性 構造可変ロボット

1. 研究開始当初の背景

自然環境にて作業する分野 (農業, 建設, レスキュー, 地雷撤去) では出力荷重比の高い油圧系の作業機が多く用いられ, 既に手動作

業機, 1自由度の自動作業機は広く普及している. しかし, 多自由度の自動作業機である油圧ロボットは, 盛んに試作されているものの [1, 2], 電動ロボットにはない問題を有す

るため、普及に至っていない。具体的には次の3つの問題がある。

そこで、力学分野・制御理論分野にて近年進展が目覚ましい陰的ポートハミルトン系の枠組[5]に着目する。陰的ハミルトン系とは、ロボットの把持・操り、歩行の研究にて現在も重要視されている「受動性に基づく制御」のために必要な力学構造が抽出された物理モデルである。陰的ポートハミルトン系の利点として、1)記述能力が高い物理モデリング 2)ロバスト非線形な制御(受動性に基づく制御) 3)制御系との整合性が高い学習 が明らかとなりつつあり、上記の問題ABCとの相性は一見良い。ところが、陰的ポートハミルトン系の理論は完成してはおらず、多自由度油圧アームのような流体-機械システムのクラスの研究は未だほとんどない。加えて、多自由度油圧アームの制御系設計だけでなく機構設計にも問題を設定した研究は無い。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、多自由度油圧アームについて次の4点を明らかにすることである。

[S0] 陰的ポートハミルトン系としての物理モデルと構造的性質

電動アームには無い「油の分流による軸間干渉」を考慮し、入出力と zero-dynamics を解析する。

[S1] 受動性に基づく動的制御手法と制御性能 (←B)

応募者の手法を適用・発展させ、積分器をもつ安定化制御、適応軌道追従制御などを初めて与える。また、ロバスト安定性だけでなくロバスト制御性能をシミュレーションと実験によって評価する。

[S2] 反復学習制御手法 (←C)

[S1]の閉ループ系が再びポートハミルトン系となることを利用し、学習器を設計、評価する。

[S3] 機構設計の指針

[S1]の制御器と[S2]の学習器による閉ループ系の性能を機構パラメータで陽に記述し解析する。

3. 研究の方法

平成19年度の計画

1: S0を実施する。

既に、2自由度シリンダ駆動(図2, シリンダの慣性モーメントなども考慮されたパラレル機構)の場合のモデリングと数値計算結果を得ている。油圧タンク-複数スプール-

複数シリンダから構成される非線形かつ動的な入力部のDirac構造という力学構造に着目し、エネルギーの蓄積と散逸の観点から、遠心力など従来のリンク系の動的干渉だけでなく、分流による軸間干渉を考慮した物理モデルを与える。さらに、パワーポートの同定、zero-dynamicsの解析する。ここで得られたモデルは、S1とS2の安定性や性能の証明に直接使用される。

2: S1の実験準備をする。

2自由度, 7Mpaの油圧アーム(制御PC, シリンダ, 機械要素, 圧力センサ, 流量センサ)を試作する。動的干渉項の無い直交形→重力項の無い水平多関節形→垂直多関節形の順に取り組む。

3: S1を実施する。また、国内会議にて、S0の成果を発表する。

応募者が研究している動的補償器の設計手法、既存の手法を適用・発展し、積分器をもつ安定化制御器、同定が困難な摩擦係数を未知とした場合の適応軌道追従制御器を与え、数値的、実験的に評価する。線形ロバスト制御による結果などとも比較しつつ、把持動作による手先負荷の変動などを与え、特にロバスト制御性能を評価する。

(2) 平成20年度以降の計画

S2を実施する。

S0とS1の結果を用いて得られる閉ループ系の学習器の条件、逆に、学習可能なS1の制御器の条件を明らかにする。具体的には、変分対称性[11]、可逆転性[7]の存在を調べる。S1と同様に数値計算と実験により有効性を検証する。

2. S3を実施する。また、国際会議にて、S1とS0とS2の成果を発表する。

S1とS2の結果を解析し、高い制御性能や学習性能を達成するゲインと機構パラメータの条件を明らかにする。電動アームの場合(図6, [9])と同様、ゲインよりも機構パラメータの影響は大きいと予想されるが、可能な範囲で機構を再設計し、実験により検証する。

4. 研究成果

(1) [S0]

有限次元の連続式をエネルギー蓄積要素として表現する一般化連続式(入出力を有する動的な構成式)

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\text{diag}[-A_1, +A_2] \phi_d^{-1}(\bar{p})}_{\equiv g_f(\bar{p})} u_f - \underbrace{\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}}_{\equiv g} u \\ y_f = g_f(\bar{p})^T \nabla_{\bar{p}} H_f(\phi^{-1}(\bar{p})) \end{cases}$$

を提案し、従来の機械系（運動エネルギー蓄積要素とポテンシャルエネルギー蓄積要素の結合系）と結合することにより、油圧ロボットアームの物理モデルを構築した。

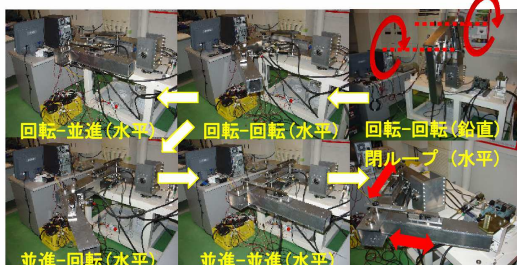
この油圧ロボットアームの物理モデルを解析すると、線形近似系だけでなく、厳密な非線形系においても陽カシミール関数が存在することから、陽カシミール関数を状態変数とする油圧ロボットアームの正準系

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{p} \\ \dot{C}_1 \\ \dot{C}_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & I & 0 & 0 \\ -I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\equiv J_{f_m}} \underbrace{\begin{bmatrix} \nabla_q H_{f_m} \\ \nabla_p H_{f_m} \\ \nabla_{C_1} H_{f_m} \\ \nabla_{C_2} H_{f_m} \end{bmatrix}}_{\equiv \nabla_x H_{f_m}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \\ g \end{bmatrix}}_{\equiv g_{f_m}} u \\ y = g_{f_m}^T \nabla_x H_{f_m} \end{cases}$$

を初めて導出した。この表現は従来の油圧ロボットアームの表現よりもシンプルであるため、制御系設計を簡単化（偏微分方程式の未知数を削減）するなどの工学的メリットがある。

(2) [S1] (前半)

油圧ロボットアームのアクチュエータはシリンダであることが多く、関節に閉ループリンク機構が存在する。また、多自由度の場合には遠心力・コリオリ力などが作用する。しかし、（電動ロボットアームでは SICE-DD アームが知られているが）油圧ロボットアームには標準的な実験装置が報告されていない。そこで、ループの開閉、関節干渉の有無を選択的に検証するための新しい油圧ロボットアーム

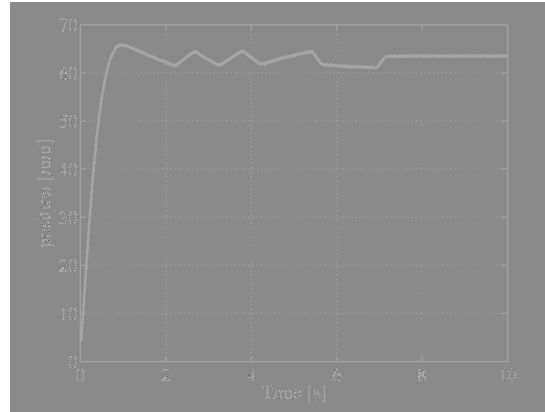


を設計し、基本的な制御性能を検証できることを確認した。提案した油圧ロボットアームを用いることで、従来は複数必要とした検証

実験を1台で実施することが可能となり、時間と労力の節約だけでなく実験の公正さが向上するという複数のメリットがある。

(2) [S1] (後半)

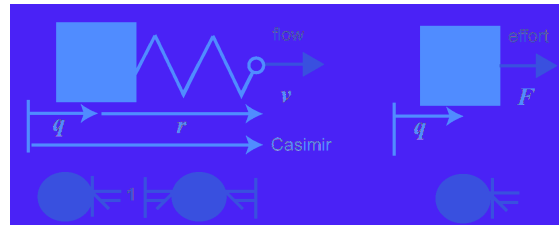
積分制御、適応制御、出力フィードバック制御などを動的な受動性に基づく制御をの



しい手法を提案し、有効性を数値シミュレーションと実験

によって検証した。

これらの手法は M1) 線形近似を介さず吸引領域が広い, M2) パラメータ同定も介さないためロバスト性が高い, M3) 閉ループ系が力学的構造を有するため、機構設計の条件導出が可能である, M4) 油圧ロボットアームだけでなく他のロボットシステム（カシミール関数を有するシステム）



にも応用可能である、という複数のメリットがある。

M4) にて応用できる他のロボットシステムのクラスが広いことが判明したこと、これまで未解決であった油圧ロボットのインピーダンス制御則を厳密かつ自然な形で導出できること、から当初予定していた S3 の研究ではなく S2 の研究をより深めることを優先した。ただし、インピーダンス制御則の導出において機構設計条件(単動シリンダよりも複動シリンダが優位)が導出されたので S4 の研究はほぼ当初の予定とおり遂行した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

①酒井 悟, 中村 安秀, 野波健藏: アク

チュエータとセンサのないロボットハンドのための入出力機構系, 日本ロボット学会誌 (Accepted).

② Kenji Fujimoto, Satoru Sakai, Toshiharu Sugie: Passivity based control of a class of Hamiltonian systems with nonholonomic constraints, Automatica (Accepted).

③ Satoru Sakai, Kenta Kuriyama, Kenzo Nonami: A novel passivity based control of active magnetic bearing systems without conventional cross-feedback, Journal of design and dynamics, Vol. 3, No. 4, pp.540-550, 2009.

④ Satoru Sakai, Michihisa Iida, Koichi Osuka, Mikio Umeda: Design and control of a heavy material handling manipulator for agricultural robots, Autonomous robots, Vol. 25, No.3, pp.189-204, 2008.

⑤ 酒井 悟: 移動機能を有する農業ロボットのための理論作業量の拡張, 農業機械学会誌, Vol. 70, No.6, pp.85-89, 2008.

[学会発表] (計7件)

① Sakai Satoru, Koichi Osuka: Port-based modeling and adaptive gravity compensation of N-DOF hydraulic robots, Proceedings of International Symposium on Mobiligence, N-416/発表総数 75 件, 2009 (Mobiligence09 at Awaji, Japan).

② Sakai Satoru, Stefano Stramigioli: A passivity based integral action of robotic manipulators using Casimir function, Proceedings of International IFAC Symposium on Robot Control, T1A4/発表総数 154 件, 2009 (IFAC_SYROCO09 at Gifu, Japan).

③ Sakai Satoru, Mikio Umeda: On the application of theoretical field capacity, Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, Workshop on autonomous agriculture, WWH-2/発表総数 5 件, 2009 (ICRA09 at Kobe, Japan). ※

④ Satoru Sakai, Stefano Stramigioli: Passivity Based Control of Hydraulic Robot Arms Using Natural Casimir Functions: Theory and Experiments, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 538-544, 2008 (IROS08 at Nice, France).

⑤ Satoru Sakai: Partial stabilization of port-Hamiltonian systems with natural Casimir functions, Proceedings of IFAC, pp. 2791-2796, 2008 (IFAC08 at Soul, Korea).

⑥ Satoru Sakai, Stefano Stramigioli: Port-Hamiltonian approaches to motion generation for mechanical systems,

Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1948-1953, 2007 (ICRA07 at Rome, Italy).

⑦ Satoru Sakai, Yasuhide Nakamura, Kenzo Nonami: A pick-and-place hand mechanism without any actuators and sensors, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.4064-4070, 2007 (ICRA07 at Rome, Italy).

[図書] (計2件)

① Satoru Sakai: Cutting Edge Robotics 2009, Passivity based control of hydraulic robot arms using natural Casimir functions, 2009, (Accepted), ISBN 978-3-902613-46-2, In-tech.

② Satoru Sakai: Ferroelectrics, An exact impedance control of DC motors using natural Casimir functions, 2010, (Accepted) ISBN-13: 978-953-7619-X-X, In-tech.

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://mec2.tn.chiba-u.jp/~satoru/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 悟 (SAKAI SATORU)

千葉大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 90400811