報告日　２０１３年（平成２５年）８月３０日

報告者　信州大学　工学部　准教授
（前　千葉大学　工学部　助教）
酒井　悟

１．　研究概要

(和文)

(1)課題名（日本語）

力センサレス油圧作業機のための力制御サーボ機構の設計条件の導出と評価

(2)研究者氏名

酒井　悟　信州大学　工学部　准教授

(3)研究概要（日本文）

油圧作業機では手先発生力が大きいため，環境反力などの手先外力を直接計測することは困難である．そこで本研究では、油圧作業機の手先に力センサを実装することなく，運動する油圧作業機の力を推定して制御する基板技術を開発した．前半では非線形モデルに基づく手先力制御法を開発する．後半では体積弾性係数・流量係数などの未知パラメータの同定を介して手先外力を推定する手法を開発する．開発された基板技術は多自由度油圧アームによる作業性能の向上に有用である．

(4)キーワード

油圧ロボット，力制御，力推定，パラメータ同定

(英文)

(1) Research title

A nonlinear estimation based force control of hydraulic arms without force sensor

(2) Name of researcher with title of position

Satoru Sakai, Associate Professor, Shinshu University

(3)Summary

This research has developed a new technology to estimate and control the end-point force of nonlinear hydraulic arms without the force sensor. The technology is useful to improve the working performance of multi-degree nonlinear hydraulic arms.

(4)Key Words

hydraulic robots, force control, force estimation, parameter identification

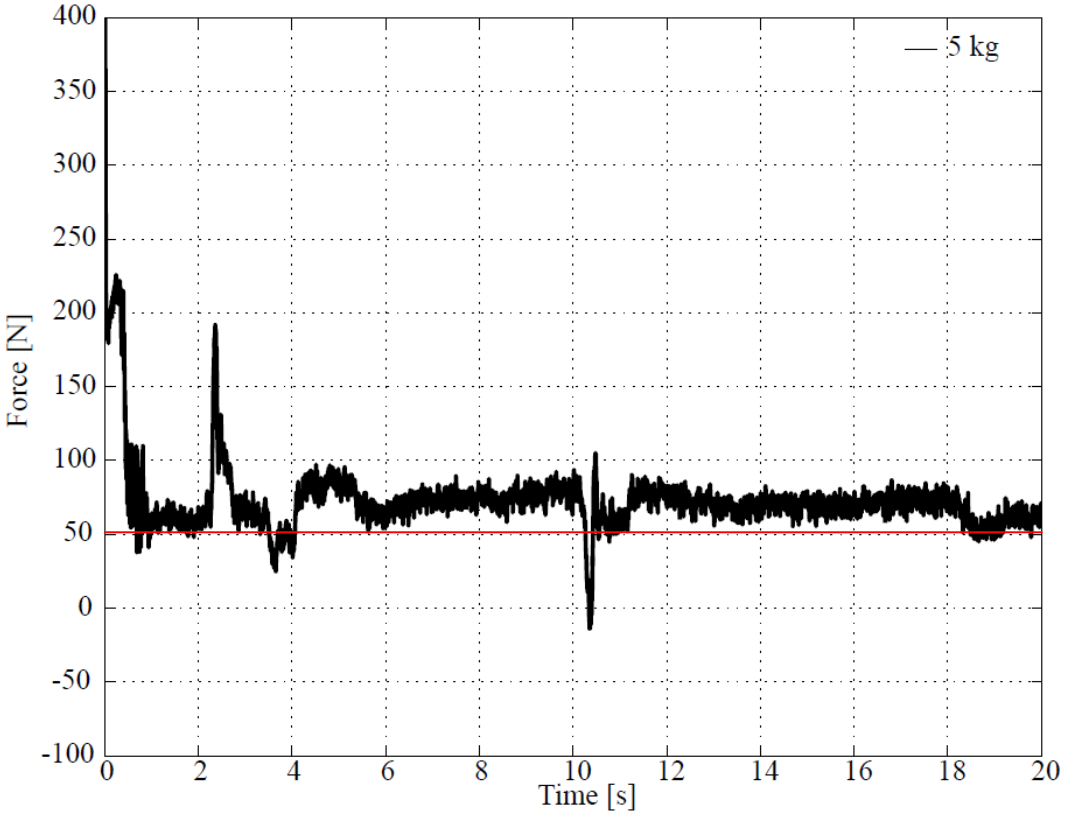
２．本研究の意義・特色

電動マニピュレータと異なって油圧マニピュレータでは手先発生力が大きいため，環境

反力などの手先外力を直接計測することは困難である．しかし，手先力の制御技術は建設機械・農業ロボットなどの作業性能の向上にとって重要な意義がある．そこで，手先外力を実時間で推定して，手先力を制御する手法を開発する．前半では非線形モデルに基づく手先力制御法を開発する．後半では体積弾性係数・流量係数などの未知パラメータの同定を介して手先外力を推定する手法を開発する．前半の手法と後半の手法を組み合わせることで手先外力を直接計測することなく手先力を制御する点，線形システムではなく物理システム（ポートハミルトン系）の表現を用いて制御器を設計するため，制御器の物理的解釈（サーボ機構としての解釈）が可能である点が本研究の特色である．

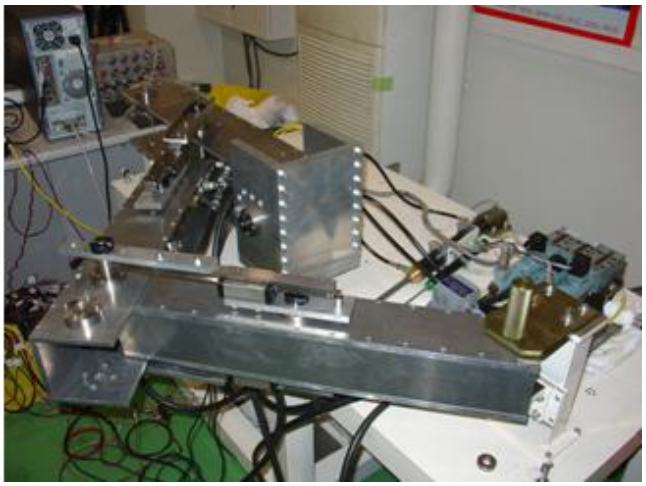
３．実施した研究の具体的内容、結果（本文）

手先外力を直接計測することなく推定して手先力を制御する手法を提案する．具体的には，パラメータ同定法を適用して慣性項，遠心力・コリオリ力項，重力項，関節摩擦項，シリンダ駆動項を力センサを装着することなく計算して，手先ヤコビアンを用いて手先外力を推定する．手先外力の推定値を前提に非線形Ｐ制御器の構造を有する手先力制御器の出力を計算して油圧作業機に入力する．以下では，まず（手先外力の真値を前提とする）手先力制御器について前半で概説して，次に手先力の推定について後半で概説する．



提案する力制御手法による実験結果（力目標値=5.0 kg）

前半では非線形モデルに基づく手先力制御法を開発する．具体的には，油圧作業機の非



試験機

（回転関節と並進関節の切替、鉛直と水平の切替、開ループと閉ループの切替が可能であるため、状態方程式の各項を系統的に考慮した同定実験や制御実験が可能である。）

線形モデルをポートハミルトン系として表現して，非線形Ｐ制御器によって手先力を目標値に漸近的かつ大域的に収束させる制御法を開発する（詳細は文献[1]を参照）．油圧作業機は一般の非線形制御系として表現されると特殊な構造的特徴を活用することがないため計算量が増大したりロバスト性や吸引領域の大きさが低下したりという問題がある．そこで油圧作業機のための非線形力制御を検討した結果，

１）油圧作業機を物理制御系（ボンドグラフの構造を抽出した系，ポートハミルトン系）として表現すると，DC モータに共通した構造が油圧作業機に存在すること（逆起電力に相当する「逆起流力」を定義することができること）

位置・運動量・シリンダ駆動力を状態とする新しい座標系

運動エネルギーと内部エネルギーの和

$$\begin{bmatrix} \dot{q_m} \\ \dot{p_m} \\ \dot{F} \\ \dot{F^{\perp}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & J_{23} & J_{24} \\ 0 & -J_{23} & 0 & 0 \\ 0 & -J_{24} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial H_{fm}}{\partial q_m}^{\mathrm{T}} \\ \frac{\partial H_{fm}}{\partial p_m}^{\mathrm{T}} \\ \frac{\partial H_{fm}}{\partial F}^{\mathrm{T}} \\ \frac{\partial H_{fm}}{\partial F^{\perp}}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g_a \\ g_b \end{bmatrix} x_v$$

スプール位置を入力とする（建設機械に近い）モデル

where

逆起電力の油圧バージョン（**逆起流力**と定義・命名する）

$$\begin{cases} J_{23} = b(A_1^2 + A_2^2)/V \\ J_{24} = b(A_1^2 - A_2^2)/(2VA_1A_2) \\ g_a = A_1g_3 - A_2g_4 (\geq 0) \\ g_b = g_3/(2A_2) + g_4/(2A_1) \end{cases}$$

２）手先外力が存在する環境下において，圧力信号を用いた特殊な構造の静的なフィードバック（Ｐ制御型の非線形フィードバック）のみで任意の力目標値を大

域的に漸近安定化する力制御が可能であること

が明らかとなった.

後半では体積弾性係数・流量係数などの未知パラメータの同定を介して手先外力を推定する手法を開発する．具体的には，油圧作業機の非線形モデルをパラメータに関する線型方程式として表現して，射影定理から運動方程式の（手先外力以外の）各項を実時間で計算することによって手先外力を計算する推定法を開発する（詳細は文献[3]を参照）．油圧作業機は非線形制御系であるためブラックボックスモデリング（周波数応答）から物理パラメータを再現することはできないという問題がある．また油圧作業機を分解して物理パラメータを１つ１つ計測するホワイトボックスモデリングもコストの観点から現実的ではないという問題もある．そこで油圧作業機のためのグレーボックスモデリングを検討した結果,

３）機械部分とは異なって，流体部分については物理パラメータである体積弾性係数・流量係数を同定結果から再現することが可能であること

４）多自由度油圧作業機の場合，従来の逐次同定法における一意性の問題を回避することが可能であること

が明らかとなった.

４．本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

酒井　悟　信州大学　准教授

５．研究実施時期

２００９年（平成２１年）４月１日から　２０１０年（平成２２年）５月２５日

６．本研究に関連して発表した主な論文等

[1] Satoru Sakai, Stefano Stramigioli: Passivity Based Force Control of Hydraulic Robots. Proc. of IFAC SYROCO, pp.20-15, 2009.

[2] Satoru Sakai: An impedance control for simplified hydraulic model with Casimir functions. Proc. of SICE, pp. 2313 – 2314, 2010.

[3] 前島，酒井，中西，大須賀: 油圧アームの基底パラメータ同定法とモデル検証，日本フルードパワー学会誌，Vol.43, No.1, pp.16-21, 2012. (学術論文賞)

[4] Satoru Sakai: Fast Computation by Simplifications of a Class of Hydro-Mechanical Systems, Proc. of IFAC LHMNL, pp.7-12, 2012.

[5] 酒井: 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, Vol.44, No.E1, pp.E21-25, 2013.

[6] Satoru Sakai: Casimir based fast computation for hydraulic robot optimizations, Proc. of IEEE IROS, 2013 (Accepted).

[7] 前島，酒井: 鉛直多自由度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（Revised).

７．内外における関連研究の状況

下記の論文を含めて，継続的に国内外から関連研究が報告されている状況である．

北川・呉: 位置・力複合制御機能を内蔵した油圧シリンダに関する研究．日本フルードパワー学会誌，E76. 第 38 巻, 2007.
Niksefat, N: Designing robust force control of hydraulic actuators despite system and environmental uncertainties, IEEE Control Systems Magazine, Vol.21, No.2, pp.66 – 77, 2001.

８．今後の発展に対する希望

手先力制御器と手先力推定器の基板技術について一定の進展を得た．一方，（当初は予想しなかった成果として）油圧作業機の新しい表現の発見[4,6]に至った．現在は新しい表現を前提にして，開発した制御器と推定器の改良を検討している．