

報告日：2012年(平成24年)6月29日

報告者：早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科 助手

亀崎 允啓

1. 研究概要

(和文)

(1) 課題名

油圧センサを用いた建機マニピュレータのシリンダ外力検出システムの基礎的研究

(2) 研究者氏名

亀崎允啓, 早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科 助手

(3) 研究概要

社会的要求が高まりつつある建設作業機の複雑・高度作業へ適応には、搭載性および実用性を考慮した汎用的な負荷検出技術が必要になる。まず、搭載性の観点から、現状の技術で利用可能な油圧センサを用いた外力負荷検出を行うこととした。一方、油圧センサを用いた負荷検出においては、無負荷状態でも大きな変動圧力が発生するという建設機械特有の油圧・機械システムが大きな問題となる。そこで、実用性の観点から、油圧シリンダに生じる外力以外の支配的な誤差負荷成分を複雑なモデリングを行わずに簡易的な方法で同定および除去する外力検出システムの開発を行った。実機を使った実証実験の結果、外力が適切に検出できることが分かった。

(4) キーワード

建設機械, 外力検出, 油圧シリンダ, 油圧センサ

(英文)

(1) Research title

Fundamental Research on Cylinder External Force Detection using Hydraulic Sensor for Construction Manipulator

(2) Name of researcher with title of position

Mitsuhiro KAMEZAKI, Research Associate, Department of Modern Mechanical Engineering, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

(3) Summary

A force detecting system considering the ease of implementation and practicality is inevitably required for adaptation of construction machinery to more advanced tasks needed socially. To satisfy the ease of implementation, our system adopts a hydraulic sensor as a force sensor. However, hydraulic pressure largely and dynamically changes in even no-load conditions, owing to the peculiar hydromechanical system in construction machinery. To satisfy the practicality, our system focuses on the dominant error-force components and identifies and removes them without complex modeling. Results of experiments conducted by using

an instrumented hydraulic arm indicated that our proposed system adequately detected external force applied to the hydraulic cylinder.

(4) Key Words

Construction machinery, external force detection, hydraulic sensor, hydraulic sensor

2. 本研究の意義・特色

本研究では、建機マニピュレータに搭載された油圧シリンダに発生する外力以外の誤差成分を除去する実用的な方法論について検討を行った。具体的には、油圧センサに生じる支配的な負荷要因である自重力 F_{sw} 、駆動力 F_{dr} 、振動成分 F_{os} を同定する方法論について検討している。これらの負荷要因はそれぞれ異なる発生メカニズムをもつため、同定の難易度が互いに異なることが予想される。自重力のみが生じる静止状態は、作動油流体の流れがないため静力学のみを考えればよいが、駆動力が生じる運動状態においては、非線形性などを有する油圧システムの動特性同定に対する実用的アプローチが重要となる。さらに、大きな振動成分を生じる過渡状態では、極めて複雑な油圧機械系の挙動を直接モデリングしない簡易的な同定手法が有用になると考えられる。

以上の同定における問題点から、油圧システム特性をブラックボックスとして扱い、同定難易度に応じた適切な同定手法を適用することで、全体システムとしての実装性および精度向上を図るのが本システムの特色である。具体的には、マニピュレータの運動状態を静止、等速度運動、加速度運動状態の3状態に分類し、各運動状態で生じる負荷成分の同定難易度に応じて、理論モデルを用いた静力学計算による自重力同定、実測値を用いた駆動力推定、波形分析に基づくフィルタリングを用いた振動成分除去を行った。本手法は、油圧駆動型多関節マニピュレータを有する建設機械全般に適用可能な負荷検出基盤技術を目指すものであり、この基盤技術を適切に形成していくことで、建設機械における機能システムの高度化（過負荷検出による危険回避支援や適切な力作業支援など）の促進をもたらし、油圧機器の利用範囲および機能の拡張に貢献する意義の高いものと考えられる。

3. 実施した研究の具体的内容、結果 (本文)

油圧シリンダに生じる外力負荷の実用的計測手法についての基礎開発が本研究の目的である。建設作業機のような産業分野における開発では、計測精度やロバスト性などの検出性能はもちろんのこと、(i)低コスト、(ii)広い適応範囲、(iii)簡素な検出方法が必要となる。はじめに、(i)および(ii)を考慮し、油圧機器に多く利用され実装の容易な油圧センサを負荷計測センサとして用いることとした。しかしながら、油圧センサは、慣性力、コリオリ・求心力、重力、摩擦力などの外力以外の誤差負荷成分も同時に検出してしまう。これらの誤差成分は関節の駆動状態と関連しており、油圧・機械システムの非線形性や不確実性から同定の難しさがそれぞれ異なる。そこで、(ii)および(iii)を満たすために、操作入力によって分類された支配的な誤差成分: 自重力 F_{sw} (静止状態)、シリンダ駆動力 F_{dr}

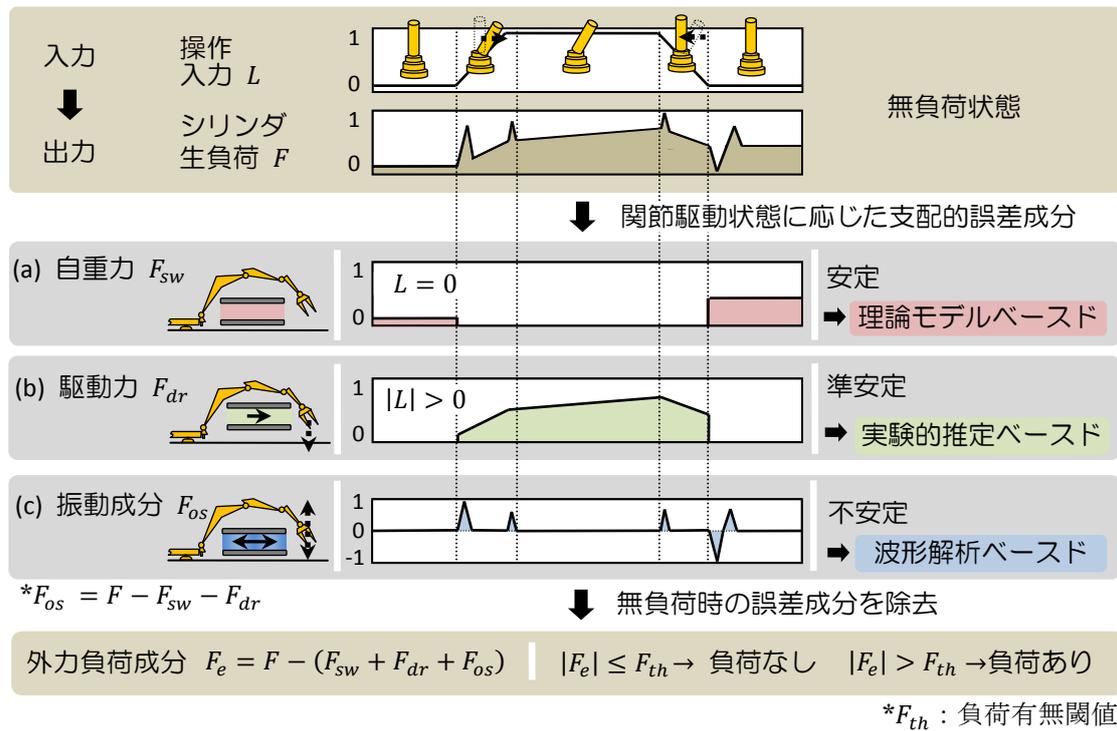


図1 誤差負荷成分の実用的除去戦略

(等速度運動状態)、振動成分 F_{os} (加速度運動状態) に着目し、複雑なモデリングを避けるため、それぞれの負荷要因に適した簡易手法：理論モデル、実験値推定、波形フィルタリングを用いてそれぞれ同定・除去を行った (図1)。以下に、具体的な手法および実験結果について概説する。

3.1 誤差成分除去手法の開発

外力負荷有無検出においては、有無閾値の低減 (感度向上) と実用性 (簡易性・搭載性) の両立が不可欠である。この点を踏まえ、各負荷要因の同定手法について検討した。

(a) 自重力：任意の姿勢におけるシリンダにかかる自重力は、静力学計算によって容易に算出することが可能である。シリンダストローク情報から得られる マニピュレータ姿勢、CAD 情報から得られる各リンクの質量、重心位置を用いることで、当該姿勢におけるシリンダ自重力を理論的に算出した。以上より、自重力は $F_{sw} = f_{sw}(q)$ で算出される。 q は関節角度、 f_{sw} はリンクゲインである。

(b) 駆動力：駆動力はシリンダの内部摩擦によるものが支配的であるが、他にもシリンダクッションや継手形状、さらには経年劣化などが大きく影響するため、理論的な駆動力導出では大きな同定誤差が避けられない。そこで、複数回の試技データをもとに実験的に駆動力同定を行う方法論が有用と考えられる。本研究では実用的かつ簡易的な同定手法として、レバー指令値・マニピュレータ姿勢 (入力) とシリンダ発生力 (出力) の関係性のみを規

定し、できる限り少ない試行回数で同定する方法論を開発した。一般的な建機マニピュレータには、根元から順にブーム、アーム、バケットと呼ばれるシリンダが搭載されている。バケットシリンダの計測を行う場合、アーム関節当該位置（4パターン）においてバケット関節を同一指令（4パターン）にて10往復ずつ可動角全域で動作させる。この16個のデータ間の線形補間および多項式補間により、全領域における全レバー指令値における駆動力を同定する。以上より、駆動力は $F_{dr} = f_{dr}(L, \theta, \varphi, \psi)$ で算出される。L はレバー操作量、 f_{dr} は補関数、 (θ, φ, ψ) はそれぞれバケット、アーム、ブーム関節の角度である。

(c) 振動成分：加速度運動状態において生じる大きな振動成分は、理論計算はおろか実測による同定も難しい。そこで、負荷波形処理により振動成分を除去する方法を試みる。加減速時にのみ発生し、短時間で正負が変わる大きなインパルス状の波形という特徴量に着目した。瞬時的という特徴から負荷の微分値、振動的という特徴から負荷波形の振動周期をそれぞれパラメータとして設定した。等速運動時の実験結果から、負荷微分値 5000 N/s 以上、振動周期 0.8 秒以下となる負荷波形を慣性力成分として扱うこととした。このフィルタ処理により、回路内で生じるサージ圧やインパルス状の外乱などの慣性力以外の誤差要因に対しても除去が可能になると考えられる。以上より、振動成分は $f_{os} = f(dF/dt, T_{os})$ で算出される。 dF/dt は負荷の微分値、 T_{os} は減衰時間である。

油圧センサより算出された生負荷 F から、同定された自重成分 F_{sw} 、駆動力成分 F_{dr} を除去した成分を F_{tmp} とする。この F_{tmp} に関してフィルタ f_{os} を用いて振動成分を除去した残りの成分が外力 F_e となる。よって、油圧シリンダに生じる外力負荷成分は、 $F_e = f_{os}\{F - (F_{sw} + F_{dr})\}$ により算出可能となる（図1）。

3.2 実証実験

実機を用いて開発した外力検出システムの実証実験を行った。はじめに、無負荷駆動実験からシリンダ外力検出における負荷有無判定の閾値を設定した。次に、設定された負荷有無閾値を用いて適切に負荷の有無が検出できることを運搬タスクにて検証した。

(1) 無負荷実験：開発した外力検出システムを実機システムに実装して実験を行った。無負荷状態における任意動作から、当該油圧シリンダにおける外力負荷の有無閾値を決定した。検出マージンを設けるため、外力負荷検出システムの利用後に残存する誤差成分の最大値の1.05倍を有無閾値として設定することとした ($F_{th} = 1.05 \times \max[F_e]$)。バケットシリンダにおいて同定された各負荷要因および外力負荷成分を図2に示す。システムを利用しない場合最大で ± 5500 N（計測レンジの36.9%）に閾値を設定する必要があるが、誤差成分を適切に除去することで有無閾値を ± 700 N（計測レンジの4.7%）まで低減可能となることが分かる。無負荷実験の結果から、バケットだけでなく、アームおよびブームシリンダにおいても高精度に誤差負荷成分を除去できることが分かった。

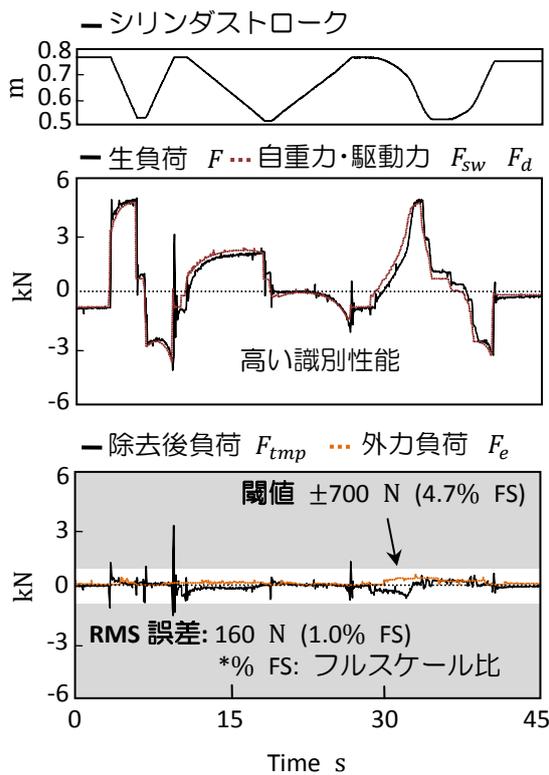


図2 無負荷時実験（有無閾値の定義）
（バケットシリンダ）

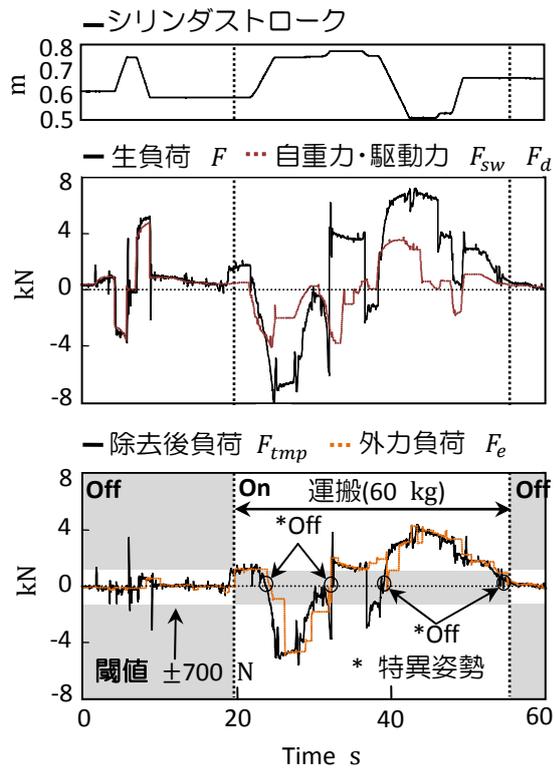


図3 運搬実験（有無検出の確認）
（バケットシリンダ）

(2)運搬実験：一連の物体運搬作業（60 kg）を行い，同定された外力負荷成分が，未運搬状態では有無閾値以下，運搬状態では有無閾値以上となることを確認する．バケットシリンダにおいて同定された各負荷要因および外力負荷成分を図3に示す．未運搬状態では，外力負荷成分が適切に有無閾値以下に抑えられていることが分かる．運搬状態では，ほとんどの領域で有無閾値以上の外力負荷が検出されているが，シリンダの特異姿勢（負荷がシリンダにかからずリンク関節のみにかかってしまう姿勢）の影響で有無閾値以下となる状態が複数回あることが分かる．これに関しては複数のシリンダ利用により今後対応を図る予定である．

以上より，主要な誤差成分である自重力，駆動力，振動成分をマニピュレータの運動状態に応じて同定・除去することで，外力負荷の有無閾値を大幅に低減できることが確認された．また，運搬実験から適切に負荷有無の検出が可能となることが示唆された．

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

- 小坂 拓未 早稲田大学 修士1年
- 岩田 浩康 早稲田大学 准教授
- 菅野 重樹 早稲田大学 教授

5. 研究実施時期

2010年(平成22年) 3月1日から 2012年(平成24年) 6月29日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

- [1] Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, “Identification of dominant error force component in hydraulic pressure reading for external force detection in construction manipulator,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 24, no. 1, pp. 95-104, 2012
- [2] Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, “Hydraulic pressure-based dominant error force component identification for detecting external force applied to construction manipulator,” in: *Proceedings of International Conference on Advanced Mechatronics 2010 (ICAM2010)*, pp. 313-318, 2010.
- [3] Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, Shigeki Sugano, “A practical approach to detecting external force applied to hydraulic cylinder for construction manipulator,” in: *Proceedings of SICE Annual Conference 2010 (SICE2010)*, pp. 1255-1256, 2010.
- [4] 亀崎允啓, 橋本諭, 岩田浩康, 菅野重樹, “マニピュレータの運動状態に応じた負荷要因同定に基づく油圧シリンダの外力負荷有無検出手法の提案,” *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010 論文集 (Robomec' 10)*, paper no. 1A1-A30, 2010年.

7. 内外における関連研究の状況

油圧システムを利用している建設機械においては、マニピュレータに生じる負荷を計測するための実用的な技術が未だに開発されていないのが現状である。本研究がとるアプローチはこのような現況を打破する実効性の高い技術開発になるものと予想される。また近年では、建設機械に対して、震災時の救助・復旧作業などへの適応に対する期待が社会的にも高まっているが、これらを実現するための不可欠な技術の1つとしても負荷計測技術は十分に意義の高いものである。本研究は時代のニーズを捉えた開発でもあり、今後ますます重要な基盤技術となることが予想される。

8. 今後の発展に対する希望

本研究では、振動成分の除去に用いたパラメータや負荷有無閾値は実験的に決められている。除去システムをより使いやすくするために、各種閾値の一般的な決定方法について議論したい。また、本研究ではシリンダ単体の負荷計測であったため、この研究成果をもとにマニピュレータの手先にかかる負荷計測に関する技術開発を行いたい。