

報告日：2015年(平成27年)10月23日
報告者：早稲田大学 理工学術院総合研究所 研究院講師
亀崎 允啓

1. 研究概要

(和文)

(1) 課題名

災害対応作業への適応を目的とした建設機械の手先荷重計測システム

(2) 研究者氏名

亀崎允啓, 早稲田大学 理工学術院総合研究所 研究院講師

(3) 研究概要

大型油圧マニピュレータを有する建設機械は、災害現場での瓦礫撤去をはじめとする災害対応作業への適応が期待されている。これらの作業を効率的かつ安全に進めるための作業改善には、適切な状況認識技術が重要となるが、重量物を扱う災害対応作業においては、特に「手先にかかる負荷」が重要となる。本研究では、これまでに培ってきた油圧シリンダの外力負荷計測をベースに手先にかかる荷重計測(把持物体の重量計測)を行う。不確定性と非線形性の大きなシステムであること、具体的な数値出力が必要であることから、よりロバストで信頼性の高い測定手法を開発した。実機を使った実証実験の結果、手先荷重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, 負荷計測, 油圧シリンダ, 災害対応

(英文)

(1) Research title

Development of an End-Point Load Measurement for Disaster Response Construction Machinery

(2) Name of researcher with title of position

Mitsuhiro KAMEZAKI, Assistant Professor, Research Institute for Science and Engineering (RISE), Waseda University

(3) Summary

Disaster response work is expected to be applied by construction machines. The purpose of this study is to develop a robust object-mass measurement method for large-scale construction manipulators. Hydraulic pressure-based force measurement complicates precise modeling of system behaviors and complete removal of error force components, so we propose a system to select a less-error data for improving the reliability of measurement data. It removes data with large-error and integrates data from plural sensors. Experimental results indicate that the proposed system can precisely measure the object-mass in various conditions.

(4) Key Words

Construction machinery, Load measurement, Hydraulic cylinder, Disaster response work

2. 本研究の意義・特色

本研究では、負荷計測技術の基盤研究として、建機マニピュレータの手先にかかる荷重(鉛直下向きの負荷の大きさ＝把持物体の重量)の計測手法を開発する。負荷計測センサには油圧センサを利用し、作業機体格や油圧システムに依存しない汎用的な高精度化手法について検討を行う。利用価値を高めるためには「計測値の信頼性」が重要となるが、過酷な屋外環境で用いられる建設機械には様々なノイズが生じやすく絶対的な高精度化が難しい。そこで、マニピュレータに搭載されている複数シリンダ(本研究では標準的なピッチ軸3関節を想定(図1))の姿勢・速度などの情報を用いて「正確な計測が可能なシリンダ」を推定する。その出力を優先的に利用することで、精度および信頼性を相対的に高める枠組みを構築する点が特色である。本研究は、「油圧シリンダに生じる誤差負荷要因の同定手法(2009年度貴財団研究助成)」をベースとした発展的研究である(油圧シリンダ単体→マニピュレータ手先)。

本研究では、a. 搭載性・汎用性を満たす油圧センサを利用、b. 実装性を考慮した簡易化モデルによって誤差成分を同定、c. 利用性を考えた計測値の信頼性評価、という3点において従来手法と比べて利点がある。特に、3つのシリンダ(本用途では、センサと言い換えられる)がマニピュレータに搭載されていることを利用し、最も信頼性の高いシリンダの計測値を最終出力とすることで計測値の信頼性を相対的に向上させることが特色である。不確実性を踏まえた上で、適切な粒度でモデル化を行う点が実世界(産業界)におけるシステム設計において重要と考えているが、提案するシステムではこれらを意識した研究となっている。本手法は、油圧駆動型の多関節マニピュレータを有する建設機械全般に適用できる負荷計測技術を目指すもので、油圧機器の利用範囲および機能の拡張に貢献するだけでなく、早期の技術整備が期待される災害対応作業の高度化促進に寄与する社会的意義の高い研究といえる。

3. 実施した研究の具体的内容、結果(本文)

本研究では、(1)手先負荷の有無を決める閾値の設定手法、(2)負荷値の信頼性を高める出力値の評価手法、(3)負荷値の最終出力手法をそれぞれ開発する。最後に、実験機にて物体運搬実験を行い、本手法の有用性を確認する。提案システムの全体像を図2に示す。

3.1 測定値の相対的信頼性向上

把持物体の質量中心が既知である(ここでは、ハンドの幾何中心と常に一致すると仮定)

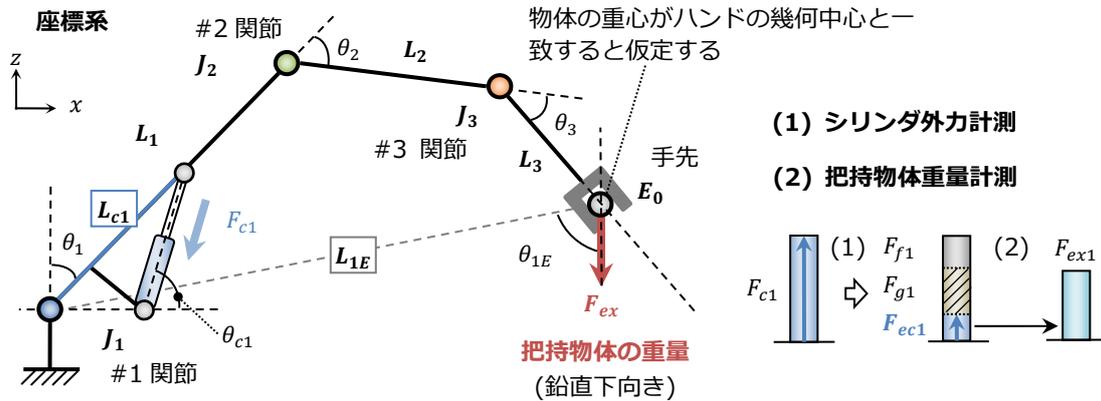


図 1 マニピュレータの構成と把持物体重量計測の基礎

場合、物体重量は以下の手順で計算できる。まず、油圧センサから計算される生負荷 F から、重力成分 F_g と駆動力成分 F_f を除去することで、シリンダに生じる外力負荷 F_{ec} を計算する(図 1(1))。

$$F_{ec} = F(P_1, P_2) - (F_g(\theta) + F_f(\dot{x}_c)) \quad (1)$$

ただし、 P_x は各領域の圧力、 θ は関節角度、 \dot{x}_c はシリンダ速度である。さらに、幾何計算により、式(2)により物体重量が計算できる(図 1(2))。#1 関節の負荷データを利用すると、

$$F_{ex1} = (L_{c1} \sin \theta_1 / L_{1E} \sin \theta_{1E}) F_{ec1} \sin \theta_{c1} \quad (2)$$

となる。本研究で利用するマニピュレータ(図 1)は、3つのピッチ軸が搭載されているので、同時に3種類の F_{ex} を算出できる。これまでの研究から、各シリンダ(センサ)に生じる誤差が、計測条件に応じて大きく変わることが分かっている。この原因の1つは、モデル化誤差によるものであるが、これを完全になくすことは現実的に難しい。そこで、誤差が少ないと考えられる条件にあるデータおよびセンサを使って把持物体重量の計測を行う。

3.2 測定条件に応じたデータ選定システム

手先負荷有無検出を行い、正しい計測がされている可能性の高いデータ区間を抽出し、フィルタによるノイズ除去を行う。最後に、誤差の累積を避けるため、誤差が少ないと考えられるセンサを絞り込み、平均化により最終出力する。図 2 にシステムの全体図を示す。

(1)信頼性の高い有無閾値(図 2: プロセス 1) : 負荷有無の判別および負荷計測が正しくできない条件にあるセンサデータを除外する。 実装性を考慮した高度化を行うため、自重力および駆動力成分は力学モデルを用いた同定を行い、振動成分は後述の信頼性評価にて扱うこととした。自重力は、2009 年度システムを利用し、駆動力は、より高精度な同定を行うためシリンダ速度(入力)とシリンダ発生力(出力)の関係性を規定する実験により同定し

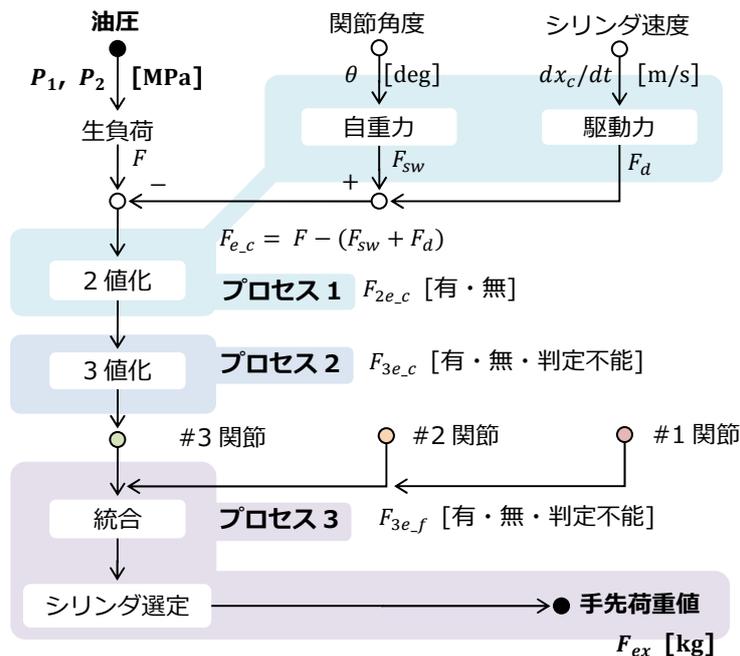


図2 手先荷重計測システム

た. 有無閾値は, 無負荷状態で任意の動作を行ったときの外力負荷波形から振動性・突発性成分を取り除いた負荷波形における最大値とした. F_{ex} が閾値より小さい場合, 「負荷なし」, 閾値以上の場合, 「負荷あり」と判定する. これにより, 計測の分解能を上げられるとともに負荷値の信頼性も向上する.

(2)有無判定の信頼性評価・判定修正(図2:プロセス2): 前項で出力された有無判定のみでは, 下記の条件下で信頼性を欠くことになるため, 状態を評価したのち適宜修正を行う.

- A. **振動・突発性負荷成分**: シリンダの急発進・急停止によりマニピュレータが振動した場合, その振動成分により有無判定が短時間で連続的に切り替わってしまう. この現象は, サージ圧・発進時静止摩擦力などの要因でも同様に生じる. これらの成分は短時間で収束することから, 変化後の状態が規定時間より長く連続して出力されれば, 変化後状態を確定する. 確定するまでは変化前状態を出力する.
- B. **有無不定条件**: 手先負荷がすべて関節の回転軸にかかる姿勢(これを特異姿勢と呼ぶ)では, シリンダが負荷を受けないため有無判定ができない. さらに, ロッドとシリンダが機械的に接触するストロークエンドでは, 無条件にリリーフ圧(シリンダが最大発生圧力)まで上昇するため有無判定ができない. これらの条件下では物理的に有無判断ができないため, 3つの判定である「有無判定不能」に修正する.

(3)負荷値の最終出力(図2:プロセス3): 前項の信頼性評価により, 有・無・判定不能の判定結果が3関節から出力されるのだが, 手先負荷状態として出力するには, 判定結果の優先度に基づき, 1つに統合する方法が必要となる.

- A. **判定の優先度設定**: 「判定不能」は, 正しい負荷検出ができないシリンダの利用回避

を目的としているため優先度は最低となる。「負荷あり」は、実験により算出された最大誤差値を利用した閾値にて判定されるため信頼度は高い。「負荷なし」は、特異姿勢周辺の姿勢では誤認識が起りやすくなることから優先度は低い。以上より、負荷ありが1つでもれば負荷あり、負荷ありがなく負荷なしが1つでもあれば負荷なし、すべて判定不能であれば判定不能という統合ルールを設定する。

- B. **出力方法**：負荷あり判定が2つ以上ある場合には、各荷重値の平均値を出力する方法が考えられるが、いずれかに大きな誤差が生じていれば出力値の信頼性が低下してしまう。そこで、同一時刻において最も良い状態のセンサのみを選出して平均をとって出力する。先端の関節(#3)は、モーメントアームの影響で外力が相対的に小さくなるため、誤差成分の影響を大きく受けやすい。つまり、S/N比が根元関節(#1)に比べ低いということである。そこで、#1→#2→#3を統合の優先順位とする。

3.3 実機を用いた手先荷重計測システムの評価

油圧駆動型マニピュレータを用いて、リーチング動作を含む40 kg (392 N)の物体運搬実験を行った。図3に、自重力と駆動力のみを除去した場合(処理無し)と提案した荷重計測システムを利用した場合(処理有り)の荷重計測結果(平均値・標準偏差)を示す。図3(a)はセンサすべてを平均したもの、図3(b)-(d)は各センサ単体の結果、図3(e)は処理有りで#1と#2を統合したもの、図3(f)は処理有りで#1・#2・#3を統合したものである。図3(a)-(d)より、計測システムを利用することで、平均値・標準偏差ともに改善されていることが分かる。さらに、センサデータ統合を行った場合、すべて使った場合(#(1+2+3))より、根元2関節(#(1+2))を使った場合のほうが、計測精度および信頼性が高くなることが分かった。これは、既述の通り、先端の関節ほど誤差の影響を受けやすく、#3に大きな計測誤差が含まれていたことに起因すると考えられる。また、平均値を比較すると、#1では379.8 N、#(1+2)では374.5 Nでありほぼ同じであるが、標準偏差では、#1では113.6 N、#(1+2)では99.3 Nとなったことから、標準偏差の小さい#(1+2)のほうが信頼度の高い計測値といえる。このように、データ区間選択だけでなく、データ統合を工夫することで、より高精度で信頼

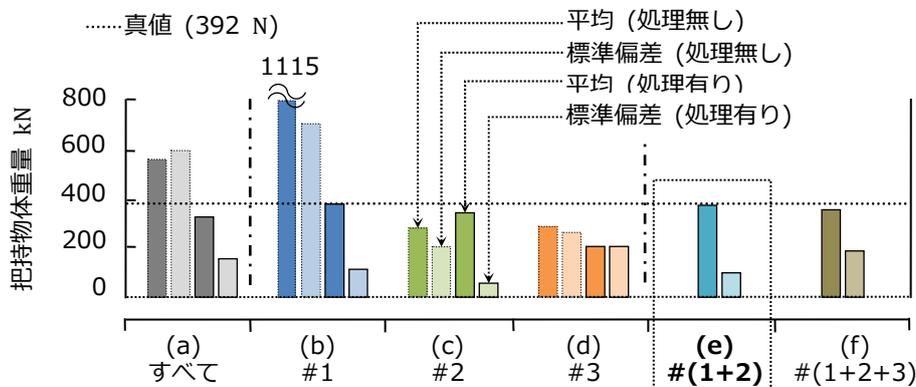


図3 計測システムを利用した荷重計測結果

性の高い計測値の算出が可能に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

森島 洋忠 早稲田大学大学院 修士2年
三矢 隆史 早稲田大学大学院 修士1年
岩田 浩康 早稲田大学 教授
菅野 重樹 早稲田大学 教授

5. 研究実施時期

2013年(平成25年) 3月1日から 2015年(平成27年) 9月30日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

[雑誌論文]

- [1] Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, “A Practical Operator Support Scheme and Its Application to Safety-Ensured Object Break Using Dual-Arm Machinery,” *Advanced Robotics*, Vol. 28, No. 23, pp. 1599-1615, Dec. 2014.
- [2] Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, “A Pragmatic Approach to Modeling Object Grasp Motion Using Operation and Pressure Signals for Demolition Machines,” *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration (JCMSI)*, Vol. 7, No. 6, pp. 356-363, Nov. 2014.

[国際会議]

- [3] Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, “Robust Object-Mass Measurement Using Condition-Based Less-Error Data Selection for Large-Scale Hydraulic Manipulators,” *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2014)*, pp. 1679-1684, Dec. 2014.
- [4] Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, “Practical Object-Grasp Estimation without Visual or Tactile Information for Heavy-Duty Work Machines,” *Proceedings of 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013)*, pp. 3210-3215, Nov. 2013.
- [5] Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, “An Object Grasp Motion Model using Control Signal and Cylinder Pressure in Demolition Machines for Disaster Response Work,” *Proceedings of SICE Annual Conference 2013 (SICE2013)*, pp. 307-312, Sept. 2013. (*The finalists of the SICE Annual Conference Young*

Author's Award in SICE2013)

- [6] Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, “Visualization of Comprehensive Work Tendency Using End-Point Frequency Map for Human-Operated Work Machines,” Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2013), pp. 752-757, May 2013.

[国内講演]

- [7] 亀崎允啓, 三矢隆史, 岩田浩康, 菅野重樹, “測定条件に応じたデータ選定によるロバストな把持物体重量計測システムの開発”, 第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集 (SI2014), pp. 1139-1140 (2B2-3), 2014 年 12 月.
- [8] 亀崎允啓, 橋本諭, 岩田浩康, 菅野重樹, “負荷変化率を用いた操作入力の無効化による双腕引き剥がし作業の安全性向上”, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会論文集 (RSJ2013), paper no. 1H3-7, 2013 年 9 月.
- [9] 亀崎允啓, 石井孝洋, 岩田浩康, 菅野重樹, “操作型作業機械の知能化に関する研究～第 10 報: 手先の外力・移動方向を用いた物体把持推定の高精度化～”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 論文集 (Robomec'13), paper no. 1A1-Q10, 2013 年 5 月.

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, 高い力密度・応答性・頑強性を特長とする建設機械に対して, 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

荷重計測システムをより使いやすくかつ精度を高めるために, 各種閾値の一般的な決定方法について議論したい. また, 本研究では鉛直下向きの方向成分のみの負荷計測であったため, この研究成果をもとに一般化したマニピュレータの手先にかかる負荷ベクトル計測に関する技術開発を行いたい.

