

報告日：2018年(平成30年)7月20日

報告者：早稲田大学 理工学術院総合研究所 研究院准教授

亀崎 允啓

## 1. 研究概要

### (和文)

#### (1)課題名

内在誤差範囲推定に基づく油圧駆動マニピュレータの高精度手先外力ベクトル計測

#### (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 研究院准教授

#### (3)研究概要

本研究では、「油圧駆動マニピュレータの外力計測技術の一般化」として、高精度外力ベクトル計測手法を開発する。油圧源の定常変動、動粘度変化、機械的ガタなどはモデル化が難しく、特に摩擦トルクは再現性が乏しいため、原理的に計測誤差が発生してしまう。さらに、ベクトル計測には2つのシリンダ(油圧センサ)の計測結果を用いるため、計測誤差が伝播・累積して出力されてしまう。そこで、シリンダに発生していると思われる誤差(内在誤差)の大きさの程度を定量化する方法を検討する。内在誤差の大きさそのものを推定することは本質的に難しいため、当該システムにおいて一意に定義しやすい誤差の最大値を利用し、再現性が乏しく誤差の主要因である摩擦力をパラメータとする。各シリンダに発生していると推定される誤差の最大値を内在誤差範囲(internal error range: IER)と呼ぶ。実機実験の結果、内在誤差範囲を推定し適切にシリンダ選定を行うことで、より真値に近い外力ベクトルを安定して得られることが分かった。

#### (4)キーワード

建設機械, 手先外力ベクトル, 油圧シリンダ, 誤差範囲推定

### (英文)

#### (1) Research title

Accurate External Force Vector Measurement Based on Internal Error Range Estimation for Hydraulic-Driven Manipulator

#### (2) Name of researcher with title of position

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

#### (3) Summary

This study proposes a practical framework for measuring the external force vector applied to a construction manipulator using hydraulic sensors. Such a measuring system inevitably

includes measuring errors owing to difficult-to-reduce modeling errors. Our framework thus introduces a relative measuring accuracy improvement approach. It consists of (i) quantifying internal error range (IER) using the summation of the maximum measuring error of static and dynamic friction forces, (ii) calculating error force vectors using IER to select cylinders with less errors, and (iii) outputting the external force vector using the selected cylinders. Experiments were conducted using an instrumented hydraulic arm. Results indicate that our proposed framework enables to improve the relative measuring accuracy, independently of various postural and kinematic conditions.

#### **(4) Key Words**

Construction machinery, External force vector, Hydraulic cylinder, Internal error range estimation

## **2. 本研究の意義・特色**

本研究では、負荷計測技術の一般化基盤技術形成として、建機マニピュレータの手先にかかる外力ベクトル(向きと大きさ)の高精度計測手法を開発する。外力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手法について検討する。利用価値を高めるためには「計測値の信頼性・精度」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。また、ベクトル計測には2つのシリンダ(油圧センサ)の計測結果を用いるため、計測誤差が伝播・累積して出力されてしまう。そこで、シリンダに発生していると思われる誤差(内在誤差)の大きさの程度を、当該システムにおいて一意に定義しやすい摩擦力に起因する誤差の最大値(内在誤差範囲(internal error range: IER))を利用して定量化する。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)の IER を実時間で算出して「相対的に誤差が少ないと考えられるシリンダ出力」を実時間で2つ選定してベクトル計算に利用することで、精度および信頼性を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)」「油圧シリンダ単体→マニピュレータ手先)、および「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(2012年度貴財団研究助成)」「マニピュレータ手先→手先ベクトル)を発展させた基盤技術形成研究である。

本研究は、真値が分からない状況で、情報に内在する誤差の推定手法と複数センサを用いた信頼性向上を扱う知的情報処理技術として、学術的・実用的観点から意義の高い研究になると考えている。センサ自体の性能向上などの絶対的精度向上手法と独立して利用できる点も本手法の特長である。本手法は、油圧駆動型の多関節マニピュレータを有する機械システムに適用できる外力計測技術の一般化を目指すもので、油圧機器の利用範囲および機能の拡張への貢献だけでなく、災害対応作業の高度化促進に寄与する社会的意義の高

い研究になると考えられる。

### 3. 実施した研究の具体的内容、結果 (本文)

本研究では、一般的な建機マニピュレータを想定し、矢状面( $x$ - $z$ 平面)の手先外力ベクトルの計測を行うこととする(図1)。

#### 3.1 負荷計測の高精度化における課題と対策

##### (A) 手先外力ベクトル計測の基礎式

シリンダロッドにかかる生負荷  $F$  は、油圧センサにより検出されるシリンダのボトム、ロッド側の圧力  $P_1, P_2$  および受圧面積  $A_1, A_2$  から、 $F = P_1 A_1 - P_2 A_2$  により算出する。次に、シリンダの外力負荷成分  $F_c$  を、外力以外の支配的負荷成分であるマニピュレータ自重力  $F_{sw}$ 、シリンダ駆動摩擦  $F_d$  を同定し、 $F_c = F - (F_{sw} + F_d)$  により算出する。最後に、幾何計算により手先負荷ベクトル  $F_{ex}$  を求めるのだが、利用するシリンダ負荷  $F_{c1}, F_{c2}, F_{c3}$  の組み合わせにより3つの値  $F_{ex12}, F_{ex13}, F_{ex23}$  が導出される。

$$F_{ex12} = F_{c1} + (F_{c2} - F_{c1} \cos \theta_{12}) / \sin \theta_{12} \quad \dots (1)$$

$$F_{ex13} = F_{c1} + (F_{c3} - F_{c1} \cos \theta_{13}) / \sin \theta_{13} \quad \dots (2)$$

$$F_{ex23} = F_{c2} + (F_{c3} - F_{c2} \cos \theta_{23}) / \sin \theta_{23} \quad \dots (3)$$

$\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$  は各関節角度より幾何学的に求められる角度である。 $F_{c1}$  および  $F_{c2}$  を用いた外力ベクトル  $F_{ex12}$  の計測例を図1に示す。

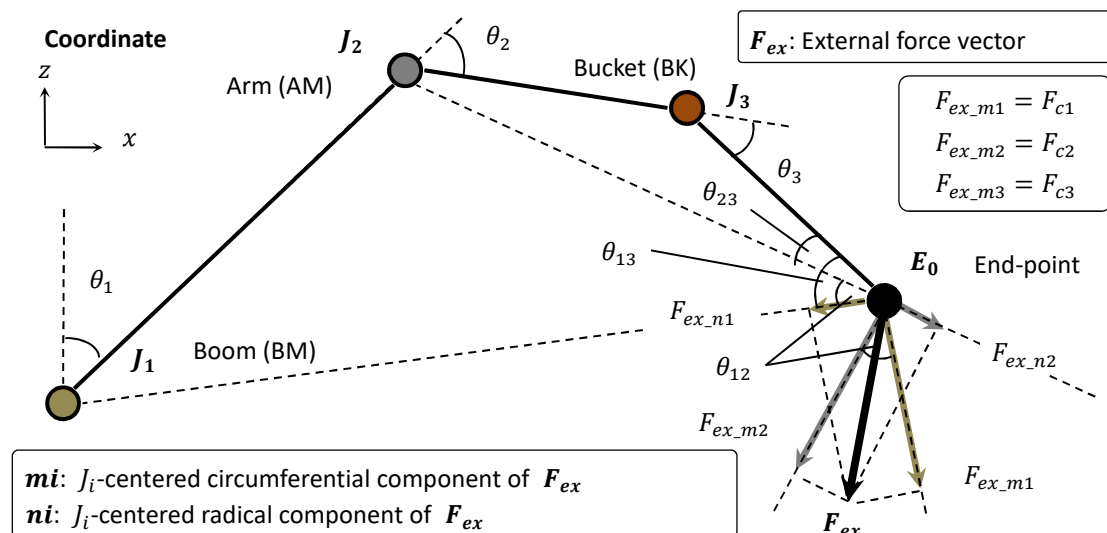


Fig. 1 Diagram of external force vector measurement

##### (B) モデル化誤差による計測誤差

小型実験機を用いた 40 kg の物体運搬タスクにおける手先外力ベクトルの実測結果を図 2 に示す。マニピュレータ姿勢やシリンダ速度などの条件に応じて計測誤差の大小が変化しており、式(1)–(3)それぞれでその様相が異なることがわかる。この計測誤差の原因の 1 つにモデル化誤差が挙げられる。シリンダ外力負荷成分  $F_c$  は、モデル化した慣性項や摩擦項などを用いた動力学計算により導出しているが、油圧源の定常変動、動粘度変化、機械的なガタなどはモデル化が難しく、特に摩擦トルクは再現性が乏しいため、原理的に計測誤差が発生してしまう。さらに、ベクトル計測には 2 つのシリンダの計測結果を用いるため、計測誤差が伝播および累積して出力される欠点も存在する。

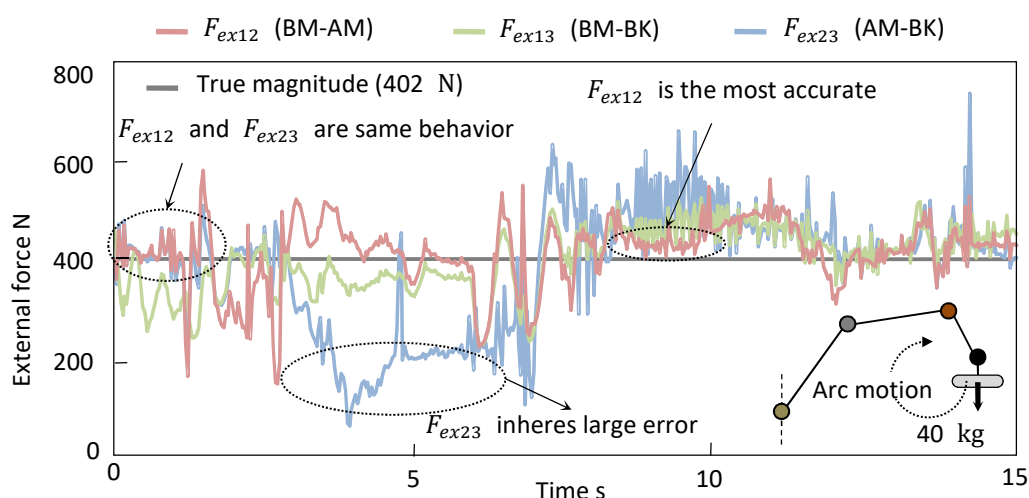


Fig. 2 Measuring errors in three measuring methods

### (C) 内在誤差範囲推定に基づく相対的精度向上

モデル化誤差は原理的に生じること、またモデルの厳密化はコストに対する実効性に欠けることから、本研究では当該システムの計測性能を最大限に発揮させる枠組みを提案した。具体的には、シリンダ負荷  $F_{c1}, F_{c2}, F_{c3}$  それぞれに発生していると思われる誤差の程度を定量化するものである。内在誤差の大きさを推定することは本質的に難しいため、当該システムにおいて一意に定義しやすい誤差の最大値を利用することとした。各シリンダに発生していると推定される誤差の最大値を内在誤差範囲  $F_{ier}$  (internal error range: IER) と定義し、この  $F_{ier}$  が小さいシリンダを計測シリンダとして利用することで相対的な精度向上を図る。

## 3.2 内在誤差範囲推定手法の開発

内在誤差範囲  $F_{ier}$  の推定手法を開発し、推定された内在誤差範囲に基づき計測に利用するシリンダを 2 つ選択する。

### (A) 内在誤差範囲推定に利用するパラメータ

内在誤差範囲の定義には、関連する誤差要因の設定および最大値の定量化手法の検討が必要

となる。既述のように摩擦力は再現性が乏しくばらつきが大きいことが分かっている。例えば、静止摩擦力はシリンダ内に残圧を発生させ、大きな測定誤差の要因となっており、動摩擦力は動粘度の変化や駆動状態によって非線形な測定誤差を生じている。そこで、摩擦力をパラメータとし、誤差の最大値および出現条件の定式化を行うこととした。

### (B) 内在誤差範囲の推定手法

駆動停止直後にはパッキンの摩擦によってシリンダ内に残圧が生じるが経過時間に応じて残圧が減少し平衡となる。そこで、静止摩擦力  $F_{err_s} (\geq 0)$  は、 $F_{max} \times (T_d - T_c \times t) / T_d$  により算出する。  $t$  はシリンダ速度  $v = 0$  時点からのカウント数で、その周期  $T_c$  は 0.037[s] である。本機における最大静止摩擦力  $F_{max}$  および減衰時間  $T_d$  はプレ実験によりブーム、アーム、バケットの順に、500, 750, 300 [N] および 9.0, 6.0, 5.0 [s] となった。動摩擦力はシリンダ速度のみを変数とし、動粘度に関しては 50°C に固定してモデル化した。油温のずれおよびシリンダ速度  $v$  が大きくなるにつれて誤差が大きくなることから、動摩擦力  $F_{err_d} (> 0)$  は、 $a(v) \times v + b(v)$  により算出する。係数  $a(v), b(v)$  は実測テーブルより得られ、最高速時には最大で 200 N 程度の誤差が生じる。

### (C) 計測シリンダの選定

シリンダの内在誤差成分  $F_{ier}$  は  $F_{err_d}$  と  $F_{err_s}$  の和により得られる。定常状態では姿勢のみを考慮するため、すべての  $F_{ier}$  を 1 [N] とする。各シリンダの内在誤差成分  $F_{ier1}, F_{ier2}, F_{ier3}$  を式 (1)-(3) における  $F_{c1}, F_{c2}, F_{c3}$  にそれぞれ代入し、手先誤差ベクトル  $F_{ex_e12}, F_{ex_e13}, F_{ex_e23}$  を計算する。  $F_{ex_e}$  が最も小さくなるシリンダの組み合わせを用いて外力ベクトル  $F_{ex}$  を計測する。

## 3.3 実機を用いた外力負荷ベクトルの評価

各種センサが搭載された実験機を用いて提案システムの有用性を検証した。台に接着された運搬物(40 kg)にリーチングし、引き剥がした後、運搬物を手前に運搬する一連作業を行った。

手先外力ベクトル計測結果および内在誤差範囲推定結果を図 3 に示す。計測値は、外力負荷有無判定手法を用いた外力有無判定の前処理後の結果を示している。外力の大きさおよび向きを示した図 3 (a), (b) からは、提案システムがより真値に近い誤差の小さな組み合わせを選択できていることがわかる。内在誤差範囲とシリンダストロークを示した図 3 (c), (d) からは、マニピュレータの状態に応じて静止摩擦力と動摩擦力の同定誤差が出力されており、内在誤差範囲が最小の組み合わせが適切に外力計測に用いられていることがわかる。運搬作業期間における計測結果の平均値および平均二乗誤差(RMS)を図 4 に示す。システム選定を行ったほうが、大きさ・向きともに平均値は真値に近く、RMS はより小さくなることが確認された。以上の結果より、利用するシリンダを固定してしまうと大きな測定誤差を生じてしまうがあるが、内在誤差範囲を推定し適切にシリンダ選定を行うことで、より真値に近い外力ベクトルを安定して得られることが分かった。

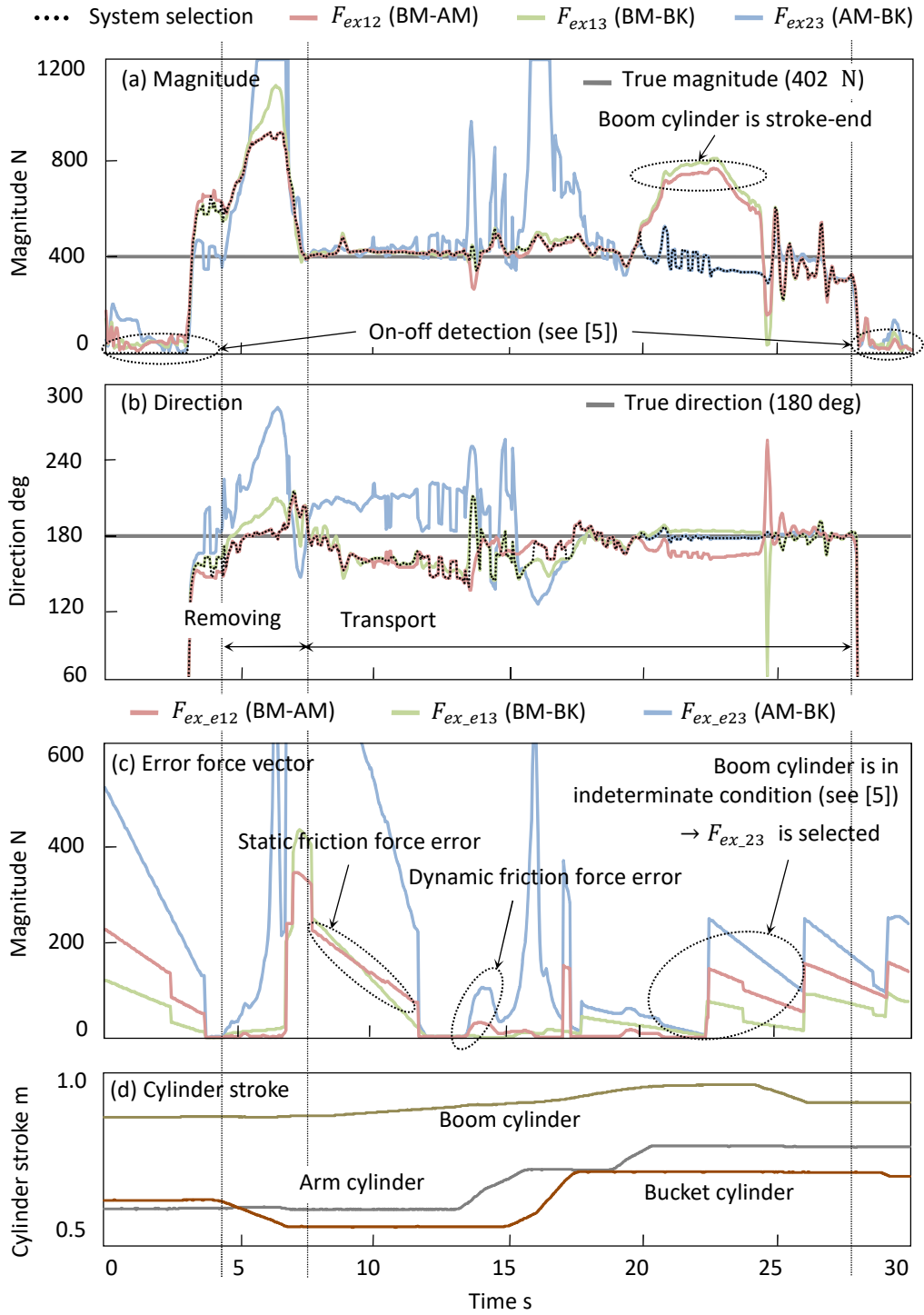


Fig. 3 Measured external force vector during transport task

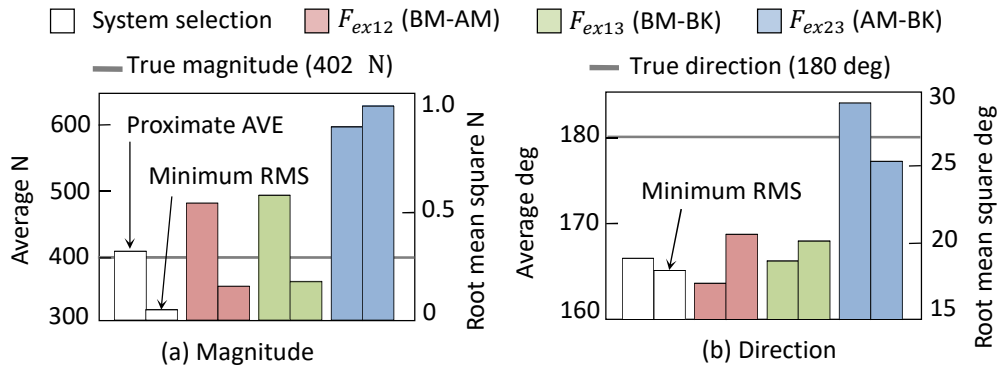


Fig. 4 Vector measurement result in statistical representation

#### 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

菅野 重樹 早稲田大学 理工学術院 教授 (工学博士)  
 岩田 浩康 早稲田大学 理工学術院 教授 (博士 (工学))  
 峰田 洋忠 早稲田大学大学院 創造理工学研究科 修士2年

#### 5. 研究実施時期

2016年(平成28年) 3月1日から 2018年(平成30年) 5月31日

#### 6. 本研究に関連して発表した主な論文等

##### [雑誌論文]

- [1] K. Chen, M. Kamezaki, T. Katano, T. Kaneko, K. Azuma, T. Ishida, M. Seki, K. Ichiryu, and S. Sugano, "Compound Locomotion Control System Combining Crawling and Walking for Multi-Crawler Multi-Arm Robot to Adapt Unstructured and Unknown Terrain," ROBOTMECH Journal, vol. 5, no. 2, 1-17, Jan. 2018.
- [2] M. Kamezaki, H. Iwata, and S. Sugano, "Condition-Based Less-Error Data Selection for Robust and Accurate Mass Measurement in Large-Scale Hydraulic Manipulators," IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, Vol. 66, No. 7, 1820-1830, July 2017.

##### [国際会議]

- [3] K. Chen, M. Kamezaki, T. Katano, T. Kaneko, K. Azuma, Y. Uehara, T. Ishida, M. Seki, K. Ichiryu, and S. Sugano "Compound Manipulation Mode for Improving Task-Ability of Multi-Arm Multi-Flipper Crawler Robot," IEEE/SICE Int. Conf. System Integration (SII 2017), paper no. 0254, Dec. 2017.
- [4] K. Chen, M. Kamezaki, T. Katano, T. Kaneko, K. Azuma, Y. Uehara, T. Ishida, M. Seki, K. Ichiryu, and S. Sugano "A Preliminary Study on a Groping Framework without External Sensors to Recognize Near-Environmental Situation for

Risk-Tolerance Disaster Response Robots Tolerance Disaster Response Robots,”  
IEEE Int. Symp. Safety, Security, and Rescue Robotics 2017 (SSRR 2017), pp.  
181-186, Oct. 2017.

- [5] K. Chen, M. Kamezaki, T. Katano, T. Kaneko, K. Azuma, T. Ishida, M. Seki, K. Ichiryu, and S. Sugano, “A Semi-Autonomous Compound Motion Pattern Using Multi-Flipper and Multi-Arm for Unstructured Terrain Traversal,” IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS 2017), 2704-2709, Sept. 2017.
- [6] M. Kamezaki, H. Ishii, T. Ishida, M. Seki, K. Ichiryu, Y. Kobayashi, K. Hashimoto, S. Sugano, A. Takanishi, M. G. Fujie, S. Hashimoto, H. Yamakawa, “Design of Four-Arm Four-Crawler Disaster Response Robot OCTOPUS,” IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA2016), 2840-2845, May 2016.

#### **[国内講演]**

- [7] 上原悠嗣, 亀崎允啓, 陳奎, 片野貴裕, 金子大靖, 東宏河, 石田健蔵, 菅野重樹, “グローピング動作に基づく災害対応ロボットの近接環境理解に関する基礎検討”, JSMEロボティクス・メカトロニクス講演会(Robomech' 18), 2A1-D11, 2018年6月.
- [8] 片野貴裕, 亀崎允啓, 金子大靖, 東宏河, 陳奎, 石田健蔵, 関雅俊, 一柳健, 菅野重樹, “多自由度災害対応ロボットにおける人と自動化機能との分散型共有操作システムの提案”, 日本ロボット学会学術講演会(RSJ2017), paper no. 1K3-04, 2017年9月.
- [9] 亀崎允啓, 石井裕之, 石田健蔵, 関雅俊, 一柳健, “4腕式極限作業ロボットOCTOPUSの開発”, JSMEロボティクス・メカトロニクス講演会(Robomec' 16), 2A1-17b5, 2016年6月.

### **7. 内外における関連研究の状況**

油圧システムを利用す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。建設機械には、災害時の救助・復旧作業などへの適応に対する期待がされているが、負荷計測技術はこれを実現するための不可欠な技術の1つである。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**

本手法は、油圧駆動型の多関節マニピュレータを有する機械システムに適用できる外力計測技術の一般化を目指すものであり、他の一般的なロボットアームへの応用についても検討したい。また、外力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、モーメントを含めた負荷計測を行うとともに、産業応用について検討していきたい。 ■