

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02135

研究課題名（和文）油圧駆動マニピュレータに器用さをもたらす新たな力触覚システムの開発と制御

研究課題名（英文）Development and control of a new haptic system that brings dexterity to hydraulically driven manipulators

研究代表者

野崎 貴裕（Nozaki, Takahiro）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・准教授

研究者番号：20734479

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではマニピュレータの基礎部に多自由度力センサを設置し、ロボットに力触覚を付与する手法を提案した。外部からマニピュレータに力が加わった際、各軸方向の力とモーメントとの比率より、接触位置および接触力の算出が可能となる。提案手法を市販の6自由度マニピュレータに実装し、接触位置および接触力の算出と制御が可能となることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間は力触覚によって力加減を調節し柔軟に作業をこなしている。しかし、従来の産業用マニピュレータは力触覚情報を得られないため、力加減を調節できず、接触対象物を破壊する危険がある。マニピュレータの基礎部にひとつの多自由度力センサを設置する本手法によって、接触部位や接触力の算出が可能となり、さらに取得された情報をフィードバックすることで柔軟かつ器用な力制御動作を実現することが可能となる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a method to give a robot a force-tactile sensation by installing a multi-degree-of-freedom force sensor at the base of a manipulator. When a force is applied to the manipulator from the external environment, the contact position and contact force can be calculated from the ratio of the force and moment in each axis direction. We implemented the proposed method on a commercial 6-DOF manipulator and confirmed that it is possible to calculate and control the contact position and contact force.

研究分野：ロボット工学

キーワード：力制御 アドミッタンス制御 バックドライバビリティ ロボット マニピュレータ

### 1. 研究開始当初の背景

人間は力触覚によって力加減を調節し柔軟に作業をこなしている(図1参照)。しかし、高減速比の機構を伴う従来の産業用マニピュレータや油圧駆動を用いた建設重機等では力触覚が感じられず、接触対象物を破壊する危険がある。力強さと繊細さ、しなやかさを兼ね備えた人間の動作、ひいては、それを可能にする力触覚をいかにして人工的に実現するかが、次世代のマニピュレータを開発する上での隘路である。研究代表者は身体感覚を伝送可能な双腕型ロボットの開発に成功するとともに力触覚伝送を伴う建設重機の開発に成功してきた。しかしながら、各駆動部に圧力センサ等、複数の力検出手段を搭載する必要があり、堅牢性やサイズの面において未だ課題が残っていた。特に高減速駆動や油圧駆動のマニピュレータにおいては、センサを用いない反力推定手法(T. Murakami, F. Yu, and K. Ohnishi, "Torque sensorless control in multidegree-of-freedom manipulator", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 40, no. 2, pp. 259-265, Apr. 1993.)の適用が困難であり、上記はより深刻な問題となる。

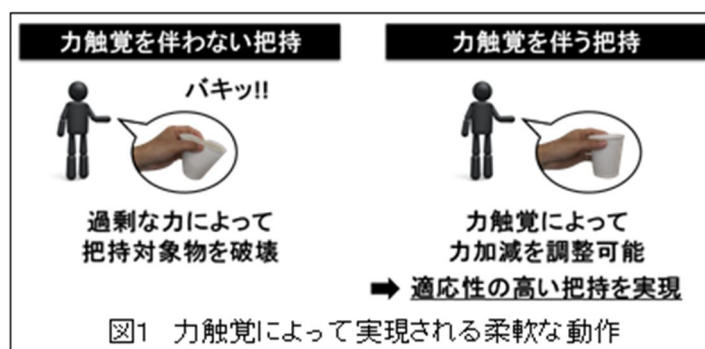


図1 力触覚によって実現される柔軟な動作

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、マニピュレータの基礎部にひとつの多自由度力センサを設置することで接触部位や接触力の算出を可能にし、さらに取得された接触部位/接触力の応答を用いたフォースフィードバックによりマニピュレータの柔軟かつ器用な力制御動作を実現することである。本手法は、マニピュレータ本体ではなくマニピュレータの基礎部に着目した独自のアプローチであり、これによりマニピュレータ全体の接触部位/接触力の測定が可能になるばかりか、既存のマニピュレータに対しても基礎部分をリプレイスすることで力触覚をもたらすことが可能となる。従来の構成では、各駆動部に圧力センサ等の複数の力検出手段を搭載する必要があったが、堅牢性やサイズの面で課題が残る。また、手先効果器部に力検出手段を搭載する構成も見受けられるが、アーム部における接触を検知できないという欠点が存在し、安全面の欠如が危惧される。

### 3. 研究の方法

外部の負荷力がマニピュレータに印加されると、基礎部に搭載された多軸力センサではx、y、z軸の各軸方向の力および各軸まわりのモーメントが観測される。各軸方向の力とモーメントとの比率より、接触部位の算出が可能となるが、マニピュレータの自重ならびにダイナミクスが力応答値に悪影響を及ぼすことが予想される。そのため、それらの影響を測定し検証するとともに、接触部位の算出精度向上手法を検討した。基本的な方針としては、質量バランスを考慮したマニピュレータのモデルを構築した上で、キネマティクスに基づく自重のフィードフォワード補償を施すとともに、各関節の角度エンコーダから導出される加速度情報を用いたダイナミクスによる影響のキャンセレーションを行った。

外部からの負荷力を表すベクトルとマニピュレータのリンクとが2点以上で交わる場合、力センサの応答から導出される接触部位の候補は複数箇所となり、一意に定まらない。本研究では二通りの方法によってこの問題の解決を図った。一つ目の解決策は時系列データの利用である。マニピュレータの姿勢を変化させることにより、接触点の候補部位が時々刻々と変化し、時系列データとして得られることとなる。この時系列データを解析することで、最も可能性の高い接触部位を特定することが可能となった。二つ目の解決策は反力推定値の利用である。高減速機構を伴うアクチュエータの場合、バックドライバビリティが低く、モータの応答から正確に反力を推定することが困難となる。しかし、本手法と組み合わせることで、推定反力が真値と異なる場合であっても観測可能なある程度以上の応答が得られ、接触部位の特定が可能となる。

上記の成果を市販のロボットマニピュレータに実装し、力触覚が付与され、接触位置および接触力の算出と制御が可能となることを確認した。

#### 4. 研究成果

本手法は基盤部に設置した力センサによってモーメントおよび並進力を測定し、これらの比率から接触部位および接触力を推定するものであり、推定結果をフィードバック制御に用いることで高減速駆動マニピュレータの柔軟な力制御動作を実現した。なお、研究成果は電気学会誌英文論文誌に掲載された(H. Handa, T. Nozaki, and T. Murakami, "Identification of contact position and force estimation on manipulator using force sensor implemented on base frame," *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 10, no. 3, pp. 324-330, May 2021.)。当初の研究計画に記載した本手法の概要を図2に示し、開発したマニピュレータシステムを図3に示す。

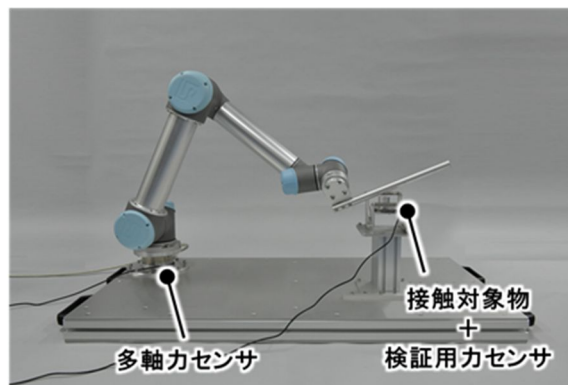


図3 開発したマニピュレータシステム

図2 本手法の概要(当初の計画書に記載)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yane Kazuki, Kido Yusuke, Yazawa Masaki, Asoda Seiji, Kawana Hiromasa, Nozaki Takahiro	4. 巻 24
2. 論文標題 Development of Penetration Detection/Automatic Stop System for Dental Implant Surgery Based on Frequency Analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Computer Aided Surgery	6. 最初と最後の頁 226 ~ 233
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5759/jscas.24.226	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Baba Tomoaki, Murakami Toshiyuki, Krebs Hermano Igo, Nozaki Takahiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Development of Optical Distance, Normal Force, Shear Force Sensor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 894 ~ 900
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.22004598	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nozaki Takahiro, Krebs Hermano Igo	4. 巻 69
2. 論文標題 Development of an Optical Sensor Capable of Measuring Distance, Tilt, and Contact Force	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 4938 ~ 4945
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIE.2021.3084168	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Chaichaowarat Ronnapree, Nishimura Satoshi, Nozaki Takahiro, Krebs Hermano Igo	4. 巻 11
2. 論文標題 Work in the Time of Covid-19: Actuators and Sensors for Rehabilitation Robotics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 256 ~ 265
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.21006581	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hangai Satoshi, Nozaki Takahiro	4. 巻 17
2. 論文標題 Haptic Data Prediction and Extrapolation for Communication Traffic Reduction of Four-Channel Bilateral Control System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Informatics	6. 最初と最後の頁 2611 ~ 2620
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TII.2020.2995627	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hangai Satoshi, Nozaki Takahiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Impedance Field-Based Teleoperation With Data Holders for Reducing Data Traffic in Haptic Transmission and Its Analysis of Performance and Stability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 6334 ~ 6343
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2020.3047853	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Handa Hinako, Nozaki Takahiro, Murakami Toshiyuki	4. 巻 3
2. 論文標題 Identification of Contact Position and Force Estimation on Manipulator Using Force Sensor Implemented on Base Frame	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.20004772	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 19件)

1. 発表者名 Kazuki Yane, Hermano Igo Krebs, Takahiro Nozaki
2. 発表標題 Delay Time of Human Motion Generation in Response to Changing Periods in Force Tracking Task
3. 学会等名 The 9th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics & Biomechatronics. (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 馬場智章、村上俊之、Hermano Igo Krebs、野崎貴裕
2. 発表標題 反射鏡を用いた薄型近接覚・カセンサの開発
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuki Yane, Takahiro Nozaki
2. 発表標題 Preliminary Study of Object Recognition by Converting Physical Responses to Images in Two Dimensions
3. 学会等名 The IEEE International Conference on Mechatronics 2023. (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryosuke Nakatsuka, Takahiro Nozaki
2. 発表標題 Position and Speed Estimation in Low Speed Range for IPMSM Based on Disturbance Observer
3. 学会等名 The 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroshi Asai, Kei Sugihara, Tomoya Kitamura, Yuki Saito, Kouhei Ohnishi, Takahiro Nozaki
2. 発表標題 Experimental Verification of a Novel Continuously Variable Transmission with Electro-Hydrostatic Actuator
3. 学会等名 The IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusuke Kido, Hiromasa Kawana, Seiji Asoda, Takahiro Nozaki, Toshiyuki Murakami
2. 発表標題 Model-Free Detection of Penetration and Automatic Stop Control in Dental Implant Surgery Based on Differential Value of Torque
3. 学会等名 The IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryosuke Nakatsuka, Takahiro Nozaki
2. 発表標題 Improvement and Analysis of Position and Speed Estimator in Low Speed Range for IPMSM Based on Disturbance Observer
3. 学会等名 The IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hinako Handa, Takahiro Nozaki
2. 発表標題 Force Control at Arbitrary Position of Manipulator Based on Estimated Contact State by Force/Torque Sensor Installed at Base Frame
3. 学会等名 The IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Saito, Hiroshi Asai, Tomoya Kitamura, Wataru Iida, Takahiro Nozaki, Kouhei Ohnishi
2. 発表標題 Performance Improvement of Bilateral Teleoperation with Hydraulic Actuator by Friction Compensation
3. 学会等名 The IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuki Yane, Takahiro Nozaki
2. 発表標題 Recognition of Environmental Impedance Configuration by Neural Network Using Time-Series Contact State Response
3. 学会等名 The IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoaki Baba, Makoto Yoshihara, Ryo Kondo, Toshiyuki Murakami, Hermano Igo Krebs, Takahiro Nozaki
2. 発表標題 Development of Optical Proximity/Contact Force/Shear Force Sensor
3. 学会等名 The 8th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Manami Shinoda, Takahiro Nozaki, Toshiyuki Murakami
2. 発表標題 Wireless Power Line Communication Using Magnetic Resonance and Its Application for Motor Control
3. 学会等名 The 8th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Erika Takeuchi, Takahiro Nozaki, Yuki Saito, Toshiyuki Murakami
2. 発表標題 Time-Domain Modal Transformation for Friction Compensation of Hydraulic Actuators
3. 学会等名 The 8th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 Takumi Karato, Takahiro Nozaki, Hermano Igo Krebs, Toshiyuki Murakami
2. 発表標題 Perception of Approaching Objects in Bilateral Control Using Proximity Sensor
3. 学会等名 The 9th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kei Sugihara, Takahiro Nozaki, Toshiyuki Murakami
2. 発表標題 Development of a Novel Hydrostatic Continuously Variable Transmission with Fast Path Switching
3. 学会等名 The 9th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shuheii Kimura, Takahiro Nozaki, Toshiyuki Murakami
2. 発表標題 Admittance-based Bilateral Control System Implementing Communication Traffic Reduction Method
3. 学会等名 The 9th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuki Yane, Takahiro Nozaki, Toshiyuki Murakami
2. 発表標題 Imitation Learning to Generate Motions by Discriminating Between Position and Force Control from Human Motions
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Kido, Takumi Karato, Takahiro Nozaki, Hiromasa Kawana, Seiji Asoda, Toshiyuki Murakami
2. 発表標題 Automatic Stop Control Just After Penetration for Drilling Device in Dental Implant Surgery in the Upper Jaw Based on the Cutting Resistance Variation
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shuhei Kimura, Takahiro Nozaki, Toshiyuki Murakami
2. 発表標題 Admittance Control-based Bilateral Control System Considering Position Error
3. 学会等名 2021 IEEE International Conference on Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahiro Nozaki and Hermano Igo Krebs
2. 発表標題 Characteristics of Human Behavior in Force Modulation while Performing Force Tracking Tasks
3. 学会等名 2020 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野崎貴裕、Hermano Igo Krebs
2. 発表標題 距離・傾き・接触力を測定可能な光学センサによる接触前可変インピーダンス制御
3. 学会等名 電気学会産業応用部門産業計測制御研究会「高度センサ情報処理技術とその応用」
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科野崎研究室  
<https://nozaki-lab.jp/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	ハーmano クレブス  (Hermano Krebs)	マサチューセッツ工科大学・Department of Mechanical Engineering・Principal Research Scientist	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------