

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26240040

研究課題名(和文) 近接覚を用いた自律制御型ハンドの研究開発と不良視環境下での遠隔操作への応用

研究課題名(英文) Research and development of autonomous control hand using proximity sensor and its application to remote control under poor visual environment

研究代表者

下条 誠 (shimojo, makoto)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・名誉教授

研究者番号：90292474

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 27,100,000円

研究成果の概要(和文)：実際の把持では、ハンドとアーム両方の協調動作があつて初めて、各種物体形状や位置・姿勢誤差に応じた適切な把持が可能となる。このため、把持対象物に追従し、その形状に自律的に倣うハンド・アーム統合制御システムを開発した。自律的把持が可能となるため、単眼カメラ映像による把持操作でも物体近傍までハンドを近づけるだけでよく、遠隔操作での確実性を向上させた。なお遠隔操作での視界不良下での作業を支援する触覚フィードバック方式を導入した。また、物体の位置姿勢等の大局的情報の獲得のため簡易視覚を導入し把持操作の適用範囲の拡大を行った

研究成果の概要(英文)：In actual grasping, cooperative action of hand and arm is necessary to grasp objects of various shapes, positions and postures. For this reason, we developed a hand / arm integrated control system in which the arm follows the object to be grasped and the hand autonomously traces the shape of the object. Since autonomous grasping is possible, even with a grasping operation by monocular camera image, it is possible to grasp by bringing the hand close to the object, so the reliability of the remote control has been improved. We also introduced a haptic feedback system that supports tasks under poor visibility by remote control. Moreover, by introducing simple vision, global information such as the position and attitude of the object can be acquired, and the application range of the grasping operation has expanded.

研究分野：ロボティクス

キーワード：触覚センサ 遠隔操作 近接覚センサ

### 1. 研究開始当初の背景

近年国際的競争力の向上のため、生産システムの高度自動化が進んでいる。特に、欧米においてロボットハンドの研究開発の進展が目覚ましい。これは、汎用・万能な「人間のよう器用な手」の実現は、人間の作業を再現する汎用デバイスとして革命的な価値をもつことによる。最近、独 DLR、米国 NASA、DARPA は、既に人間の手腕の自由度に近いシステムを実現している。しかし、動作動画を見る限り、道具を使った操作はぎこちない。この原因は、触覚などによる感覚フィードの欠如が大きい。但し、我々は触覚付与だけがその解決法ではないと考える。例えば我々は、ハンド近傍にある物体の位置・距離を計測する近接覚センサをハンドに実装することで、ハンドの把持操作性能を格段に向上できることを示した。近接情報を用いたハンドシステムは、視覚情報と触覚情報の隙間を埋める技術である。視覚は大局的情報が取得できるが、オクルージョンの問題があり、触覚は確定情報が取れるが接触するまで情報が取れない。即ち物体から 10cm 以下の近傍領域において、把持操作における情報の欠落が起り、確実・高速な操作ができなかった。

### 2. 研究の目的

実環境の把持では、ハンドとアーム両方の協調動作があつて初めて、各種物体形状や位置・姿勢誤差に応じた適切な把持が可能となる。このため、近接覚センサ情報に基づくハンド制御方式を発展させ、移動する把持対象物にも追従し、その形状に自律的に倣うハンド・アーム統合制御システムを開発する。自律的把持が可能となるため、従来遠隔操作が難しかった単眼カメラ映像による把持操作でも物体近傍までハンドを近づけるだけでよく、遠隔操作での確実性を向上させる。なお遠隔操作での視界不良下での作業を支援する触覚フィードバック方式を導入した。また、局所的感覚である触覚・近接覚では困難であった、物体の位置・姿勢の検出を可能とするため、簡易視覚を導入し把持操作適用範囲の拡大を図る。

### 3. 研究の方法

#### (1) 知的ロボットハンドの研究開発

物体形状に自律的に倣うハンド制御系の開発と、把持対象物を追従するアーム制御系を開発し、これらを統合する制御システムを開発する。

まずハンド制御系として、近接覚出力とハンドモータ系を直接結合した近接覚制御型ハンドの実現を図る。このため 1) 対象物を検出・追従し、2) 物体形状に応じて多指が自律的に倣い、3) 指先の同時接触による掴み動作を行う。そして 4) 触覚を用いて対象物を落とさない適切な把持力での把持を行う。次にアーム制御系として、物体形状に自律的に倣うハンド制御系を拡張した反射型制御方式を

用いてアーム手先位置・姿勢をも高速に制御できるシステムを開発する。また光学系近接覚を用いたときの欠点である物体表面反射率の影響を補償する計測方式の導入を行い反射率の影響を受けず、把持に重要な多指同時接触の実現を行う。

#### (2) 知的ハンドを用いた遠隔操作システムの構築

知的ロボットハンドは、対象物近傍まで誘導すればハンドが自動的に把持を行うため、単眼カメラ映像による把持操作でも、操作者は物体近傍までハンドを近づけるだけでよく、遠隔操作での確実性と高速性の向上が達成できる。また視界不良化での操作性の向上を図るため、遠隔ハンド指先の近接覚センサ出力を操作者指先に取付けた電気触覚ディスプレイにより物体近傍情報をフィードバックし、接触後は近接覚と触覚センサを組み合わせ物体の柔らかさの検出を可能とする。その他、遠隔操作実験を行うため、移動台車と搭載アーム、およびこれに実装可能な軽量ロボットハンドを開発し、これらを統合するシステムの開発を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 知的ロボットハンドの研究開発

触覚・近接覚・すべり覚を統合したハンドで近接覚出力とハンドモータ系を直接結合した近接覚制御型知的ハンドの実現を行った。図 1 にそのシステムを示す。

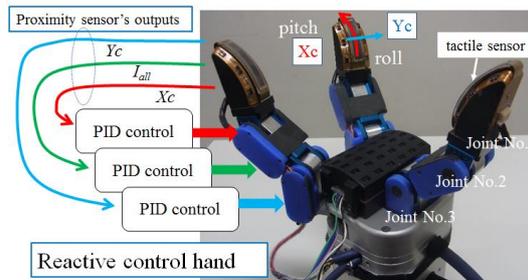


図 1 反射型制御を用いたロボットハンド

指先部近接覚センサは、対象物面とのロール角( $Y_c$ )、ピッチ角( $X_c$ )周りの姿勢と距離( $I_{all}$ )を検出できるため、これらを調整可能なロボットハンドであれば、このセンサで1つの指を制御できる。本研究で用いるハンドは、1指あたり3関節を持ち、先端関節(joint1)は指先ピッチ角の変化に、根元関節(joint2)は物体-指先間の距離の変化に、旋回関節(joint3)は、指先ロール角の変化にそれぞれ対応する。さらに、先端関節を  $X_c = 0$ 、旋回関節を  $Y_c = 0$  となるよう制御し、根元関節は  $I_{all}$  が一定値となるよう制御することで、対象物面に対し指先を正対させ、指先-物体間距離を一定に保つ動作を可能とした。これにより、ハンドを把持対象物に近づけるだけで、物体の形に倣う自律的把持を行える知的ロボットハンドが可能となった。このハンドは、動作の高速性はもちろん、遠隔操作

のように遅延時間があり物体が少し移動・振動する場合の自動追従把持が可能である。またハンドは、近接覚センサと駆動モータを一对で接続するローカル制御系のためハンド内部に制御系を実装するコンパクトなモジュラー型ハンドシステムが実現できた。

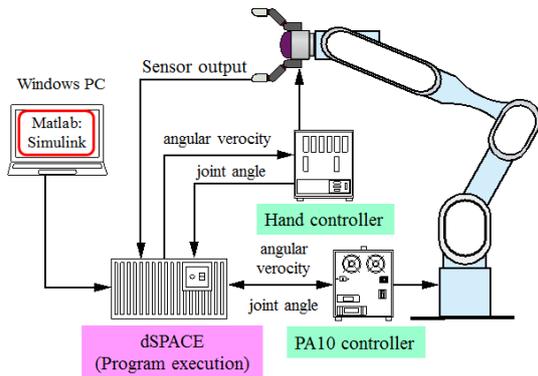


図2 ハンド・アーム統合制御系システム

図2に、ハンド・アームシステム全体の構成を示す。ロボットは、3指(8DoF)のハンドと、7軸汎用アーム(PA10-7C)で構成される。制御実行にはdSPACEを用いる。今回、7軸汎用アームに付属の既存プログラムを使用せず、Simulinkで新規に作成したハンド・アーム統合制御モデルをdSPACEにダウンロードしてこの内蔵プロセッサ上で実行することで0.1msでのセンサ値の取得と5ms周期でのハンドとアームの制御ループを実現した。

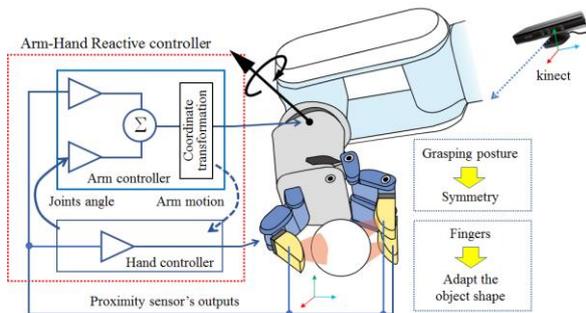


図3 ハンド・アーム統合系への反射制御方式の拡張

これまで把持制御は、ハンドのみを制御対象とした。しかし、実環境で把持を行うためには、対象物の位置・姿勢により、アーム手先位置・姿勢も制御する必要があり、ハンドとアーム両方の協調動作があって初めて、各種物体形状や位置・姿勢誤差に応じた適切な把持が可能となる。そこで図3に示すように、ハンド各関節の反射型制御に加えて、アーム手先位置・姿勢を調整するための反射型制御を導入した。ハンドとアームの反射型制御は独立、かつ並列に実行される。しかし、赤外光を用いた近接覚センサの出力は表面の反射特性にも依存する欠点がある。よって対象物の反射率が未知の場合、一定距離に指先を近づけることは難しく、各指先を同時に接触

させることはできなかった。そこで本研究ではプリシェイピング中の近接覚センサ出力の変化率から対象物面の反射率を推定する手法を開発した。プリシェイピングと同時に反射率推定を行うことで、各指先から物体までの相対距離を推定できる。これにより、各指が同時(0.056s以内)に触れるように物体を把持できるハンドを実現した。並びにTime-To-Contactと呼ばれる生物的視覚情報処理方式の導入を行うことで、多指が自律的に対象物面に正対し、同時接触が可能な制御を実験的に実証した。

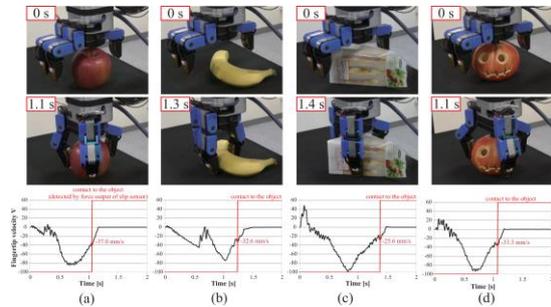


図4 反射率推定後の各種対象物に対するの同時接触実験結果

しかしながら近接覚システムでは対象物体の位置・姿勢などは、触覚・近接覚では困難であった。このため大局的情報取得する簡易視覚(kinect)を導入して、把持操作適用範囲の拡大を図った。知的ハンドではおおよその位置と姿勢が分かればよいため、視覚情報として本研究では全ての対象物を円柱に近似して、把持のアプローチを行った。円柱近似する手法としてはkinectから取得した対象物の点群に対してRANSAC法を用いた。図5に実際の対象物に対して、円柱近似した結果を例として示す。

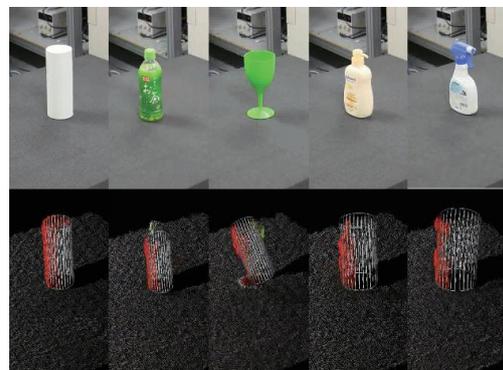


図5 簡易視覚による把持対象物の円柱近似計測結果例

視覚による計測位置・形状の誤差はある程度あるが、本システムでは近接覚を用いてこの計測誤差があっても動作が可能な点が大きな長所である。また、図6には簡易視覚で把持対象のおおよその位置と姿勢を計測しハンド・アームシステムで把持を行っている様

子を示す。

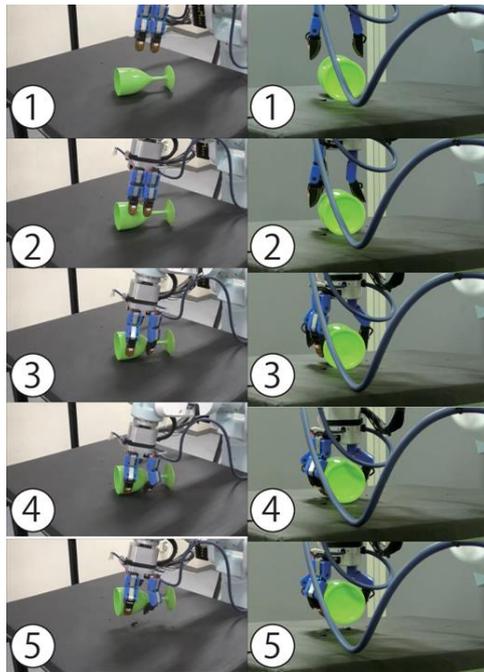


図6 簡易視覚で物体の位置姿勢を検出し，ロボットハンドにより対象物形状に倣い把持実行例（ワイングラス）

柔らかさの顕出：物体の柔らかさは，押込んだ時の変形量 ( $x_d$ ) と接触力から検出を行った。図7にその様子を示す。近接覚センサの距離出力  $I_{all}$  は，指先と物体が非接触の状態では指先と物体の接近に伴って増加する。但し，物体との接触後には図のように物体の変形量  $x_d$  の増加に伴って距離出力  $I_{all}$  が増加する。そのため触覚センサにより接触を検出し，接触の瞬間における距離出力  $I_{contact}$  を基準として変化率  $I_{rate}$  をとると，その値は物体表面の反射特性によらず物体の変形量  $x_d$  は  $I_{rate}$  の関係から求めることができる。もちろん接触力は触覚センサから計測できるため，この二値の比から柔らかさを求めた。

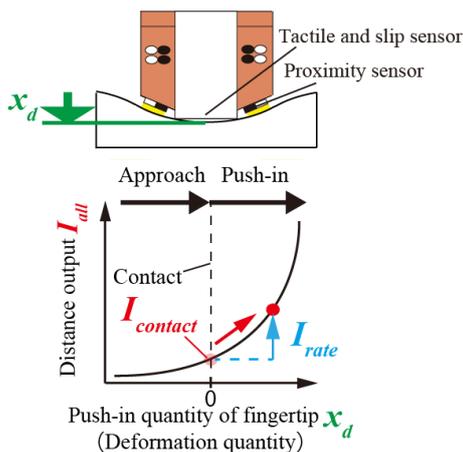


図7 柔らかさの検出方式。対象物への接触力とその変形から検出する

## (2) 知的ハンドを用いた遠隔操作システムの構築

一般的に，遠隔操作型ロボットアーム・ハンドシステムでは，操作者が主に視覚センサから得られる外界情報に基づき操作を行う。しかし，対象物に接近した際にはロボットハンド自体による対象物の隠蔽，または不良視界によりカメラで対象物を捉えることが困難となり，物体近傍で情報の欠落が生じる。そのため，操作者は把持直前におけるハンド指先の配置を調整及び決定することが難しい。本研究では開発した知的ロボットハンドは，対象物近傍まで誘導すればハンドが自動的に把持を行う。このため，単眼カメラ映像による把持操作でも，操作者はカメラ画像を見ながら物体近傍までハンドを近づけるだけでよく，遠隔操作での確実性と高速性の向上が達成できる。また，遠隔ハンド指先近接覚センサ出力を操作者指先に取付けた電気触覚ディスプレイによりフェードバックを行い視界不良化での操作性の向上を図った。

遠隔操作システムの開発：本研究では，まず遠隔操作実験を行うため，構造が容易なロボットハンド・アームを搭載した移動台車システムの構築を行った。図8にはそのシステムを示す。

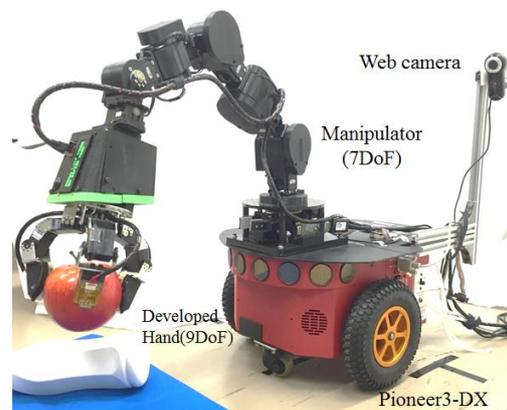


図8 開発した遠隔操作システム。移動台車にハンド・アーム系そしてWebカメラを搭載している

移動ロボットには，Pioneer3を，またアームにはCyton\_Gamma1500 (7 DoF)を用いた。但し，移動台車に搭載するためには，小型軽量で高性能な多自由度ロボットハンドが必要となる。このため高性能なRCサーボモータを用いて新たにハンドの開発を行った。ハンドは3指合計して9自由度を有し，1指あたり屈曲2自由度，旋回1自由度を有している。すべての関節にはRCサーボモータである近藤科学製の“KRS-3204”を使用した。モータ・センサの制御回路は全て手首内部の空間に収め，ハンドの合計重量は800gWとなった。制御周期は100Hzである。指先力は1.17kgf，応答性として目標角度30度の入力に対して

100ms 程度で目標角度に到達しており、把持力および応答性に対して十分な性能を示している。

触覚提示システムの開発：ハンド指先-物体間の距離数十ミリメートルから物体との距離・傾きを検出でき、この近接覚情報を操作者の指先へ呈示することで、非接触で物体把持位置を決定できる。操作者の指の動きと同期してハンド指先が物体へ接近した場合、指先近接覚センサは距離と傾き出力が変化する。それと同期するように、操作者の指先は仮想的な弾性体を押込んだ感覚提示刺激を与えた。

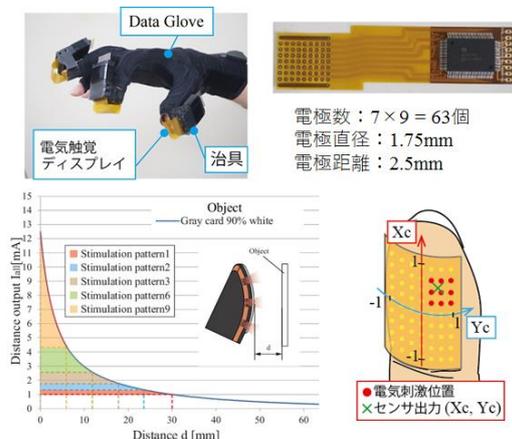


図8 触覚フィードバック用電気触覚ディスプレイ。左下には距離と提示刺激の関係を示す

本研究では、操作者の指先-弾性体間の接触面積の変化と指先近接覚センサの距離出力、操作者の指先-弾性体間の接触位置の変化と指先近接覚センサの傾き出力を対応付けた。電気触覚ディスプレイは経皮電気刺激により、皮膚表面に接触した電極から微弱電流パルスを流すことで、機械受容器を刺激し、バーチャルな触覚を生成する。電気触覚ディスプレイの構成は、電極基板、スイッチ回路基板、及び制御基板の3つからなる。提示はスイッチ回路により電極を高速に切り替える経皮電気刺激を行っている。そのため電気刺激面積や電気刺激位置を制御することができる。電極部分は、電極直径 1.75mm、電極間距離 2.5mm、7X9 個の電極が格子状に配置されており、人の指先に実装することが可能である。これによって、より適切な遠隔操作の支援情報提示とマニピュレータ・ハンド系の自律動作の統合による遠隔操作システムの構築ができた。

##### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)(全て査読あり)

- ① ネット状近接覚センサを用いた非接触手探り動作による未知物体把持の研究, 鈴木陽介, 瀬戸川 将夫, 明愛国, 下条誠, 日本ロボット学会誌, Vol.35, No.2, pp.49-56, 2017. <http://doi.org/10.7210/jrsj.35.135>

- ② 小山佳祐, 鈴木陽介, 明愛国, 下条誠, 指先に光学式近接覚センサを備えた多指ハンドによる同時接触での把持(物体表面の反射率推定とセンサ出力の補正), 日本機械学会論文集, Vol.82, No.833, pp.15-00366 (14 頁), 2015 <http://doi.org/10.1299/transjsme.15-00366>
- ③ H. Hasegawa, Y. Suzuki, A. Ming, K. Koyama, M. Ishikawa, and M. Shimojo, Net-Structure Proximity Sensor: High-Speed and Free-Form Sensor With Analog Computing Circuit, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 20, No. 6, pp.3232-3241, 2015 DOI: 10.1109/TMECH.2015.2417555
- ④ 小山佳祐, 鈴木陽介, 明愛国, 下条誠, 指先に近接覚センサを備えたロボットハンドによるプリグリップ制御, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.9, pp.712-722, 2015 (日本ロボット学会論文賞) <http://doi.org/10.7210/jrsj.33.712>
- ⑤ 西村冬威, 明愛国, 下条誠, 圧電繊維複合材料を用いた生物模倣型ソフト水中ロボットの研究開発-立体魚型ソフト水中ロボットの開発-, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.7, pp.524-530, 2015 <http://doi.org/10.7210/jrsj.33.524>
- ⑥ W. Zhao, A. Ming, M. Shimojo, Y. Inoue, and H. Maekawa, Fluid-Structure Interaction Analysis of a Soft Robotic Fish Using Piezoelectric Fiber Composite, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.5, pp.638-648, 2014 DOI:10.20965/jrm.2014.p0638

〔学会発表〕(計47件)

国際学会(11件)(全て査読あり)

- ① K. Koyama, Y. Suzuki, A. Ming, and M. Shimojo, Integrated Control of a Multi-fingered Hand and Arm using Proximity Sensors on the Fingertips, 2016 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp.4282-4822, Stockholm(Sweden), 2016.5.16 DOI:10.1109/ICRA.2016.7487625
- ② E. Kazama, R. Sato, I. Miyamoto, A. Ming and M. Shimojo, Development of a small quadruped robot with bi-articular muscle-tendon complex, 2015 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp.1059-1064, Zhuhai(china), 2015.12.6 (Best Paper Award) DOI:10.1109/ROBIO.2015.7418912
- ③ K. Koyama, Y. Suzuki, A. Ming, and M. Shimojo, Grasping Control Based on Time-To-Contact Method for a Robot Hand Equipped with Proximity Sensors on Fingertips, 2015 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.504-510, Hamburg(German), 2015.9.28

- DOI: 10.1109/IROS.2015.7353419
- ④ R. Sato, I. Miyamoto, K. Sato, A. Ming, M. Shimojo, Development of robot legs inspired by bi-articular muscle-tendon complex of cats, 2015 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.1552-1557, Hamburg(German), 2015.9.28  
DOI: 10.1109/IROS.2015.7353574
  - ⑤ T. Uchida, R. Sato, A. Ming, M. Shimojo, Development of leg mechanism using a knee joint with continuously variable reduction ratio adaptive to load, 2015 IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation (ICMA), pp.1199-1220, Beijing(China), 2015.8.2  
DOI:10.1109/ICMA.2015.7237656
  - ⑥ A. Ming, K. Sato, R. Sato, E. Kazama, I. Miyamoto, M. Shimojo, Development of robot leg composed of parallel linkage and elastic spring for dynamic locomotion, 2015 IEEE Int. Conf. on Information and Automation (ICIA), pp.38-43, Lijiang(China), 2015.8.8 (Best Paper Award of IEEE ICIA 2015)  
DOI: 10.1109/ICInfA.2015.7279255
  - ⑦ Y. Suzuki, K. Koyama, A. Ming, M. Shimojo, Grasping Strategy for Moving Object Using Net-Structure Proximity Sensor and Vision Sensor, 2015 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp.1403-1409, Seattle (USA), 2015.5.26  
DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139373
  - ⑧ A. Ming, T. Ichikawa, W. Zhao, M. Shimojo, Development of a sea snake-like underwater robot, Proc. of the 2014 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp.761-766, Bali( Indonesia), 2014.12.5  
DOI: 10.1109/ROBIO.2014.7090423
  - ⑨ A. Ming, K. Enomoto, M. Shinozaki, R. Sato, M. Shimojo, Development of an entertainment robot system using Kinect, 2014 10th France-Japan 8th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS), pp.127-132, Tokyo(Japan), 2014.11.27  
DOI: 0.1109/MECATRONICS.2014.7018621
  - ⑩ A. Ming, T. Tahata, K. Ueki, M. Shimojo, Development of a novel leg mechanism in the shape of backward convex with a mechanical joint stop for bipedal robot, 2014 IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation (ICMA), pp.107-112, Tianjin(China), 2014.8.3  
DOI: 10.1109/ICMA.2014.68856
  - ⑪ W. Zhao, A. Ming, M. Shimojo, Dynamic analysis and optimization of soft robotic fish using fluid-structural coupling method, 2014 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp.1474-1479, Hong Kong, 2014.5.31  
DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907046

国内学会 36件(査読なし)

- 1) 下条誠, Keynote 拡張型触覚とその応用, SICE,SI 部門講演会, 名古屋国際会議場, 愛知県・名古屋市, 2015.12.15 ほか

[図書] (計2件)

- ① M. Ishikawa, Idaku Ishii, Y. Sakaguchi, M. Shimojo, H. Shinoda, H. Yamamoto, T. Komuro, H. Oku, Y. Nakajima and Y. Watanabe, Dynamic Information Space Based on High-Speed Sensor Technology (Chapter5), Human-Harmonized Information Technology, Vol.1, pp.97-136, Springer, 2016
- ② 下条誠(監修/執筆), 触覚認識メカニズムと応用技術(増補版), 全666頁, サイエンス&テクノロジー株式会社, 2014

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

- 受賞
- ① 日本ロボット学会論文賞(2016年)  
<http://doi.org/10.7210/jrsj.33.712>
- ② Best Paper in Biomimetics Award of IEEE ROBIO 2015  
DOI:10.1109/ROBIO.2015.7418912
- ③ Best Paper in Robotics Award of IEEE ICIA 2015  
DOI: 10.1109/ICInfA.2015.7279255
- ④ Most Cited Articles in IEEE Sensors Journal from all times by April 2014.  
<http://ieee-sensors.org/most-cited-paper/>
- プレス発表
- ① 視覚に頼らず物体つかめる近接覚センサー組込型アナログ回路を開発, 日刊工業新聞, 2014/08/08
- ② 正確な手さばき, 人の代行—電通大, 「つかむ」を究める, 日経産業新聞, 2014/04/04
- ③ IEEE SPECTRUM "Video Friday": Selection of ICRA 2015 videos, 2016/5/24  
<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-software/video-friday-icra-stockholm>

6. 研究組織

- (1) 下条誠(SHIMOJO MAKOTO), 電気通信大学・大学院情報理工学研究科・名誉教授, 研究者番号: 90292474

(2) 研究分担者

- ① 明愛国(MING AIGUO), 電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授, 研究者番号: 50239456
- ② 鈴木陽介(SUZUKI YOUSUKE), 金沢大学・理工研究域・機械工学系・助教, 研究者番号: 20582331

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者 なし