

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22240012

研究課題名(和文)統合型触覚センサーアーキテクチャーの研究開発

研究課題名(英文) Research and development of the tactile sensor architecture in which integrate tactile sense

研究代表者

下条 誠 (shimojo, makoto)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：90292474

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,900,000円、(間接経費) 10,170,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ロボットはもとより各種機械システムに装着する触覚センサシステムの高機能化を図るため、接触、滑り、近接などの多様な物理量を統合する触覚センサーアーキテクチャーを研究開発した。これにより、従来問題となっていた、多数の検出素子を接続する配線処理への方法論の提案を行い、アナログ回路網を用いることにより検出素子増加に伴う応答遅れの問題への解決を図った。また、従来困難であった、すべり始める直前の事前滑りを検出可能なすべり覚センサを開発した。センサは薄型軽量・高速応答が可能である。研究では、これら開発したセンサをロボットハンド等へ実装し、検証実験を行い、その有用性を実験により明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research, the tactile sensor architecture which measures contact, slip and proximity information by the same analog circuit was developed. Thus, advanced features of the tactile sensor system mounted on robots and various mechanical system can be achieved. By this method, the solution of the wiring problem which connects many detection elements was proposed. And also by using an analog circuitry network, solution to the problem of the response delay accompanying the increase in a detection element was attained. Moreover, the slip sensor which can detect the slip just before beginning to slip was developed. The sensor is a high-speed response with a simple structure and thin light weight. In this research, the these-developed sensor was mounted to the robot hand and the autonomous vehicle, the verification experiment was conducted, and the availability was clarified in the experiment.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：センサ融合・統合 触覚 近接覚 すべり覚

### 1. 研究開始当初の背景

20世紀は視覚と聴覚の時代として、その工学的実現・応用が目覚ましい発展を遂げ、社会生活、産業に大きな変革をもたらした。現在これらが成熟期を迎え、今触覚に注目が集まってきている。これまでに我々は、2.5次元触覚として接触とその近傍数センチ範囲の対象を検出するセンサを開発した。これによりロボット等への応用で対象物に接触するまで検出できない触覚の問題を解決した。また視覚には隠蔽、死角があり全方位無死角、かつ高応答性の確保は困難であった。我々が開発した2.5次元触覚は、これら視・触覚の問題を解決し、かつ高速応答が可能であり、また拡張性が高く、大面積化も容易である特長がある。本研究では、アナログ回路網方式を基礎に、さらに発展させ多様な検出素子の統合を図る。また滑りの検出は、物体の器用な操りやHapticsインターフェースなどにおいて必要不可欠の情報である。しかしながら、すべりの検出技術に関してはいまだ有効な方法が無いのが現実である。以上の事から我々は、次の項目を解決すべき問題とした。

- 1) 本来触覚は、滑り、接触、温度等を含む多角的センサであり、多くの検出素子を分散配置する必要がある、特に機械システム全体を覆う場合、その膨大な配線数の処理が困難である。
- 2) 検出素子数の増加と共に、その走査と情報処理のため、応答遅れが生じる。
- 3) Hapticsインターフェース、および各種自動化機器で利用可能な初期滑り覚センサがない。

### 2. 研究の目的

本研究課題は、多様な物理量を検出する触覚センサアーキテクチャを研究開発する。触覚は接触、滑り、温度等と、新たな概念として接触前情報を検知する近接を加えた多様な検出素子から構成されるとした。今回これら多様な検出素子を統合するセンサアーキテクチャを提案する。これにより従来から問題となっていた、多数の配線処理の解決、検出素子増加に伴う応答遅れ等の課題を解決する。また、これまで困難であった事前滑りを検出可能な初期滑り覚センサの開発を行う。多様な検出素子を統合するセンサアーキテクチャの開発を目指して、(1) ネット状アナログ回路網方式による多角的触覚情報の統合、および(2) 高感度・高速応答型の初期滑り覚センサの研究開発を行う。

(1) ネット状アナログ回路網方式による多角的触覚情報の統合

- 1) 近接、接触、滑り等の多様な検出素子を実アナログ回路網方式により統合する
- 2) 検出素子数、面積、配置にかかわらずセンサからの配線数は、4~8本程度と省配線とする
- 3) これまでは省配線・高速応答の特徴を有する反面、分布量計測ができない欠点があった。今回省配線、高速性の特徴を活かし、分布量計測を可能とする

(2) 高感度・高速応答が可能なすべり覚センサの開発

- 1) 滑りの事前情報である”初期滑り”を高感度・高速に検出する
- 2) 薄型軽量(5mm×5mm×1mm程度)とする

### 3. 研究の方法

(1) ネット状アナログ回路網方式による多角的触覚情報の統合：近接、接触、滑り、温度等の多様な検出素子を、アナログ回路網形式へ統合する。それと共に回路網方式の改良を行う。基本となるセンサ構造を図1に示す。m×nの網目状の抵抗網A,B層と、A,B層間を接続する検出素子とSW(switch)素子とから構成する。センサは、図1(b)に示す単位エレメントを複数個並列に接続し、図1(a)に示す電気的境界条件を満たせばよい。検出素子は、物理量(力、光、磁気など)で抵抗値が変化するものなら利用可能である。全てのSW素子がONであった場合、センサは全ての検出素子で検出された電流値の中心位置とその総和が出力される。出力は電極電圧(E1,E2,E3,E4)から求められ、センサからの配線は4本のみとなる。分布量計測には順次SW素子ONすることで計測可能である。また3次元構造体を被覆した場合のセンサ死角への対応、および検出素子数の増加とともに増加する抵抗回路網の構成素子の問題解決を図るため回路網構造の改良を行なう。

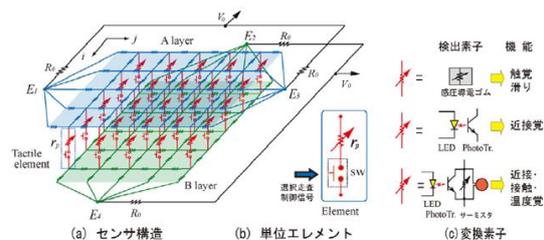


図1 アナログ回路網型センサ構造と検出素子

(2) 高感度・高速応答が可能なすべり覚センサの開発：高感度・高速応答型の初期滑り覚



であるため、図1にトランスインピーダンス回路を追加して対応した。また分布量計測は、図5の装置でLEDを順次点灯走査することで検出を行い、図6に示すようにロボット近傍の対象物配置の検出が可能であることを示した。

(2) 高感度・高速応答が可能なすべり覚センサの開発

①初期滑り分離アルゴリズムの開発：初期滑りの発生に伴い高周波の信号成分を離散ウェーブレットを利用して、初期滑りとそれ以外の場合について分離した。図7にその処理結果例を示す。高周波信号成分は滑り変位発生前に生じること、離散ウェーブレットで核関数 db2 が高速性、分離性能ともに優れていることを明らかにした。

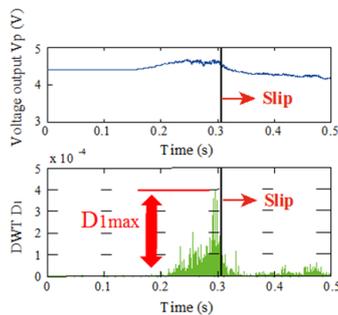


図7 感圧素材抵抗変化とDWT処理結果

対象物体の材質を変更した際の影響についても調べた。物体として、アクリル、布、ボール紙、ウレタンフォーム、スチール、テフロン、木材を選んだ。この結果、いずれの物体についても、すべり変位発生前にDWT値が増加すること、材質によらずDWT値の大きさもほぼ同様の値をとることから、物体の表面性状に対する影響は極めて小さいことがわかり、多くに物体でのすべり検出に利用できることが明らかになった。これらを含めすべり覚センサの特性として次の事がわかった。

- 1) 感圧導電性ゴムの感圧範囲によって検出可能な初期法線力の範囲が決まる
- 2) 急激な滑りほど検出しやすい特性
- 3) 物体の表面性状の影響を受けにくい
- 4) 被覆材を貼付してもすべり検出可能

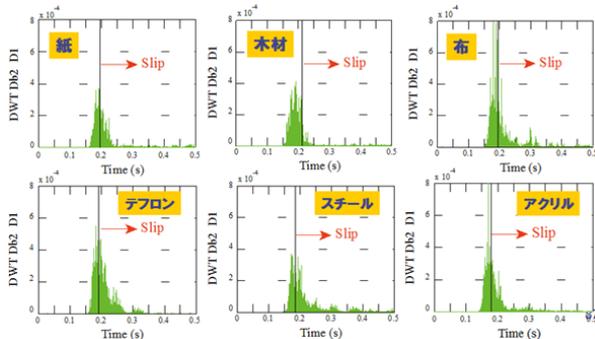


図8 各種素材に対するすべり検出結果

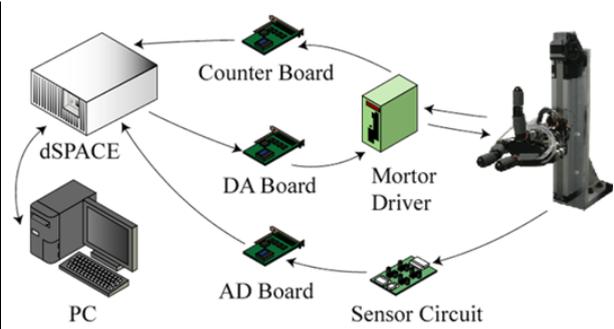


図9 ロボットハンド系システム

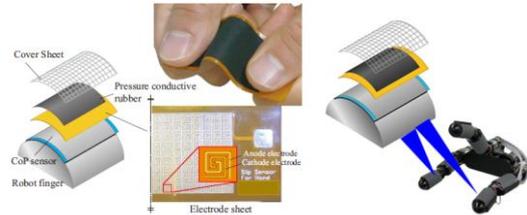


図10 試作すべり覚センサとハンドへの実装

②センサのロボットハンド・義手への応用

信号処理アルゴリズム開発と並行して、センサ試作を行った。実験システム図9に示す。制御はdSPACEを使用し、MATLAB/simulinkを用いて作成した制御プログラムでのリアルタイム制御が可能なシステムである。制御周期は1msと非常に高速である。最高10kHzのAD変換ボードを有し外部からのセンサ信号を高速に取得することができる。すべり覚センサのデータ取得はサンプリング周波数10kHzで実行し、取得したデータに対してDWTの演算を行う。その結果に基づき、ロボットハンドの制御を制御周期1kHzで実行した。すべり覚センサは、図10に示すようにフレキシブル基板上に電極を作り、感圧抵抗素材をのせ被覆材で覆い作製した。実験は、プラスチック製のコップを軽く把持し、注ぎこむ粒子の重量を変化させ、初期滑り検出に基づく把持力調整制御を実行した。図11上は変位、図11中は触覚センサからの把持力、図11下はDWT値を示す。すべり覚センサによって物体の初期滑りを検出できていること、また、ハンドの把持力制御に応用できるほど高速応答かつ安定した検出が実現できていることを確認した。本すべり覚センサの出力を利用することにより、物体を滑らすことなく、かつ最小に近い力での把持を実現可能であることを示した。この他、適切なセンサが無かった義手の接触・滑り覚センサとして利用した。図12に示すように義手については横井らの開発した小型軽量な義手に取付け、実験を行った。実験では1)ペットボトルの把持、2)ペットボトルの受け渡しとして、人の手で容器を持ち上げ時、すべりを検出したら手を開く動作をさせる、そして3)使用者の操作によらない反射的動作として、手のひ

らのセンサが接触したら指を閉じるという動作させ把持を行った。全ての動作でスムーズな操作を実現でき、すべり覚センサ有用性が明らかになった。図 13 には近接覚・触覚・すべり覚をまとめ実装した統合型ロボットハンドを示す。指脇に近接覚を配し指中央に触・すべり覚センサを実装した。把持動作では、近接覚を用いて対象物形状に倣ったプリシェーピング動作を行い、対象物面の直近に各指先を等間隔で配置することで同時接触把持を可能とし、触覚・すべり覚で適切な把持力で対象物を掴む動作を実現できることを示した。

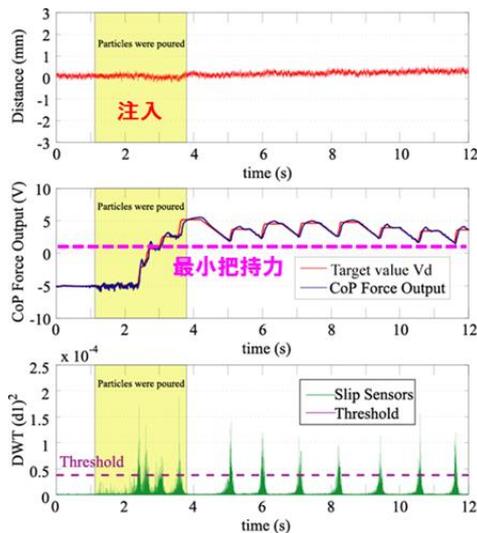


図 11 すべり覚を用いた把持制御結果



図 12 すべり覚を取り付けた義手

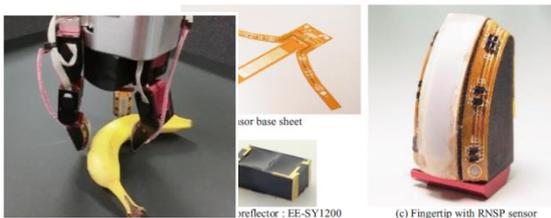


図 13 近接・接触・すべり覚統合型ハンド

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 12 件) (全て査読あり)

- 1) Shimojo M., Araki T., Ming A., Ishikawa M., A High-Speed Mesh of Tactile Sensors Fitting Arbitrary Surfaces, IEEE Sensors Journal, 10,4, pp.822-830,2010.4.
- 2) Zhaoxian Xie, Manabu Yamashiro, Hisashi Yamaguchi, Aiguo Ming and Makoto Shimojo: Development of A Mobile Manipulator System

With RFID-Based Sensor Fusion For Home Service: A Case Study on Mobile Manipulation of Chairs, International Journal of Information Acquisition, Vol. 7, No.1, pp.1-13,2010.6

- 3) 溝口善智, 多田隈建二郎, 長谷川浩章, 明愛国, 石川正俊, 下条誠, 近接・触・すべり覚を統合したインテリジェントロボットハンドの開発, 計測自動制御学会論文集, Vol.46, No.10, pp.632-640, 2010.10
- 4) H. Hasegawa, Y. Suzuki, A. Ming, M. Ishikawa, M. Shimojo, Robot Hand Whose Fingertip Covered with Net-Spaced Proximity Sensor +/-Moving Object Tracking Using Proximity Sensing-, J. of Robotics and Mechatronics, vol.23, no.3, pp.328-337,2011.6
- 5) 寺田一貴, 鈴木陽介, 長谷川浩章, 曾根聡史, 明愛国, 石川正俊, 下条誠, 全方位検出・高速応答可能なネット状近接覚センサの開発, 日本ロボット学会誌, vol.29,no.8, pp.683-693, 2011.10
- 6) Yosuke Suzuki, Norio Inou, Hitoshi Kimura, and Michihiko Koseki: Self-Reconfigurable Modular Robots Adaptively Transforming a Mechanical Structure - Algorithm for Adaptive Transformation to Load Condition -, Journal of Robotics, Vol. 2011, Article ID 794251 (2011)
- 7) Xu, Chunquan; Yang, Zhizhen; Ming, Aiguo; Shimojo, Makoto. Motion planning of a golf swing robot, MECHATRONICS, Vol.22, No.1, pp.13-23, 2012.
- 8) Seiichi Teshigawara, Takahiro Tsutsumi, Yosuke Suzuki, and Makoto Shimojo: High Speed and High Sensitivity Slip Sensor for Dexterous Grasping; Journal of Robotics and Mechatronics, vol.24, no.2, pp.298-310,2012.4
- 9) 鈴木健治, 鈴木陽介, 長谷川浩章, 明愛国, 石川正俊, 下条誠: ロボットハンド指先に付与したネット状近接覚センサ情報に基づく把持姿勢の決定; 計測自動制御学会論文集, Vol. 48, No. 4, pp.232-240,2012.4. (FA 財団 論文賞)
- 10) Yosuke Suzuki, Seiichi Teshigawara, Mitsuhiro Chiba, Takumi Shimada, Aiguo Ming, and Makoto Shimojo, Experimental Discussion of Occurrence of High-Frequency Component on Slip Sensor Output Using Pressure Conductive Rubber, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.25, No.2, pp. 316-323, 2013.2
- 11) 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠: ロボットハンドの構造・運動を考慮した操りスキルの統合に基づく結び目の生成計画, 日本ロボット学会誌, vol.31,no.3, pp.283-291,2013.3.
- 12) Ichiro Miyamoto, Yosuke Suzuki, Aiguo Ming, Masatoshi Ishikawa, Makoto Shimojo, Basic Study of Touchless Human Interface Using Net Structure Proximity Sensors, Journal of Robotics and Mechatronics, vol.25,no.3,pp.1-6,2013.6

〔学会発表〕(計 104 件)

国際学会 (30 件) (全て査読あり)

- 1) Hasegawa, H.; Mizoguchi, Y.; Tadakuma, K.; Aiguo Ming; Ishikawa, M.; Shimojo, M.; Development of intelligent robot hand using proximity, contact and slip sensing, Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE Int. Conf. on, pp. 777 - 784, 2010 (Anchorage, AK, 3 May 2010)
- 2) Teshigawara, S.; Tadakuma, K.; Aiguo Ming; Ishikawa, M.; Shimojo, M., High Sensitivity Initial Slip Sensor for Dexterous Grasp, 2010 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp.4867-4872, 2010 (Anchorage, AK, 3 May 2010)
- 3) Tadakuma, K.; Ohishi, C.; Maruyama, A.; Tadakuma, R.; Nagatani, K.; Yoshida, K.; Aiguo Ming; Shimojo, M., Connected Tracked Robot with Offset Joint Mechanism for Multiple Configurations, 2010 IEEE/RSJ Int. Conf. on

- Intelligent Robots and Systems (IROS)  
pp.3366-71,2010 (Taiwan, 18 October 2010)
- 4) Shintake, J., Ming, A., Shimojo, M., Development of flexible underwater robots with caudal fin propulsion, 2010 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.940-5, 2010 (Taipei, Taiwan, 18 Oct. 2010)
  - 5) Yamaguchi, H.; Zhaoxian Xie; Aiguo Ming; Shimojo, M.; Human assist by a mobile manipulator with high speed tactile sensor, 2010 IEEE Int. Conf. on Information and Automation (ICIA), pp.765-770, 2010 (Harbin, China, 20 June 2010) (Best Paper in Mechatronics Nomination Finalist)
  - 6) Teshigawara, S.; Tsutsumi, T.; Shimizu, S.; Suzuki, Y.; Ming, A.; Ishikawa, M.; Shimojo, M., Highly Sensitive Sensor for Detection of Initial Slip and Its Application in a Multi-fingered Robot Hand, 2011 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp.1097-102, 2011 (Shanghai, China, 9 May 2011)
  - 7) Terada, K.; Suzuki, Y.; Hasegawa, H.; Sone, S.; Ming, A.; Ishikawa, M.; Shimojo, M., Development of Omni-directional and Fast-responsive Net-structure Proximity Sensor, 2011 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 1954-1961, 2011 (San Francisco, CA, USA, 25 Sept. 2011)
  - 8) Shintake, J.; Aiguo Ming; Shimojo, M., A novel propulsion method of flexible underwater robots, 2011 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS) pp.4735-40, 2011 (San Francisco, CA, USA, 25 Sept. 2011)
  - 9) Xu, C., Ming, A., Shimojo, M., A unified framework for virtual passive bipedal gait generation, 2012 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp.3141-3146, 2012 (Saint Paul, MN, USA, 14 May 2012)
  - 10) Ye, Sha; Suzuki, Kenji; Suzuki, Yosuke; Ishikawa, Masatoshi; Shimojo, Makoto, Robust Robotic Grasping Using IR Net-Structure Proximity Sensor to Handle Objects with Unknown Position and Attitude, 2013 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp.3271-8, 2013 (Karlsruhe, Germany, May 6, 2013)
  - 11) Arita, Hikaru; Suzuki, Yosuke; Ogawa, Hironori; Tobita, Kazuteru; Shimojo, Makoto, Hemispherical Net-Structure Proximity Sensor Detecting Azimuth and Elevation for Guide Dog Robot, 2013 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.653-658, 2013.
  - 12) Koyama, Keisuke; Hasegawa, Hiroaki; Suzuki, Yosuke; Ming, Aiguo; Shimojo, Makoto, Pre-Shaping for Various Objects by the Robot Hand Equipped with Resistor Network Structure Proximity Sensor, 2013 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.4027-4033, 2013 (Tokyo Big Sight, Japan, November 3, 2013)

国内学会 74件(査読なし)

- 1) 清水智, 勅使河原誠一, 明愛国, 石川正俊, 下条誠, 高感度初期滑り検出センサの研究開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A1-D02, 旭川, 2010. 6. 15.

ほか

〔図書〕(計1件)

- 1) 下条誠(監修および執筆): 触覚認識メカニズムと応用技術, サイエンス&テクノロジー株式会社, 全499頁 2010.
- 2) 上記増補版, 全666頁 2014. 3.

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

〔その他〕

〔受賞〕

- 1) 財団法人FA財団,平成24・25年度「論文賞」
- 2) IEEE ICIA Best Conference Paper of ICAL 2013.
- 3) IEEE Sensor Journal; 25 MOST ACCESSED PAPER in June 2012, 25 MOST ACCESSED PAPER in April 2012
- 4) ICAM2010(Int. Conf. on Advanced Mechatronics)で Best Paper Nomination Finalist
- 5) 計測自動制御学会論文賞, 2010.

〔プレス発表〕

- 1) ファナック FA ロボット財団、今年度「論文賞」に下条教授ら、日刊工業新聞、2010/01/26
- 2) 近接覚センサー搭載ロボットハンド、日刊工業新聞、2013/11/5
- 3) ロボの手、より緻密に、電通大がセンサー、指先の力加減や滑る方向を検出、日経産業新聞、2012/12/11
- 4) 電通大、3センサーで未知の物体認識し最適な力で作業できるロボハンド、日刊工業新聞、2012/08/03
- 5) 応答速度を100倍に高めた近接覚センサー開発、日刊工業新聞、2011/11/16
- 6) 応答速度10マイクロ秒、近接センサー、カメラ不要—電通大が開発、ロボに応用へ、日経産業新聞、2011/11/24

6. 研究組織

(1) 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所・教授

研究者番号：90292474

(2) 研究分担者

① 石川 正俊 (ISHIKAWA MASATOSHI)

東京大学・大学院情報理工学系研究所・教授  
研究者番号：40212857

② 横井 浩史 (YOKOI HIROSHI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授

研究者番号：90271634

③ 明 愛国 (MING AIGUO)

電気通信大学・大学院情報理工学研究所・准教授

研究者番号：50239456

④ 鈴木 陽介 (SUZUKI YOUSUKE)

電気通信大学・大学院情報理工学研究所・助教

研究者番号：20582331

(3) 連携研究者

なし