

平成 22 年 4 月 20 日現在

研究種目：基盤研究(A)  
 研究期間：2007 ～ 2009  
 課題番号：19200015  
 研究課題名(和文) 近接覚から触覚までをシームレスにつなぐ汎用触覚センサ構成方式の研究開発  
 研究課題名(英文) Research and development of the tactile sensor system in which connects from a proximity sense to a tactile sense seamlessly  
 研究代表者 下条 誠(SHIMOJO MAKOTO)  
 電気通信大学・電気通信学部・教授  
 研究者番号：90292474

## 研究成果の概要(和文)：

本研究は、基本動作原理が同じセンサで、近接覚から触覚までをシームレスにつながる触覚センサシステムの開発と、これらを用いた新たな制御システムの開発を行った。その特色・独創的な点としては、全て同じ動作原理であるため、ソフトウェアの統一が取りやすく、また単純なアナログ回路網で構成するため、高速応答性に優れ、拡張性が高く、構造が簡単なことから安価に供給できる。このような特徴を併せてもつセンサはこれまで実現されておらず、これからのロボット技術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共通的プラットフォーム技術として利用できると考える。

## 研究成果の概要(英文)：

In this research, the tactile sensor system seamlessly connected in from a proximity sense to a tactile sense and a new control system using these sensors was developed. Since sensors are operated under same basic principle, it is easy to take standardization of software. Moreover, since it constitutes from a simple analog circuitry network, it excels in a high-speed response and extendibility is high. The sensor which has such a feature is not realized until now. This sensor can be used as common platform technology of the tactile sensor system with which various mechanical systems are equipped.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	11,600,000	3,480,000	15,080,000
2008年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
2009年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	27,500,000	8,250,000	35,750,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：知能情報処理・知能ロボティクス

キーワード：センサ融合・統合

## 1. 研究開始当初の背景

ロボットが知的動作を行なう場合、視覚と触覚は必ず必要になる感覚である。この視覚と触覚は相補的な感覚であり、視覚は大域的状況を推定し触覚は局所的状況を確認する役割がある。しかしながら、触覚は研究開発段階の研究が多く実用化の面では視覚に比べ遅れているといえる。この視覚と触覚とを統合するシステムには、視覚情報と触覚情報のシームレスな接続の問題がある。すなわち、対象物数センチの近距離では、視覚では隠蔽などによる情報の欠落、かつ触覚では非接触のための情報の取得不可の問題がある。ここで近接覚センサを導入することで、確実に近距離情報を検知でき、両者の欠点を補うことが可能となる。このように近距離での視覚の死角を補完する近接覚・触覚の組合せの必要性は、今後高まると予想される。以下に主にこの触覚システムについて解決すべき問題点を示す。

1. 視覚は大域的な情報を取得できるが、死角、隠蔽による情報欠落の問題があり、特に近距離での情報取得は困難である。
2. 触覚は接触・力など視覚では取れない情報を確定的に取得できるが、接触して初めて情報が取れる。このためアプローチ動作では対象物に衝突してしまうか、低速度での動作となる。
3. 触覚は自由曲面への装着が困難である。ロボット等各種機械システムには自由曲面が多く存在し、センサの取付けが難しい。
4. 触覚は多数の配線処理が困難である。各種機械システム全体を覆う場合、多くの検出素子を分散配置する必要があり、その配線数は膨大なものになり、その配線処理が難しい。
5. 処理時間がかかる。特に触覚では、検出素子の走査と情報処理のため、検出素子の増大とともに応答遅れが生じてしまう。
6. 触覚は標準的のセンサがない。このためソフトウェアの蓄積が困難であり触覚を必要とする応用分野での研究開発の効率低下、触覚を必要とするシステムの普及・発展の妨げとなっている。

## 2. 研究の目的

本研究は、基本動作原理が同じセンサで、近接覚から触覚までをシームレスにつなげる触覚センサシステムの開発と、これら近接・

触覚センサを用いた新たな制御システムの開発を行う。その特徴を箇条書きで示す。

- 1) 近接から接触までのシームレスな検出が可能となる。接触を伴う場合の従来の制御の弱点であったラスト数 cm 距離での制御方式を導入できる
- 2) 自由曲面にネットを被せるようにセンサが配置可能である
- 3) 検出素子数、面積、配置にかかわらずセンサと高々 4 本の配線で接続出来る
- 4) センサはアナログ回路網となっているため、検出素子の個数、配置面積にかかわらず、1ms 以下の高速応答性がある。このため通常ロボット制御に用いられる 1kHz 程度の制御ループにも十分対応可能である
- 5) 全て同一動作原理の汎用触覚センサの構成であるため、ソフトウェアの統一が取りやすい

従来多くの触覚センサが発表されたが、すでに述べた理由によりロボット等のセンサとして実際に利用する場合困難があり発展のネックとなっていた。本提案システムは、従来と比較してその性能・構造とも優れたものとする。また磁気、熱など各種検出素子を組み合わせることで、幅広い用途に応用できる等から、触覚センサの共通的プラットフォーム技術となる可能性がある。

## 3. 研究の方法

研究開発は、近接覚から触覚までをシームレスにつなぐ触覚センサシステムの開発と、これら近接・触覚センサを用いた新たな制御システムの開発から構成される。

- 1) 近接覚から触覚までをシームレスにつなぐ触覚センサシステムの開発
  - ① ネット状触覚センサ：センサを離散構造とし、その単位エレメントを試作してネット状構造としたセンサを開発する。センサ特性解析のためセンサモデルを構築し、適切な設計パラメータを決定する。求めたパラメータを基に単位エレメントを試作し、自由曲面に取り付け実験的検証を行なう。
  - ② ネット状近接覚センサ：検出素子特性と基本的センサ特性の解析、および回路シミュレータを用いての設計を行い、試作と基礎実験を行なう。プロトタイプを開発し、性能評価と改良を行なう。またセンサ出力における検出レンジの拡大、センサ配置形状等の解析を行う。また、試作したセンサをハンド、アーム等に取り付け検証実験を行う。
  - ③ ネット状近接・触覚センサ：回路シミュレ

ータを用いた基本回路の決定と、回路定数とセンサ特性の関係を解析する。また検出素子配置の機構設計と基本特性検証実験を行なう。そして、回路シミュレータ結果および上記近接覚センサの結果を基に実験プロトタイプを開発し、検証実験を行う。

④分布計測触覚センサ：センサはスイッチ素子と遅延素子を組合わせたものであり、遅延回路の選定、基礎実験と、回路シミュレータを用いた基本回路の決定と回路定数とセンサ機能との関係を解析する。その結果を基に試験センサを開発し、性能評価と改良を行なう。

2) 近接・触覚センサを用いた新たな制御システムの開発

①ロボットによる動作制御：多自由度マニピュレータを用いて触覚センサをマニピュレータ表面並びに小型の2足歩行ロボットに取付け、接触検知と動作生成に関する基本的な制御実験を行なう。また、近接・接触情報を活用した動作生成アルゴリズムの開発を行い、実験的に検証する。

②ロボットハンドと触覚センサを組合わせたハンドリング：対象物の滑り検知および把持制御の基礎実験を行なう。そして、ハンド全ての指および掌にセンサを装着し、対象物の把持を行なわせる把持アルゴリズムの設計・開発を行なう。

#### 4. 研究成果

本研究課題では、上記目的を達成するネット状触覚センサ、ネット状近接覚センサ、ネット状触覚・近接覚融合型センサ、ネット状分布型触覚センサを開発した。そして、これらセンサをロボットに実装して、ラスト数cmの距離での効果的な制御方式の開発を行った。また、本研究の成果に対して学会、産業界などからも次のような評価を受けたので記す。

- 1) ネット状触覚センサについて、IEEE Robotics and Automation Society Award Best Paper Finalist in IROS2007を贈られる。(2007年度)
- 2) ネット状分布型触覚センサについて、論文賞を、産業ロボットのトップメーカーであるファナック株式会社を母体とするファナック財団から贈られる。(2009年度)
- 3) 国内外の各種ロボット関連テーマが展示される国際ロボット展では、3企業から我々のセンサ方式が試作品として出展される。(2009年度)

この他、日本バーチャルリアリティ学会論文賞(2009年度)、そしてIEEE Int. Symp. on Robot and Human Interactive Communicationにて実用化に近く、社会的に意義が大きい研

究に与えられるKAZUO TANIE AWARDを受賞している。以下には研究成果の概要を示す。

1) 近接覚から触覚までをシームレスにつなぐ触覚センサシステムの開発

①ネット状触覚センサ：本研究では、自由曲面上に装着可能であり、かつ省配線化が可能で、高速な応答速度を持つネット状触覚センサの開発を行った。その概念図を図1に示す。

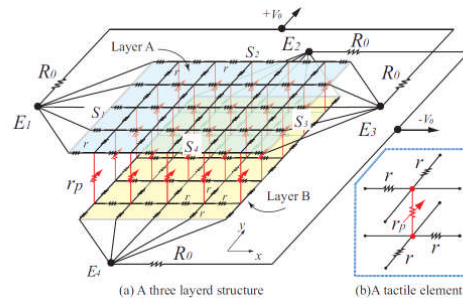


図1 ネット状触覚センサ

多数の検出素子の配線は、隣り合う検出素子どうしを接続するのみでよく、センサからの出力線は4本のみである。また、センサはアナログ回路であるため、検出素子の個数、配置、センサ面積に係わらず、その応答速度高速で、かつほぼ一定である。

②ネット状近接覚センサ：ネット状近接覚センサは、上記センサと原理は同一で、検出素子を接触を検出する感圧導電ゴムから、近接距離を検出するフォトリフレクタに変更した点にある。図2にその構造を示す。

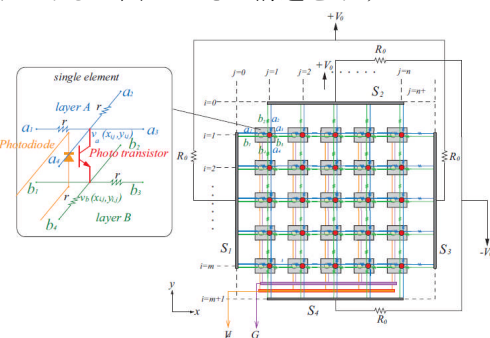


図2 ネット状近接覚センサ構造

フォトリフレクタは、大電流によるパルス発光と同期検波回路を開発し検出レンジを0.5m程度に拡大した。これを基に実験用センサを製作し小型ロボット、マニピュレータへの実装を行いロボットに接近する対象物を検出し、排除・回避等が可能であることを示した。

③ネット状近接・触覚センサ：本センサは、ネット状触覚センサの原理を近接覚・触覚の融合型に拡張したものである。本センサでは、検出素子として、感圧導電ゴムとフォトリフレクタを並列に接続した構造とし近接から接触までをシームレスに検出するセンサとした。

④分布計測触覚センサ：本研究では、ネット状触覚センサの原理を応用し省配線、高速応答の特徴を活かし、かつ荷重分布が計測可能なセンサの開発を行った。本センサは、選択走査方式により接触がある部分の荷重のみを検出するため、ロボット全身被覆のような大面積かつ接触部分が比較的小さい場合において応答速度を大幅に短縮することができる。センサは図3右上に示す様に、制御入力によってON/OFF可能なスイッチング素子(SW)回路を検出エレメントに付加してある。

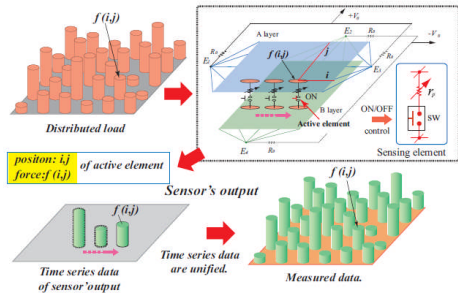


図3 分布計測触覚センサ概念図

次に、常に一箇所のみを検出エレメントをアクティブとする走査方式を導入するとセンサは、図3に示す様に荷重位置と荷重値  $f(i, j)$  を順次出力するため、全ての走査が終了後には荷重分布が計測できることになる。また遅延の有無を切替えることで接触状態にある検出エレメントのみを選択走査することになる。図4にはセンサ出力の時系列変化を示す。

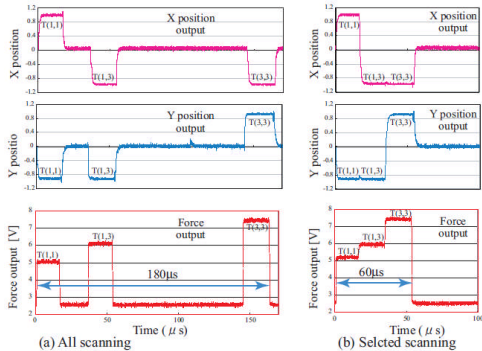


図4 分布計測時のセンサ出力(3点荷重) このようにセンサ全面に荷重が分布している様子が確認できる。

## 2) 近接・触覚センサを用いた新たな制御システムの開発

①ロボットによる動作制御：ネット状近接触覚センサを7自由度マニピュレータ表面に取り付け、対象物検知・回避の実験を行った。図5にはマニピュレータ先端に取り付けた近接触覚センサと対象物検知実験の様子を示す。

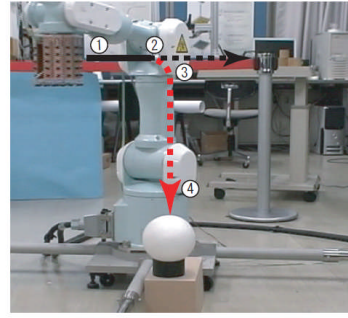


図5 対象物検知実験

図6には対象物追従・回避実験を示す。実験として、接触検知と動作生成に関する基本的な制御実験を行なう。対象物には直径150mmの白球を使用し、先端センサに近づけ追従動作を行わせた。また障害物として人間を想定し、追従制御中のPA10に接近してもらった。写真1~4からPA10が白球を追従している。また5で側面センサが人を検知し、追従せず停止している。さらに、6で人が存在しない方向に追従を続けている。この結果より、近接覚情報を使用することで追従動作と回避動作ができていること、効果としてロボットの安全性の向上を図ることが確認できた。

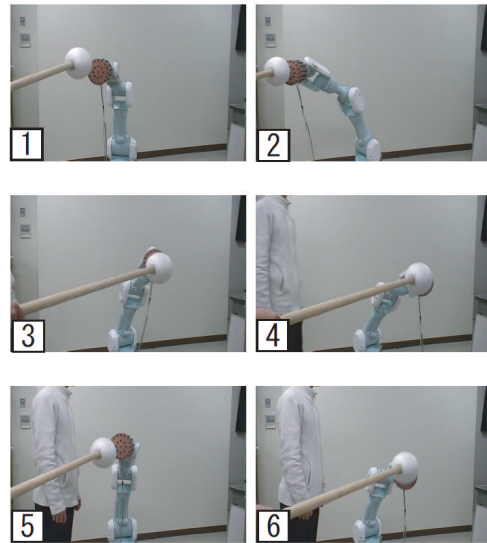


図6 対象物追従・回避実験連続写真

図7には試作した近接・触覚センサを示す。近接、触覚エレメントをそれぞれ33個用いている。

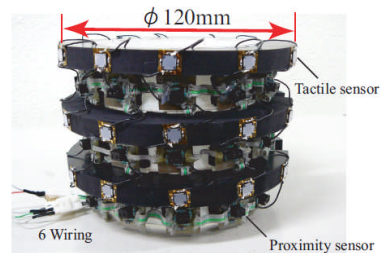


図7 近接・触覚センサ

このセンサを用いて近接から接触までをシームレスに制御する実験の様子を図8に示す。図中の写真(1)から(2)までの動作から、手を近づけると近接覚情報によりマンピュレータが接近し、一方(3)から(4)までの動作は、接触後触覚センサ情報により、力を加えた方向にマンピュレータが退避動作を行っている。このように、非接触状態での接近動作と接触時の退避動作をシームレスに検出し制御できることを確認した。



図7.3 実験結果—近接覚情報による対象物の検出

図8 近接・触覚実験

②ロボットハンドと触覚センサを組合わせたハンドリング：感圧導電ゴムにせん断変形を与えると感圧ゴムの抵抗値が急激に増大する現象を我々は発見し、これを用いたすべり検出と適切な把持力制御を行った。今回近接覚と触覚を統合するため、図9に示すように、シート状触覚に窓を開け、ネット状近接覚と一体化した。またロボットハンドの掌に3×5の近接覚センサを取り付け、設置位置誤差がある対象物把持を行い補正動作の成功を確認した。

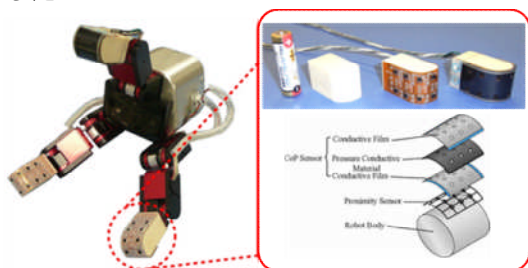


図9 近接・触覚を統合したハンド

以上、本課題では、視覚情報と触覚情報を滑らかに接続する近接覚センサを導入することが有用であることを示した。これは視覚は大局的な情報を取得できる反面、対象物近傍では死角および隠蔽による情報の欠落の問題がある。また触覚は、接触を確実に検出できる反面、局所的な情報である欠点がある。これに対して接触表面から数cmの近距離を検出する近接覚センサは上記の情報の欠落問題に対する一つの有効な解となる。この近

接覚センサを用いることで近距離に接近したことを確実に検出できるため、より高速なアプローチ、よりソフトな接触が可能となる。以上、これらの開発したセンサは、単純なアナログ回路網で構成するため、高速応答性に優れ、拡張性が高い特徴を有する。このような特徴を併せてもつセンサはこれまで実現されておらず、これからの触覚を用いたインターフェースはもとより、ロボット技術、各種機械システムに装着する触覚センサシステムの共通のプラットフォーム技術として利用できると考える。

## 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*, (2010) (in press).
- 2) 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠, 高速多指ハンドと高速視触覚フィードバックを用いた柔軟紐の結び操作, *日本ロボット学会*, Vol. 27, No. 9, pp. 1016-1024, 2009.
- 3) 西野高明, 下条誠, 石川正俊, 選択走査方式を用いた省配線分布型触覚センサ, *計測自動制御学会論文集*, Vol. 45, No. 8, pp. 391-397, 2009.
- 4) Seiichi Teshigawara, Kenjiro Tadakuma, Aiguo Ming, Masatoshi Ishikawa, and Makoto shimojo, High Speed and High Sensitivity Slip Sensor Utilizing Characteristics of Conductive, *J. of Robotics and Mechatronics*, Vol. 21 No. 2, pp. 200-208, 2009.
- 5) 島田茂伸, 篠原正美, 安彦成泰, 下条誠, オプタコンの機械特性と人間の触覚特性との適合度に関する研究, *電子情報通信学会論文誌D*, vol. J91-D, no. 5, pp. 1296-1304, 2008.
- 6) Xie Zhao-xian; Huang Da-gui, Ming Aiguo, Li Zhi-jun, Shimojo, M., Navigation system for mobile robot based on simultaneous-firing sonar ring, *Journal of University of Electronic Science and Technology of China* vol. 36 pp. 309-311, 321, 2007.
- 7) M. Hirasawa, H. Okada, M shimojo, The Development of the plantar Pressure Sensor Shoes for Gait Analysis, *J. of Robotics and Mechatronics*, vol. 20, no. 2, pp. 289-295, 2008.
- 8) 山本卓, 内田優典, 島田茂伸, 篠原正美, 下条誠, 清水豊, インタラクティブ型触覚グラフィックディスプレイのユーザインタフェース向上とその応用, *日本バーチャルリアリティ学会*, TVRSJ vol. 13, no. 1, pp. 49-58, 2008.
- 9) C. Xu, A. Ming, T. Maruyama, & M. Shimojo, Motion generation for hyper dynamic manipulation, *Int. J. Mechatronics*, vol. 18, no. 8, pp. 405-416, 2007.
- 10) Xu, C., Ming, A., Mak, K., Shimojo, M., Design for high dynamic performance robot based on dynamically coupled driving and joint stops, *Int. J.*

- Robotics & Automation, Vol. 22, Issue 4, pp. 281-293, 2007.
- 11) 岩下貴司, 下条誠, 石川正俊, 等電位法に基づく分布型オーバサンプリング A-D 変換を用いた触覚センサ, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol. J90-C, No. 10, pp. 683-692, 2007.
  - 12) Shimojo, M., Niki, T., Development of a compact and fast-response haptics display system, Systems and Computers in Japan, vol. 37, no. 2, pp. 46-55, 2006. [学会発表] (計 86 件)
- 国際学会 (24 件) (全て査読あり)
- 1) Teshigawara S., Shimizu S., Tadakuma K., Ming A., Ishikawa M. and Shimojo M., High Sensitivity Slip Sensor Using Pressure Conductive Rubber Int. Conf. on SENSORS 2009, pp. 988-991, Christchurch, 2009. 10. 28.
  - 2) Sakai S., Xu C., Ming A., Shimojo M., Motion planning for a high-speed manipulator with mechanical joint stops based on target dynamics and PCH system, 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 279-84, St. Louis, 2009. 10. 11.
  - 3) Yamakawa Y., Namiki A., Ishikawa M., Shimojo M., One-handed knotting of a linear flexible object based on reconfigurable skill synthesis strategy, 2009 ASME/IFTOMM Int. Conf. on Reconfigurable Mechanisms and Robots, pp. 486-93, London, 2009. 6. 22.
  - 4) Teshigawara S., Ishikawa M.; Shimojo M., Development of high speed and high sensitivity slip sensor, 2008 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 47-52, Nice, 2008. 9. 22.
  - 5) Gunji D., Mizoguchi Y., Teshigawara S., Ming A. Namiki A., Ishikawa M. and Shimojo M., Grasping force control of multi-fingered robot hand based on slip detection using tactile sensor 2008 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2605-10, Pasadena, 2008. 5. 19.
  - 6) Yamakawa Y., Namiki A., Ishikawa M., Shimojo M., One-handed Knotting of a Flexible Rope with a High-speed Multifingered Hand having Tactile Sensors 2007 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 703-8, San Diego, 2007. 10. 29.
  - 7) Shimojo M., Araki T., Teshigawara S., Ming A., Ishikawa M., A Net-Structure Tactile Sensor Covering Free-form Surface and Ensuring High-Speed Response IROS 2007, pp. 670-675, San Diego, 2007. 10. 29.
- ほか
- 国内学会 62 件(査読なし)
- 1) 寺田, 多田隈, 石川, 下条, 360° 特異点の無いネット状近接覚センサの構成法, 111-02, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, 横浜, 2009. 9. 15.
- ほか
- [図書] (計 1 件)
- 1) 下条誠: センシング入門, オーム社 (共

- 同執筆), pp. 71. -84, 2007.
- [産業財産権]
- 出願状況 (計 1 件)
- 1) 名称: 近接距離分布を計測する多段リング型二次元近接覚センサ  
発明者: 下条誠, 寺田一貫  
権利者: 電気通信大学  
種類: 特許  
番号: 2009-203027  
出願年月日: 2009. 9. 2  
国内外の別: 国内  
[その他]  
[受賞]
  - 1) The IEEE Robotics and Automation Society Award, Best Paper Finalist in IROS2007, 2007.
  - 2) 日本バーチャルリアリティ学会論文賞, 2009.
  - 3) IEEE Int. Symp. on Robot and Human Interactive Communication, KAZUO TANIE AWARD, 2009.
  - 4) 論文賞 財団法人ファナック F A ロボット財団, 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) 移動ロボット四足歩行一車輪走行 地形見極め自ら判断 日本精工と電気通信大開発一平地・段差を認識して自動的に移動方法を変えるロボットを開発一, 日経産業新聞, 2009. 10. 09
  - 3) 東大・千葉大など、片手で素早くひも結ぶ一多指ロボットハンド開発, 日刊工業新聞, 2009/09/14
- など
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
下条 誠 (SHIMOJO MAKOTO)  
電気通信大学・電気通信学部・教授  
研究者番号: 90292474
- (2) 研究分担者  
石川 正俊 (ISHIKAWA MASATOSHI)  
東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授  
研究者番号: 40212857
- 明 愛国 (MING AIGUO)  
電気通信大学・電気通信学部・准教授  
研究者番号: 50239456
- 並木 明夫 (NAMIKI AKIO)  
千葉大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 40376611
- 多田隈建二郎 (TADAKUMA KENJIRO)  
大阪大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 30508833
- (3) 連携研究者  
なし