

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2013～2017

課題番号：25220903

研究課題名(和文)力触覚技術による医工融合基盤の革新

研究課題名(英文) Revolution of integrated platform on medicine and engineering by haptic technology

研究代表者

大西 公平(Ohnishi, Kouhei)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：80137984

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 161,000,000円

研究成果の概要(和文)：人工機械による非接触作業あるいは接触作業を実現するには、発現したい運動機能に心じて力源と速度源を加速度空間で制御しなくてはならない。本研究ではそのための一般的手法を確立し、アルゴリズム化を図るとともに、誰でも使えるようにカスタムLSIとしてハードウェア化することに成功した。これにより、人間の力加減を含む巧妙な動作をデータ化することが可能になり、このデータを人工機械で再現することで、これまで産業用ロボットでは困難であった環境に順応する作業や器用な運動が可能になる。これを、新たに開発した医工分野で使える11自由度22軸のHEM2で実験的に実証するとともに、技術移転を目指して社会実装を開始した。

研究成果の概要(英文)：Control of force source and velocity source to realize desired functions is essential for both non-contact and contact motion for artificial machines including robots. This research succeeded in establishing general methodology for the purpose, and this has been represented as a set of control algorithms which has been successfully installed in a newly developed custom LSI. This hardware enables data origination of human motion skills and as well as can be used as control input of artificial machines so that they can accomplish compliant motion to environment and/or skilled motion like human. A newly designed and constructed machine called HEM2 (haptic end-effector for medicine and manufacturing) with 11 degrees-of-freedom and 22 axes has been examined for investigation. The successful results have been obtained from the experiments and the social implementation and the technology transfer have started in an alliance of university, enterprises, and companies.

研究分野：電気電子工学

キーワード：ハプティクス 力触覚 医工融合基盤 モーションコントロール ロボティクス 手先効果器

1. 研究開始当初の背景

21世紀になり社会の高齢化に伴い、モノの大量供給から生活の質(QOL)の充実により高い価値が与えられるようになった。QOLの充実にかかせない医療福祉介護分野や産業分野の高度化は人手に大きく頼っており、何らかの人工的手段を導入しなければ社会の持続的発展が望めない。そのためには人間動作を人工的に実現する基盤技術の創生が不可欠である。特に医工融合分野において人間支援技術の基盤技術構築とそれを社会実装する具体的な手段提供が強く望まれていた。

2. 研究の目的

- (1) 人間支援基盤技術の基本である身体性の「見える化」すなわち必要なデータを取得し人間支援に用いるための方法論を具体的な数式記述として表現し、動作設計論を確立することが第一の目的である。
- (2) 人間支援の具体的な装置を製作すると共に、広く社会実装可能な具体的なデバイスを提供することが第二の目的である。
- (3) これらの成果を社会還元する仕組みを構築することが第三の目的である。

3. 研究の方法

- (1) 第一の目的のために研究計画Aで身体機能を表現する方法論を確立し、研究計画Bで定義された機能を能動動作として発現する数式表現を示し、研究計画Cで具体的な動作として実現する。
- (2) 第二の目的のために医工融合分野で用いることの可能なHEM² (Haptic End-effector for Medicine and Manufacturing: 医工用ハプティクス手先効果器)を製作し、実証実験を行うのが研究計画Dである。
- (3) 第三の目的のために企業群とコンソーシアムを作り、技術移転と社会実装を行う。

4. 研究成果

- (1) 第一の目的に対する成果

双対性より能動的運動を引き起こすエネルギー源は力源と速度源(精確には運動量源)のみである。前者は力制御で後者は速度制御で実現できる。これを運動機能と結び付けるための研究が計画Aで、機能の表現がモードで表わされることおよびモードと力源/速度源とが変換で結び付けられることが図1のように明確にされた。

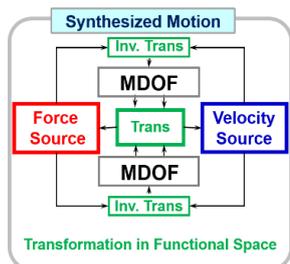


図1 双対性に基づく機能表現

なお、運動の自由度は独立した機能数の上限となる。一例として、マスタースレーブ間で自由度の異なる義手ハンドでは図2に示す三指からなるスレーブハンドの独立した機能は把持、手首の首振り、俯仰として定義でき、把持の力触覚のみが足単指にフィードバックされる。残りの二つのモードでは力源と速度源が混在する非線形コンプライアンス制御を援用することで全体として人間の手の動作に近い性能を得られる。このように能動的な機能が広義の座標変換の枠組みで表現できることが示された。



図2 機能試験中のハプティクス義手

定義された機能を実際の運動に結び付ける研究が計画Bである。発現したい機能に独立した座標に対応させる方法を確立し、より直截的な運動設計を可能にした。この対応付けを容易ならしめるため、図3に示すカスタムLSI (Custom Large Scale Integrated circuit: 特定用途向け大規模集積回路)を開発し、互いに異形であるマスタースレーブシステムであっても、機能定義から運動学を統合する座標変換に至る一連の設計が柔軟に出来るようになった。これにより、医工融合分野における様々な状況に対して、困難なく動作機能を発現できるシステムが確立した。更に、計画Cで、機能定義、座標変換及びアクチュエータまでを統合する実現技術を確立した。すなわち、運動機能を加速度空間に写像しそれを速度源と力源に対応付け、最終的にアクチュエータの指令値を出力するプロセスまでを上記の開発したLSIボードに組み入れた。

このように、動作機能の表現、発現および実現を機能定義から写像および変換を通じてアクチュエータの最終指令値に至る一連のプロセスとして数式記述され、これらが最終的にカスタムLSIボードに組み込まれることで第一の目的が達成された。



図3 開発したカスタムLSIとインタフェースボード

- (2) 第二の目的に対する成果

計画Dでは、医工融合基盤技術を実現するデバイスHEM²を製作しその性能を評価することで人間支援機器としての可能性を検証する。HEM²は粗動部と微動部からなり、粗

動部は微動部の位置と姿勢を制御するため直動3自由度、回転3自由度をもつ。微動部はハンドの役割を持つ手先効果器であり、直動1自由度、ジンバル構造の回転3自由度と手先の開閉1自由度を持つ。このように11自由度を持つが同様の自由度をマスター側も持つためマスタースレーブで合計44軸22自由度の運動が可能である。実際には左右両腕が必要であるためこの2倍の自由度と軸数を持つ。図4にHEM²の右手スレーブ微動部のマスター(手前側)とスレーブ(奥側)を示す。

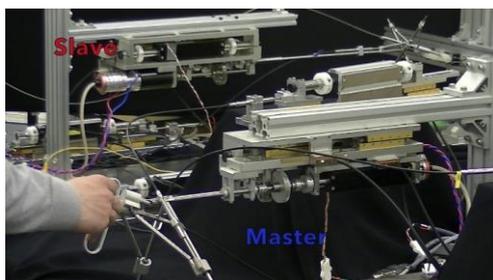


図4 実証実験に用いたHEM²微動部

HEM²の詳細は雑誌論文(6)(2018年度FA財団論文賞候補論文)にて公開されている通りである。このHEM²を用いた医学分野の実証実験を行い、術者の動作データを用いたHEM²による自動縫合と自動結紮の実証実験に世界で初めて成功した。図5は結紮の実証実験において右手スレーブ上のビデオカメラで撮影した4号針を右手から左手に持ち替えている協調動作シーンである。

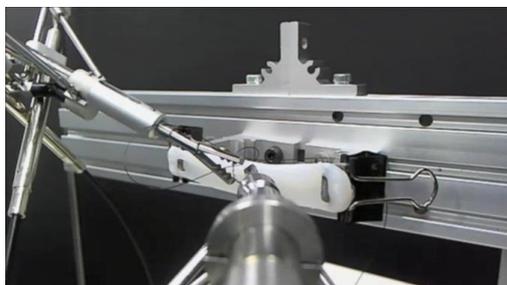


図5 HEM²による結紮動作実証実験

医療分野のみならず産業分野でもその有効性を確認するため、組み立てなどの作業に類出するはめ込み動作(Peg-in-hole task)を行った例が図6に示されている。作業者のはめ込み動作データを用いて、第2ホールからピンを抜き第1ホールに差し直すという作業を自動で行った実証実験である。



図6 HEM²によるはめ込み動作実証実験

以上から製作したHEM²が術者や作業者の動作データを取得し、これを用いた自動作業が可能であることを実験的に実証した。HEM²は様々な拡張ができるので医工融合分野で広く用いることが可能である。このようにHEM²による実証実験を行うという本研究の第二の目的も達成された。

(3) 第三の目的に対する成果

力触覚技術に基づく医工融合基盤技術を企業に技術移転を行うべく、2014年12月に研究代表者を長とするハプティクス研究センターを大学内公式組織として発足させ、本技術の普及を図った。本技術は既存設備にアドオンでも使用できるため、多くの企業に恩恵が及ぶ。そのため、カスタムLSIに全てのアルゴリズムを実装し提供することが普及の早道になる。このLSIは定義された運動機能を加速度空間で設計し、それをアクチュエータ指令値として出力することを可能にするもので、協力会社と提携し、およそ十数回程度の試作後の2017年2月に十分商用に耐え得る回路および内蔵ソフトウェアを完成させることができた。運動設計は主に加速度空間で行われるので、この20mm角のLSIはABCコア(Acceleration-based Bilateral Control Core)と名付けられている。ハプティクス研究センターは企業とのコンソーシアムを組織し、このコア及びボードを提供するとともに、医工融合基盤を確立すべく多くの会社に参加を呼びかけた。その結果、40社以上の参加があり治療・診断機器、半導体製造装置、鉄鋼製造装置、建機、自動車電装装置、縫製機、農水産物仕分け装置、遠隔保守装置、環境保全システムなど多岐に亘る応用研究が行われ、2018年度中にもABCコアを搭載した生産装置や商品が上市される予定である。

このように、力触覚技術を医工連携基盤技術として確立したばかりでなく、企業とコンソーシアムを組織しABCコアの提供を通じて技術移転を積極的に行った。その結果、これまで人手に頼っていた作業データを取得し、加速度空間で動作設計を行うことで人工的な機械でも人間のような柔軟な動作を実現することが可能になり企業を中心に社会実装が進みつつあり、第三の目的も順調に達成されている。

(4) 全体成果の達成と更なる普及を目指して

以上のように研究当初に予定していた全ての目的を達成し、研究成果をカスタムLSIに結実させ、ハードウェアとして提供できるまでに至った。このABCコアを企業のみならず大学を中心とするアカデミアにも提供し、研究と開発を推し進めていくことで超成熟社会の持続的発展に寄与できると考える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

- [雑誌論文] (計 40 件) (*: 主要 3 編論文)
- (1)*Simon Lemerle, Takahiro Nozaki, Kouhei Ohnishi, Design and Evaluation of a Remote Actuated Finger Exoskeleton using Motion-Copying System for Tendon Rehabilitation, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 査読有、2018 (Accepted)
DOI:10.1109/TII.2018.2796859
 - (2)Kazuo Koyanagi, Soji Ozawa, Yuji Tachimori, Minimally invasive esophagectomy in the prone position improves postoperative outcomes: role of C-reactive protein as an indicator of surgical invasiveness, Esophagus, 査読有、15 巻、2018、95-102
DOI: 10.1007/s10388-017-0602-8
 - (3)Phuong Thao Tran, Ohishi Kiyoshi, Mitsantisuk Choharit, Yokokura Yuki, Ohnishi Kouhei, Oboe Roberto, Sabanovic Asif, Disturbance Observer and Kalman Filter Based Motion Control Realization, IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有、7 巻、2018、1-14
DOI:10.1541/ieejia.7.1
 - (4)Tojo Naoya, Shimono Tomoyuki, Kaneko Takeshi, Tsuji Toshiaki, Mizoguchi Takahiro, Estimation of Antagonistic Output Ratios Based on Force Distribution at End Effector of Limb, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 査読有、64 巻、2017、1783-1792
DOI:10.1109/TIE.2016.2607161
 - (5)Kouhei Ohnishi, Takahiro Mizoguchi, Real Haptics and Its Applications, IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 査読有、12 巻、2017、803-808
DOI:10.1002/tee.22562
 - (6)*松永 卓也、兪 浩洋、大西 公平、パラレルリンク機構を用いた 5 自由度 HEM² の開発、精密工学会誌、査読有、83 巻、2017、802-810
DOI:10.2493/jjspe.83.802
 - (7)Yanagisawa S, Oshio T, Kato M, Kano M, Tsuji Y, Morikawa Y, Endoscopic chemocauterization for pyriform sinus fistula in children, Pediatrics International, 査読有、59 巻、2017、807-811
DOI:10.1111/ped.13294
 - (8)Koyo Yu, Takuya Matsunaga, Hiromasa Kawana, Shin Usuda, Kouhei Ohnishi, Frequency Based Analysis of the Relationship between Cutting Force and CT Number for an Implant Surgery Teaching Robot, IEEJ Journal of Industry Application, 査読有、6 巻、2016、66-72
DOI:10.1541/ieejia.6.66
 - (9)Motoi Naoki, Kubo Ryogo, Human-Machine Cooperative Grasping/Manipulating System Using Force-based Compliance Controller with Force Threshold, IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有、5 巻、2016、39-46
DOI:10.1541/ieejia.5.39
 - (10)Yusuke Asai, Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, Fine Force Reproduction of Environmental Haptic Sensations Based on Momentum Control, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 査読有、63 巻、2016、4304-4313
DOI:10.1109/TIE.2016.2531019
 - (11)Shoyo Hyodo, Kouhei Ohnishi, A Bilateral Control System to Synchronize, IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有、5 巻、2016、370-377
DOI:10.1541/ieejia.5.370
 - (12)Shuhei Shimmyo, Kazuki Yuki, Kouhei Ohnishi, Torque Ripple Suppression Method with Multilevel Inverter and Feedforward Dead-Time Compensation, IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有、5 巻、2016、360-369
DOI:10.1541/ieejia.5.360
 - (13)Shoyo Hyodo, Kouhei Ohnishi, An Allocation Method of High Pass Filter for Bilateral Teleoperation System Over Network Considering Stability and Performance, IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有、5 巻、2015、199-205
DOI:10.1541/ieejia.5.199
 - (14)元井 直樹、久保 亮吾、下野 誠通、人・機械協調システムによる位置・力情報を有する教示信号の実時間修正手法、電気学会産業応用部門誌、査読有、135 巻、2015、503-512
DOI:10.1541/ieejias.135.503
 - (15)Shoyo Hyodo, Kouhei Ohnishi, A Two Flow Expression Method of Four-Channel Bilateral Control System with Time Delay and Validation of Model-Free Time Delay Compensator, IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有、4 巻、2015、574-581
DOI:10.1541/ieejia.4.574
 - (16)Shoyo Hyodo, Kouhei Ohnishi, A Structural Approach to Improve the Stability of Bilateral Control System with Time Delay, IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有、4 巻、2015、526-534
DOI:10.1541/ieejia.4.526
 - (17)Kasun Prasanga, Emre Sariyildiz, Kouhei Ohnishi, Compensation of Backlash for Geared Drive Systems and Thrust Wires Used in Teleoperation, IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有、4 巻、2015、514-525
DOI:10.1541/ieejia.4.514
 - (18)小川 健司、魚住 誠二、兪 浩洋、和田 則仁、浦岡 俊夫、下島直 樹、矢作 直久、北川 雄光、大西 公平、カセンサレス臓器触診デバイスによる生体の硬さ測定法、日本コンピュータ外科学会論文誌、査読有、17 巻、2015、91-100
DOI:10.5759/jscas.17.91

- (19)清水 就平、大野 嘉紀、野崎 貴裕、大西 公平、官能評価に基づく機能モードごとの通信遅延補償設計法、電気学会論文誌産業応用部門誌、査読有、135 巻、2015、755-764
DOI:10.1541/ieejias.135.755
- (20)Shuhei Shimmyo, Katsutoku Takeuchi, Norio Takahashi, Makoto Matsushita, Kouhei Ohnishi, Multi-level Motor Drives for Torque Ripple Suppression Taking Control Sensitivity into Account, IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有、5 巻、2015、69 - 77
DOI:10.1541/ieejia.5.69
- (21)Francis Bechet, Kenji Ogawa, Emre Sariyildiz, Kouhei Ohnishi, Electrohydraulic Transmission System for Minimally Invasive Robotics, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 査読有、62 巻、2015、7643-7654
DOI:10.1109/TIE.2015.2453930
- (22)Emre Sariyildiz, Kouhei Ohnishi, An Adaptive Reaction Force Observer Design, IEEE Transactions on Mechatronics, 査読有、20 巻、2015、750-760
DOI:10.1109/TMECH.2014.2321014
- (23)神原 義幸、魚住 誠二、野崎 貴裕、大西 公平、直流電動機における位置センサレス運動制御、電気学会論文誌産業応用部門誌、査読有、135 巻、2015、205-211
DOI:10.1541/ieejias.135.205
- (24)兵頭 翔洋、大西 公平、不安定な通信ネットワークを考慮した通信外乱オブザーバ内の制御対象モデルの配置方法、電気学会論文誌産業応用部門誌、査読有、135 巻、2015、192-198
DOI:10.1541/ieejias.135.192
- (25)Emre Sariyildiz, Kouhei Ohnishi, Stability and Robustness of Disturbance Observer-based Motion Control Systems, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 査読有、62 巻、2015、414-422
DOI:10.1109/TIE.2014.2327009
- (26)*Takahiro Nozaki, Takahiro Mizoguchi, Kouhei Ohnishi, Motion Expression by Elemental Separation of Haptic Information, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 査読有、61 巻、2014、6192-6201
DOI:10.1109/TIE.2014.2308162
- (27)Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, Seiichiro Katsura, Fine Force Reproduction Based on Motion-Copying System using Acceleration Observer, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 査読有、61 巻、2014、6213-6221
DOI:10.1109/TIE.2014.2308142
- (28)Yu Nakajima, Takahiro Nozaki, Kouhei Ohnishi, Heartbeat Synchronization with Haptic Feedback for Telesurgical Robot, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 査読有、61 巻、2014、3753-3764
DOI:10.1109/TIE.2013.2287258
- (29)Emre Sariyildiz, Kouhei Ohnishi, On the Explicit Robust Force Control via Disturbance Observer, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 査読有、62 巻、2014、1581-1589
DOI:10.1109/TIE.2014.2361611
- (30)Emre Sariyildiz, Kouhei Ohnishi, A Guide to Design Disturbance Observer, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 査読有、136 巻、2014、1-10
DOI:10.1115/1.4025801
- (31)大野 嘉紀、寫本 慶太、溝口 貴弘、大西 公平、多自由度異構造バイラテラル制御系の通信遅延補償法、電気学会論文誌産業応用部門誌、査読有、134 巻、2014、317-324
DOI: 10.1541/ieejias.134.317
- (32)Takahiro Nozaki, Takahiro Mizoguchi, Kouhei Ohnishi, Decoupling Strategy for Position and Force Control Based on Modal Space Disturbance Observer, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 査読有、61 巻、2014、1022-1032
DOI:10.1109/TIE.2013.2264788
- (33)Takahiro Mizoguchi, Takahiro Nozaki, Kouhei Ohnishi, Stiffness Transmission of Scaling Bilateral Control System by Gyration Element Integration, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 査読有、61 巻、2014、1033-1043
DOI:10.1109/TIE.2013.2264787
- (34)Thao Tran Phuong, Kiyoshi Ohishi, Yuki Yokokura, Chowarit Mitsantisuk, FPGA-Based High-Performance Force Control System With Friction-Free and Noise-Free Force Observation, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 査読有、61 巻、2014、994-1008
DOI:10.1109/TIE.2013.2266081
- (35)Takahiro Nozaki, Takahiro Mizoguchi, Kouhei Ohnishi, Motion-copying system with Variable-Impedance based on Scaled Bilateral Control in One-Degree-of-freedom Robot, IEEJ Journal of Industry Application, 査読有、3 巻、2014、1-9
DOI:10.1541/ieejia.3.1
- (36)Shuhei Shimmyo, Tomoya Sato, Kouhei Ohnishi, Biped Walking Pattern Generation by Using Preview Control Based on Three-Mass Model, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 査読有、60 巻、2013、5137-5147
DOI:10.1109/TIE.2012.2221111
- (37)Takahiro Nozaki, Takahiro Mizoguchi, Yuki Saito, Daisuke Yashiro, Kouhei Ohnishi, Recognition of Grasping Motion Based on Modal Space Haptic Information

Using DP Pattern-Matching Algorithm,
IEEE Transactions on Industrial
Informatics, 査読有、9 巻、2013、2043-2051
DOI:10.1109/TII.2012.2232934

(38)Emre Sariyildiz, Kouhei Ohnishi,
Analysis the Robustness of Control
Systems Based on Disturbance Observer,
International Journal of Control, 査読有、
86 巻、2013、1733-1743
DOI:10.1080/00207179.2013.795663

(39)鈴木 敦、大西 公平、低周波モデル誤差フ
ィードバックによる通信外乱オブザーバを
用いたむだ時間制御系の定常精度改善手法、
電気学会論文誌産業応用部門誌、査読有、133
巻、2013、861-867
DOI:10.1541/ieejias.133.861

(40)Sho Sakaino, Tomoya Sato, Kouhei
Ohnishi, A Novel Motion Equation for
General Task Description and Analysis of
Mobile-Hapto, IEEE Transaction on
Industrial Electronics, 査読有、60 巻、2013、
2673-2680
DOI:10.1109/TIE.2012.2196009

〔学会発表〕 (計 102 件)

(1)Kouhei Ohnishi, Soft Robotics for Future
Society, 15th IEEE International
Workshop on Advanced Motion Control
(Invited), 2018

(2)Takuya Matsunaga, Toshiaki Okano,
Xiaobai Sun, Takahiro Mizoguchi, Kouhei
Ohnishi, Motion Reproduction System
Using Multi DoF Haptic Forceps Robots
for Ligation Task, Proceedings of the 43rd
Annual Conference of the IEEE Industrial
Electronics Society, IECON 2017, China,
査読有、2017、2888-2893
DOI:10.1109/IECON.2017.8216487

(3)Kouhei Ohnishi, Soft Robotics by Real
Haptics, The 2017 IEEE International
Conference on Advanced Intelligent
Mechatronics (Invited), 2017

(4)Daisuke Tomizuka, Kouhei Ohnishi,
Haptic Micro Manipulation using
Grasping-Manipulating Mode with
Different DOF, Proceedings of the 42nd
Annual Conference of the IEEE Industrial
Electronics Society, IECON 2016, Italy,
査読有、2016、710-715
DOI:10.1109/IECON.2016.7793596

他 98 件

〔図書〕 (計 2 件)

(1)Kouhei Ohnishi (Chapter 6) 他、CRC Press,
Nonlinear Control Techniques for Electro
-Hydraulic Actuators in Robotics
Engineering, 2017、119

(2)大西 公平、東京電機大学出版局、リアル
を掴む、2017、174

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 11 件)

名称：位置・力制御装置、位置・力制御方法
及びプログラム

発明者：大西 公平、境野 翔、野崎 貴裕

権利者：学校法人慶應義塾

種類：特許

番号：特願 2015-537631

(国際出願番号 JP2014073083)

出願年月日：平成 26 年 9 月 2 日

国内外の別：国内 (PCT 出願中)

他 10 件

〔その他〕

ホームページ：

[http://www-oml.sum.sd.keio.ac.jp/section.p
hp?quest=kaken2013&PHPSESSID=d9d5f
87cf1b3b11e4169b8408885af2a](http://www-oml.sum.sd.keio.ac.jp/section.php?quest=kaken2013&PHPSESSID=d9d5f87cf1b3b11e4169b8408885af2a)

報道情報例 (ラジオ、雑誌、テレビ、新聞)：

2018.04.24 J-WAVE MORNING RADIO

2018.01.10 NIKKEI Robotics

2017.05.27 TV 東京 ミライダネ

2016.06.12 神奈川新聞 朝刊 1 面

6. 研究組織 (2018 年 3 月末現在)

(1)研究代表者

大西 公平 (OHNISHI Kouhei)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：8 0 1 3 7 9 8 4

(2)研究分担者

小澤 壯治 (OZAWA Soji)

東海大学・医学部・教授

研究者番号：1 0 1 6 9 2 8 7

(3)連携研究者

森川 康英 (MORIKAWA Yasuhide)

国際医療福祉大学・大学病院・教授

研究者番号：9 0 1 2 4 9 5 8

大石 潔 (OHISHI Kiyoshi)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：4 0 1 8 5 1 8 7

下野 誠通 (SHIMONO Tomoyuki)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：9 0 5 1 3 2 9 2

名取 賢二 (NATORI Kenji)

千葉大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：7 0 5 4 5 6 0 7

元井 直樹 (MOTOI Naoki)

神戸大学・海事科学研究科・准教授

研究者番号：1 0 6 1 1 2 7 0