

立石科学技術振興財団

# 助成研究成果集

【第22号】

平成25年(2013)



# 人間と機械の調和を促進する助成研究成果集

第 22 号

平成 25 年 9 月 (2013)

公益財団法人 立石科学技術振興財団

Tateisi Science and Technology Foundation

# 設 立 趣 意 書

今日、日本の科学技術の進歩・発展は著しいものがありますが、エレクトロニクス及び情報工学の分野における技術革新も、いまでは社会的・経済的にきわめて大きな影響を及ぼしています。たとえば、工場では各種工程のオートメーション化が進むとともに、オートメーション機器をコンピュータや通信機器とつなぎ、工場全体を統合的に動かすシステムの実現へと向かっています。

一方、オフィスでは、ワークステーションやパソコンなどの OA 機器の普及が目覚ましく、また通信技術を利用することにより、データベースへのアクセスや情報交換も盛んになりつつあります。さらに、家庭においても、いわゆるホームオートメーション機器が浸透しはじめています。

このように、人間が働き生活する環境に、エレクトロニクス技術に支えられた各種機器がどんどん入ってきており、しかもその技術は年々高度化・システム化してきています。しかしながら、その技術革新のスピードが速いだけに、技術革新がそれら機器やシステムを使う主体である人間に及ぼす影響が十分考慮されない傾向があります。このため、本当に使いやすい機器・システムの開発が大きな課題になっています。

一方、今後の技術の飛躍的な発展のためには、人間の素晴らしい知識能力を規範にしたファジィなどの人工知能技術を確立し、使いやすい機器・システムの提供はもちろん、人間がより楽しく創造的な活動をするのに広く役立たせることが期待されます。

このような情勢に鑑み、オムロン株式会社、立石一真及び立石孝雄の醸出資金により「立石科学技術振興財団」を設立し、エレクトロニクス及び情報工学の分野で、人間と機械の調和を促進する研究及び国際交流に対し助成をおこない、技術革新を人間にとって真に最適なものとするに寄与せんとするものであります。

---

---

# 助成研究成果集

---

---

## 目次

1. 理事長挨拶	2
2. 財団関係者寄稿	
(株)国際電気通信基礎技術研究所 顧問 葉原耕平 (評議員)	3
3. 研究助成成果の抄録一覧	4
4. 国際交流報告の抄録一覧	127
5. 平成 24 年度活動報告 (業務日程・会計)	143
6. 平成 25 年度助成報告	144
7. 受領者投稿	146
神戸大学大学院 システム情報学研究科 教授 的場 修	146
名古屋工業大学大学院 工学研究科 准教授 加藤昇平	147
8. 研究室訪問	148
熊本大学大学院 自然科学研究科 教授 松永信智	148
9. 平成 25 年度 (第 24 回) 助成課題一覧	151
10. 平成 25 年度研究助成課題の紹介	155
11. 平成 26 年度助成候補募集案内	158
12. 財団の概要	165
13. 評議員・役員	166
編集後記	167

## ごあいさつ

助成研究成果集第22号の発行に際し、ひとことご挨拶申し上げます。

当財団は、オムロン(株)の創業者であります故立石一真が卒寿を迎えましたのを機に、科学技術の分野で「人間と機械の調和」を促進することを趣意として平成2年(1990年)に設立しました。そして本年は第24回目の助成金の交付をとり行うことができました。設立以来の助成件数と助成金は、立石賞5件を含めて累積でそれぞれ799件、約13億3千万円となりました。これも日頃からの皆様のご支援の賜と感謝いたすところでございます。



本成果集の発行は成果普及活動のひとつとして行うもので、助成対象となった研究課題の成果を、財団設立の趣意に沿って方向を同じくする研究者や研究機関と共有することを目的とするとともに、研究者の相互交流の一助となることを願って、毎年実施しております。今回ご寄稿いただきました研究者の皆様をはじめ、ご協力いただいた方々に厚く御礼申し上げます。

さて、隔年で実施しております立石賞については、この6月末で募集を締め切り、来年5月の第3回目の表彰に向けて審議を開始しております。今回も素晴らしい業績をあげられた研究者が選ばれると確信し、楽しみにしております。本成果集に掲載されている研究者の皆様におかれましては、将来の立石賞の受賞を目指して、研究に邁進していただくよう期待しております。

今日本は、大震災や経済不況からの復興・回復の途上にあり大変に重要な岐路に立っております。さらに、どの国よりもスピードの速い少子高齢化の中で国の活力をどのようにして維持、向上していくかという課題にも直面しております。これらを克服し、日本が再び元気を取り戻し国際社会に貢献するために、卓越した科学技術の力を更に高めることが求められております。当財団は、それに対し微力ながらも寄与するために、「人間と機械の調和」を促進する研究活動への助成と顕彰を継続し、もって人間重視の視点に立った豊かで健全な最適化社会の実現に貢献していきたいと思っております。

今後も引き続き、より一層のご支援ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。

理事長 立石 義雄

## 「自然」の中の「人」

当立石科学技術振興財団は設立以来一貫して「人間と機械の調和」を標榜してきた。「人」と「人」の間、コミュニケーションまで含む「人間」に主眼をおくすぐれた趣意である。一方、「人」は自然や社会など様々な環境の中で生活しており、古くからこれら環境に適応・順応してきた。

かたや「西洋が自然を征服してきたのに対して東洋は自然を尊重してきた」との議論もあるが、それは危険である。それどころか、東洋でも近年の環境破壊はとて「自然を尊重してきた」とは言い難い。

また、近年「自然を大切に」「地球にやさしく」などとよく見聞きするが、これらに対して私は違和感を覚える。なぜなら、そこには「自然」・「地球」は「人間」との対立概念で、「人間」の方が偉いがゆえに「地球」や「自然」を保護すべきである、との思い上がりが感じられるからで、その遠因は西洋では旧約聖書創世記第1章にまで遡るように思える。そこには「(神は) …我々に似せて、人を作り、…地上のすべてのものを支配させよう (26節)」とある。明らかに人間上位・人間中心・人間至上の思想で、これが humanism の第一義でもある。

翻って、仏教では「じねん」という言葉があり「自然」と書く。明治初期 nature の訳語にこの「自然 (読みは“しぜん”)」を当てたとされるが、両者の意味合いはかなり違う。「じねん」は「自ずから然る、あるがままに」ということ。人間を含めて生きとし生けるものはすべてこの大きな「じねん」の中に含まれる。

話を「地球にやさしく」に戻す。極論として、仮に人類が滅亡しても地球自身は却って清々したとばかりに悠然と太陽の周りを回り続けるであろう。地球が大切なのは「人類が地上で住まわせてもらう」ためであって地球のためではない。

当財団は「人間と機械」について大きな第一歩を踏み出した。次は世界に先駆けて、視野を、地球、宇宙の総ての存在に感謝し自然の中で生かさせてもらう「人」に広げるのも有意義かと思われる。それは全く新しい思想へのチャレンジであろう。願わくば自然や四季を愛でて1,200年の歴史を持つ京の地から新しいパラダイムが誕生することを願いたい。そのココロの支えのキーワードには京都ではごく普通の「おおきに」「すんまへん」などがふさわしいように思える。的を射た言葉である。



# 研究助成成果の抄録一覧

(年度順五十音順)

- ◆ 柔軟な足裏の変形から生み出される感覚情報処理メカニズムの解明 (2011002) ..... 7  
Understanding The Sensory Information Processing Mechanism Yielded from Soft Deformable Feet  
大 脇 大 東北大学 電気通信研究所 助教
- ◆ 柔軟に状態空間を変更可能な行動計画法による複数ロボットの協調行動の創発 (2011005) ..... 11  
Emergence of cooperative behavior based on planning-space shift motion generation  
小 林 祐 一 静岡大学大学院 工学研究科 准教授
- ◆ 人の心と体に配慮した新しい生活支援技術の開発 (2011006) ..... 15  
Development of assistive technology based on mental and physical load  
佐々木 誠 岩手大学 工学部 機械システム工学科 助教
- ◆ モバイル環境での頑健な超音波モーションキャプチャシステムの開発 (2011010) ..... 19  
A Robust Ultrasound Motion-capture System in Mobile Environments  
杉 本 雅 則 北海道大学大学院 情報科学研究科 教授
- ◆ 人間との親和性を有するパーソナルモビリティの運動制御 (2011012) ..... 25  
Motion Control of Human-Friendly Personal Mobility  
中 川 智 皓 大阪府立大学 工学研究科 助教
- ◆ 液体フィルタを用いたすべり計測触覚センサに関する研究 (2011014) ..... 29  
Tactile sensor using standing cantilever covered with liquid filter for slippage detection  
野 田 堅太郎 東京大学大学院 情報理工学系研究科 特任助教
- ◆ 快適な車いす利用に向けた乗心地指標化のためのパーソナルセンシング・動的測量技術  
(2011019) ..... 33  
Personal Sensing Technologies for Road Surface Survey toward Comfortable Wheelchair Driving  
矢 入 郁 子 上智大学 理工学部 情報理工学科 准教授
- ◆ カソードルミネッセンス顕微鏡による細胞中の高空間分解能蛋白質イメージング (2011902) ..... 37  
High Spatial-resolution Protein Imaging with Using Cathodoluminescence Microscopy  
橋 本 守 大阪大学 基礎工学研究科 准教授
- ◆ 音響誘起電磁 (ASEM) 法の医療応用へ向けた開発 (2021001) ..... 42  
Medical applications of the acoustically stimulated electromagnetic method  
生 嶋 健 司 東京農工大学 准教授
- ◆ 中赤外ナノ秒パルスレーザーを用いたう蝕の選択的除去技術の開発 (2021002) ..... 46  
Development of Selective Caries Removal Technique by using Mid-infrared Nanosecond Pulsed Laser  
石 井 克 典 大阪大学大学院 工学研究科 助教

- ❖ 圧縮センシングを導入したホログラフィック MRI により超高速イメージング (2021003) ..... 50  
 Ultra-fast Holographic MR Imaging using Compressed Sensing  
 伊 藤 聡 志      宇都宮大学大学院 教授
- ❖ メディカルデバイスの表面親水性向上のためのナノ改質加工法の研究 (2021006) ..... 54  
 A Study on Surface Generation of Superior Hydrophilicity for Surgical Medical Devices  
 片 平 和 俊      (独) 理化学研究所 専任研究員
- ❖ 環境推定・適応機能を有しオペレータ協調する自律型ロボットのための制御方策の確立  
 (2021007) ..... 60  
 Controller Design for Operator-Cooperative Autonomous Robots with Ability to Estimate  
 and Adapt Environment  
 金 田 さやか      大阪府立大学 工学域機械系学類 航空宇宙課程 助教
- ❖ 音声対話情報案内システムにおける機械学習理論に基づく自律的精度向上の研究 (2021008) ..... 64  
 Study on Autonomous Improvement Approaches based on Machine Learning for  
 Speech-oriented Information Guidance Systems  
 川 波 弘 道      奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 助教
- ❖ 多重散乱波を用いた超波長分解能誘電体内部 UWB レーダセンサの研究 (2021009) ..... 68  
 Super-resolution UWB radar sensor for dielectric medium by using multiple scattering signal  
 木 寺 正 平      電気通信大学 助教
- ❖ 視覚障害をもつ児童生徒のための移動ロボットを用いたプログラミング教育 (2021010) ..... 72  
 Mobile Robot Programming Education for visually impaired students  
 木 室 義 彦      福岡工業大学 教授
- ❖ 人と機器の共創で高い安全性を実現するバイタルデータ自動入力システム (2021011) ..... 77  
 Automatic Vital Data Recording System to Support Clinical Safety under  
 Harmonic Collaboration between Human and Machine  
 黒 田 知 宏      京都大学 医学研究科 准教授
- ❖ 主成分分析と画像エッジを用いたロバストかつ高速なパターンマッチング手法の開発  
 (2021012) ..... 81  
 Development of Fast and Robust Pattern Matching Method Using Principal Component Analysis  
 and Image Edges  
 上 瀧 剛      熊本大学大学院 先導機構 特任助教
- ❖ 大腿部痛の予防を目的とした人工股関節固定性の定量的評価法の構築 (2021014) ..... 85  
 Development of the Quantitative Evaluation Technique of Hip Stem Stability Aiming  
 at Prevention of Thigh Pain  
 酒 井 利 奈      北里大学 医療衛生学部 講師

- ◆ ピエゾ抵抗型両持ち梁を用いた3軸触覚センサに関する研究 (2021016) ..... 89  
 A TRIAXIAL TACTILE SENSOR USING PAIRS OF PIEZORESISTIVE BEAMS  
 WITH SIDEWALL DOPING  
 高橋 英俊 東京大学 IRT 研究機構 特任研究員
- ◆ 色覚バリアフリーインタフェースの実現にむけた個人色覚モデルと再配色手法の提案  
 (2021017) ..... 93  
 Estimation of personal color vision model and image modification for color blindness  
 滝本 裕則 岡山県立大学 情報工学部 情報通信工学科 助教
- ◆ 検診用PET/CT画像を対象とした肺がん自動検出システムの開発 (2021018) ..... 98  
 Development of automated scheme for lung cancer detection in screening PET/CT images  
 寺本 篤司 藤田保健衛生大学 医療科学部 放射線学科 准教授
- ◆ 弾性表面波デバイスを用いた悪臭計測用匂い濃縮素子の研究 (2021019) ..... 102  
 Study of odor preconcentrator for bad-smell measurement using a SAW device  
 中本 高道 東京工業大学 精密工学研究所 教授
- ◆ 圧縮センシングに基づく磁気共鳴画像 (MRI) の高速撮像法の開発 (2021020) ..... 106  
 Development of Fast Magnetic Resonance Imaging Technique Based on Compressed Sensing  
 平林 晃 立命館大学 教授
- ◆ 眼底画像における緑内障診断補助ツールの開発 (2021022) ..... 110  
 Development of a computer-aided diagnostic tool for glaucoma on retinal fundus images  
 村松 千左子 岐阜大学大学院 医学系研究科 知能イメージ情報分野  
 特定研究補助員 (客員准教授)
- ◆ 人間機械協調系のための自律ロボット群における知識獲得・利用法の開発 (2021023) ..... 114  
 Knowledge Acquisition and Utilization of Autonomous Robots for Human-Robot Cooperation  
 保田 俊行 広島大学大学院 工学研究院 機械システム・応用力学部門 助教
- ◆ デザイン性と作業性を両立した対向3指を備えた作業用電動義手の開発 (2021024) ..... 118  
 Electric Prosthesis Having Three Opposed Fingers with Functionality and Design  
 吉川 雅博 (独) 産業技術総合研究所 知能システム研究部門 特別研究員
- ◆ 画像距離センサによる脳性麻痺者インタフェースの開発 (2021025) ..... 122  
 Development of Interface for Cerebral Palsy Patient by Image Range Sensor  
 依田 育士 (独) 産業技術総合研究所 サービス工学研究センター 主任研究員

# 柔軟な足裏の変形から生み出される感覚情報処理メカニズムの解明

## Understanding The Sensory Information Processing Mechanism Yielded from Soft Deformable Feet

2011002



研究代表者

東北大学 電気通信研究所

助教

大 脇 大

### [研究の目的]

本研究の目的は、柔軟な身体を有し、これまでのロボティクスで取り扱われていた（機構的、また感覚情動的な）自由度を遙かに凌駕する超大自由度を、実時間で「手なづけ」ながら無限定環境に適応可能な知能機械システムを実現する「コンティニューム・ロボティクス」技術の創出である。具体的には、歩行運動を事例として、ヒトと同等程度の感覚機能を有する柔軟足「Bionic foot」の開発と感覚情報の統合処理アルゴリズムの構築を目指す。本研究では、柔軟な身体材料とそのレオロジー的性質から生み出される多様な時空間感覚情報を獲得し実時間で統合するメカニズムを構築することによって、適応的歩行生成の鍵となる身体特性（足裏の材料特性、センサの配置）およびそれらを活用した感覚情報統合メカニズムの解明を目指し研究を行った。

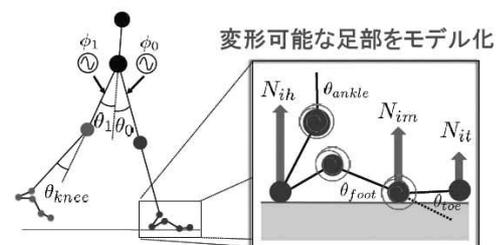
### [研究の内容, 成果]

具体的に本研究では、(1) 柔軟な足裏の変形から生み出される感覚情報を活用する制御モデルの提案（シミュレーション）、(2) 提案する制御則を検証するための2足ロボット実機の開発、および(3) 2足ロボットに実装する柔軟な足部「Bionic foot」の開発と実機への実装、理論解析という手順で研究を行ってきた。

### (1) シミュレーション

ヒトの筋骨格構造を参考に柔軟な変形を可能とする足部の骨格モデルを有する動力学シミュレータ（図1）を構築した。また、位相振動子をベースとし、足部からの感覚情報をフィードバックすることで、歩行のリズムを調整する歩行パターン生成器モデルを提案した（図1）。構築した制御則に基づき、定常歩行、移動速度変化に対する適応性、環境変化、外乱に対する頑健性の検証を行った。

シミュレーションの結果、安定かつ継続的な歩行、静止状態から歩行状態への遷移が確認された。さらに、平地から斜面上へと環境が変化した際の環境適応性、歩行中に外乱を印可した際の頑健性（図2）についても、提案する歩行制御モデルによってパフォーマンスが向上する結果が得られた。柔軟な足裏から生み出される感覚情報を制御系にフィードバックし、歩行リ



### 位相振動子で歩行パターン生成器をモデル化

$$\dot{\phi}_i = \omega + \epsilon \sin(\phi_j - \phi_i - \pi) + (aN_{ih} + bN_{irm} + cN_{it}) \cos \phi_i$$

脚間相互作用 足からのセンサフィードバック

図1 筋骨格モデルと制御モデル

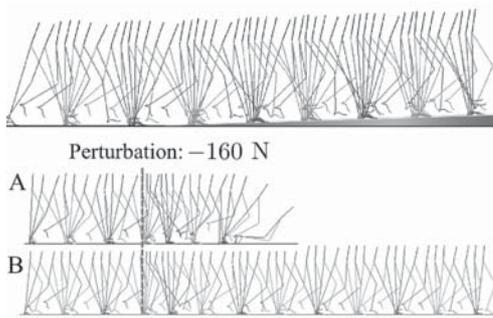


図2 シミュレーション結果

ズムを調整することで、優れた環境適応性や頑健性が発現する結果が得られた。

## (2) 実機実験

提案する制御則の妥当性を実世界において検証するため、足裏にウレタン樹脂を実装し、センサを埋め込んだ足部を有する二脚ロボット(図3)を開発し、実機実験を行った。シミュレーションと同様に定常歩行、移動速度変化の実験を行った。

開発した2足ロボットは、脚長0.4[m]、上体長0.2[m]、幅0.2[m]、重量1.6[kg]となっている。腰関節、および各脚に股関節、膝関節を有する構造となっている。腰関節には弾性要素が実装されており、受動的に可動可能となっている。各脚の股関節にはサーボモータが実装されており、歩行パターン生成器からの指令に応じて脚を駆動する。膝関節は、受動的な関節となっており、足裏が接地している時のみ関節の剛性を高める反射機構を有している。腰部に実装したサーボモータによりワイヤを引っ

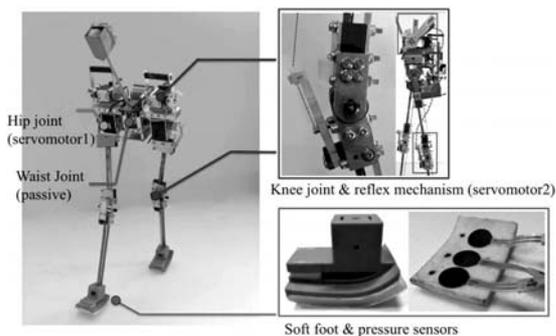


図3 実機プロトタイプ

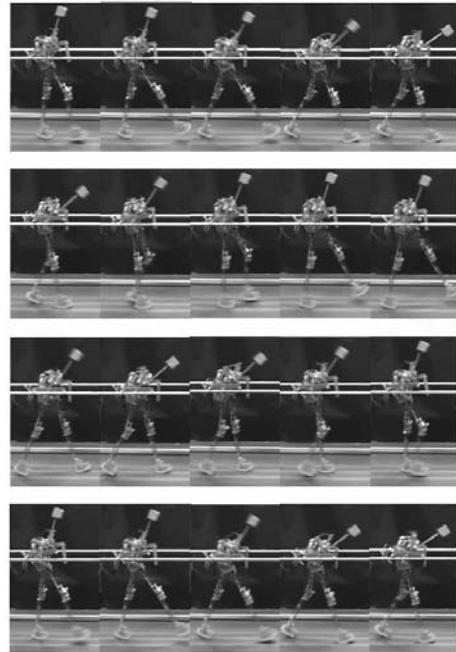


図4 定常歩行の様子

張ることで、足裏接地時に膝関節剛性を高める機構を実装した。本研究で着目する足裏には、シリコン材料である人肌ゲルを貼ることで柔軟性を実現した。足裏からの感覚情報取得のために圧力センサを用い、柔軟な人肌ゲルを介したセンサ情報を活用することで、多様な感覚情報の取得が可能となる機構を採用した。初動段階の検証のため、実験環境であるトレッドミル上において、ロボットは矢状面のみに運動を拘束されている。

図4は、開発した2足ロボットの定常歩行時のスナップショット(歩行1周期)を示す。提案する制御則を用いることによって、安定かつ継続的な歩行が実世界においても確認された。さまざまな初期条件に対して約70%の成功率で100歩以上の継続的な歩行が可能であった。

## (3) ヒトを模擬した足部開発と理論解析

ヒトの足部を詳細に模擬した足部機構「Bionic foot」(図5)を開発し、足部の柔軟性から生み出される感覚情報が歩行の頑健性に与える影響を、2足ロボット(図6)を用いて検証した。さらに、得られた実験データから、安定な歩行

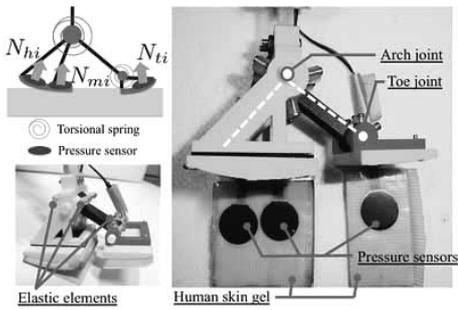


図5 柔軟な足部「Bionic foot」

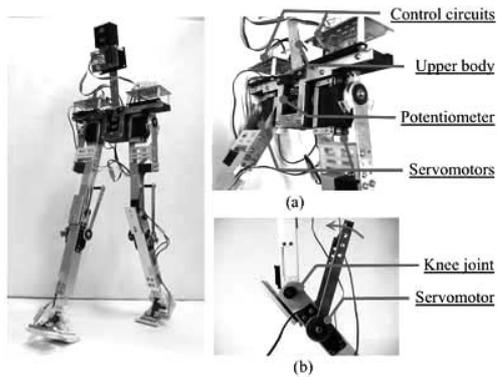


図6 柔軟な足部を有する2足ロボット

生成に内在する力学構造の理論解析を行った。

足部構造に2関節を有し、各関節に弾性要素を実装した足部を開発し、関節可動による柔軟性を新たに実現した。また、足裏には人肌ゲル（ウレタン樹脂）を実装することで、ヒトの皮膚構造を模擬した柔軟性を実現した。足裏に圧力センサを埋め込むことによって、足裏の皮膚変形から生み出される感覚情報を獲得する機構を開発した。

実機実験の結果、継続かつ定常的な歩行が実現できた（図7）。また、歩行速度の変化に対しても柔軟に歩行速度を適応可能であることを示した。さらに興味深いことに、柔軟な足部機構を有するロボットにおいて、歩行中の外乱に対する頑健性が大きく向上する結果が得られた。この結果は、柔軟な足部を用いることで、歩行運動中の地面との力学的相互作用を反映した感覚情報が獲得され、さらにその感覚情報を歩行リズム制御器へとフィードバックすることで、感覚運動協調を生起し、より安定な歩行を生成できたことを示唆する結果である。

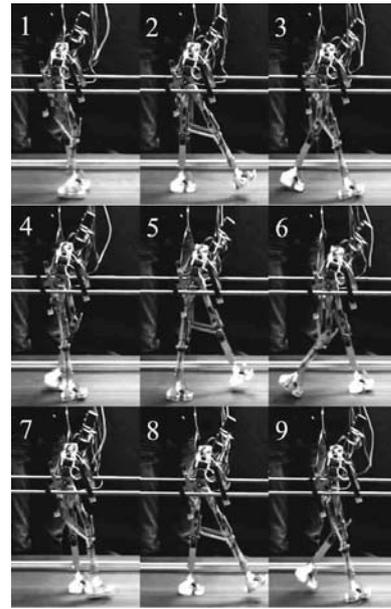


図7 柔軟な足部を活用した定常歩行

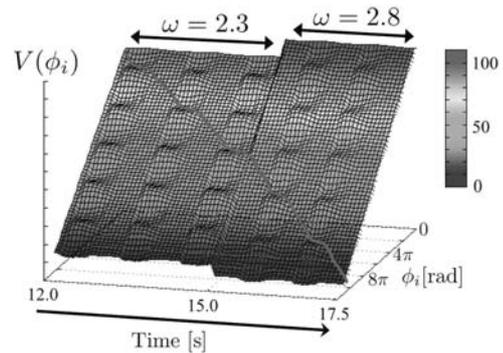


図8 柔軟な足部を用いた歩行の背後に潜む感覚情報処理の力学構造

さらに理論的な観点から考察を行った結果、適応的な歩行を実現する力学構造として、周期的な振動性と非周期的な興奮性の特性を、状況依存的に遷移する適応的構造が、柔軟な足部を用いた感覚情報処理メカニズムの背後に存在すること（図8）が明らかとなった。

[今後の研究の方向、課題]

これまでの研究成果から柔軟な足部から得られる感覚情報、具体的には足圧中心（CoP: Center of Pressure）が安定な歩行を生成するためには非常に重要な役割を果たすことが明らかとなった。歩行の状態をより反映した足圧情

報を獲得するため、さらに多数のセンサを埋め込んだ足部構造の開発が現状の課題であり、現在研究に取り組んでいる。また、これらの成果をもとに、東北大学医学部と議論を行い、歩行中の足圧情報を提示することによる新奇なりハビリシステムの構築を目指した共同研究に取り組んでいる。

[成果の発表, 論文等]

- [1] 受賞: IEEE/RSJ IROS JTCF Novel Technology Paper Award for Amusement Culture Finalist, 2012/10/11 (関連研究)
- [2] Dai Owaki and Akio Ishiguro, "Adaptive Walking Generated From Soft Deformable Feet", *Bioinspiration & Biomimetics*, (preparing for submission).
- [3] Hartmut Witte and Dai Owaki, Role of Passive

Properties in Producing Adaptive Motion in Robotic and Biological Systems, 6th International Symposium on Adaptive Motion on Animals and Machines (AMAMM2013), 2013 (Invited talk).

- [4] 大脇 大, 福田裕樹, 石黒章夫, 柔軟な足部から生み出される感覚情報を活用した適応的動歩行制御, 第33回バイオメカニズム学術講演会, pp.201-202.
- [5] Dai Owaki, Hiroki Fukuda, and Akio Ishiguro, Adaptive Bipedal Walking through Sensory-motor Coordination Yielded from Soft Deformable Feet, The 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2012), pp. 4257-4263.
- [6] 福田裕樹, 大脇 大, 石黒章夫, ミニマリストなCPGモデルから探る二脚ロコモーションに内在する脚間協調と脚内協調の発現機序, 第30回日本ロボット学会学術講演会.

# 柔軟に状態空間を変更可能な行動計画法による 複数ロボットの協調行動の創発

Emergence of cooperative behavior based on planning-space shift motion generation

2011005



研究者代表

静岡大学大学院 工学研究科

准教授

小林 祐一

## [研究の目的]

本研究では、複数移動ロボットによる協調行動の実現にあたり、「単体でロボットが運動しているモード」「ロボットが物体を運んでいるモード」などの離散的な区別を導入し、そのモードを含んだ動作計画方法の枠組みを提案することで、ボトムアップな協調行動を可能にする動作生成の枠組みを提案することを目指す。複数移動ロボットによる協調行動の実現にあたり、2つのアプローチからの方法提案と実装・解析を行う。一つの方法は、単体のロボットが物体を押し運ぶ動作を学習する方法を構築し、その延長として物体を協調して運ぶ動作を生成させる方法を開発することであり、もう一つの方法は、複数の移動ロボットが協調して作業するような問題を予め考え、その枠組の中でいかにして最適な役割分担を実現するかというメカニズムを提案・考察し、第一の方法の開発に役立てることである。本報告では、複数移動ロボットの繰り返し協調搬送問題を例にとった第二の方法についてまず述べる。その後で、単体のロボットにおける「モードの切替え」に着目した動作計画方法とその学習によるアプローチについて述べる。

## [研究の内容, 成果]

### 1. 複数移動ロボットの繰り返し搬送問題における協調行動の調整

あらかじめ二種類の役割を与えられた多数のロボットがいかにして局所的に得られる観測情報をもとに最適なタスク達成をできるかという問題を設定し、そのための役割分担法を考案・検証した。図1に想定する繰り返し協調搬送問題の概観を示す。

各ロボットは自分の前方にいるロボットとの距離をもとに自分の速度を決定する Optimal Velocity モデルと呼ばれる速度決定法、および前方のロボットを追従することで適切な経路を創発的に獲得する Local Pursuit 戦略にもとづいて走行する。初期位置と目標位置との往復を繰り返す搬送問題において、2つの経路のうち

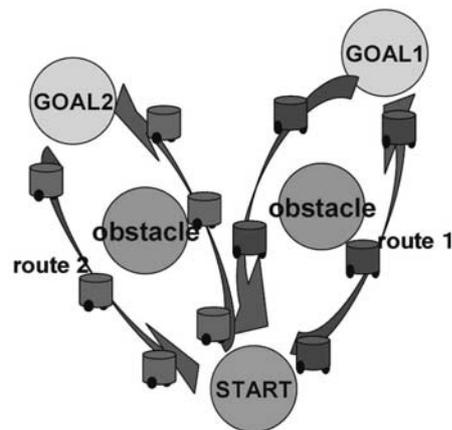


図1 繰り返し協調搬送問題

どちらを走行するかを選択することができる。各ロボットは、近傍にいるロボットとの位置関係から、現在与えられている役割（現在走行中の経路）の達成効率を推定する。推定された達成効率の情報にもとづいて、もう一方の役割を行うべきか、現在の役割を続けるべきかの判断を自律的に行う。時系列予測モデルを応用した達成効率の推定法にもとづいた自律的な役割分担方法を構築した。

図2に繰り返し協調搬送における役割分担の達成過程を示す。図中2つの円は経路を表し、その上の黒点はロボットを表す。各円の上の数字はその経路上に存在するロボット数を表し、ロボットの総数は30台である。この条件では、タスク開始時に左側の経路に全ロボットが集中し、渋滞のためにタスク達成効率が低くなっている。提案する役割分担法により、中央の図のようにいったん右側の経路にロボットが集中する過程を経て、右図のように最適な台数比率による分担が実現されていることがわかる。

図3にタスク達成効率の時間変化の比較を示す。単純な役割分担方法（図中 simple）と比較して、提案する方法（proposed 2）が効率の

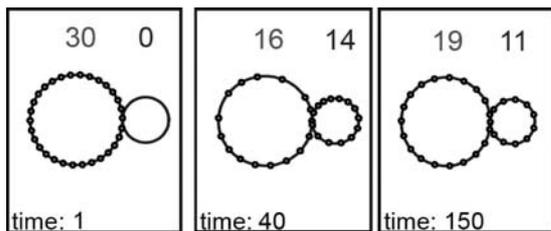


図2 役割分担の達成過程

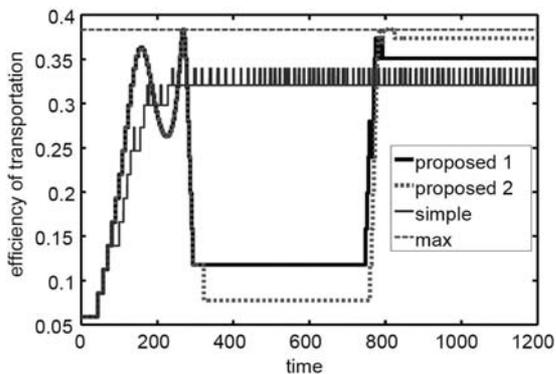


図3 役割分担の達成過程

よい役割分担を達成していることがわかる。

これらの結果より、2種類の役割が与えられた複数ロボットが全体としての効率を最適にするために局所的な観測情報から適切な役割分担を行うことが達成された。

## 2. モード切り替えに注目した移動ロボットによる物体押し操作の動作計画と学習

複数のロボットによる協調動作を考える際、「1台のロボットが物体を運ぶ」「もう1台のロボットに物体を受け渡す」などの複数の行動のまとまりを考えることができる。このようなまとまりをあらかじめ固定されたものとして設計者が準備しておくのではなく、ロボットが自律的に発見・獲得することが、ロボットの自律性を高める上で好ましい。このような「行動のまとまり」を本研究では「モード」という言葉で表現する。ここでモードとは、環境内で観測される対象の動きにもとづいて設定するものとする。具体的には、ロボットによる物体の押し運び動作であれば、「ロボットが単体で動いている状態」「ロボットが物体を押しながら動いている状態」「別のロボットが物体を押しながら動いている状態」などを個別のモードと考える。

2台のロボットによる協調動作を考えるための基礎として、1台のロボットが物体を押しして運ぶ動作において、提案するモードの考え方を利用した動作生成法を提案・検証した。自律型のロボットでの押し動作を考慮し、全方位カメラを搭載した車輪型ロボットのモデルをシミュレーション上で構築した（図4参照）。物体の押し動作の問題設定として、以下を想定する。

- ロボットは物体および物体を運ぶ目標位置までの距離と方向を観測する。

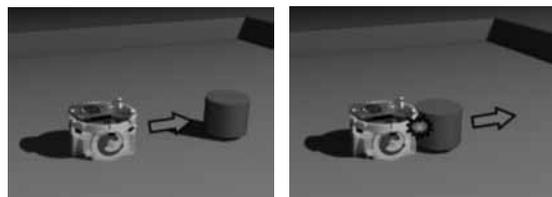


図4 押し動作における2つのモード

- ロボットの行動は、2つの車輪の微小な回転量とする。
- 最短行動ステップで物体を目標位置まで運ぶことを目的とする。
- 物体を目標位置まで運ぶ際の評価として、物体と目標位置間の距離が一定範囲内におさまることをタスク成功とみなす。

この問題設定のもとで、左図のような物体に接近するモードと、右図のような物体を目標位置まで押して運ぶモードの2種類を考える。

上記のような2つのモードを切り替えて最終的に押し動作を達成する動作生成法を考える。モードの切替えを考慮する利点としては、抽象的な行動・状態識別のまとまりを導入することで動作生成の際の計算量・学習量を効率化できることがあげられる。通常動作生成・行動学習の枠組みでは、最終的に目標に到達するという情報のみを用いて動作を生成するのに対して、モード切り替えを考慮した提案手法では、各モード内での動作の生成と、モードの切り替わりが起きる境界をどのように選ぶかという問題とを分けることで、より少ない試行錯誤や計算により望ましい動作系列を獲得できることが期待できる。

提案するモード切り替えを考慮した動作計画方法の概略を図5に示す。状態空間は、接触

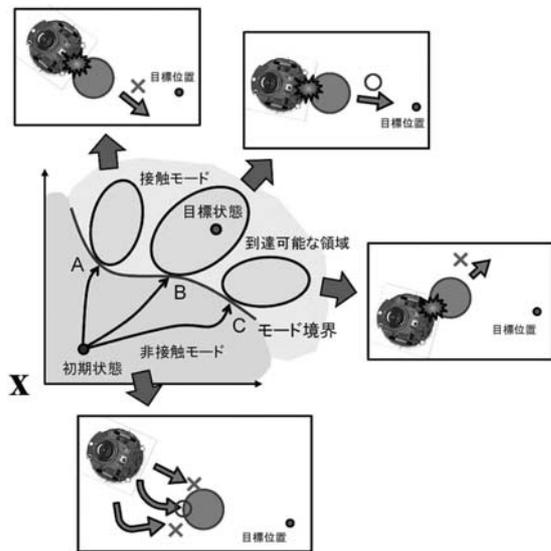


図5 押し動作における2つのモード

(ロボットが物体と接触しながら押し運ぶ)モードと非接触(物体に接触せずロボットのみが動きまわる)モードの2つに分けることができる。図中の境界上の点A, B, Cは、物体との接触が異なる場所で起きることを表している。境界上のどの点でモード切り替わりを起こすか(物体のどこで接触して押し始めるか)により、その後到達可能な状態(運べる物体の位置)は異なる。物体押し動作の動作生成は、「接触モードにおいて目標位置に向かって物体を押し動作」と「ある目標とするモード境界に到達するように移動する動作」を分けて生成することにより達成される。

動作生成には、モデル同定型の動的計画法を用いる。これにより、(TD型の強化学習法と比較して)少ない試行錯誤からの動作生成を実現する。モデル同定には、逐次最小二乗法と混合正規分布モデルにもとづいたOn-line EMアルゴリズムによる状態遷移モデルの関数近似を用いる。動的計画法の評価関数(報酬)として、物体と目標位置の距離にもとづいた報酬と、モード切り替え境界上に設定された点との距離にもとづいた報酬の2種類を用いる。

各モードについて提案学習手法で得られた動作を示す。図6に、接触モードにおける物体押し動作の学習過程を示す。試行回数が10回を超えた付近で一定の報酬を得ることができていることがわかる。

接触モードにおける押し動作学習結果を利用し、非接触モードを含んだ押し動作全体の学習

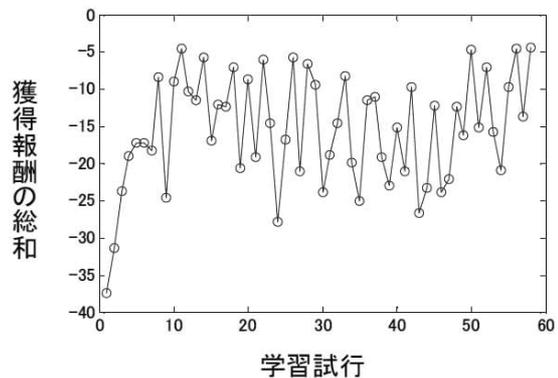


図6 接触モードにおける学習過程

を行った学習過程を図7に示す。左上が第1回の試行，右上が13回，左下が19回，右下が25回目の試行での軌跡を表す。

ロボットは2輪移動機構のため非ホロノミック拘束（車輪に垂直な方向には速度を発生させられない）を受ける。その拘束による強い非線形性の存在する状態遷移において，車両の運動学や物体とロボットの間相互作用などが未知の状態から，適切な物体の押し動作を学習により獲得できていることがわかる。

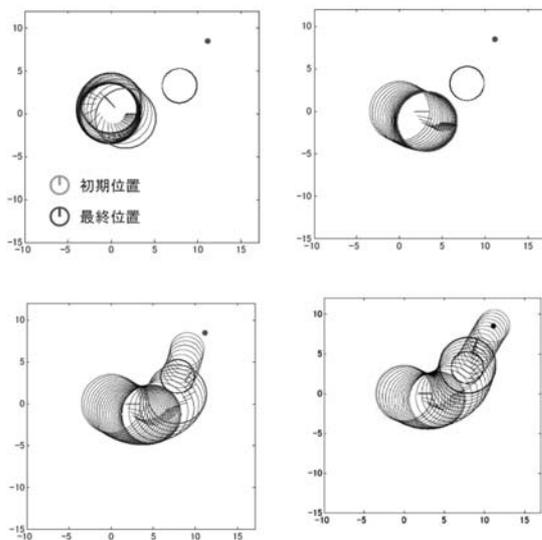


図7 モード切り替えを含んだ動作全体の学習過程

#### [今後の研究の方向，課題]

これまでに得られた2つの成果を統合・拡張することで2台のロボットによる役割分担の動作計画方法を実装・検証することが今後の方向の一つである。また，(2)の成果として得られた単体のロボット動作学習法でのモード識別に

対して，「もう1台の別のロボットが物体に接触している」モードなどを追加することで最終的に2台のロボットによる協調動作の生成が可能になると考えられる。そのための提案手法の拡張と検証が今後の課題となる。また，提案手法を実機で検証するための移動ロボットシステムを構築しており，実機での検証を行うことを予定している。

#### [成果の発表，論文等]

- [1] Y. Kobayashi, Y. Sato and M. Gouko, Division of iterative-transportation based on local observation by multiple mobile robots, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol. 16, No. 3, pp. 462-468, 2012.
- [2] Y. Kobayashi and S. Hosoe, Planning-Space Shift Motion Generation: Variable-space Motion Planning: Toward Flexible Extension of Body Schema, Journal of Intelligent and Robotic Systems, volume 62, issue 3-4, pp. 467-500, 2011.
- [3] T. Sekiguchi, Y. Kobayashi, A. Shimizu, T. Kaneko, Online learning of optimal robot behavior for object manipulation using mode switching, Proc. of IEEE Int. Symposium on Robotic and Sensors Environments, 61-66, Nov. 2012, Magdeburg, Germany.
- [4] 関口拓生，小林祐一，清水昭伸，金子透，離散・連続的ダイナミクスを考慮したロボット動作のオンライン学習，第30回日本ロボット学会学術講演会予稿集，AC4N1-7，2012（9月），札幌市。
- [5] 関口拓生，小林祐一，逐次最小二乗法を用いた連続行動空間での最適行動の学習，計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，1618-1620，2011（12月），京都市。
- [6] 関口拓生，小林祐一，高次元空間における行動生成のための大域的・局所的最適制御法，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011，1A1-M03，2011（5月），岡山市。

# 人の心と体に配慮した新しい生活支援技術の開発

## Development of assistive technology based on mental and physical load

2011006



研究代表者

岩手大学 工学部  
機械システム工学科

助教 佐々木 誠

### [研究の目的]

近年、身体運動計測技術やモデル解析技術の発展に伴い、関節や筋などの実測困難な生体内負荷を指標とした人と機械の適合性評価や、人の特性に基づいた生活支援機器の開発が進められている。しかしながら、身体的負荷を最小にするように設計された生活支援機器が使用者の心理面・精神面にどのような影響を与えるのか、また、心理的・精神的負荷を最小にするように設計された機器がどの程度の身体的負担を要求するのか、明確な知見は得られていない。

本研究では、人の「こころ」と「からだ」に配慮した新しい生活支援技術を確立するための基礎研究として、人との調和・適合が不可欠な生活支援機器の一つである手動車いすに着目し、その評価・検討を行った。

### [研究の内容, 成果]

#### 1. 唾液バイオマーカーによる生体反応の評価

人の身体的・精神的負荷を理解する一つの評価手法として、非侵襲的に分析可能な唾液バイオマーカーが注目されている。本研究では、内分泌系の指標である唾液コルチゾールと、交感神経系の指標である唾液アミラーゼに着目し、車いす駆動条件と生体反応との関係について検討を行った。

被験者は、健康成人男性5名(年齢22±0.7

歳, 身長167.2±2.8 cm, 体重60±4.6 kg, Mean±SD)とした。実験時間は、安静10分、車いす駆動5分、安静25分の合計40分とし、実験開始から終了まで2.5分おきに合計17回の唾液採取を行った。唾液中のコルチゾール濃度は、ELISAキット(1-3002; Salimetrics LLC)と蛍光プレートリーダー(ARVO MX; PerkinElmer Inc.)を用いて分析した。また、唾液アミラーゼ活性は、交感神経モニタ( $\alpha$ -AMY, Yamaha Motor Co.)を用いて、即時分析を行った。

車いす駆動実験には、ホイールベース長さ、シート高さ、トレッド幅、シート角、走行抵抗などをPCで自由に制御可能な車いすシミュレータを用いた(図1)。駆動姿勢は、腕を真下に下ろした時の指先位置と車軸位置が等しくなるように、各被験者ごとにシート位置を調整した。走行抵抗は、3, 6 Nmの2種類とし、毎分40回の駆動周期で、駆動輪の角速度を2

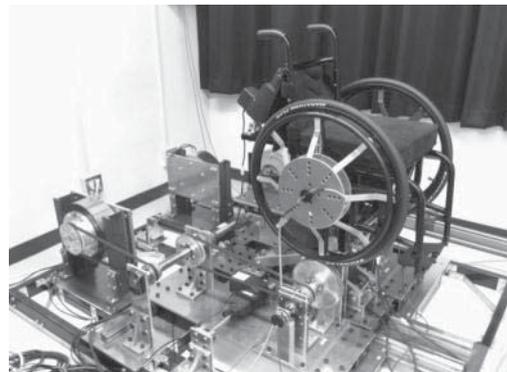


図1 車いすシミュレータ

rad/s に維持するように被験者に指示を与えた。駆動中の上肢運動とハンドリムに加えた駆動力は、3次元位置姿勢センサ (Fastrak; Polhemus Inc.) と6軸力覚センサ (IFS-45E15A250-I63-ANA; Nitta Co.) を用いて、サンプリング周波数 25 Hz で計測した。

7関節 (肩関節の屈伸, 内外転, 内外旋, 肘関節の屈伸展, 手関節の回内外, 掌背屈, 橈尺屈) を有する剛体リンクモデルと, 上肢運動に支配的な10筋 (上腕筋, 三角筋前部, 三角筋中部, 三角筋後部, 上腕二頭筋, 上腕三頭筋短頭, 上腕三頭筋長頭, 大胸筋, 橈側手根屈筋, 橈側手根伸筋) を有する2次元の筋骨格モデル (簡易モデル) を用いて, 被験者の身体負荷を筋消費エネルギーとして数値化したところ, 走行負荷の上昇に伴い, 身体負荷が有意に増加することが確認された ( $p < 0.01$ )。一方, 唾液コルチゾール濃度と唾液アミラーゼ活性は, 身体的あるいは精神的負荷によって上昇することが報告されているが, 乗り心地や操作性, 肉体的・精神的疲労などの身体的・精神的負荷が複雑に混在する車いす駆動の場合には, 各値の変動に個人差が大きく, 筋消費エネルギーとの間に有意な相関関係は見られなかった。

## 2. 生体力学的指標と生理学的指標による適合性の評価

車いす駆動に伴う最も深刻な問題は, 車いす使用者の半数以上が経験する上肢の痛み, 関節筋腱板や尺骨神経の損傷, 手根管症候群などの2次的障害の発症である。そのため, 関節, 靭帯, 筋などにかかる実測困難な生体内負荷を定量化し, 使用者に適した駆動方式や駆動姿勢を導出することは重要である。ここでは, 関節, 靭帯, 筋などを詳細にモデル化した3次元筋骨格モデル解析と呼気ガス分析を用いて, 生体力学的, 生理学的な観点から, 駆動方式や駆動条件の違いが使用者に与える影響を考察した。

被験者は, 健常成人男性4名 (年齢  $22 \pm 0.4$  歳, 身長  $172.0 \pm 6.7$  cm, 体重  $59.6 \pm 5.0$  kg,

Mean $\pm$ SD) とした。駆動方式は, ハンドリム式 (HHR-4; OX-engineering Co.), レバー式 (NuDrive; Pure Global Ltd.) の2種類とした (図2)。実験では, 各駆動装置を車いすシミュレータに取り付け, 被験者の駆動力に応じた駆動輪の回転運動を AC サーボモータ (SGMCS-35E3B41; Yaskawa electric Co.) を用いて再現した (図3)。駆動力は, ハンドリムと車輪の間, またはグリップ根元に6軸力覚センサを組み込むことで計測した。走行抵抗  $d$  は, スロープ角度が  $0^\circ$  (平坦),  $3^\circ$ ,  $6^\circ$  に相当する負荷トルクとしてそれぞれ与えた。

$$d = RMg \sin \alpha \quad (1)$$

ここで,  $R$  は駆動輪の半径,  $M$  は被験者と車いすを合わせた全体の質量,  $g$  は重力加速度を表す。また, レバー式駆動の実験では, 変速機を仮想的に設定し, レバーと車輪のギア比がそれぞれ 1, 1.5, 1/1.5 倍となるよう, 車いすシミュレータの制御を行った。被験者は, 前方に設置したスクリーンで走行速度を確認しながら, 走行速度を 2.5 rad/s に維持するように, 3分間の駆動を行った。駆動中の身体運動は, 12台の赤外線カメラで構成したモーションキャプ

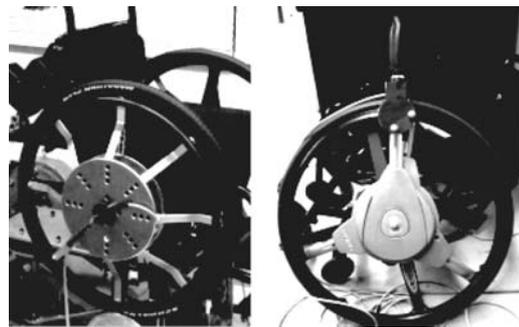


図2 車いす駆動計測装置

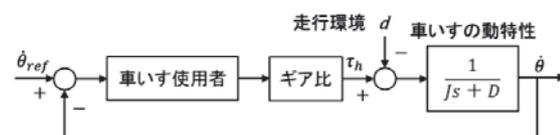


図3 車いすシミュレータの制御方法

チャシシステム (OptiTrack; Natural Point Inc.) により計測した。また、身体の消費エネルギーを分析するために、呼気ガス分析装置 (Cpex-1; Inter Reha Co., Japan) を用いて、駆動時の酸素摂取量の測定を同時に行った。酸素摂取量は、駆動開始前の 15 分間にも測定を行い、これを安静時酸素摂取量と定義した。以上の実験を、各条件ごとに 2 回ずつ行った。駆動トルクや車輪の角速度などの車いすシミュレータに関する各パラメータはサンプリング周波数 200 Hz、酸素摂取量は 180 Hz でそれぞれ計測を行った。なお、本実験による疲労の影響を考慮するため、各条件の間に 1 日以上インターバルを設けた。

モーショキャプチャシステムで計測した車輪の回転角度、回転中心位置、手のひら位置の各情報をもとに、車軸部で計測した駆動力から、ハンドリムに加えた力とモーメントを算出した。そして、全身の 3 次元身体運動と、ハンドリムに加えた力とモーメントの計測値を用いて、生体内負荷のモデル解析を行った (図 4)。解析には、筋肉 997、腱 50、靭帯 125、軟骨 34 の全要素 1206 で構成される 3 次元筋骨格モデルを用い、実測困難な関節反力、関節トルク、筋張力、筋収縮速度などを推定した。また、各筋の張力と収縮速度の積を時間積分することで、消費エネルギー  $E_{hm}$  を算出した。

$$E_{hm} = \sum_{j=1}^n \int |F_j \times v_j| dt \quad (2)$$

ここで、 $j$  は駆動に要した筋の数 (166 筋)、 $F$  は筋張力、 $v$  は筋収縮速度である。また、筋骨格モデル解析の結果と比較するために、呼気

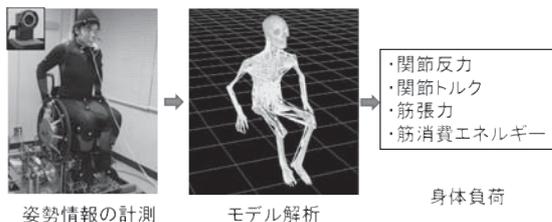


図 4 3次元筋骨格モデル

ガス分析で得られる酸素摂取量から消費エネルギー  $E_{hg}$  を計算した。

$$E_{hg} = 1.05 \times METS \times Wt \quad (3)$$

ここで、 $METS$  (metabolic equivalents) は駆動時酸素摂取量と安静時酸素摂取量の比から得られる運動強度、 $W$  は体重、 $t$  は駆動時間である。安静時代謝量 1  $METS$  は、酸素摂取量にして 3.5 ml/(min · kg) に相当する。

車いすの駆動効率  $E_{ff}$  は、車いすの走行に使われたエネルギー  $E_w$  と人が消費したエネルギー  $E_{hm}$  の比として定義した。

$$E_{ff} = E_w / E_{hm} \quad (4)$$

なお、車いすのエネルギー  $E_w$  は次式で与えた。

$$E_w = \sum_{i=1}^2 \int |\tau_{hi} \theta_i| dt \quad (5)$$

ここで、 $i$  は駆動輪の数、 $\tau_{hi}$  は各駆動輪軸周りの駆動トルク、 $\theta_i$  は各駆動輪の角速度である。

図 5 には、肩部の関節反力を、被験者 4 名の平均値 ± 標準偏差として示した。関節反力は、ハンドリム式とレバー式のどちらの場合においても、走行抵抗の増加に伴って大きくなる傾向

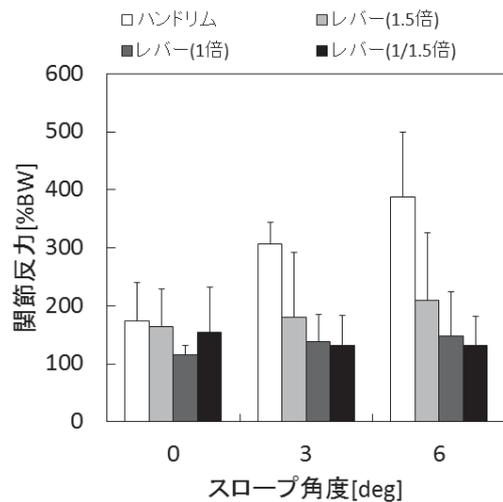


図 5 肩関節の関節反力

が見られた。ここで、駆動方式に着目すると、ハンドリム式の関節反力はレバー式よりも1.1～3.0倍大きく、また、レバー式のギア比に着目すると、小さな力でレバー操作が可能な1/1.5倍の場合の方が、関節反力は小さくなることが示された。

図6、7には、筋骨格モデル解析から算出した駆動効率と、呼気ガス分析から算出した駆動効率をそれぞれ示した。この結果、筋骨格モデル解析による駆動効率は、呼気ガス分析の結果よりも全体的に低値を示したが、ハンドリム式の方がレバー式よりも駆動効率が低く、また、レバー式のギア比では1/1.5倍の場合の方が、駆動効率が高いという傾向は一致した。さらに、

これら2つの方法で算出した駆動効率の相関関係を調べたところ、相関係数  $R=0.75$  という強い相関が見られた。これにより、筋骨格モデル解析を用いることで、関節、靭帯、筋などの実測困難な生体内負荷だけでなく、生理学的指標を考慮した駆動効率の算出が可能となり、装置が高価で実験が煩雑となる呼気ガス分析の代替手法として、有用であることが示唆された。

#### [今後の研究の方向、課題]

本研究では、3次元筋骨格モデル解析による車いす適合評価の有用性を確認した。今後は車いすシミュレータを用いて、様々な駆動条件下での駆動計測、ならびに筋骨格モデル解析を行うことで、リアルタイムに個人に最適な駆動方式や車いす形状を導出する適合支援技術の開発を進めていく。さらに、バイオマーカーの分析や官能評価を継続することで、人の「こころ」と「からだ」に配慮した機器設計技術の確立を目指す予定である。

#### [成果の発表、論文等]

- [1] 長田仁也, 伊藤翔太, 佐々木誠, 山口昌樹: 車いす適合支援を目的とした酸素摂取量の評価, 第45回日本生体医工学会東北支部大会, ME-01-2, p.9, 2011.
- [2] 長田仁也, 佐々木誠, 伊藤翔太, ステファノフディミター, 大日方五郎, 山口昌樹: 車いす駆動における駆動効率の評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, pp.2A1-A11 (1)-2A1-A11 (2), 2012.
- [3] 長田仁也, 伊藤翔太, 佐々木誠, 山口昌樹: 車いす駆動における駆動効率の評価, 心身ストレスに関する学術研究集会 2012, P-7, pp.12-13, 2012.
- [4] 伊藤翔太, 佐々木誠, 長田仁也, 三浦弘樹, 山口昌樹: 筋骨格モデルを用いた車いす駆動動作の解析, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会, GS3-5-3, pp.1-2, 2012.
- [5] 松田敬子, 佐々木誠, 長谷和徳, 山口昌樹: 車いす最適設計を目的とした順動力学シミュレーション, 計測自動制御学会東北支部第277回研究集会, 227-9, 2012.

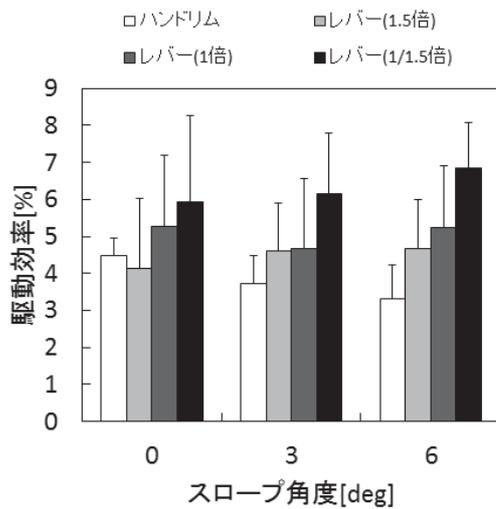


図6 モデル解析から算出した駆動効率

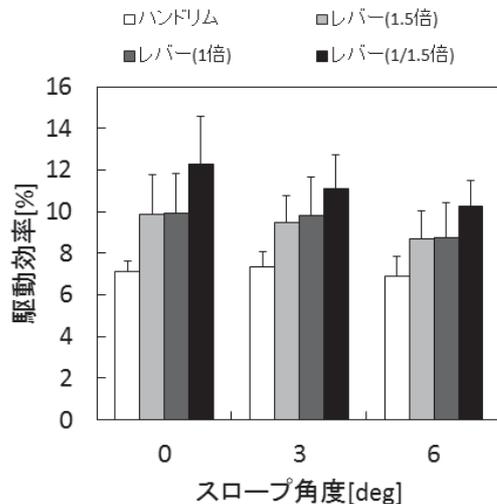


図7 呼気ガス分析から算出した駆動効率

# モバイル環境での頑健な超音波モーショントラッキングシステムの開発

## A Robust Ultrasound Motion-capture System in Mobile Environments

2011010



研究代表者

北海道大学大学院  
情報科学研究科

教授 杉本 雅 則

### [研究の目的]

モーショントラッキングシステム（以下 MCS と略す）は、CG やスポーツ科学等、幅広い分野で使用されている。しかし、現在市販されている光学および磁気方式の MCS は、大変高価（数百万～数千万円）である、機材が環境に固定され限られた場所でのみ使用できないなど、いくつかの課題がある。本研究では、申請者が独自に開発した高精度超音波測距技術を利用し、実用性能を満たしつつ極めて安価でかつポータブルな MCS を開発する。多くの人々が容易に入手、利用できる MCS を実現することで、多様な学術領域、産業分野での波及効果を期待できる。さらに、本 MCS 実現を通して確立される個々の技術は、関連分野での問題解決の有用な知見を与えると考えられる。

### [研究の内容、成果]

#### 1. 研究概要

我々のグループでは、超音波を用いた測距手法を構築しその評価を行ってきた。位相一致法（Phase Accordance Method: PAM）[1] と呼ばれる手法では、2つの異なる周波数の超音波を重畳し、それらの位相差が0となる点を時刻基準点として、送信機側で検出する。3m 測距において標準偏差 0.032 mm という極めて高い性能を示すことが、これまでの実験で確認され

ている。この性能は、狭帯域超音波トランスデューサを用いた測距としては我々が知る限り世界最高レベルである。また、本手法を拡張することにより、ロボットトラッキングシステム [2] やドップラーシフト補償による速度と測距の同時計測が可能な拡張位相一致法 [3] を提案した。

超音波を用いた3次元位置推定は、三辺測量（trilateration）の原理に基づく。GPS の例から明らかなようにターゲット位置の推定精度は、(1) 距離計測精度および (2) センサ（GPS の場合は人工衛星）の空間的配置に依存する。図1に示す通り、センサが空間的に分散している場合は、GDOP（Geometric Dilution of Precision）値が低くなり高い精度が得られる（good GDOP）が、集中している場合は GDOP が高くなり精度は悪くなる（poor GDOP）。しかし、センサを空間中に分散すると、システムが大規模になり設置の容易さや可搬性が乏しくなるという問題がある。

我々のグループで構築した3次元位置認識シ



図1 長いベースライン（右）と短いベースライン（左）

システム [4][5] は、センサ間の基線長を小さくすることで、コンパクトな実装かつ一定レベルの精度を実現した。しかし、以下の点が問題であった。

- 超音波トランスデューサの位相特性

超音波トランスデューサは指向性を持っており、超音波の入射角によって位相特性が変化する。提案測距手法は位相差を時刻基準点とするため、位相特性の変化は測距の誤差に直結する。

- poor GDOP による 3 次元位置認識精度の限界

GDOP 値が高い場合、測距の小さな誤差が 3 次元位置認識の大きな誤差に増幅される。特に、距離方向 (z 方向) と鉛直な面 (xy 平面) での誤差が極めて大きくなる。

そこで、本研究では以下の 2 つの方法を用いることにより、高精度かつコンパクトな 3 次元モーションキャプチャシステムを提案した。

- 超音波トランスデューサの位相特性の補償
- 単眼カメラと超音波による深さ方向の計測の統合

本研究では、複数の入射角での超音波トランスデューサの位相特性を計測し、スプライン関数によって位相補償平面を構築する。カメラによって得られるターゲットの位置 (カメラを原点とするターゲットの方向) により、超音波測距の補正を行うと同時に、それと鉛直な面での誤差を小さくできると期待される。

## 2. 提案手法

### 2.1 カメラと超音波による 3D 位置認識

図 2 において、カメラと超音波受信機の基線

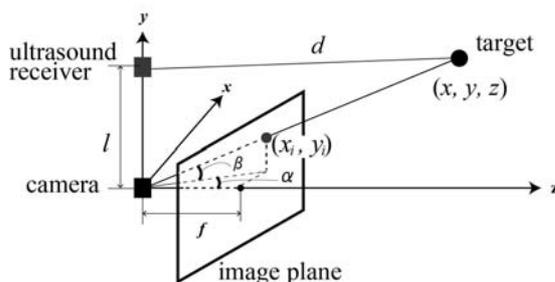


図 2 カメラと超音波による 3 次元位置認識の概要

長を  $l$ 、カメラの焦点距離を  $f$ 、ターゲットのカメラ画像での位置を  $(x_i, y_i)$ 、超音波測距により計測されたターゲットまでの距離を  $d$  とする。このとき、ターゲットの位置  $(x, y, z)$  は以下の 3 つの式から求めることができる。

$$\frac{x_i}{f} = \frac{x}{z}, \quad \frac{y_i}{f} = \frac{y}{z}, \quad x^2 + (y-l)^2 + z^2 = d^2 \quad (1)$$

### 2.2 拡張位相一致法

拡張位相一致法は、TOF (Time of Flight) に基づく測距手法である。拡張位相一致法で用いられる送信信号は、図 3 に示すように 2 つの送信波から構成される。1 番目の送信波  $s_d(t)$  は、2 つの正弦波で構成されるビート信号の 1 周期分であり、以下の式で表される。

$$s_d(t) = a_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) + a_2 \sin(\omega_2 t + \phi_2)$$

ここで  $a_i, \omega_i, \phi_i (i=1, 2)$  はそれぞれ、振幅、角周波数、位相である。1 周期分の信号なので、2 つの正弦波の位相差が 0 となる点は一つである。受信機側では、信号受信中の時刻  $t_w$  で検波を行うと、時刻基準点 (epoch) までの時刻  $t_e$  は以下のように表すことができる (詳細は [1] を参照のこと)。

$$t_e = -\frac{\phi_1 - \phi_2}{\omega_1 - \omega_2}$$

超音波送受信機間の時刻同期が取れていれば、時間  $t_w + t_e$  に音速をかければ距離が求まる。しかし、移動体の場合はドップラーシフトにより、

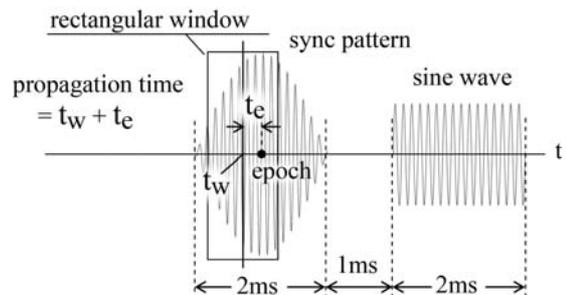


図 3 拡張位相一致法で用いる送信信号

角周波数が変化する。そこで、以下の式で表される 2 番目の送信波  $s_v(t)$  を用いて、ドップラシフト推定を行う。

$$s_v(t) = a_1 \sin(\omega_0 t + \phi_0)$$

詳細は [3] に譲るが、提案手法ではドップラシフトによって、送信波の振幅は変化しないことに着目して、ドップラシフト量を求める。評価実験では、 $\omega_0 = 40.0$  kHz,  $\omega_1 = 39.75$  kHz,  $\omega_2 = 40.25$  kHz とした。実験結果から、フーリエ変換等従来手法に比べて極めて高速かつ高精度な推定が行えること、ドップラシフト補正した角周波数を用いることにより、静止時とほぼ同程度の精度で時刻基準点が求まることを確認できた。

### 2.3 超音波トランスデューサの位相特性とその補正

超音波トランスデューサはその指向性により、信号の入射角に依存して振幅および位相の特性が変化する。特に拡張位相一致法は 2 つの正弦波の位相差に着目して距離計測を行う手法であるため、位相特性の変化は測距の誤差となることを意味する。そこで、決められた距離からの送信信号に対し、入射角を変えつつ測距を行うことで、位相特性を計測した。

超音波送信機および受信機（日本セラミック社 T40-16 および R40-16）の設置は以下のように行った。超音波受信機の位置は、三脚を用いて高さ 1,000 mm から 1,600 mm まで 30 mm 刻みで変更する。一方、超音波送信機は高さ 1,300 mm に設置された電動スライダ（Oriental Motor 社, SPVL8M150UA）に装着され、水平方向に  $-400$  mm から  $400$  mm の間を 40 mm 刻みで移動することで位置を変更する。送受信機間の距離は 1,500 mm である。よって、信号の入射角が水平方向  $\pm 11.3$  度、鉛直方向  $\pm 8.5$  度の範囲で 441 点での計測が行われた。各計測点での計測回数は 30 回であった。測定結果から得られた標準偏差は  $4.32 \times 10^{-3}$  rad と

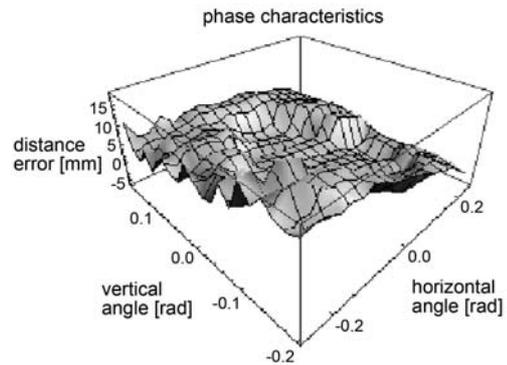


図 4 超音波測距にスプライン関数を適用することにより求めた位相補間曲面

なり、精度の高い位相特性の計測が行われたことが分かる。

次に、離散的に得られた計測値に対し、B スプライン関数を用いて補間曲面を生成した。その結果を図 4 に示す。

カメラと超音波受信機は基線長  $l$  だけ離れており、よって図 2 の  $\alpha, \beta$  は超音波受信機への正しい入射角ではない。そこで以下の手順で受信機への超音波の入射角を求めることで、位相特性補正を行う。

1. 式 (1) を用いて

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{x}{z}, \quad \beta' = \tan^{-1} \frac{y-l}{\sqrt{x^2+z^2}} \text{ を求める}$$

2.  $\alpha$  および  $\beta'$  を用いて位相特性補正を行い、 $d$  を更新する
3.  $d$  の変化が閾値以下になれば終了し、そうでなければ 1. に戻る

## 3. 評価実験

### 3.1 実験設定

提案手法のモーションキャプチャシステムとしての評価にあたり、その 3D トラッキング性能を確認するため、まずは以下の 2 つの実験を実施した。

1. 静止状態実験：位相特性補正なし (w/o comp.) および補正あり (w/ comp.)
2. トラッキング実験：速度 0.1 m/s および 1.0 m/s, それぞれ補正なしおよび補正あり

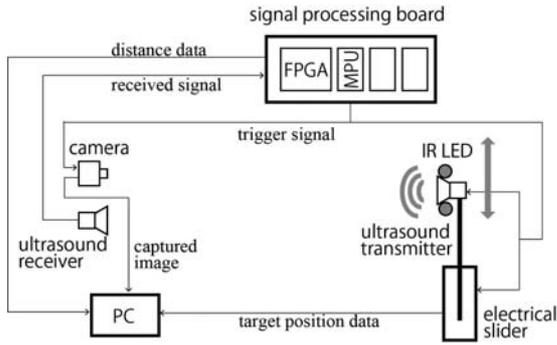


図5 実験設定

実験1では、前節で述べた超音波トランスデューサの入射角による補正の効果を調べる。実験2では、移動体の速度を変えつつ、提案手法のトラッキング性能を評価する。

図5に実験設定の概要を示す。信号処理基板のMPUからは、超音波送信センサおよびカメラ（Point Grey社、Firefly MV, 1,328×1,048 pixel）に対してトリガ信号が送られ、超音波信号の送信および画像の取得が行われる。超音波受信センサで受信された信号は信号処理基板上のFPGAで高速処理され、測距結果が出力される。一方、赤外線フィルタを介して得られたカメラ画像はPCに送信される。PC上ではsub pixelレベルの輝点抽出が行われ、測距結果と式(1)を用いてターゲット（超音波送信機）の3次元位置が求められる。なお、輝点抽出とカメラパラメータの補正には、OpenCVに付属ライブラリを使用した。

位相特性の計測と同様、超音波送信機は電動スライダに装着された。また、図5に示すように送信機周囲の3個の赤外線LEDは、その重心が送信機の位置と一致するように配置された。カメラと超音波受信センサの基線長は、27.5 mmである。

### 3.2 静止状態実験

前節の位相特性での計測位置とは異なる位置にターゲットを配置し、その3次元位置を測定した。送受信機間の距離は1,900 mmである。実験の結果を、表1に示す。計測位置数は8カ所、各計測位置での計測回数は30回である。

表1 静止状態での3次元位置認識結果

	x-axis	y-axis	z-axis	3D error
RMSE (mm) without compensation	0.92	0.30	2.52	2.70
RMSE (mm) with compensation	0.85	0.28	0.85	1.24

表2 移動状態での3次元位置認識結果 (0.1 m/s)

	x-axis	y-axis	z-axis	3D error
RMSE (mm) without compensation	1.01	0.31	2.28	2.51
RMSE (mm) with compensation	0.90	0.29	0.74	1.20

表3 移動状態での3次元位置認識結果 (1.0 m/s)

	x-axis	y-axis	z-axis	3D error
RMSE (mm) without compensation	0.95	0.32	2.76	2.93
RMSE (mm) with compensation	0.93	0.34	1.34	1.66

表1から明らかのように、位相特性の補正を行うことにより、RMSE (root means square error: 平均2乗誤差)の改善が確認できた。

### 3.3 トラッキング実験

図5に示すように、ターゲットがカメラの光軸との鉛直な面上を0.1 m/s、および1.0 m/sで移動する場合の実験結果を表2および表3に示す。ターゲットは電動スライダ上で往復運動を行い、それぞれ179回および64回の計測が行われた。

上記の表から、ターゲットトラッキングの場合は、静止状態よりもRMSE、ともに悪化が見られるものの、位相特性補正を行うことでいずれも2 mm未満に抑えられている。静止状態実験およびトラッキング実験で得られた結果の累積分布関数(cumulative distribution function: CDF)および90パーセントイルでの各々の値を、図6に示す。位相特性補償を行った結果、静止状態、0.1 m/sおよび1.0 m/sにおける90 percentileでの値は、それぞれ2.92 mm, 3.63 mm, および7.23 mmであった。

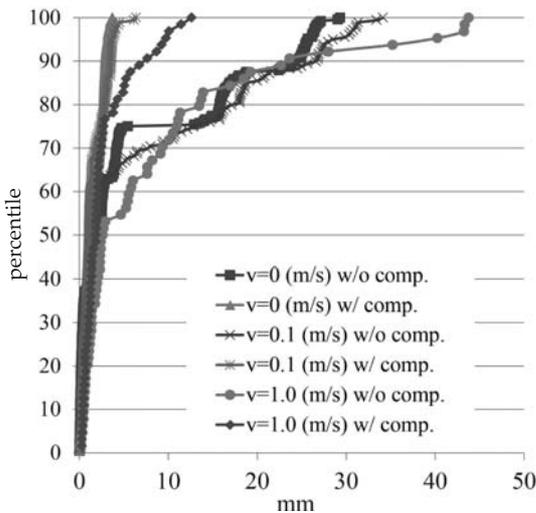


図6 静止状態および移動状態位置認識における累積分布関数

#### [今後の研究の方向, 課題]

これまでの研究を踏まえた結論と今後の課題は以下のようにまとめられる。

#### ●コンパクトでロバストな3次元トラッキング手法

基線長が短い (27.5 mm), つまり GDOP 値が高いにも関わらず, 極めて高精度の3次元位置推定が実現できた。従来の無線信号による三辺測量では基線長が短い場合, 図1に示したようにターゲットまでの距離方向の精度が高くても, それと直交する面での精度が悪化する可能性がある。逆に, ステレオカメラでの3次元位置認識では基線長が短い場合, ターゲットまでの測距精度が悪化する。提案手法は, 高精度な超音波測距技術を用い, カメラおよび超音波計測の特徴を生かすことによって高精度な3次元認識を実現したと言える。また, 基線長を短くできれば, 計測装置をコンパクトに設計することが可能となり, 実装のコスト (環境等への設置など) も小さくできる。さらに, 三辺測量やステレオカメラでは, No Line of Sight (NLOS) やオクルージョンによりターゲットからの信号や画像が得られない超音波受信センサやカメラが1つでも存在すれば, 3次元位置認識に失敗する。その点, 提案手法は, コンパクトな設計

にできるため, 位置認識に失敗する可能性を従来よりも小さくできると考えられる。

#### ●トラッキング可能領域の拡大

超音波信号は空気中での減衰が大きいため, 離れた (5 m 以上) ターゲットに対する高精度の測距は難しい。また, 本稿で用いた超音波受信センサは指向性が強いため, トラッキング可能な領域は限定される。同様の問題はカメラにも当てはまる。よって, 広角の超音波トランスデューサやカメラを使用する, 複数の超音波トランスデューサを搭載してより受信可能な入射角を広げる, などの工夫が求められる。

#### ●多点同時トラッキングによるモーションキャプチャシステムの実装

提案手法は安価に実装できるにもかかわらず, 光学式あるいは磁気式のモーションキャプチャシステムの位置認識精度 (誤差 1 mm 程度) に匹敵できる精度を実現している。よって複数の送受信装置を用いることで光学-超音波によるハイブリッド型のモーションキャプチャシステムを構築が可能となる。しかし, その実現にはフレームレートの向上が不可欠である。拡張位相一致法では, 図3に示した通りドップラシフト推定のための正弦波を追加した分だけ送信時間が長い。我々はこの正弦波なしでも移動体測距を高精度に行う手法 [6] をすでに構築しており, よって送信時間を短縮することは可能である。また, 超音波を用いた 3 m の距離計測には, 伝播時間だけでも約 10 ns を要する。そのため理論的な限界は, 約 100 fps となる。複数の送信機を用いる場合, 時分割による3次元位置計測を行えば, 送信機の数に応じてフレームレートは悪化する。よって, 現在の active system から passive system への設計変更を行う, あるいは広帯域超音波センサを用い周波数分割による測距を行う, 等の拡張が必要となる。

## [参考文献]

- [1] 橋爪, 金子, 杉本: 位相一致法による正確な超音波位置認識手法とその特性, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J91-A, No. 4, pp. 435-447, 2008.
- [2] Ito, T., Sato, T., Tulathimutte, K., Sugimoto, M., Hashizume, H.: A Scalable Tracking System Using Ultrasonic Communication, *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, Vol. E92-A, No. 6, pp. 1408-1416, 2009.
- [3] 佐藤, 杉本, 橋爪: 高精度超音波移動体測位のための位相一致法の拡張手法, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J92-A, No. 12, pp. 953-963, 2009.
- [4] Sugimoto, M., Tulathimutte, K., Ito, T., Sato, T., Hashizume, H.: An Ultrasonic 3D Positioning System using a Single Compact Receiver Unit, In *Proc. of LOCA 2009*, pp. 240-253, Tokyo, Japan, 2009.
- [5] Nakamura, S., Sato, T., Sugimoto, M., Hashizume, H.: An Accurate Technique for Simultaneous Measurement of 3D Position and Velocity of a Moving Object Using a Single Ultrasonic Receiver Unit, In *Proc. of IPIN 2010*, ETH Zurich, Switzerland, pp. 1-7, 2010.
- [6] Sato, T., Nakamura, S., Sugimoto, M., Hashizume, H.: Extended Phase Accordance Method: A Real-time and Accurate Technique for Estimating Position and Velocity of Moving Objects using Ultrasonic Communication, *Sensors and Transducer Journal* (special issue, Dec. 2010), Vol. 9, pp. 56-70, 2010.
- [7] Sugimoto, M., Kanie, N., Nakamura, S., Hashizume, H.: An Accurate 3D Localization Technique using a Single Camera and Ultrasound, In *Proceedings of IEEE IPIN 2012*, Sydney, Australia, pp. 1-8, November 2012.  
([http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6418874](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6418874))
- [8] 杉本, 蟹江, 中村, 橋爪: 単眼カメラと超音波を用いた高精度三次元位置認識手法, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 (ROBOMECH 2012), 浜松, 静岡 (2012年5月).
- [9] 蟹江, 中村, 杉本, 橋爪: 単眼カメラと超音波による高精度三次元位置認識手法, 電子情報通信学会超音波研究会, 日野, 東京 (2012年2月).
- [10] Nakamura, S., Sugimoto, M., Hashizume, H.: Measuring Phase Characteristics of Ultrasonic Microphones for Accurate Ultrasonic Localization Systems, In *Proceedings of IEEE IUS 2011*, pp. 979-982, Orlando, FL, October 2011.
- [11] Nakamura, S., Sato, T., Terabayashi, K., Sugimoto, M., Hashizume, H.: An Accurate and Compact 3D Positioning System for a Moving Target by Integrating Extended Phase Accordance Method and Particle Filter, In *Proceedings of IEEE IPIN 2011*, Guimaraes, Portugal, September 2011.  
(<http://ipin2011.dsi.uminho.pt/detailedProgram.php>).
- [12] Sato, T., Nakamura, S., Terabayashi, K., Sugimoto, M., Hashizume, H.: Design and Implementation of a Robust and Real-time Ultrasonic Motion-capture System, In *Proceedings of IEEE IPIN 2011*, Guimaraes, Portugal, pp. 1-6, September 2011.  
([http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6071907](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6071907))

## [当該研究期間の成果発表論文]

- [7] Sugimoto, M., Kanie, N., Nakamura, S., Hashizume, H.: An Accurate 3D Localization Technique

# 人間との親和性を有するパーソナルモビリティの運動制御

## Motion Control of Human-Friendly Personal Mobility

2011012



研究者代表

大阪府立大学 工学研究科

助教

中川 智 皓

### [研究の目的]

近年、環境保全、高齢社会、移動権確保への対応から、歩行の延長となる個人の移動手段、パーソナルモビリティの研究開発が成されている。例えば、小型の倒立振子型車両は、パーソナルモビリティの代表例である(図1)。これは、操縦者の体重移動によって走行する乗り物である。

本研究では、パーソナルモビリティを対象に、人間と機械の親和性を科学する。研究の最終目的は、人間、すなわち車両の操縦者、また周囲の歩行者との親和性が高い動きを実現するパーソナルモビリティの運転支援システムを構築することである。パーソナルモビリティは、ロボット単体として動くモノではなく、車両と人



トヨタ自動車ホームページより  
図1 パーソナルモビリティの例  
(小型の倒立振子型車両)

間が一体となって、初めて、移動という生活の重要な一部を成すため、人間との調和を図ることに大きな意義がある。

倒立振子型車両はその小回りの利く利便性から観光や警備に使用されている例がある<sup>(1)</sup>。このように歩行空間で使用されうるパーソナルモビリティは、周囲歩行者にとって安全また安心であることが求められる。歩行空間におけるパーソナルモビリティの歩行者との親和性に関する研究ではこれまで以下の検討を行った。商店街を模擬した歩行者流内において、自転車や倒立振子型車両を走行させ、周囲歩行者への不快感や恐怖感をアンケート評価した。その結果、車両の種類によって不快感や恐怖感が有意に異なることが分かった<sup>(2)</sup>。次に、パーソナルモビリティと歩行者の親和性を数値的に評価する手法として、パーソナルスペース(Personal Space, PS)の概念を用いた検討を行った。パーソナルスペースとは、他者の侵入によって心理的緊張が生じる領域である。車両の種類、大きさ、速度によって有意にパーソナルスペースが変化することを示した<sup>(3)</sup>。また、パーソナルモビリティ操縦者と歩行者のパーソナルスペースが必ずしも一致しないことを示した<sup>(3)</sup>。すなわち、パーソナルスペースの測定結果では、すれ違う際にパーソナルモビリティ操縦者にとって歩行者は不快でなくとも、歩行者にとってはパーソナルモビリティが不快と感じる状況の存在が確認された。

そこで、本研究では、パーソナルモビリティが歩行者と親和性の高い動きを実現するために、パーソナルスペースを利用したパーソナルモビリティの運転支援を構築することを最終目標とする。基礎検討として、パーソナルスペースの概念に基づいた行動モデルを構築し、シミュレーションにて歩行者とPMVの親和性を状況別に評価する。

### [研究の内容, 成果]

## 1. パーソナルスペースを利用したパーソナルモビリティの運転支援コンセプト

パーソナルスペースを利用したパーソナルモビリティの運転支援コンセプトを述べる。パーソナルモビリティの歩行者との親和性を向上させるために、歩行者のパーソナルスペース内できるだけパーソナルモビリティが侵入しないようにすることを目標とする。例えば、パーソナルモビリティがレーザーレンジファインダ等で周囲歩行者を検知し、そのときの状態量（距離、速度等）から歩行者のパーソナルスペースを計算する。パーソナルモビリティ操縦者が歩行者のパーソナルスペースに侵入しているまたは侵入しそうである場合には、音や光、振動などでそれを知らせる。その後、パーソナルモビリティ操縦者自身の判断で歩行者を回避する。もしくは、他者のパーソナルスペースに侵入しそうな場合に、車両側で減速や回避の制御を行う、または操縦者が減速や回避を行うよう促す制御を行う。図2に、パーソナルスペースを利

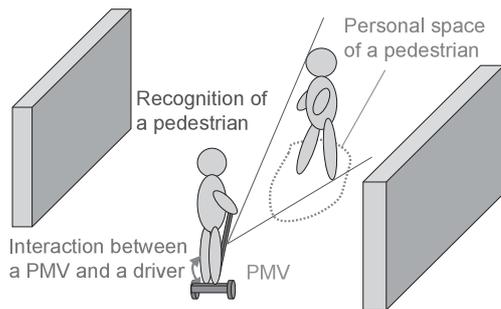


図2 パーソナルスペースを利用した

用したパーソナルモビリティの運転支援コンセプト図を示す。

## 2. 数値シミュレーション

### 2.1 パーソナルスペース

歩行者またパーソナルモビリティ操縦者のパーソナルスペースは、以下のように定義する。歩行者のパーソナルスペースについては、歩行者とパーソナルモビリティ操縦者が互いに正面からすれ違う場合に、パーソナルモビリティ操縦者が直進し続け、歩行者がパーソナルモビリティ操縦者を回避し始めたときの両者の頭部間距離を前方パーソナルスペース  $l_f$ 、すれ違う際の真横の頭部間距離を側方パーソナルスペース  $l_s$  とした。パーソナルモビリティ操縦者のパーソナルスペースについても同様に定義する。

### 2.2 通常のパーソナルモビリティ行動モデル

通常のパーソナルモビリティの行動モデルを図4のフローチャートに示す。パーソナルモビ

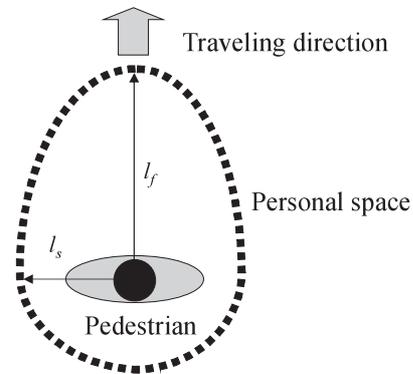


図3 パーソナルスペース

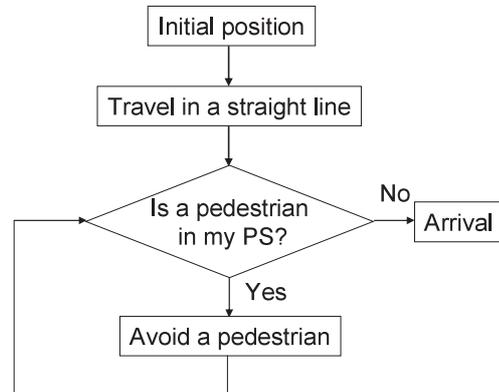


図4 通常の行動モデル

リティは初期位置から目標地点に向かって直進するものとする。歩行者が視界に入った場合、歩行者がパーソナルモビリティ操縦者のパーソナルスペースに侵入しているかを判定する。パーソナルモビリティ操縦者のパーソナルスペースに歩行者が侵入していれば歩行者を回避する。これは、パーソナルモビリティ操縦者自身のパーソナルスペースに基づいた通常のパーソナルモビリティの行動といえる。

### 2.3 歩行者のパーソナルスペースを尊重したパーソナルモビリティ行動モデル

歩行者のパーソナルスペースを尊重したパーソナルモビリティの行動モデルを図5のフローチャートに示す。歩行者が視界に入った場合、歩行者のパーソナルモビリティに対するパーソナルスペースを計算する。パーソナルモビリティが歩行者のパーソナルスペースに侵入しているかを判定する。歩行者のパーソナルスペースにパーソナルモビリティが侵入していれば歩行者のパーソナルスペースから出るようにする。その後、パーソナルモビリティ操縦者のパーソナルスペースに歩行者が侵入しているかを判定し、侵入していれば歩行者を回避する。これは、まず歩行者のパーソナルスペースを尊重し、次にパーソナルモビリティ操縦者自身のパーソナルスペースに基づいて回避する行動といえる。

## 3. 結果

パーソナルモビリティが歩行者のパーソナルスペースを尊重する場合とそうでない場合の歩行者に対する効果の評価には、平均侵食率、最

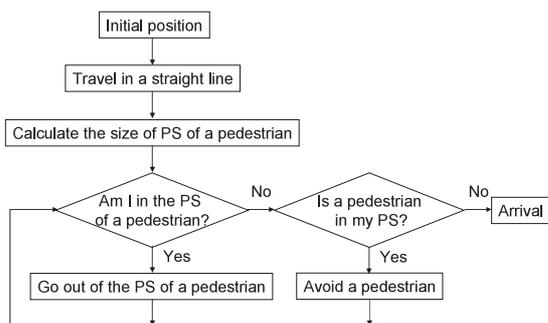


図5 パーソナルスペースを尊重した行動モデル

大侵食率、すれ違い時間の3指標を用いた [7]。

シミュレーションの結果、車体幅によって、歩行者のパーソナルスペースを尊重する行動の効果が出やすい条件とそうでない条件が分かった。歩行者のパーソナルスペースに比べてパーソナルモビリティのそれが大きい場合は、パーソナルモビリティの運転の支援をせずともパーソナルモビリティは歩行者のパーソナルスペースを侵害しない。一方、歩行者のパーソナルスペースに比べてパーソナルモビリティのそれが小さいときに運転支援の効果が発揮された (図6)。

走行する空間の道幅によって、歩行者のパーソナルスペースを尊重する行動の効果が変化することが分かった。道幅が2 [m] 程度のときは、パーソナルモビリティの運転支援を付加しても、歩行者を回避できる空間が限定されているため、その効果は小さい。一方、道幅が3 [m] 程度あれば、歩行者を回避する空間を十分取ることができ、運転支援の効果が確認できた (図7)。

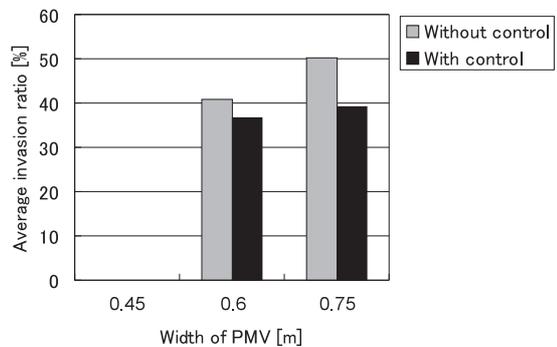


図6 パーソナルモビリティの車体幅に対する平均侵食率

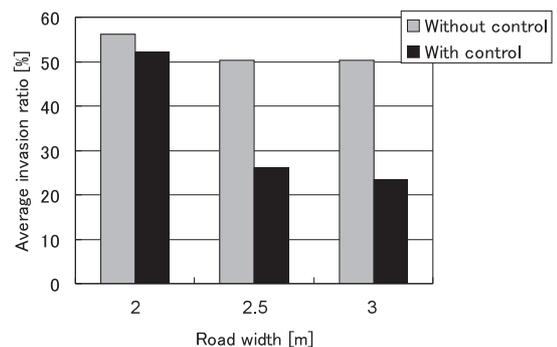


図7 道幅に対する平均侵食率

その他、歩行者の回避操縦支援に、速度制御も組み込んだ支援についてもシミュレーションを行った。速度制御を行う場合、減速度量により、「すれ違い時間」と「侵食率」の間にトレードオフの関係があることが分かった [4]。

#### [今後の研究の方向, 課題]

今後、提案したパーソナルスペースを利用した運転支援システムを実装した車両を用い、実験にて効果を検証することが課題である。

#### [参考文献]

- (1) Segway Inc. Website,  
<http://www/segway.com/>, July 13, 2012 accessed.
- (2) 中川智皓, 中野公彦, 須田義大, 川原崎由博, 小坂雄介, “歩行空間におけるパーソナルモビリティ・ビークルの安全性と安心感”, 自動車技術会論文集, Vol. 41, No. 4, (2010), pp. 941-946.
- (3) 中川智皓, 中野公彦, 古賀誉章, 須田義大, 川原崎由博, 小坂雄介, “パーソナルスペースを用いたパーソナルモビリティと歩行者の親和性評価実験”, 日本機械学会 (C 編), Vol. 76, No. 770, (2010), pp. 2493-2499.

#### [成果の発表, 論文等]

- [1] 中川智皓, 今村和樹, 新谷篤彦, 伊藤智博, パーソナルモビリティ・ビークルの大きさと歩行者の親和性に関する実験的研究, 日本機械学会論文集 C

編, 78, 794, 3332-3342 (2012).

- [2] 今村和樹, 中川智皓, 新谷篤彦, 伊藤智博, パーソナルモビリティ・ビークルのパーソナルスペースを利用した回避行動の基礎研究, 日本機械学会関西支部第 87 期定時総会講演会講演論文集, 124-1, 11/4 (2012).
- [3] 中川智皓, 今村和樹, 新谷篤彦, 伊藤智博, パーソナルスペースを利用した PMV の運転に関する基礎検討, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2012, USB 講演論文集, 12-12, 222, 9 pages (2012).
- [4] 今村和樹, 中川智皓, 新谷篤彦, 伊藤智博, パーソナルスペースを考慮した回避操縦支援を組み込んだ PMV が周囲環境に与える影響の基礎的検討, 日本機械学会第 21 回 交通・物流部門大会講演論文集, 12-79, 1413, 4 pages (2012).
- [5] 今村和樹, 中川智皓, 新谷篤彦, 伊藤智博, PMV のパーソナルスペースを利用した複数歩行者への回避行動の基礎検討, 日本機械学会関西支部第 88 期定時総会講演会講演論文集, 134-1, 7-15 (2013).
- [6] C. Nakagawa, K. Imamura, A. Shintani and T. Ito, Influence of the Size of a Personal Mobility Vehicle on the Affinity with a Pedestrian, Proc. of ASME 2012 5th Annual Dynamic Systems and Control Conference joint with the JSME 2012 11th Motion and Vibration Conference, CD-ROM Proceedings, DSCC2012-MOVIC2012-8578, 8 pages (2012).
- [7] C. Nakagawa, K. Imamura, A. Shintani and T. Ito, Simulations of the Relationship between Personal Mobility Vehicle and Pedestrians, Proc. of 2012 IEEE International Systems Conference (SYSCON), pp. 53-58, (2012).

# 液体フィルタを用いたすべり計測触覚センサに関する研究

Tactile sensor using standing cantilever covered with liquid filter for slippage detection

2011014



研究者代表

東京大学大学院  
情報理工学系研究科

特任助教

野田 堅太郎

## [研究の目的]

現在、我々の日常生活で食器の洗浄や掃除などの作業を手助けするため、生活空間で活動するロボットを実現する研究が多く進められている。このとき、様々な物体を破壊しないような最小限の力で扱うことが重要となり、物体に対するロボットの把持を計測・制御する触覚センサの実現が必要とされている。

こうした最小限の力での把持を実現するためには、ロボットと物体との接触面に加わるすべりを検知し、把持力を制御することが必要である。そこで本研究では、液体の流動性・粘性を活用することで、手先に加わるせん断力の時間変化のみを計測し、せん断力が変化した瞬間、すなわちすべり発生した瞬間を検知するための触覚センサの実現を目指す。

## [研究の内容, 成果]

提案する触覚センサの構造を図1に示す。この触覚センサは、変位によって抵抗値が変わるピエゾ抵抗素子を液体フィルタ中に配置し、その周囲をシリコンゴムで覆っている。センサに加わるせん断力が変化した場合、液体に流れが生じ、液体中に封止されたピエゾ抵抗素子に変形する。この変形によってピエゾ抵抗素子の抵抗値が変化する。一方、せん断力に変化がなく、液体の流れが停止すると、ピエゾ抵抗素子

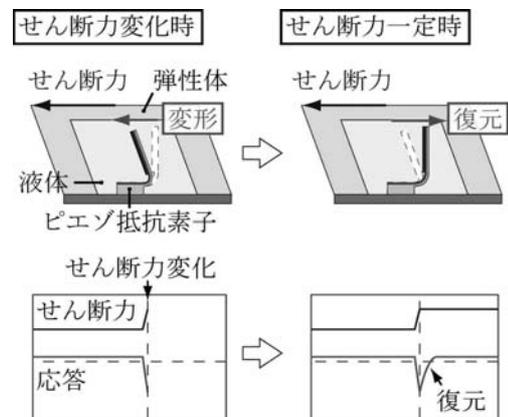


図1 液体フィルタを使用した触覚センサ

は初期形状に戻る。このため、提案するセンサは、ピエゾ抵抗素子の抵抗値変化を計測することでせん断力の変化を計測できる。本研究では、ロボットハンドによる物体把持に必要なすべり計測を実現するため、 $10 \times 14 \text{ mm}^2$ の大きさで0.3 Nまでのせん断応力を計測する液体フィルタ構造を有する触覚センサを実現する。このとき、下記の3点の要素に関して研究を行った。

### (1) 液体フィルタ中の流れの計測

提案するセンサ構造にせん断力を加えた際に、ピエゾ抵抗素子に加わる力の大きさを推定するため、液体フィルタ中の流れを計測した。このとき、流れを可視化するため直径  $4 \mu\text{m}$  のガラスビーズを液体中に分散し、せん断力を加えた際のビーズの動きを観測した(図2)。

基底部からビーズまでの位置と、ビーズの移

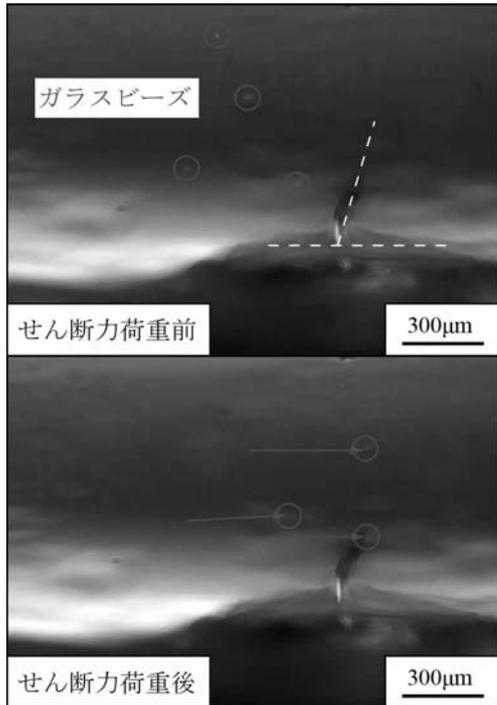


図2 ガラスビーズを用いたピエゾ抵抗素子周りの流れ観測の様子

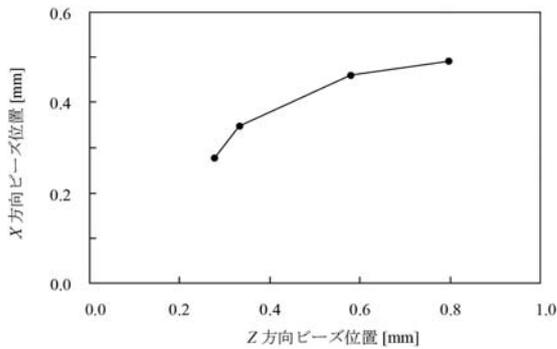
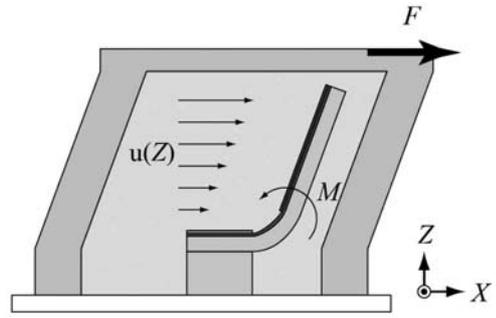


図3 基底からのビーズ高さと同移動量の比較

動量を比較した結果を図3に示す。ビーズはせん断力を加えた方向に移動し、その移動量が基底部からの高さとともに単調増加することから、フィルタ中の流れが層流であることを確認した。この結果から、提案するセンサ構造に微小なせん断力を加えた場合にフィルタ内に生じる流れは、平行平板構造中に流れる層流と仮定できる。この仮定を元に、せん断力がピエゾ抵抗素子に与える変形と、ピエゾ抵抗素子が初期形状に戻ろうとする復元力を算出し、せん断力と抵抗値変化の関係をもとにしたモデルは図4のようになる。このモデルに基づいて流れがピエゾ抵抗素



$$\text{変形による抵抗値変化率} : \frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{F}{l}$$

図4 層流に対するピエゾ抵抗素子の变形モデル

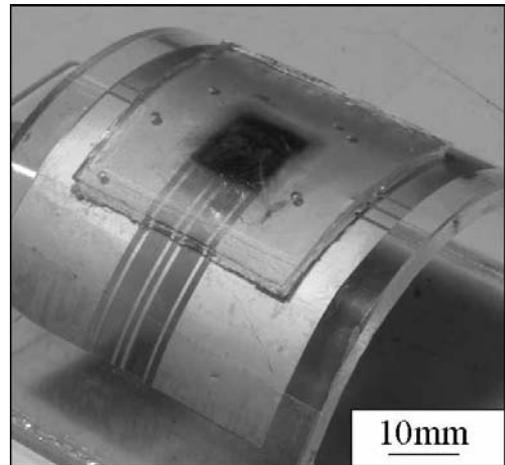


図5 試作した液体フィルタを有する触覚センサ

子に加える力を算出し、抵抗値変化とせん断力変化との間に線形の関係があることを確認した。

## (2) 試作センサの基礎特性計測・評価

前節での結果を元に、液体中にピエゾ抵抗素子を配置し、これを弾性体中に埋め込んだセンサ構造を試作した。液体を弾性体中に埋め込む場合、液体と弾性体とが直接接触すると、液体の形状が変形し、液体フィルタが歪な形状となる。そこで、弾性体への埋め込み時に、液体フィルタの変形を防ぐため、液体表面に薄膜の高分子膜をCVD法によって形成し、弾性体との接触で液体の形状が変化しないようにした状態で埋め込みを行った。

試作したセンサは、大きさ  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  の流路構造中に厚み  $300 \text{ nm}$ 、高さ  $300 \text{ um}$ 、幅  $200 \text{ um}$  のピエゾ抵抗素子を配置している (図5)。

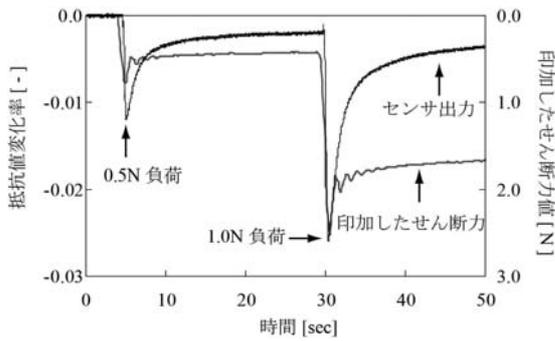


図6 せん断力に対するセンサ応答

このセンサの有効性を確認するため、0.5 N および 1 N の力を 2 段階に分けて加えた際のセンサ出力は図 6 に示すとおりである。この結果が示すとおり、試作したセンサはせん断力の時間変化に応答することを確認した。この特性は、提案するセンサは、初期荷重がかかっている状態であってもすべりなどによって生じるせん断力の変化を計測できることを示唆している。例えば、重量物の運搬中に生じたすべりを計測し、把持力を補正することで物体の安定な運搬が可能となる。

この特性を確認するため、センサに対して 0~0.6 N までの初期荷重を加えた状態から 0~3 N のせん断力を加えた時のセンサの抵抗値変化を計測した。この時の piezoelectric 抵抗素子の抵抗値変化を図 7(a) に、せん断力にセンサ感度をプロットした結果を図 7(b) に示す。図 7(b) の結果が示すように、各初期荷重に対するセンサ感度の差は 10% 未満であり、前述の

とおり初期荷重に影響を受けることなくせん断力の変化を検出できることを確認した。この結果から、提案するセンサは、ロボットハンドにおける重量物把持作業を実現する際に、その重量によらずにすべりを検知し、把持力制御が可能になると考えられる。

### (3) 液体粘性とセンサ出力の関係の検証

液体中に配置した piezoelectric 抵抗素子は、液体の粘性によって変形・復元速度が大きく変化する。この液体粘度とセンサ出力の関係性を確認するため、低粘度の液体材料 (37 mm<sup>2</sup>/s)、高粘度の液体材料 (3,900 mm<sup>2</sup>/s)、ゴム材料 (固体)、の三種類の材料に piezoelectric 抵抗素子をそれぞれ埋め込んだセンサを試作し、2.5~37.5 Hz の周波数でせん断力を繰り返し加えた際の応答特性の違いを計測した。センサの抵抗値変化の周波数特性をフーリエ変換によって算出し、印加したせん断力の周波数のパワースペクトルを比較した結果を図 8 に示す。

この結果が示すように弾性体中に piezoelectric 抵抗素子を配置した場合には、加重の周波数に関わりなくセンサ出力が一定となる。液体中に piezoelectric 抵抗素子を配置した場合、低粘度では高周波の、高粘度では低周波の振動に対して強く応答する。低粘度の液体の場合、液体の流れが piezoelectric 抵抗素子に与える力よりも素子の復元力の方が大きく、低周波のせん断力には応答しない。一方、高粘度の液体中では、piezoelectric 抵抗素子の

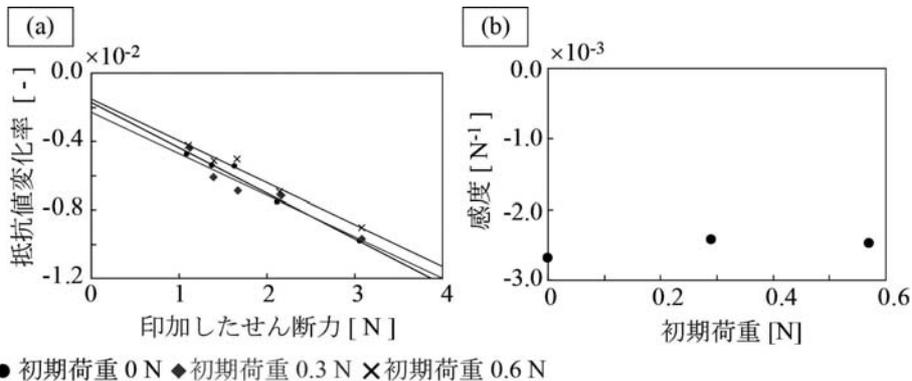


図7 初期荷重による提案センサの感度の違いの計測結果

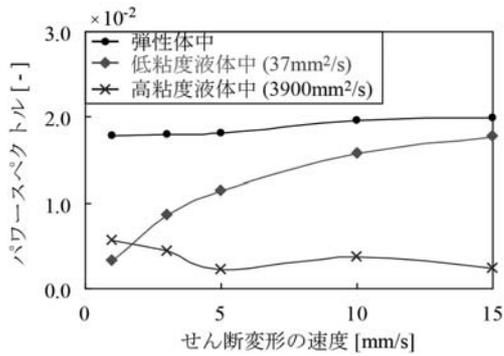


図8 液体フィルタの粘度を変えた場合のせん断変形速度に対する応答の違いの計測結果

復元力よりも液体が素子に与える力が大きくなるため、復元速度が遅くなる。このため、せん断力変化の周波数が高くなると、ピエゾ抵抗素子が初期形状に戻ることができず、ピエゾ抵抗素子の抵抗値は常に一定となる。このため、高粘度の液体を用いて試作した触覚センサでは、低周波の繰り返し加重に強く応答したと考えられる。

この結果は、液体中に任意の粘度の液体を封止することで、特定の周波数帯域で応答するメカニカルなバンドパスフィルタを形成できることを示唆している。これは人の触覚受容器と類似した特性であり、例えば物体をなぞった時に生じる振動の周波数から物体の表面状態を把握するといった触感計測にも応用できると考えられる。

#### [今後の研究の方向, 課題]

本研究では、ピエゾ抵抗素子を液体中に配置し、弾性体に埋め込むことすべりによって生じるせん断力の時間変化を計測する触覚センサを実現した。このセンサは、例えばロボットによる最小限の把持力での物体把持を実現するために必要な物体のすべりの検知に有効だと考えられる。提案するセンサは、初期荷重によらずせん断力変化に応答し、また使用する液体フィルタの粘度によって計測可能な力の変化周波数を変えることができることを確認した。

このように特定の周波数の加重のみを検出するセンサ特性は、人の触覚受容器と同様の性質を持つといえる。こうした点から、今後、提案する液体フィルタ構造を用いることで、物体の表面テクスチャを計測するセンサを実現し、人が物体表面の形状を検出するメカニズムの解明へとつなげたいと考えている。

#### [成果の発表, 論文等]

- Kentaro Noda, *et. al.*, "A shear stress sensor for tactile sensing with the piezoresistive cantilever in elastic material," *Sensors and Actuators A*, Vol. 127, No. 11, pp. 295-301, 2006.
- Kentaro Noda, *et. al.*, "Flexible tactile sensor sheet with liquid filter for shear force detection," *Proc. of MEMS '09*, 2009.

# 快適な車いす利用に向けた乗心地指標化のための パーソナルセンシング・動的測量技術

Personal Sensing Technologies for Road Surface Survey toward Comfortable Wheelchair Driving

2011019



研究者代表

上智大学 理工学部  
情報理工学科

准教授

矢入 郁子

## [研究の目的]

提案者はこれまで、別々に開発・整備される車いすと道路の双方を、車いすやユーザにとりつけた簡易なセンサと位置情報を用いて同時に評価し、車いすユーザが本当に使いやすい車いす・通しやすい道路実現のための指標化を目指し研究を行ってきた。本研究では乗心地指標化に向けて、車いすユーザの走行時の主観を定量化するためのパーソナルセンシング技術と、準天頂衛星みちびきの高精度位置情報と車いすが実際に街を走行した際に受ける衝撃や振動の解析にもとづいた、図1に示すような車いすユーザの視点からの道路の動的測量技術を実現することを目的とする。これらの技術の実現により、人と車いすの調和だけでなく、人と車いす・道路の3つの緊密な調和が促進されることを目指す。

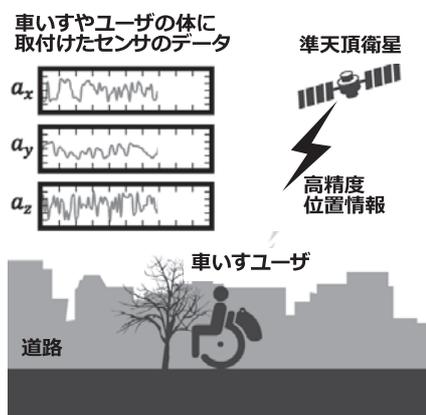


図1 車いすユーザの視点からの道路の動的測量技術のイメージ図

## [研究の内容, 成果]

本研究では、2年間の助成期間中に以下の3つの技術的課題の解決に取り組んだ。

【パーソナルセンシング技術】ジャイロスコープ、3軸加速度センサと通信機能が一体となったスマートデバイスを用いて、車いす走行時にユーザが体に受ける振動や衝撃を計測・記録するパーソナルセンシング技術を実現した。

【動的道路測量技術】準天頂衛星民間実験に参加し、サブメータ精度での高精度位置データを取得して、スマートデバイスによってセンシングされる車いすが受ける振動や衝撃と車いすの走行軌跡との関係を記録・集積する動的測量技術を実現した。

【ユーザの主観的乗心地の多様性の分析】多様なユーザの実際のデータの分析を通して、主観的乗心地を絶対的に評価可能な基準の策定を目指した。

本研究では助成開始直前に東日本大震災が起こり、車いすユーザを大規模に招集しての実験が困難となった。そのため助成期間を2年に延長していただき、1年目は2010年3月に秋葉原で収集した車いす走行データの分析と可視化を、2年目は上智大学周辺の路上での13名の車いす走行データの収集と分析を行った。以下に走行データの分析について、(1)秋葉原データを用いての研究、(2)走行実験の実施とその

データ分析の研究の二つに分けて研究成果を示す。

(1) 3軸加速度時系列データからの車いす走行行動分析の研究

典型的な車いす事故として、1) 車道と歩道の間の縁石による転倒、2) 坂道走行中に制御不能となることによる交通事故発生、3) 段差や表面の粗い路面を避けるために車道を走行することによる交通事故発生、といった事例が報告されている。これらの事故の原因には、段差やスロープといった路面上の障害の存在がある。またこのような重大な事故の背後には、“事故に至らなかったために報告されることのない軽微な出来事”が、路面上の障害によって日々多数引き起こされている。

そこで提案者らは、走行時に問題が発生しやすい場所を、車いす走行時の3軸加速度センサ時系列データをもとに経路に存在する潜在的なリスクとして可視化するために、2010年3月に図2のような方法で収集された秋葉原電気街での7人の車いす走行ログを、振動レベル (VAL) という指標によって色分けし、地図上に可視化して評価した。しかし VAL は、走行時に車いす利用者が体感する振動の大きさを表すものであり、速度を緩めたり突然停止したりといった車いす利用者の行動に大きく影響されるため、十分に路面の障害を可視化することは出来なかった。そこで本研究では路面状況を可視化するために機械学習の手法を用いた路面状況推定が可能であるかどうかを調べた。推定のための車いす走行行動の分類を図3に示す。1段階目の分類では、車いす走行行動を移動行動と静止行動に分類し、2段階目の分類では、移動行動をバリアのある路面の走行とバリアの無い路面の走行で分類した。収集された車いす走行ログデータには図4に示すようなサンプリングレートのばらつきがあり、分類精度の低さが懸念された。SVMを用いて加速度データの分類と最適ウィンドウ幅の探索を行った結果、1

段階目の分類では生データを30フレーム単位で分割した際に98.2%の分類精度を、第二段階目のバリアの有無の分類では、図5に示すように統計量を特徴量として用い、フレーム数を60フレームとした場合に82.1%の分類精度となることがわかった。そして図6(a)のように分類結果を地図にプロットし(b)のVALに

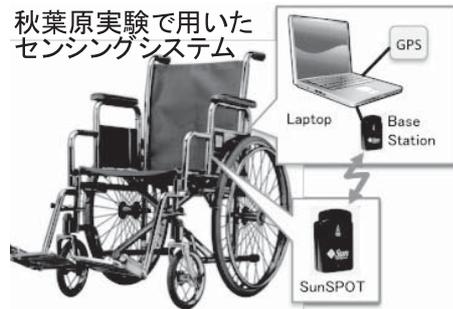


図2 車いす走行実験時の様子

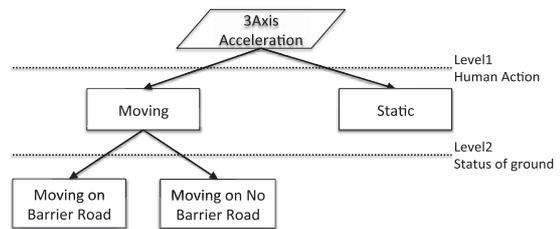


図3 2段階の行動分類

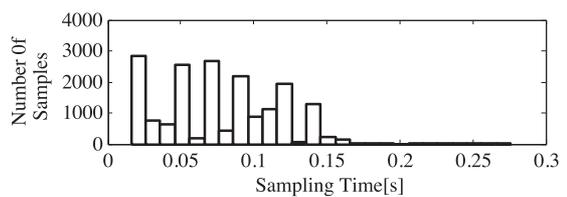
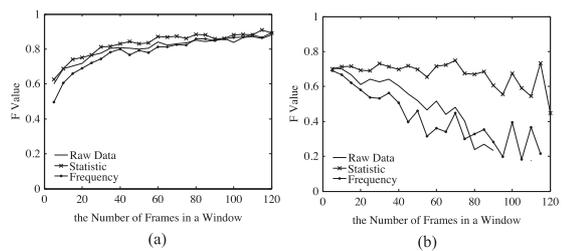
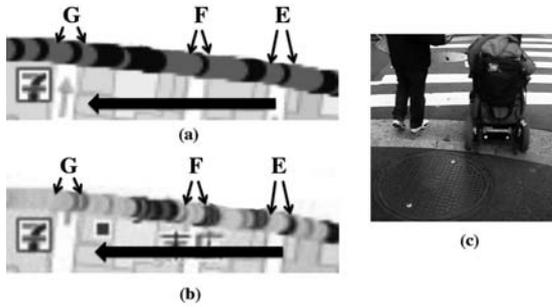


図4 使用データのサンプリングレートのばらつき



(a) バリア有クラス (b) バリア無クラス

図5 フレーム数を変化させた際の各分類手法におけるF値の変化



(a) 推定結果の可視化 (b) VALの可視化 (c) 地点Fの様子  
図6 2つの可視化手法の比較

よる可視化と比較したところ、(c)の交差点の歩車道区分の危険な段差を車いす走行ログから推定可能であることがわかった。

## (2) 車いす走行実験とデータ分析の研究

本研究では2012年12月に、車いすの両車輪と座席下、及び被験者のポケットに iPod touch を設置し JR 四谷駅近辺の指定経路を走行する実験を、被験者13名に対して行った。経路は走行に20~30分を要する約1.5kmの周回コースを設定し、被験者の体力に合わせて1~3週の走行を行った。秋葉原実験では比較的表面が滑らかな経路を選択して実験を行ったが、本実験では路面が整備されていない様な粗い路面を含む経路を選択した。実験で使用する車いすは統一せず、被験者が日常で使用し、走行し慣れている車いすで実験を行った。図7に実験の様子を示す。撮影者は車いすの後方を追跡し、ビデオによって実験時の走行の様子を記録している。車いすの両車輪と座席下及び被験者のポケットに iPod touch が設置されている。各三軸加速度センサのサンプリング周波数は50Hzにセットした。3周走行した4人の被験者のセンサデータ全サンプルに、実験時に撮影した動画データを観察して1) 静止、2) 段差上り、3) 段差下り、4) 点字ブロック上の走行、5) その他の5つの行動データにラベリングを行い、SVMによる分類を行った。具体的には、1) 20種類のウィンドウ幅、4つの特徴量、4つのデータセットについて移動/静止行動、段差・

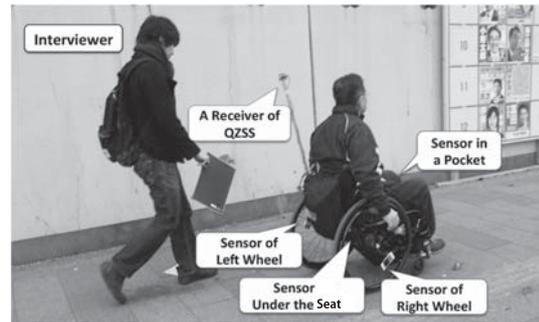


図7 新たに実施された車いす走行実験時の様子

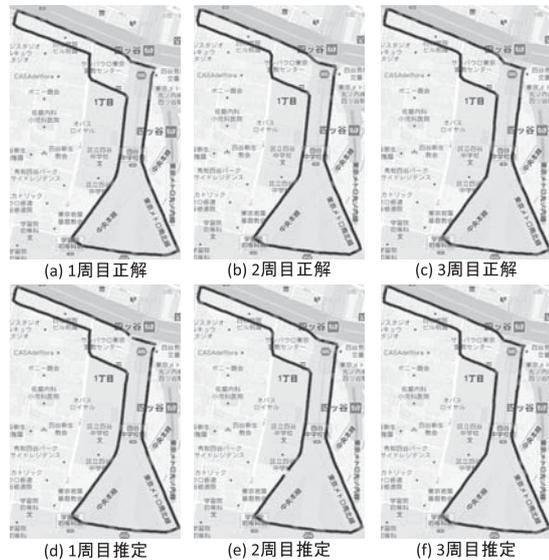


図8 車いすユーザの視点からの道路の動的測量技術のイメージ図

点字ブロックの有無を分類しF値により評価、2) 推定結果を地図上にマッピング、実際の走行状況との比較により評価を行った。結果、特徴量としては標準偏差が適切であり、最適ウィンドウ幅（それぞれ4.5秒と9.0秒）において、移動/静止を99.8%、段差・点字ブロックの有無を89.6%の精度で達成した。また、点字ブロックに関しては24/39、縁石に関しては35/36を正しく推定できていた。図8に各周での実際の路面環境と推定結果を可視化の比較例を示す。上段が実際の走行環境、下段が推定結果。青が通常移動、赤が段差の乗り越え、黄色が停止行動を示す。なお、マッピングの際の位置情報としては準天頂衛星で取得したデータを手動で補正した位置情報を利用した。

## [今後の研究の方向, 課題]

本研究は車いすユーザのパーソナルセンシングと道路の動的測量を同時に行う技術の実現を通して、位置情報と結びついた主観的乗心地データを集積・分析することで、「低ストレスな車いすと低バリアな道路づくりの双方に貢献しうるこれまでにない新しい指標の提案」を目指した。日常行動をスマートデバイスで記録し、知的アルゴリズムによって路面の危険性を推定、可視化することで障害者移動環境を抜本的に改善するシステムの提案は、独創的なものとして国際会議等で高く評価された。本研究では、研究の核となる基礎データの車いす走行実験による収集とともに、危険性可視化の第一歩として、車いすユーザの移動ライフログの特性を、代表的な機械学習の手法の1つであるSVMによる解析を通して明らかにした。今後は最適な知的アルゴリズムの開発が最重要課題である。また、車いすユーザが経路上でどのような行動をとったかは走行環境を評価する最もプラクティカルな情報であり、今後は大量の移動ログを集積しての分析が課題となる。本研究の今後の展開として現在提案者らが検討しているのは、車いすユーザのライフログデータの集積・解析プラットフォームの研究である。本研究で得られた成果をもとに、高齢者・障害者のスマートデバイス等を用いた日常行動センシングデータのボランティアな大規模集積と、集積されたデータから機器・サービス開発者にとって有益な情報の抽出を可能とする次世代福祉・介護アプリケーション技術創出のためのビッグデータプラット

フォームの実現を目指していきたい。

## [成果の発表, 論文等]

1. 岩澤有祐, 矢入郁子, 3軸加速度時系列データからの車いす走行行動分析の研究, 2012年度人工知能学会全国大会 26回大会, June, 12-15, 2012.
2. 浅井信尊, 高橋雄介, 福島裕介, 矢入郁子, 三軸加速度センサを用いた車いすバスケットボール選手の動作分析, Human Interface Symposium, Sept. 4-7, 2012.
3. Yusuke Iwasawa and Ikuko Eguchi Yairi, "Life-Logging of Wheelchair Driving on Web Maps for Visualizing Potential Accidents and Incidents", PRICAI 2012, LNAI 7458, pp.157-169, 2012. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012.
4. Yusuke Iwasawa, Hidetaka Suzuki and Ikuko Eguchi Yairi, "Detecting Exceptional Actions Using Wearable Sensors' Data for Developing Life-Log Database of Visually Impaired People", In Proc. Data Driven Wellness Symposia, AAAI Spring Symposium Series 2013, March 25-28, Stanford University, California 2013.
5. 岩澤有祐, 矢入郁子. 車いす走行ライフログの時空間解析による路面状況推定システム, The 27th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, June, 4-7, 2013.
6. [発表予定] Y. Iwasawa, and I. E. Yairi. Spatiotemporal Life-Log Mining of Wheelchair Users' Driving for Visualizing Accessibility of Roads. In Proceedings of IEEE International Conference on Data Mining, MoDAT: Designing the Market of Data - for Synthesizing Data in Sciences and Businesses, Dallas, Texas, December 7-10, 2013.
7. [発表予定] 高田佑平, 岩澤有祐, 矢入郁子, 3軸加速度センサを用いた機械学習による車いす走行危険箇所可視化システム, Human Interface Symposium, September, 10-13, 2013.

# カソードルミネッセンス顕微鏡による細胞中の 高空間分解能蛋白質イメージング

## High Spatial-resolution Protein Imaging with Using Cathodoluminescence Microscopy

2011002



研究代表者 大阪大学 基礎工学研究科 准教授 橋本 守  
共同研究者 大阪大学 基礎工学研究科 助教 新岡 宏彦

### [研究の目的]

生命機能を明らかにするためには細胞内部における蛋白質種の同定と、その空間分布を明らかにする必要がある。電子顕微鏡を用いた場合、数 nm の空間分解能でイメージングが可能であり、蛋白質種の同定手法として免疫金染色法が知られているが、この手法では蛍光顕微鏡のようにカラーで複数の蛋白質種を見分ける事は不可能であった。

本研究では、カソードルミネッセンス (CL) を用いることにより、電子顕微鏡レベルの高空間分解能と、複数蛋白質種の識別能力を併せ持つ顕微鏡手法の確立を目的としている。CL とは物質に電子線を照射した際に誘起される光であり、異なる CL スペクトルを持つナノ蛍光体粒子をそれぞれ目的の蛋白質に修飾後 CL イメージングすることにより、蛋白質種を見分ける事が可能であると考えられる。上記目的達成のために、電子線励起によりそれぞれ異なるスペクトルで発光するナノ蛍光体の作製、細胞内に導入した発光波長の異なるナノ蛍光体の CL イメージングを行った。

### [研究の内容, 成果]

#### 1. SEM-CL 顕微鏡装置

本研究では、FE-SEM (JEOL, JSM-6500F)

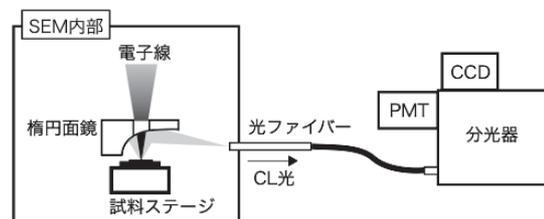


図1 SEM-CL 顕微鏡装置  
楕円面鏡には電子線を通す穴がついている

に図1に示すようなCL測定系(楕円面鏡, 光ファイバー, 分光器, CCD, 光電子増倍管(PMT))を連結した装置を用いた。SEM内部において試料上を電子線スキャンし、発生したCL光は試料上の楕円面鏡にて集光後、光ファイバーを通して分光器に導入した。CLスペクトルはCCDによって取得し、イメージングはPMTにて行った。

#### 2. ナノ蛍光体のCLスペクトル

ゾルゲル法を用いて、電子線励起によって発光するナノ蛍光体の作製を行なった。3種のナノ蛍光体粒子  $Y_2O_3:Tm$ ,  $Y_2O_3:Tb$ ,  $Y_2O_3:Eu$  のCLスペクトルを示す。それぞれの蛍光体は希土類の発光に由来したシャープなスペクトルを示しており、分光計測によって容易にそれぞれの粒子を識別可能である。

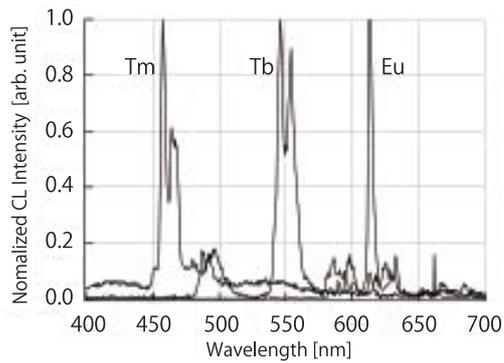


図2 ナノ蛍光体 ( $Y_2O_3:Tb$ ,  $Y_2O_3:Tm$ ,  $Y_2O_3:Eu$ ) それぞれのCLスペクトル

### 3. 細胞中ナノ蛍光体のマルチカラーCLイメージング

細胞中ナノ蛍光体のCLカラーイメージングを行なった。計測試料は、3種類のナノ蛍光体を取り込ませた Macrophage-like cell (J744A.1) を用いた。3種のナノ蛍光体  $Y_2O_3:Tm$ ,  $Y_2O_3:Tb$ ,  $Y_2O_3:Eu$  をそれぞれ、蒸留水と混合し、超音波処理を施す事で蛍光体の分散液を作製した。分散液を培養中の細胞に滴下し、細胞の食作用を利用する事でナノ蛍光体を細胞内に導入した。その後、細胞固定、脱水とエポキシ樹脂への包埋を行い、マイクロームを用いて500 nmの切片とし、ガラス基板上に乗せた。さらに、水酸化カリウムエタノール溶液でエポキシ樹脂を溶解させた後、金蒸着を行い、観察試料とした。

図4に細胞のSEM像と、計測波長462 nm, 550 nm, 614 nmにおけるCL像をそれぞれ示す。図3より、SEM像からは細胞中に導入された3種類のナノ蛍光体を見分ける事はできないが、CL像では発光波長の違いによりそれぞれのナノ蛍光体の空間分布をイメージング出来ていると言える。

### 4. レーザーアブレーションによるナノ蛍光体の微細化

CL顕微鏡は10 nm以上の空間分解能を有しているが、蛋白質等生体分子観察においてその空間分解能はナノ蛍光体のサイズによって制限

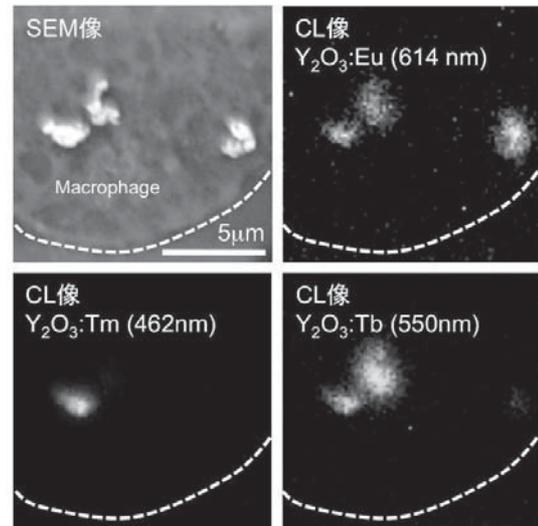


図3 マクロファージ細胞内ナノ蛍光体のSEM像及びCL像  
カッコ内は計測波長を表わす

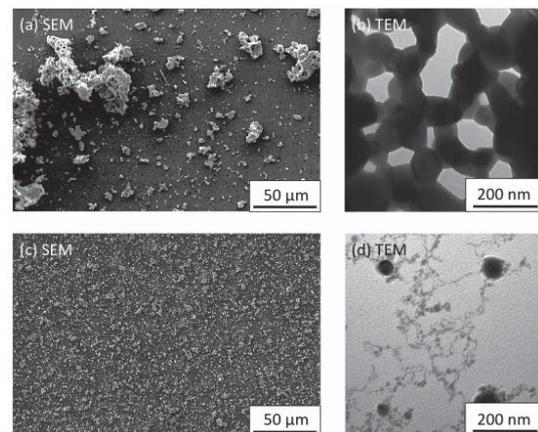


図4 ナノ蛍光体のSEM像及びTEM像  
(a) (b) はレーザーアブレーション処理前  
(c) (d) はレーザーアブレーション処理後

される。ソルゲル法で作製したナノ蛍光体は凝集や焼成の際のネッキングによりそのサイズが大きく、空間分解能を悪くする要因となる。そのため、液相レーザーアブレーション法を用いて、凝集ナノ蛍光体の分散化および微小ナノ蛍光体の作製を行った。液相レーザーアブレーション法は高強度のパルスレーザーを集光した際に生じるプラズマや衝撃波を用い、液中ナノ粒子の微細化/分散化を行なう手法である。図4はレーザーアブレーション法を施す前後のナノ蛍光体 ( $Y_2O_3:Eu$ ) のSEMおよびTEM像である。これらの像より、ナノ蛍光体が微細化

/分散化されている事が見てとれる。

## 5. ナノ蛍光体の高輝度化

微細化に伴い、ナノ蛍光体のCL発光強度は減衰する。従って、微細化により空間分解能を改善しても、S/Nが下がることによって計測時間が長くなることや、そもそもイメージングができなくなる恐れがある。そのため、ナノ蛍光体の高輝度化を行なった。

$Y_2O_3$ は酸化物であり導電性が低く、電子線照射によりチャージアップし易い。照射電子線はチャージアップした電子によって反発力を受けて減速し、ナノ蛍光体の奥まで侵入できない。結果として、励起体積が減少し、発光強度の減少に繋がる。我々はZnを添加することによりナノ蛍光体の導電性を上昇させ、チャージアップの影響を軽減することによりCL発光強度の増加を行なった。

図5にCL発光強度、照射電子線の電流量とZnの添加量の関係を示す（Znの濃度はモル%で表わしている。30%のとき ( $Y_{0.95-x}Eu_{0.05}$

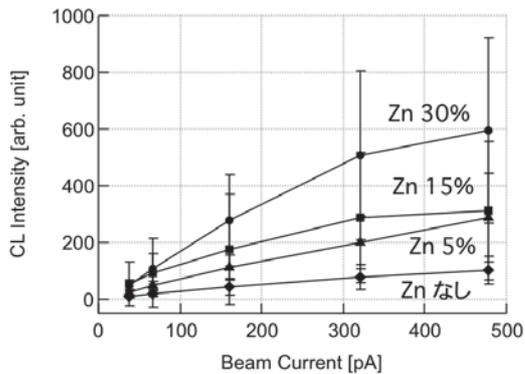


図5 Zn添加濃度を変化させた際の、電流値と発光強度の関係 Euの濃度は全て5%。縦軸はCL発光強度。横軸はビーム電流。

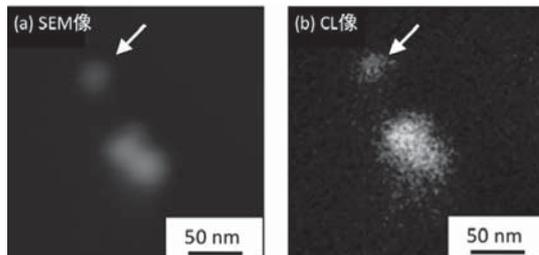


図6 ナノ蛍光体 ( $Y_2O_3:Eu/Zn$ ) のSEM像(左)及びCL像(右) 矢印は直径約20 nmのナノ蛍光体を示す

$Zn_x)_2O_3$ ,  $X=0.30$ である。)。粒径200 nm程度のナノ蛍光体を選択し計測を行なった。Zn濃度を上昇させることによりCL光強度が上昇していることが分かる。またZnの濃度が30%のとき、添加しない場合に比べて10倍程度のCL光増強が確認された。

さらに、Znの濃度が15% ( $X=0.15$ ) のナノ蛍光体のCLイメージングを行なったところ、粒径約20 nmの微小ナノ蛍光体のイメージングに成功した(図6)。この結果により、CL顕微鏡を用いた高空間分解能イメージングへ向けてその端緒を得ることができた。

## 6. 細胞中ナノ蛍光体の蛍光イメージング

本研究で用いた希土類添加  $Y_2O_3$  蛍光体は光励起によって蛍光を発する。CL顕微鏡観察のための試料作成には時間を要するが、その前に蛍光顕微鏡で試料の状態を確認することが可能である。また、近年、蛍光顕微鏡像と電子顕微鏡像両方から生体試料の情報を得る光・電子相関顕微鏡法(CLEM: Correlative Light and Electron Microscopy)について報告がなされているが、本ナノ蛍光体粒子はCLEMへの応用が可能と考える。

図7はレーザーアブレーション後の  $Y_2O_3:Eu$  ナノ蛍光体を取り込んだHeLa細胞の蛍光像及び透過像である。ナノ蛍光体は培養液に入れ、エンドサイトーシスによってHeLa細胞に

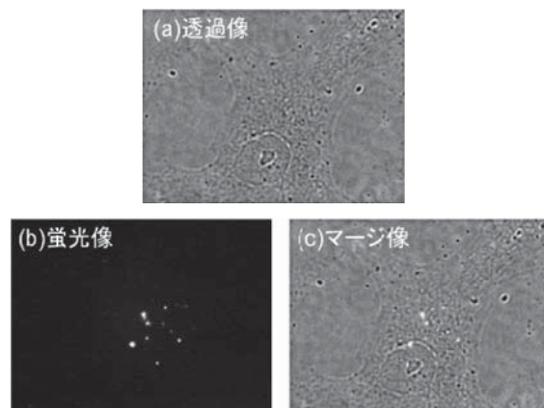


図7  $Y_2O_3:Eu$  ナノ蛍光体を導入したHeLa細胞の (a) 透過像 (b) 蛍光像 (c) マージ像

取り込ませた。励起光には水銀ランプの輝線（波長 254 nm）を用い、画像取得には EM-CCD（Andor, LUCA）を用いた。また、 $Y_2O_3:Eu$  ナノ蛍光体の蛍光波長は 614 nm 辺にあり、CL 光と同様である。結果、エンドサイトーシス小胞に存在するナノ蛍光体が輝点として蛍光観測された。

### [今後の研究の方向, 課題]

今後は、より高い空間分解能の実現を目指し、より小さく形状の揃ったナノ蛍光体作製を行なう。また、蛋白質をナノ蛍光体修飾で染色するために、ナノ蛍光体粒子の表面を有機分子でコーティングして単分散状態のナノ蛍光体粒子を作製した後、免疫抗体分子を取り付ける。

本研究では SEM-CL 顕微鏡を用いたが、将来的には TEM-CL や大気圧 SEM を用いたイメージングへの応用を考えている。TEM-CL では、細胞内小器官の情報を同時に得ることができ、大気圧 SEM を用いると液中細胞の CL イメージングが可能となり、より生きた状態に近い試料の観察ができる。

### [成果の発表, 論文等]

#### 原著論文 (1 報)

- 1) H. Niioka, T. Furukawa, M. Ichimiya, M. Ashida, T. Araki, and M. Hashimoto, "Multicolor cathodoluminescence microscopy for biological imaging with nanophosphors", APEX, **4**, 11, 112402-112404 (2011).

#### 国際学会発表 (3 件)

- 1) T. Furukawa, H. Niioka, M. Ichimiya, S. Ichikawa, T. Nagata, J. Miyake, M. Ashida, T. Araki and M. Hashimoto, "Synthesis of Rare-earth Doped Nano Phosphors for Biological Cathodoluminescence Imaging", Focus on Microscopy 2013 (Maastricht, The Netherlands, March, 2013). (ポスター)
- 2) H. Niioka, T. Furukawa, M. Ichimiya, M. Ashida, T. Araki, M. Hashimoto, "Multicolor cathodoluminescence imaging for biological cells with using nanophosphors", Focus on Microscopy 2012

(Singapore, April, 2012).

- 3) T. Furukawa, H. Niioka, M. Ichimiya, T. Nagata, M. Ashida, T. Araki and M. Hashimoto, "Well-dispersed nanophosphors for cathodoluminescence microscopy produced by using laser ablation method", Focus on Microscopy 2012 (Singapore, April, 2012). (ポスター)

#### 国内学会発表

(招待講演 3 件, その他口頭発表 9 件, ポスター発表 4 件)

- 1) 古川太一, 新岡宏彦, 一宮正義, 市川 聡, 永田智啓, 三宅 淳, 芦田昌明, 荒木 勉, 橋本 守, "カソードルミネッセンス生体イメージングのための微小希土類添加ナノ蛍光体作製", 第 60 回応用物理学会学術講演会 (2013/3/27-30, 神奈川工科大学).
- 2) H. Niioka, T. Furukawa, M. Ichimiya, T. Nagata, M. Ashida, T. Araki, and M. Hashimoto, "Rare-earth Doped  $Y_2O_3$  Nanophosphors Synthesized for Bio-imaging with Using CL and Fluorescence Microscopy", 第 8 回阪大ナノサイエンス・ナノテクノロジー国際シンポジウム (2012/12/10-11, 大阪大学) (ポスター).
- 3) 新岡宏彦, 古川太一, 一宮正義, 永田智啓, 芦田昌明, 荒木 勉, 橋本 守, "希土類添加  $Y_2O_3$  ナノ蛍光体を用いたマルチモーダル蛍光・CL 細胞イメージング (Multimodal fluorescence and CL imaging for biological cells with using rare-earth doped  $Y_2O_3$  nanophosphors)", 平成 24 年度 日本分光学会年次講演会 (2012/11/27-29, 東京工業大学百年記念館).
- 4) 新岡宏彦, 古川太一, 一宮正義, 永田智啓, 芦田昌明, 荒木 勉, 橋本 守, "希土類添加ナノ蛍光体粒子を用いた蛍光・CL 細胞イメージング", 生理研研究会 (2012/10/24-25, 生理学研究所) (招待講演)
- 5) 新岡宏彦, 古川太一, 一宮正義, 永田智啓, 芦田昌明, 荒木 勉, 橋本 守, "光学顕微鏡とカソードルミネッセンス顕微鏡を用いたマルチモーダル細胞イメージング", 50 回日本生物物理学会年会 (2012/9/22-24, 名古屋大学).
- 6) 新岡宏彦, 古川太一, 一宮正義, 永田智啓, 芦田昌明, 荒木 勉, 橋本 守, "高輝度ナノ蛍光体粒子を用いたカソードルミネッセンス細胞イメージング", ナノ学会第 10 回大会 (2012/6/14-16, 大阪大学) (ポスター).
- 7) 新岡宏彦, 古川太一, 一宮正義, 芦田昌明, 荒木 勉, 橋本 守, "ナノ蛍光体粒子とカソードルミネッセンス顕微鏡を用いたマルチカラー生体イメージング", 日本顕微鏡学会 (つくば国際会議場, 2012/5/14-16) (指定講演)
- 8) 古川太一, 新岡宏彦, 一宮正義, 永田智啓, 芦田

- 昌明, 荒木 勉, 橋本 守, “希土類ナノ蛍光体を用いた生体カソードルミネッセンスイメージングの高輝度化”, 第 59 回応用物理学関係連合講演会 (2012/3/15-18, 早稲田大学).
- 9) 新岡宏彦, 古川太一, 一宮正義, 芦田昌明, 荒木 勉, 橋本 守, “ナノ蛍光体を用いた多色カソードルミネッセンス細胞イメージング”, 顕微鏡学会分科会バイオメディカルニューマイクروسコープ (2012/3/5, 帝京大学医学部) (招待講演)
- 10) H. Niioka, T. Furukawa, M. Ichimiya, M. Ashida, T. Araki, M. Hashimoto, “ナノ蛍光体粒子を用いたカソードルミネッセンス生体イメージング”, 第 3 回デザインバイオニクス講演会 (2012/2/21-22, 大阪大学)
- 11) H. Niioka, T. Furukawa, M. Ichimiya, M. Ashida, T. Araki, M. Hashimoto, “Super-resolution imaging of nano phosphors via cathodoluminescence microscopy for biological imaging” 平成 23 年度日本分光学会年次講演会 (2011/11/30-12/2, 東京工業大学)
- 12) 古川太一, 新岡宏彦, 一宮正義, 芦田昌明, 荒木 勉, 橋本 守 “ナノ蛍光体粒子を用いたマルチカラー 生体カソードルミネッセンスイメージング”, Optics & Photonics Japan 2011, (2011/11/28-30, 大阪大学)
- 13) 新岡宏彦, 古川太一, 一宮正義, 芦田昌明, 荒木 勉, 橋本 守 “分散化ナノ蛍光体粒子を用いたカソードルミネッセンス生体イメージング”, Optics & Photonics Japan 2011, (2011/11/28-30 大阪大学) (ポスター)
- 14) H. Niioka, T. Furukawa, M. Ichimiya, M. Ashida, T. Araki, M. Hashimoto “Multi-color Cathodoluminescence Imaging for Biological Cells With Using Nanophosphors”, 第 7 回阪大ナノサイエンス・ナノテクノロジー国際シンポジウム (2011/11/10, 大阪大学) (ポスター)
- 15) 古川太一, 新岡宏彦, 一宮正義, 芦田昌明, 荒木 勉, 橋本 守, “カソードルミネッセンスを用いた細胞の超解像イメージング” 第 72 回応用物理学学会学術講演会予稿集, 2a-B-8 (2011/8/29-9/2 山形大学)
- 16) T. Furukawa, H. Niioka, M. Ichimiya, M. Ashida, T. Araki, M. Hashimoto “カソードルミネッセンスを利用した生体細胞の超解像イメージング手法”, 第 37 回レーザー顕微鏡研究会 (2011/7/6, 理研)

## 音響誘起電磁 (ASEM) 法の医療応用へ向けた開発

### Medical applications of the acoustically stimulated electromagnetic method

2021001



研究代表者 東京農工大学 准教授 生嶋 健 司

#### [研究の目的]

超音波は人体の内部伝搬特性が優れているので、非侵襲な医療診断法として広く利用されている。しかしながら、その多くの利用は対象物の質量密度分布や弾性率などの力学特性に限られている——すなわち、電氣的、或いは磁氣的な特性をプローブしない。我々は最近、超音波の特徴を活かしながら、通常のエコー法では得られない電気・磁気特性をプローブする新たな方法（音響誘起電磁 (ASEM) 法）を提案し、装置開発および基礎的データの収集を推進してきた。本研究はこの ASEM 法を医療応用に向けて開発することを目的とする。本研究により、骨部や腱部の圧電イメージングや神経・筋肉活動に伴う電気信号の非侵襲検知など、これまでにない新しい医療診断システムが期待される。

#### [研究背景]

弾性波である音波は、電磁波のように直接的に電気・磁気特性と結合しない。しかしながら、弾性変調は、固体の格子歪みや液体の密度変化を通してしばしば対象物の電荷や磁気モーメントに時間変調を与えることができる。このことは、超音波照射により、双極子放射等を通して超音波と同一周波数の電磁波（通常 RF 波—マイクロ波）が発生し得ることを意味する。ここでは、超音波によって励起される電磁波を音響

誘起電磁波 (Acoustically Stimulated Electro Magnetic (ASEM) wave) と呼ぶことにする。固体物質ならピエゾ効果や磁歪効果を通して ASEM 波が放射されるだろう。液晶や燃料電池などに含まれるコロイド溶液・イオン電解水の場合なら、製品動作時に生じる局所的な電荷中性条件の破れ（すなわち、電束密度勾配の発生）が ASEM 放射の発生原因になり得るだろう。また、より興味深い応用として、脳を代表とする神経組織および筋組織の活動状態の非侵襲検知が考えられる。神経組織は細胞内外のイオン濃度制御により活動電位を伝播させ、情報伝達・処理を行っている。音波収束ビームは、その局所的なイオン濃度（あるいはそれに伴う媒体の電束密度勾配）に時間・空間変調を与え、電磁放射を誘発するはずである。つまり、ASEM 計測は、対象物の電荷や磁化に超音波を通して変調を加え、電磁放射の形でこれらの情報を外部発信させる手法と見なすことができる。前述したように、音波は電磁波よりも同一周波数で空間分解能を 5 桁高くすることができる。よって、音波収束ビームの走査により比較的高分解能の画像化が可能である（10 MHz の電波の波長は 30 m に対して水中音波の波長は 150  $\mu\text{m}$  である）。以上が、本研究において我々が提案した計測原理である音波計測の長い歴史の中で、音波により誘起される電磁放射に関する学術論文や特許は少ない。関連するものとして、音響デバイスのワイヤレス動作に関するも

の、地球物理学における岩石破壊によって生じる電磁波などが挙げられるが、測定対象物からの微弱な信号を検出してイメージング計測へ応用するといった報告は我々の調べた限り皆無である。また、本計測を反転した方法、すなわち電磁波（RF 波～近赤外光）照射により発生した超音波を検知する方法は、Photoacoustic imaging と呼ばれ医療診断への応用が期待されている。しかしながら、この方法は、電磁波吸収を通して人体の水濃度分布や血液中の酸素濃度分布を画像化しようとするものであり、体内部位の電気・磁気的特性を獲得するものではない。

よって、ASEM 法は全くの新技术構想であり、各要素技術を発展させることによって、医療診断や材料評価など、広範囲な応用が期待される。

[研究内容・成果]

本研究は次の二つの方向で展開された。(1) ASEM 応答に対するさらなる高感度検出技術を開発すること、(2) ASEM 応答の実施例を蓄積すること、である。

まず、(1) について報告する。本測定方法で重要な点は、超音波振動子からの電磁ノイズと測定対象物からの目的信号を区別することである。これまで、超音波パルス法（時間領域測定法）によって音波遅延時間を利用して、電磁ノイズと目的信号を時間的に分離する手法が用いられてきた（図 1）。図 2 にパルス信号の概念図を示す。超音波励起パルスと超音波エコー信号に起因する大きなパルス信号は振動子からの電磁ノイズであり、エコー信号の半分の遅延時間で ASEM 信号が得られる。図 3 に示すように、これまで様々な圧電・磁性物質において ASEM 信号が検出されてきた。しかしながら、パルス法では有効的に利用する積分時間が短く、測定時間がかかる問題があった。本研究では、振幅変調された連続超音波を用いて周波数領域

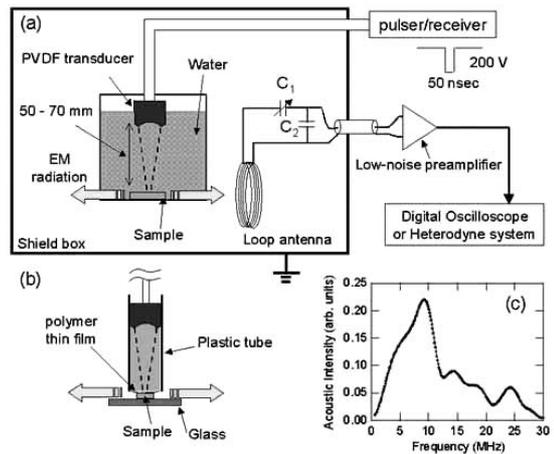


図 1 測定概念図  
(a) 水浸タイプ (b) 非浸水プローブタイプ  
(c) 超音波のスペクトル

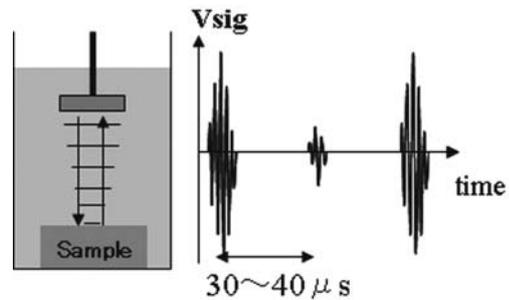


図 2 パルス信号概念図

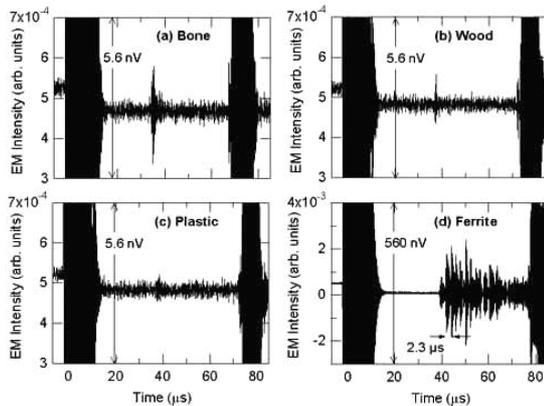


図 3 圧電・磁性物質からの ASEM 信号

で目的信号を分解し、ASEM 応答を高感度に検出する方法を開発した（図 4）。振動子と対象物の距離が  $(2n+1)\lambda_m/4$  のとき ( $\lambda_m$ : 変調周波数に対応する水中音波波長), 振動子ノイズと ASEM 信号の位相差が 90 度となり、目的信号がロックインアンプの虚部信号として分離

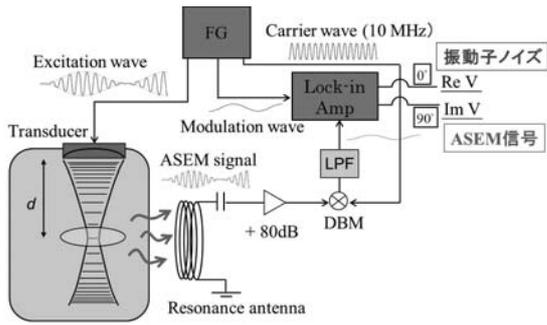


図4 振幅変調法の測定概念図

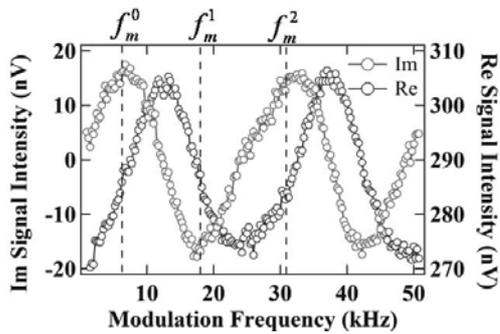


図5 振幅変調法によるASEM信号(大腿骨)

される。図5に骨からのASEM応答に対する実施例を示す。予想した変調周波数において、虚部信号が最大値、実部信号がゼロとなることが示された。振幅変調法により、今回の実施で約170分の1(原理的には約3万分の1)の測定時間短縮に成功し、実用化への期待が高まった。

次に、二つ目の方向性として挙げた実施例の蓄積について報告する。ここでは、骨の物性とASEM応答との相関に関する研究について述べる。骨は表面を覆う薄く硬い皮質骨(cortical bone)とその内部にあるスポンジ状の海綿骨(cancellous bone(骨梁: trabecular bone))の二つの構造からできている(図6)。さらにその骨組織は主にハイドロキシアパタイトとコラーゲン結晶から構成されている。骨の健康状態の指標として、これまでミネラル成分の濃度を示す骨密度(BMD)が用いられてきたが、近年、コラーゲンの結晶性が関与した“骨質”が骨の強度に依存することがわかってきた。骨密度の測定は通常、X線CTや超音波測定で行

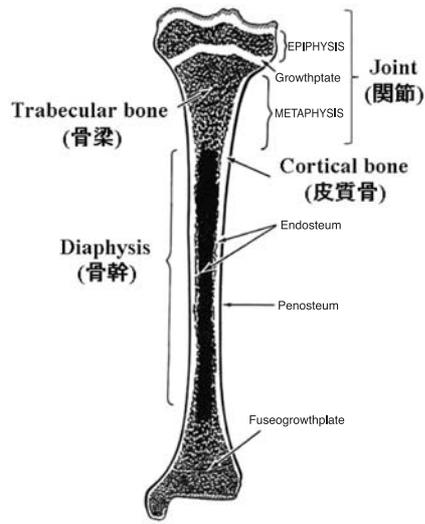


図6 骨の構造

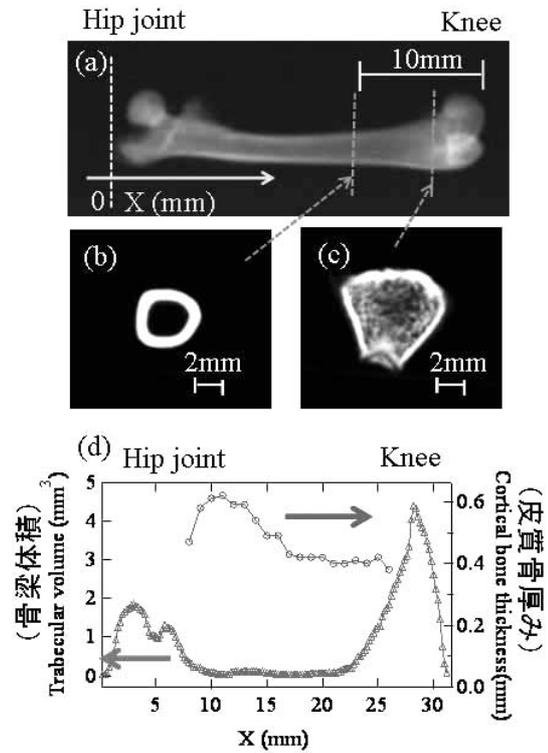


図7 X線CTによるラット大腿骨の評価

われてきたが、骨質の評価方法はまだ確立していない。そこで我々が着目したのが骨の圧電効果である。骨の圧電効果は半世紀前に報告されているが、その起源は主に骨軸にそって配向したコラーゲンの圧電効果であると考えられている。

図7にラット大腿骨のX線CT像による解

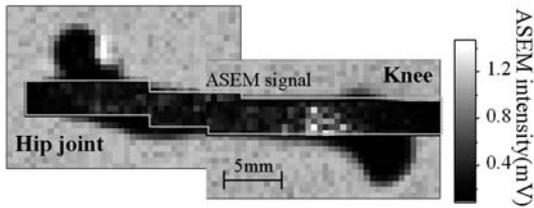


図8 ラット大腿骨のASEMイメージング図

析結果を示す。骨梁は関節部にのみ存在し、骨幹部は中空構造であることがわかる。このラット大腿骨に対して、ASEM 信号強度を2次元マップした結果を図8に示す。ASEM 信号のパルス遅延時間の解析から、各点のASEM 信号は皮質骨で生じていることが確認されている。このイメージング結果から膝側関節に近い骨幹部分で最大のASEM 信号強度が得られることが分かった。この膝側関節よりの骨幹部で強い信号が得られる傾向は同一ラットの右足、左足とも、別のラットの大腿骨でも同様に観測されている。膝側骨幹部で普遍的にASEM 信号が強いという結果は大変興味深い。そこでCT画像から得られたデータとASEM 信号強度を比較してその理由を議論しよう。まず考えられることは、皮質骨の厚みモードに依る機械共振による信号増強だろう。しかし、ASEM 信号のスペクトルを分析したところ、膝側関節近傍の信号強度増大を音波共振で説明できないことがわかった。そこで、膝側骨幹部と股関節側骨幹部における物性の違いについて着目した。CTデータの解析から、膝側関節近傍の骨幹部で骨密度が小さいことが示唆されている。つまり、ミネラル成分の濃度が低く、コラーゲン濃度が高いことを意味している。まだ骨質との相関は明らかにされておらず、多くの課題が残されているが、通常の超音波エコー法やX線CTでは得られない骨の物性情報がASEM法を通して可視化されることがわかった。

#### [今後の研究の方向, 課題]

振幅変調を利用することによる画期的な測定

時間短縮は、実用化の上で大変意義が大きい。ただし、パルス法に比べて細かい位相調整が要求されるのでより使い勝手のよい自動化システムの開発が求められている。一方、ASEM法の骨診断への応用として、骨の圧電効果を通じた骨質評価を試みた。ASEM 信号強度がラット大腿骨内において一様でないことがわかり、骨のコラーゲン結晶性に関する何らかの情報を反映していると思われる。今後は、物理的機構を解明するとともに、化学的処理した骨試料との比較、骨粗しょう症の骨と健康骨との比較など、実証例を増やし、骨の新しい診断方法としての確立を目指す。

#### [成果の発表, 論文等]

##### 【論文・会議抄録】

- 1) N. Ohno, M. Uehara, H. Yamada, K. Ikushima, N. Niimi, Y. Kojima, "Acoustically Stimulated Electromagnetic Response in Bones" Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics 33, 523-524 (2012).
- 2) N. Ohno, H. Yamada, K. Ikushima, N. Niimi, Y. Kojima, "Imaging of Electromagnetic Properties via Acoustic Excitation" 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings 487-490 (2012)
- 3) H. Yamada, K. Takashima, K. Ikushima, H. Toida, M. Sato, Y. Ishizawa, "Magnetic sensing via ultrasonic excitation" Rev. Sci. Instrum. 84, 044903 (2013).
- 4) H. Yamada, K. Takashima, K. Ikushima, H. Toida, M. Sato, Y. Ishizawa, "Magnetic imaging by ultrasonic techniques" Proceedings of the 32nd International Acoustic Imaging Symposium, in press.

##### 【学会発表】

- 5) 大野奈津美, 上原美貴, 山田尚人, 生嶋健司, 新実信夫, 小島良績, "骨の音響誘起電磁応答", 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム (USE2012), 千葉大, 2012年11月。
- 6) 内藤 駿, 大野奈津美, 生嶋健司, 新実信夫, "骨の音響刺激電磁応答の測定" 応用物理学会, 神奈川工科大, 2013年3月。
- 7) 山田尚人, 高島和也, 生嶋健司, "強磁性体の音響刺激電磁応答" 応用物理学会, 神奈川工科大, 2013年3月。
- 8) 山田尚人, 生嶋健司, 四辻淳一, "超音波刺激による強磁性金属材料の磁気測定" 超音波研究会, 九州大学, 2013年7月 (予定)。

## 中赤外ナノ秒パルスレーザーを用いたう蝕の選択的除去技術の開発

## Development of Selective Caries Removal Technique by using Mid-infrared Nanosecond Pulsed Laser

2021002



研究代表者 大阪大学大学院 工学研究科 助教 石井 克典  
 共同研究者 大阪大学大学院 工学研究科 教授 栗津 邦男

## [研究の目的]

近年、う蝕（虫歯）の切削治療にレーザーが用いられている。日本では波長  $2.94 \mu\text{m}$  の Er:YAG レーザーが硬組織切削用の医療機器として承認されている。歯科用ドリルを用いた切削では、治療時の騒音や振動といった不快感が生じ問題となっているが、レーザーを用いた場合では、これらの不快感を軽減させることができる。しかし、Er:YAG レーザーを用いた切削は水の微小爆発による反作用力を利用するため、う蝕に対する選択性が無く健全歯質も切削してしまう。さらに、う蝕を除去した後、詰め物として充填されるコンポジットレジンの接着強度が低下するといった報告もされている。

歯科領域においては、低侵襲な治療および歯質の保全が重要であるという概念 (Minimal Intervention; MI) に基づいた医療が理想とされており、現状の Er:YAG レーザーではこれらを達成させることができていない。MI に基づいた医療を行うためにも、う蝕切削に対する選択性を持ち、コンポジットレジン修復治療に優れた新しいレーザー歯科治療技術の開発が必要である。

レーザーを用いた治療を行う際には、生体組織の吸収特性を考えることが重要である。図1にウシ歯の健全象牙質と脱灰象牙質（う蝕模擬モデル）の中赤外域における吸収スペクトルを

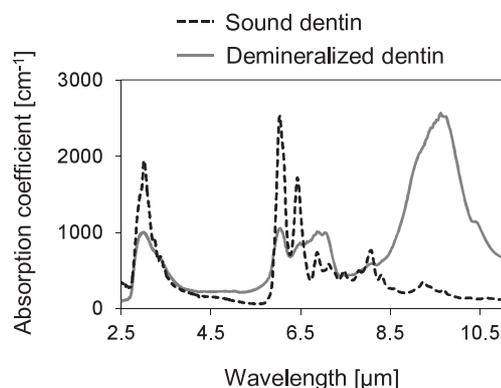


図1 ウシ歯の健全および脱灰象牙質の赤外吸収スペクトル

示す。主な吸収は波長  $3 \mu\text{m}$ 、 $6 \mu\text{m}$  帯、 $9 \sim 10 \mu\text{m}$  帯に存在する。波長  $3 \mu\text{m}$  は OH 伸縮振動に、波長  $9 \mu\text{m}$  帯は PO 伸縮振動に由来する吸収である。波長  $6 \mu\text{m}$  帯はアミド結合の振動モードに由来する吸収帯（アミドバンド）で、波長  $6.0 \mu\text{m}$  の吸収帯はアミド I、波長  $6.4 \mu\text{m}$  の吸収帯はアミド II と呼ばれている。

我々の研究グループは波長  $6 \mu\text{m}$  帯に着目した。波長  $6 \mu\text{m}$  帯は象牙質の組成の 20% を占める有機質と相互作用し、脱灰象牙質の方が吸収が大きいことからう蝕象牙質の選択的な切削が期待できる。これまでに波長  $5.6 \sim 6.6 \mu\text{m}$  において網羅的な実験を行い、脱灰象牙質の選択的な切削の条件について検討したところ、象牙質の吸収ピーク波長  $6.00 \mu\text{m}$  より短波長側の  $5.8 \mu\text{m}$  帯が選択的なう蝕切削に適しているという結果が得られた。そこで本研究では、中赤外域の波長  $5.8 \mu\text{m}$  帯に着目し、ナノ秒パルスレー

ザーを用いたう蝕の選択的な除去効果について検討を行った。

#### [研究の内容, 成果]

##### ① レーザー照射実験の方法

試料にはウシ歯象牙質を使用した。健全象牙質は歯冠部をダイヤモンドカッターを用いておよそ5 mm×5 mm×1 mmのディスク状に加工し得た。脱灰象牙質はディスク状の健全象牙質を37°C温槽内で乳酸(20006-75, Nacalai Tesque)水溶液に24時間浸漬させ、人工的に脱灰反応を誘起させ得た。

光源には差周波発生(Difference-Frequency Generation; DFG)方式の中赤外波長可変固体レーザー(以下DFGレーザー)(川崎重工業株式会社と理化学研究所の共同開発)を使用した。非線形光学結晶としてAgGaS<sub>2</sub>(銀硫化ガリウム)を用いた。ポンプ光とシグナル光にはそれぞれ、波長1,064 nmのNd:YAGレーザー(TEMPEST 10, New Wave Research)と波長1,064 nmのNd:YAGレーザー(TEMPEST 300, New Wave Research)により励起され波長可変域1,150~1,350 nmで発振可能なCr:forsteriteレーザーを使用した。これら2つのレーザーの差周波として波長5.8 μm帯の中赤外光を得た。

DFGレーザーを焦点距離10 cmの放物面鏡を用いて自動ステージ上にスポット径約150 μmで集光した。電磁シャッターを用いて照射時間1秒のスポット照射を行った。照射条件は象牙質の吸収ピークよりも短波長側の波長5.70~6.00 μm, 平均パワー密度は10~40 W/cm<sup>2</sup>とした。

レーザー照射後試料を十分に自然乾燥させ、イオンスプッター(E-1010, HITACHI)を用いて試料表面に厚さ約10 nm程度の金コーティングを施し、走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope; SEM)(JCM-5700, JEOL)を用いて照射痕の観察を行った。その後、共焦

点レーザー顕微鏡(OLS3100, OLYMPUS)を用いて照射痕の切削深さの測定を行った。

##### ② レジン接着強度試験の方法

試料にはウシ歯冠部をダイヤモンドカッターを用いておよそ1 cm×1 cm×1 mmのディスク状に加工した健全象牙質を用いた。レーザー1スポットあたり1 s間の照射になるように自動ステージの走査速度を設定し、面状に照射を行った。照射条件は、前述の実験で明らかとなった選択的な脱灰象牙質除去が可能な条件を採用し、波長5.80 μm, 平均パワー密度30 W/cm<sup>2</sup>を用いた。接着強度測定は、まず照射歯面に対してセルフエッチングプライマーで歯面処理を施し、その後ボンディング材を塗布した。その上にコンポジットレジン(Clearfil<sup>®</sup> AP-X, Kuraray Medical)を充填し光照射することでコンポジットレジンを接着させた。接着後、37度水中に24時間保管し、万能試験機(IM-20, INTESCO)を用いてクロスヘッドスピード0.3 mm/minにて引張接着強度の測定を行った。

##### ③ レーザー照射実験の結果

図2に波長5.80 μm及び6.00 μmで照射した際の健全及び脱灰象牙質の照射痕のSEM画像を、図3に同波長での健全及び脱灰象牙質の切削深さを示す。波長5.80 μmで健全象牙質と脱灰象牙質の照射痕を比較すると、平均パワー密度が大きくなるにつれて照射痕の大きさに差が表れ、切削深さに差が表れていることが示唆された。切削深さを見ると、30~40 W/cm<sup>2</sup>において健全象牙質には低侵襲に脱灰象牙質を大きく切削しており、脱灰象牙質に対する選択性が観察された。一方、比較対象である吸収ピーク波長の6.00 μmの結果に着目すると、健全象牙質と脱灰象牙質の照射痕の大きさに違いは観察されず、切削深さもほぼ同程度であり選択性は確認されなかった。

表1に各照射条件における健全象牙質と脱灰

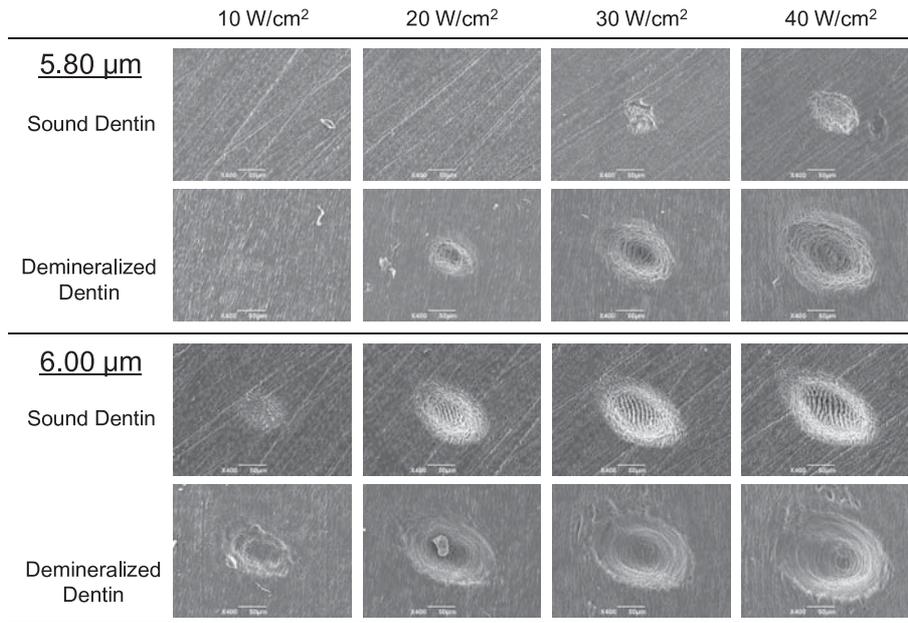


図2 波長5.80 μm および 6.00 μm で照射した際の健全及び脱灰象牙質の照射痕のSEM 画像

象牙質の切削深さの差を示す。( ) 内の数字は左から健全象牙質と脱灰象牙質の切削深さを示している。波長 5.8 μm 帯で照射した際、全

体として脱灰象牙質の方が大きく切削される傾向を示した。脱灰象牙質の切削速度が大きいことおよび健全象牙質に対して低侵襲であるという観点より、波長 5.75~5.80 μm, 平均パワー密度 30~40 W/cm²が低侵襲なう蝕切削に最適な照射条件であることが分かった。

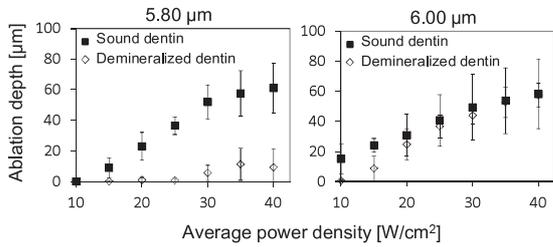


図3 波長 5.80 μm および 6.00 μm で照射した際の健全及び脱灰象牙質の切削深さ

#### ④ レジン接着強度試験の結果

図4に各照射条件におけるレジン接着強度試験の結果を示す。選択的な脱灰象牙質除去が可能な照射条件における接着強度は、臨床で用い

表1 各照射条件における健全象牙質と脱灰象牙質の切削深さの差

	Wavelength [μm]						
	5.70	5.75	5.80	5.85	5.90	6.00	
Average power density [W/cm²]	10	0 (0, 0)	0 (0, 0)	0 (0.2, 0)	15.9 (0, 15.9)	17.2 (0.1, 17.3)	14.5 (0.5, 15)
	15	0 (0, 0)	0 (0.4, 0.1)	8.8 (0.2, 9)	20.0 (0.7, 20.7)	17.0 (12.6, 29.6)	15.4 (8.6, 24)
	20	0 (0, 0)	10.4 (0, 10.4)	22.1 (1, 23)	35.7 (2.7, 38.3)	19.0 (22.2, 41.3)	6.3 (24.6, 30.8)
	25	2.4 (0, 2.4)	28.8 (1.3, 30.1)	35.7 (0.8, 36.5)	21.4 (12.2, 33.6)	18.8 (32.4, 51.2)	3.9 (36.7, 40.6)
	30	11.8 (0.3, 12.2)	37.9 (3.4, 41.3)	46.3 (5.7, 52)	29.4 (25, 54.3)	13.2 (44.6, 57.8)	5.5 (43.8, 49.2)
	35	37.6 (0, 37.7)	46.7 (5, 51.7)	46.2 (11.3, 57.5)	30.4 (32, 62.4)	10.1 (52.3, 62.3)	1.2 (52.6, 53.7)
	40		48.5 (7, 55.4)	51.9 (9.3, 61.2)	14.9 (32.2, 47)	11.4 (49.1, 60.5)	0.7 (57.4, 58.1)

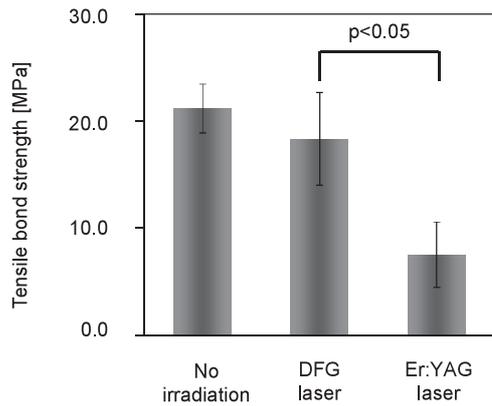


図4 レジン接着強度

られている Er:YAG レーザー照射時の接着強度に比べ有意に大きな値を示した。さらに、レーザー未照射面と接着強度を比較すると有意な差は観察されず、接着強度の低下は認められなかった。以上より、DFG レーザーを用いた照射面では Er:YAG レーザー照射時における接着強度の低下は観測されず、コンポジットレジンによる修復治療に優れていることが示された。

#### [今後の研究の方向, 課題]

中赤外域のナノ秒パルスレーザーを用いたう蝕象牙質の除去に関して、波長 5.75~5.80  $\mu\text{m}$ 、平均パワー密度 30~40  $\text{W}/\text{cm}^2$  が選択的なう蝕除去に最適な照射条件であることが分かった。また、この条件はう蝕除去後のコンポジットレジンによる修復治療にも優れていることが示された。次のステップとしては、ヒトう蝕歯を用いた評価が重要であり、現在進行中である。また、なぜ波長 5.8  $\mu\text{m}$  帯で脱灰象牙質が選択的に除去されやすいか、そのメカニズムを解明する必要がある。今後の課題は動物実験や臨床研究へ向けた治療機器の開発である。具体的には

レーザー装置の小型化および口腔内へ波長 5.8  $\mu\text{m}$  のレーザーをデリバリー可能なデバイスの開発である。

#### [成果の発表, 論文等]

##### ① 投稿中 (英文雑誌)

- ・ T. Kita, K. Ishii, K. Yoshikawa, K. Yasuo, K. Yamamoto, K. Awazu: In-vitro study about selective removal of bovine demineralized dentin using nanosecond pulsed laser at wavelengths around 5.8  $\mu\text{m}$  for realizing less invasive treatment of dental caries, J. Biomed. Opt., revised

##### ② 国際学会発表・プロシーディングス

- ・ T. Kita, K. Ishii, K. Yoshikawa, K. Yasuo, K. Yamamoto, K. Awazu: Selective excavation of human carious dentin using the nanosecond pulsed laser in 5.8- $\mu\text{m}$  wavelength range, Proc. SPIE, 8566, 85660B (2013. 3)
- ・ T. Kita, K. Ishii, K. Yoshikawa, K. Yasuo, K. Yamamoto, K. Awazu: Selective removal of human carious dentin using a nanosecond pulsed laser with 5.8  $\mu\text{m}$  wavelength range, Proc. CLSM 2013, CLSM1-4 (6-7) (2013. 4)
- ・ T. Kita, K. Ishii, K. Yoshikawa, K. Yasuo, K. Yamamoto, K. Awazu: Selective excavation of human carious dentin using a nanosecond pulsed laser with a wavelength of 5.85  $\mu\text{m}$ , Proc. SPIE, 8803, 88030G (2013. 6)

##### ③ 国内学会発表

- ・ T. Kita, K. Ishii, M. Saiki, K. Yoshikawa, K. Yasuo, K. Yamamoto, K. Awazu: Wavelength dependency of less-invasive carious dentin excavation using the laser in the 6  $\mu\text{m}$  wavelength range, 第 51 回日本生体医工学会大会
- ・ 北 哲也, 石井克典, 吉川一志, 保尾謙三, 山本一世, 粟津邦男: 波長 5.8  $\mu\text{m}$  帯ナノ秒パルスレーザーを用いたヒトう蝕象牙質の選択的除去, 第 24 回日本レーザー歯学会総会・学術大会
- ・ 石井克典, 北 哲也, 吉川一志, 保尾謙三, 山本一世, 粟津邦男: 波長 5.8  $\mu\text{m}$  のナノ秒パルスレーザーを用いたう蝕象牙質の選択的切削技術の開発, レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会

# 圧縮センシングを導入したホログラフィック MRI により 超高速イメージング

Ultra-fast Holographic MR Imaging using Compressed Sensing

2021003



研究代表者

宇都宮大学大学院

教授

伊藤 聡 志

## [研究の目的]

MRI が有する圧倒的な検査能力は広く認められており、様々な疾病の早期発見のためにその受検数が年々増加している。しかしながら、検査を受ける患者からの「検査時間が長い」、「トンネル型の場合、検査を受ける装置の空間が狭い」などが不満としてあげられている。このように、検査時間の短縮化へのニーズは非常に高く、経済産業省の 2010 技術戦略においても重要課題として取り上げられている。

近年、信号処理的な手法から撮像時間の短縮を目指す方法として、圧縮センシング (Compressed Sensing) の MRI 応用が研究されている。圧縮センシングは、少数の信号データから画像の復元を試みる方法であり、取得する信号データ量の削減は撮像時間の短縮に直接的に結びつくため、MRI の信号計測に応用することができれば、その効用は大きいものがある。本研究では、ホログラフィの立体映像再生原理と近年脚光を浴びている圧縮センシングの信号復元理論を組合せた MRI の超高速撮像の実現可能性について検討を行い、将来の医療福祉の改善に繋げることを目的とする。また、圧縮センシングによる画像再生は反復処理を必要とし、三次元画像を扱う場合には計算コストが膨大になることから、並列演算処理性に優れた画像処理プロセッサ (GPU) を汎用の計算処理に利用し、再構成処理の高速化を図った。

## [研究の内容, 成果]

### 1 位相拡散フーリエ変換映像法

位相拡散フーリエ変換法 (以降, Phase Scrambling Fourier Transform method を略して PSFT と称する) は MRI で汎用となっているフーリエ変換映像法の変法であり、光学的なホログラフィで言うところのレンズレス・フーリエ変換ホログラムと同形の信号式を持つ。二次関数状磁界の勾配係数を  $b$  とし、磁界強度を  $\Delta B = b(x^2 + y^2 + z^2)$  とする場合の信号式は式 (1) で与えられる。

$$\nu(k_x, k_y, k_z) = \iiint \{\rho(x, y, z) e^{-j\gamma b \tau (x^2 + y^2 + z^2)}\} \times e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} dx dy dz \quad (1)$$

ここで、 $\rho(x, y, z)$  は被写体関数、 $k_x, k_y, k_z$  は信号空間の座標である。式 (1) の PSFT 信号は、式 (2) のように周波数変調された被写体関数のフーリエ変換式に変形できる。

いま、Fig. 1 のように被写体を空間的に極く狭い範囲からなる一次元の断片像に分割して考える。この断片像には周波数変調が与えられ、かつ

$$\nu(k_x, k_y, k_z) = \iiint \rho(x, y, z) e^{-j(\omega_x(x) + \omega_y(y) + \omega_z(z))} \times e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} dx dy dz \quad (2)$$

$$\omega_x(x) = \gamma b \tau x, \omega_y(y) = \gamma b \tau y, \omega_z(z) = \gamma b \tau z \quad (3)$$

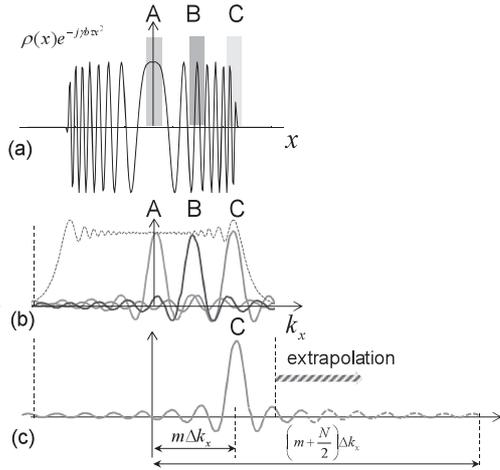


Fig. 1 Schematic of PSFT signal extrapolation  
The spectrum of frequency modulated localized images are shifted in accordance with the spatio-temporal frequency

その変調周波数は式(3)のように空間位置に比例して大きくなるから、その周波数スペクトラムはシフト定理により移動する。図(a)のように断片像A, B, Cを考えたとき、断片像Aには殆ど周波数変調は与えられないから、そのスペクトラムの中心は図(b)に示すように信号空間上で殆ど移動しない。それに対し、断片像Cには大きな変調が与えられるから、そのスペクトラムは信号空間上で大きくシフトする。被写体関数を実関数と仮定できるとき、そのスペクトラムである信号空間の信号は、スペクトルのピークを中心にして対称になるように復元できる性質がある。よって、有限長のサンプリングによって信号が打ち切られても図(c)のように信号は外挿、復元することができる。式(3)のように変調周波数は空間に比例するので断片像のスペクトラムシフトも周辺ほど大きくなる。そのため周辺像ほど外挿される信号の帯域幅が大きくなり、結果として分解能の改善効果も大きくなる性質がある。

## 2. 圧縮センシングの応用

圧縮センシングは、計測される信号がスパース性を満たすときにサンプリング定理を満たさない少数の信号データから画像を復元する手法

である。 $\rho$ を系列長 $N$ のベクトル、 $s$ を系列長 $M$ のベクトルからなる観測データ、 $\Phi$ を $M \times N$ の計測マトリクスとする。 $s = \Phi \rho$ の関係式から $\rho$ を復元しようとするとき、 $M < N$ の場合であると、解は一意的に定まらない。しかしながら、 $\rho$ のベクトルがスパースである場合には $\rho$ を復元することができる場合がある。 $\rho$ のベクトルがスパース性を示さない場合には、 $\rho$ に対し適当な変換関数 $\Psi$ を施してスパース性を与える。このとき、 $\check{\rho} = \Psi \rho$ として、式(4)から $\check{\rho}$ を求める問題に帰着する。

$$s = \Phi(\Psi^{-1}\check{\rho}) = (\Phi\Psi^{-1})\check{\rho} \quad (4)$$

観測行列 $\Phi$ と観測ベクトル $s$ から未知ベクトル $\check{\rho}$ を求める方法として、式(7)の1-ノルム最適化問題を解くと、高い確率で原信号を復元することができる。ここで、 $\varepsilon$ は画像に含まれる雑音量から決める定数である。

$$\check{\rho} = \arg \min \|\check{\rho}\|_1 \text{ subj. to } \|s - (\Phi\Psi^{-1})\check{\rho}\|_2 < \varepsilon \quad (5)$$

式(5)から $\check{\rho}$ を求める方法にはいくつかあるが、本研究では比較的計算コストが少ない射影勾配法を使用した。

## 3. 実験

分解能の改善度を評価するために信号データ量をフルデータの40%から25%まで変えて画像再生を行った。分解能評価に使用した数値モデルは、位相エンコード方向に細いスリットの入った数値ファントムである。再生像の分解能と信号空間の有効な帯域幅には対応関係があるから、数値モデルから計算されたフーリエ変換法の信号に対し信号帯域を変えながら画像再構成を行い、信号帯域から理論的に求められる分解能と再生像のスリット部の最深部振幅との対応関係を求めた。この対応関係を利用し、本方法で得られた再生像のスリット部振幅から等価

的な分解能を求めた。分解能評価結果を Fig. 2 に示す。横軸は画像空間原点からの距離であり、右端は視野端である。縦軸はフーリエ変換法による再生像の分解能を 1.0 とした相対的な分解能を示す。PSFT 法でフルデータを取得した 100% の場合は、ほぼ原点からの距離に比例して分解能は改善される。一方、信号量が少なくなると画像全体の分解能が低下し、また空間的な分解能の改善係数もやや低下している。具体的には、信号量 35% の場合をみると、画像空間の中央付近の分解能は、フーリエ変換法によるフルデータ再構成の 0.91 倍程度の分解能である。原点からの距離に比例して分解能は改善し、画像中央から FOV 比で 0.4 倍の位置では、1.25 倍である。Fig. 2 の結果から、取得する信号量によって変化するが、本方法により、サンプリング定理を満足しない少量の信号によってもフーリエ変換法にフルデータを利用した再生像に比べて分解能の高い画像を取得できる可能性が示された。

Fig. 3 に MR 画像を利用した結果を示す。ここでは、1.5 T の MRI を利用して取得したボランティア像より PSFT 信号を作成した。(a) は信号量が 35% の場合の収集軌道例を図示したものであり、白線部を収集した。(b) は MR モデル画像であり、 $512 \times 512$  の信号から再生された像である。(c) は (b) の部分拡大図、(d) は  $256 \times 256$  点のフルデータ信号を利用して得られた分解能改善像、(e) は比較のためにフーリエ変換法の 35% 信号を利用した CS 像、(f) は信号量 35% の PSFT 信号を利用した提案法による再生像である。矢印で示した周辺部を比較すると、(d) の PSFT フルデータに分解能改善処理を施した再生像は、Fig. 5 から 1.7 倍程度の分解能改善が期待できるので、2 倍の分解能を持つ (c) の像に近い分解能が得られている。信号量 35% のとし CS を適用した (f) は、フーリエ法の CS 像 (e) よりも細部の表現性に優れ、100% の信号を使用した再生像 (d) に近い分解能を示している。

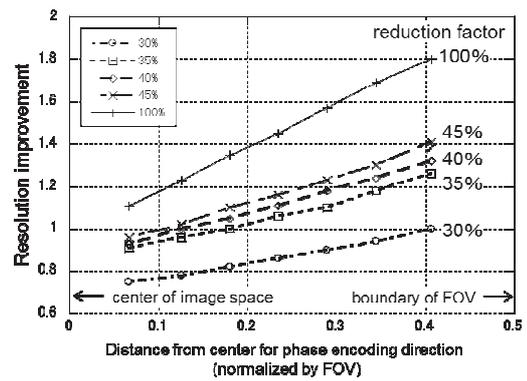


Fig. 2 Resolution improvement for phase encoding direction after signal extrapolation in PSFT-CS

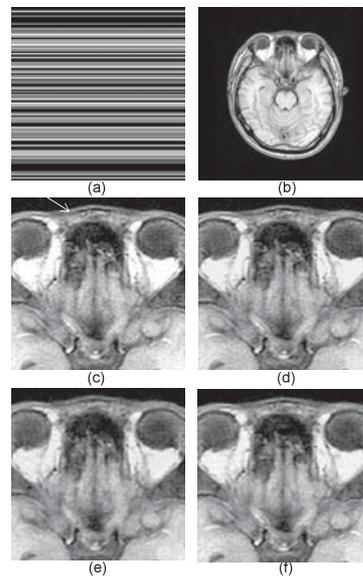


Fig. 3 Simulation results of MR image ; (a) sampling trajectory of signal, (b) original image ( $512 \times 512$ ), (c) close up of image (b), (d) fully  $256 \times 256$  scanned image by PSFT, (e) FT-CS image using 35% data, (f) PSFT-CS images with band extrapolation using 35% signal

#### 4. GPGPU による再構成の高速化

評価に用いた GPU を搭載するコンピュータと使用した GPU である NVIDIA Tesla K20 の仕様をそれぞれ Table 1 と Table 2 に示す。計算機再構成では Visual C 環境によりコーデ

Table 1 Specifications of GPU embedded computer

CPU	Intel Core i7-3960X CPU 3.30 GHz
RAM	64 GB DDR
GPU	Tesla K 20
Software	CUDA SDK 3.0, CUDA Toolkit 3.0

Table 2 Specifications of GPU

GPU type	NVIDIA Tesla K 20
Device memory	5.0 GB
Core clock	706 MHz
Shader processors	2496
Memory bandwidth	208 GB/s
Bus width	320 bit
TFLOPS	1.17

ングを行った。

圧縮センシングの再構成を計算機のCPUの単一スレッドを使用する条件と、GPUを使用する条件とで比較を行った。なお、再構成に要する反復回数は30回であった。GPUを適用することによって、CPUでは807.1秒を要した計算が、GPUの利用により51秒に短縮され、約16倍という高速化が達成された。

#### [今後の研究の方向, 課題]

信号の波面伝搬のパラメータや収集軌道の間引き方、さらに再構成アルゴリズムの方法を改良することにより、さらに圧縮率の向上を図る。また、複数GPUの並列使用により、再構成のさらなる高速化を目指す。

#### [成果の発表, 論文等]

1. 伊藤聡志, 齊藤文彦, 山田芳文: GPUを用いた三次元MRI圧縮センシング再構成の高速化, *MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY*, vol. 31, No. 3, pp. 167-175 (2013).
2. 伊藤聡志, 中村一喜, 齊藤文彦, 山田芳文: MR画像の位相歪みに頑健な圧縮センシング, *電子情報通信学会論文誌*, vol. J96-D, No. 4, pp. 803-812 (2013).
3. Satoshi ITO, Hiroto ARAI, Yoshifumi YAMADA: Compressed Sensing in Magnetic Resonance Imaging Using the Multi-step Fresnel Domain Band Split Transformation, *Magnetic Resonance in Medical Sciences*, vol. 11, no. 4, pp. 243-252 (2012).
4. 小久保潤, 伊藤聡志, 山田芳文: 圧縮センシングを導入したMR高速撮像におけるGPU利用による再構成の高速化, *MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY*, vol. 30, No. 2, pp. 115-122 (2012).
5. S. Ito, K. Nakamura, Y. Yamada: An Efficient Compressed Sensing Reconstruction Robust to Phase Variation on MR Images, *International Society of Magnetic Resonance in Medicine 21th Scientific Meeting*, Salt lake City, USA, 2604 (2013).
6. S. Ito, Y. Yamada, Compressed Sensing with Super-resolution in Magnetic Resonance using Quadratic Phase Modulation, *APSIPA Annual Summit and Conference 2012, Proceedings on USB, PS. 4-BioSPS. 3*, Hollywood, CA, USA (2012).
7. 荒井博俊, 伊藤聡志, 山田芳文: 圧縮センシングのMRI三次元撮像への応用, 2012年映像情報メディア学会冬季大会, 8-9 (2012) (学生優秀発表賞受賞).
8. 伊藤聡志, 来住俊一, 山田芳文: 位相拡散フーリエ法の導入による圧縮センシング再構成の高分解能化, 第40回日本磁気共鳴医学会大会, P-1-10, p. 291 (2012).
9. 伊藤聡志, 荒井博俊, 山田芳文: 圧縮センシングによる3次元撮像の高速化に関する基礎検討, 第40回日本磁気共鳴医学会大会, O-2-201, p. 244 (2012).

## メデイカルデバイスの表面親水性向上のためのナノ改質加工法の研究

### A Study on Surface Generation of Superior Hydrophilicity for Surgical Medical Devices

2021006



研究代表者 (独) 理化学研究所 専任研究員 片 平 和 俊

#### [研究の目的]

再生医療分野では、患者自らの組織を取り出して培養、損傷した部位に再び戻して治療させる手法が、様々な可能性から、次世代の治療法として期待されている反面、根本的な問題も存在している<sup>1,2)</sup>。手術にはサージカルスチール(surgical steel)製の金属メスや金属性注射針などの医療用ツールが使用される(通常はSUS420J2, SUS304系)が、その際、生体電気反応や、微量の金属イオンの溶出により、生体組織がダメージを受けてしまう恐れがある。とくに、ツール表面の濡れ性は、生体組織との親和性、汚れの洗浄性などに対して、大きな影響を及ぼすことから、その評価を行うことは極めて重要である。

#### [研究の内容, 成果]

##### 1. はじめに

上述した医療用ツールの作製には、精密切削、精密研削加工技術が多く用いられている。これまで著者らは、金属材料の表面仕上げ法としてELID(Electrolytic In-Process Dressing)研削技術に注目してきた<sup>3-6)</sup>。最近の研究より、ELID研削を施すことで、精密加工を達成するとともに、被加工物の表面組織が改質され、耐食性、耐摩耗性等が向上するという知見が得られており、腐食環境に晒される成形金型材料や

金属系バイオマテリアルなどへの適用が進められている<sup>5,6)</sup>。

とくに、著者らの過去の研究で、ダイヤモンド、SiO<sub>2</sub>、アルミナを砥粒成分とするELID研削用砥石を作製し、砥粒成分の違いが加工後表面の濡れ性へ及ぼす影響について調べた。その結果、アルミナ砥粒でELID研削を施した加工面の接触角は、他の砥粒で加工した表面の接触角よりも小さく、親水性に優れていることがわかった。

そこで、本研究では、アルミナ系砥粒に焦点を絞り、砥粒成分と加工面の濡れ性の関係をさらに掘り下げて検討することとした。すなわち、一般に、研削加工に用いられるアルミナ系砥粒には大別してWA, SA, A系という3種類があるが、これらアルミナ系砥粒種類の違いが加工表面の状態、親水性へ及ぼす影響について評価するとともに、優れた親水性を発現させる加工条件についても検討を加えた。

##### 2. 供試材および実験方法

供試材は、一般的に金属メスや金属性注射針などの医療用ツールに使用されるサージカルスチールSUS420J2とした。同材をφ12×t3のディスク状に加工した後、一方の端面をELID研削により鏡面状に仕上げた。その際、表面改質層の形成に影響を及ぼすと考えられる砥粒成分に着目し、WA, SA, A系の3種類のアルミナ砥粒(#4000相当)を用いて仕上げ加工し

た試験片を準備した。それぞれの砥粒の外観および特徴を表1に示す。砥石のボンド材や研削液成分も表面改質層の形成に影響を及ぼすと考えられているが、本研究ではボンド材としてELID研削用砥石に通常用いられるメタル（銅）とレジンの混合物を採用した。

これらの砥石を用いて、図1に示すELID装置を搭載した卓上3軸加工機を使用し、表2に示す条件下においてELID研削を施した。以下、砥粒成分の違いによって、WA, SA, A系アルミナ砥粒を用いてELID研削を施した試験片をそれぞれWA, SA, Aシリーズと称する。一方、金属の表面仕上げとして一般的に用いられている手法、すなわち耐水エメリー紙（#320-#1200）とアルミナ粉末（0.3 μm）を用いて鏡面状に研磨した試験片も準備した。この試験片をPシリーズと称する。このようにし

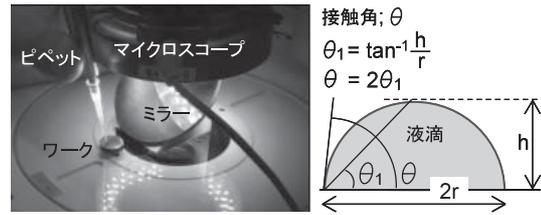


図2 濡れ性評価試験の様子

て準備した4種類の試験片に対して、触針式粗さ測定器による表面粗さ測定、グロー放電発光分析（GDOES）による表面元素分析、およびX線回折による結晶構造解析を行なった。また一般に、濡れ性は、表面電位と相関があることから、本研究では、ケルビンプローブを用いた振動容量法による表面電位測定を行った<sup>7)</sup>。

濡れ性評価にはいくつかの方法があるが、本研究では水に対する接触角を測定する方法を用いた。濡れ性評価試験の様子を図2に示す。

表1 実験に使用する3種類のアルミナ砥粒

WA系	SA系	A系
純粋な白色コランダム結晶からなる	純度の高い単結晶アルミナであり、コランダム結晶からなる	コランダム結晶および非晶質部分からなる

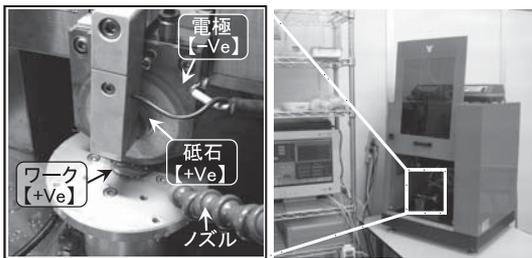


図1 ELID装置を搭載した卓上3軸加工機

表2 加工条件

被加工物	ステンレス鋼 (SUS420J2), φ12 mm×3 mm
加工装置	卓上3軸加工機
前加工用砥石	铸铁ボンドダイヤモンド砥石 (#325, #2000)
仕上げ加工用砥石	メタル (Cu) レジンボンド砥石: WA系, SA系, A系アルミナ砥粒 (#4000相当)
電源	直流パルス電源 ED-920 [富士ダイス(株)]
クーラント	水溶性研削液 (CG7, 5% 希釈)
加工条件	砥石回転数 2,000 rpm, ワーク回転数 1,000 rpm, 仕上げ切込量 0.5 μm

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 ELID研削後の表面粗さ測定結果

上述の砥石を用いて、SUS420J2に対してELID研削を行った。加工後の表面粗さ測定結果を図3に示す。WA, SAシリーズと比較して、Aシリーズは若干高い値を示しているものの、すべてのシリーズにおいて平均粗さ Ra 10 nm 以下の高品位な表面が得られることが確認できた。

なお、各試験片の表面粗さの違いが濡れ性に影響を及ぼすことも懸念される。この点を明らかにするため、砥石の番手を #325, #1200, #4000 と変えて加工することにより、意図的に表面粗さが異なる試験片を準備し、すべての試

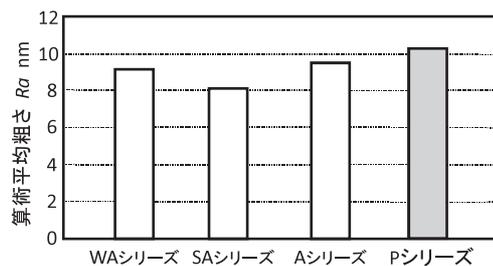


図3 粗さ測定結果

験片表面の接触角を測定した。その結果、表面粗さに差があるにもかかわらず、接触角はほぼ同じ値を示すことを確認している。したがって、本論文で論じる表面粗さのレベルでは ( $R_a$  で 300 nm 以下)、表面粗さの違いが濡れ性へ及ぼす影響は小さいものと考えられる。

### 3.2 砥粒種類の違いが濡れ性に及ぼす影響

濡れ性を評価するために観察した液滴の様子を図4に示す。同図より、砥粒種類の違いによってワーク表面の濡れ性が変わることが確認できる。とくに、A系アルミナ砥粒でELID研削を施したAシリーズの接触角が他のシリーズと比較して15~25%ほど小さいことから、水に対する親水性に優れていることがわかる。そこで、Aシリーズがとくに優れた親水性を有する要因を調べるため、表面電位測定および表面元素分析を行った。

初期表面電位  $V_i^{(7)}$  と、図4より得られた接触角の値を整理し、図5に示す。表面電位が高いほど、接触角は小さいという傾向が認められ

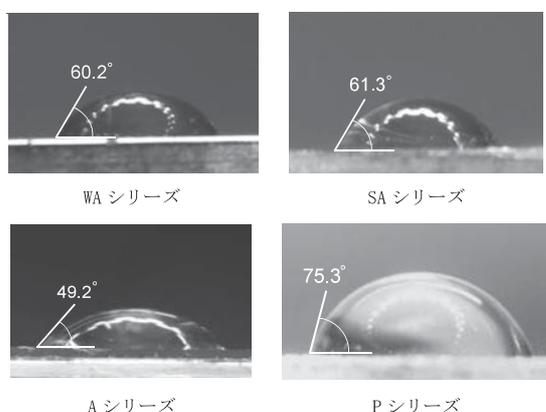


図4 液滴の観察結果

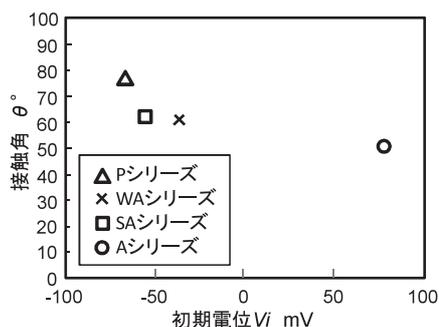


図5 各シリーズの表面電位と接触角の関係

る。Aシリーズの表面電位がとくに高い正の値を示しており、よって、同シリーズが最も小さな接触角を有する、すなわち親水性に優れるという結果が得られた。一方、Al元素を検出対象として、表面から深さ方向へ元素分析を行った結果を図6に示す。同図より、すべてのシリーズにおいて、表面から深さ30nm程度まで、Al元素の拡散が認められる。その中でも、Aシリーズが最も高い検出強度を示している。

これらの結果に基づいて、A系アルミナ砥粒で加工した面が優れた親水性を示す理由は次のように考えられる。アルミナ砥粒を用いてELID研削を施すことにより、砥粒成分であるAl元素が基材内部に拡散することは確認されている。ここで、帯電列より、Al元素は正に帯電しやすい特性を有するが知られている。一方、レナード効果<sup>8)</sup>により、通常、水滴表面は負に帯電している。よって、図7に模式的に示

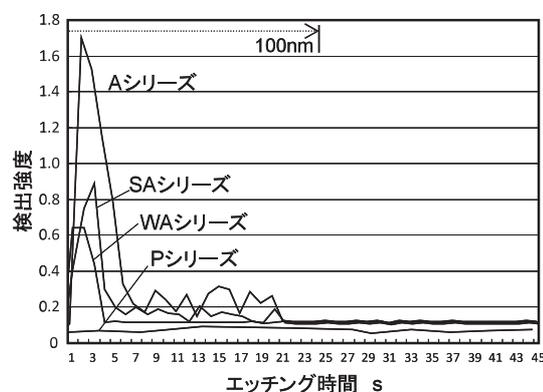


図6 GDOESによるAl元素の基材深さ方向への元素分析

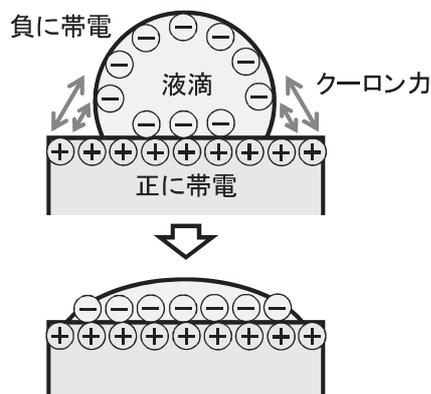


図7 アルミナ系砥粒で加工した面が親水性を示す模式図

すように、Al 元素拡散層と液滴表面との間に強いクーロン力が作用し、親水性の表面を形成するものと推察される。なお、A シリーズは他のシリーズと比較して、表面のアルミナ元素拡散量がとくに多いために、最も優れた親水性を示したものと考えられる。ELID 研削原理に基づく砥粒成分元素拡散効果の発現には種々の要因が重疊的に作用しているものと考えられ、このメカニズムの解明まで掘り下げた検討を引き続き実施する必要がある。

### 3.3 A 系アルミナ砥粒の非晶質割合と濡れ性の関係

前節において、A 系アルミナ砥粒で加工した面は、他の砥粒で加工したそれよりも、Al 元素の拡散が最も多く認められ、かつ優れた親水性を示す結果となった。その要因を調べるため、それぞれの砥粒の特性の違い、とくに本節では結晶状態の違いに着目した。表 1 に示したとおり、WA および SA 砥粒は結晶構造のみであることに対し、A 系砥粒は結晶性アルミナと非晶質部が混合した構造となっている。図 8 は、それぞれの砥粒に対する X 線回折結果であるが、A 系アルミナ砥粒は結晶性の  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  のピークを示しておらず、すなわち、非晶質部分を多く含んでいることがわかる。一般に、アモルファス状態の微粒子は、条件にもよるが、固体接触時にメカノケミカル反応を生じやすいと言われている。前節の実験においても、非晶質部を多く含む A 系アルミナ砥粒では、加工点における砥粒とワークのメカノケミカル反応が活発に生じ、ワーク表面に拡散する Al 元素量が多くなったと考えられ、その結果、親水性

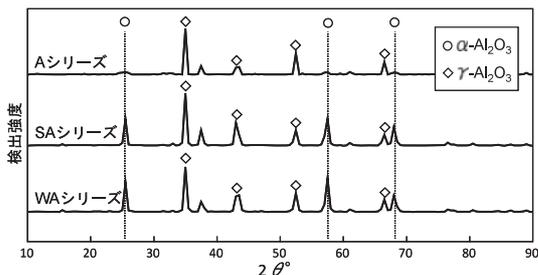


図 8 それぞれの砥粒に対する X 線回折結果

が向上したものと示唆される。

そこで本節では、A 系アルミナ砥粒の非晶質割合が、加工後の表面の Al 元素拡散量および親水性とどのような相関があるか調べることとした。図 9 は、それぞれの砥粒における X 線回折から得られる  $2\theta$  の値 ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  のピーク付近) と、焼成温度の関係である。ここで、 $2\theta$  のピークにおける半価幅は、砥粒の非晶質割合と相関があることから、便宜的にこの値を用いて、それぞれの砥粒の非晶質割合と焼成温度の関係を整理し、図 10 に示す。WA, SA 系アルミナ砥粒は、焼成温度を変えても非晶質割合は一定のままだが、A 系アルミナ砥粒においては、焼成温度を変えることで非晶質割合を調整することが可能であることがわかる。

そこで、A 系アルミナ砥粒砥石の焼成温度を 600~900℃まで変化させ、砥粒の非晶質割合が異なる砥石を準備し、その砥石を用いて加工した面の接触角測定結果と Al 元素検出強度の関係を図 11 に整理する。これらの結果より、非晶質割合の多い砥粒を用いて加工した面が、最も高い Al 元素検出強度および親水性を示す

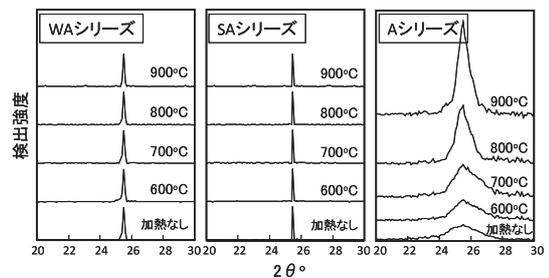


図 9 X 線回折で得られる  $2\theta$  の値と焼成温度の関係

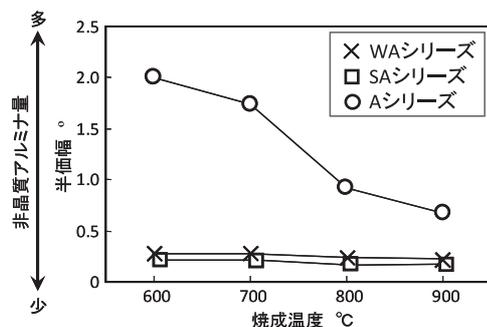


図 10 砥粒の非晶質割合と焼成温度の関係

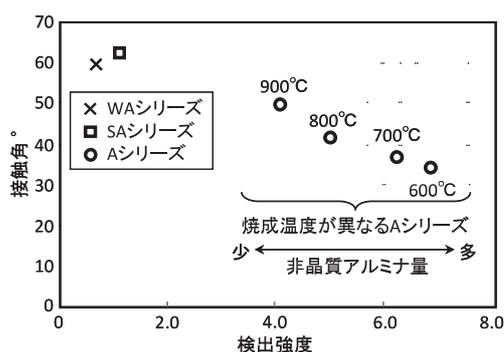


図 11 接触角と Al 元素検出強度と関係

ことがわかる。これらの結果は、表面の Al 元素拡散量が多いほど、優れた親水性を示すという前節までの考察と矛盾しない。

### 3.4 研削液温度が砥粒成分拡散に及ぼす影響

砥粒成分がワーク表面に拡散するという現象は、加工環境、とくに温度の影響を強く受けるものと考えられる。本節では、研削液の温度が、砥粒成分の拡散現象に及ぼす影響を調べるための基礎実験として、研削液温度を 25~90℃まで変化させた条件で加工を行い、加工後表面の元素分析、濡れ性評価を実施した。なお、本実験には、WA 系および A 系アルミナ砥粒を用いた。

図 12 は、加工後表面の Al 元素検出強度と、研削液温度の関係である。いずれの温度においても、WA シリーズと比較して、A シリーズの方が高い検出強度を示しており、Al 元素拡散量が多いことがわかる。A 系アルミナ砥粒の成分が拡散しやすいというこの結果は、前節までに得られた知見と一致している。さらに、A シリーズの結果に着目すると、研削液温度

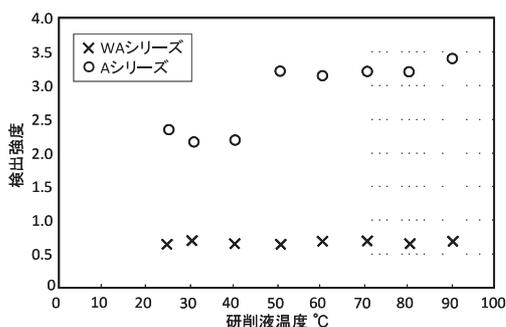


図 12 加工後表面の Al 元素検出強度と研削液温度の関係

が 50℃を超えたところから検出強度が急激に高くなっている。

一般にアルミナは化学的に安定であるといわれているが、非晶質アルミナは、ある特殊な条件化（温度 50℃以上、pH 8~12）で化学反応を起こすといわれている。本研究で使用している研削液の pH は 10.2 である。そのため、研削液温度を 50℃以上にするにより、非晶質アルミナ部で式(1) および (2) に示す化学反応が起こり、イオン化された Al 元素が加工により活性となったワーク表面に拡散するという現象が一層促進されたものと考えられる。なお、式(2) 中の水素イオンは、ELID プロセス中に、砥石と電極間において水が電気分解することにより発生し、研削液中に多量に存在するものである。

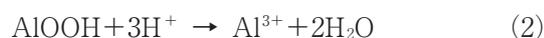


図 13 に、研削液温度 25, 50, 70℃における、WA および A シリーズの濡れ性評価試験の代表的な結果を示す。同図中、A シリーズ、50℃の結果に着目すると、接触角 27.8 度という著しい親水性を示すことが確認できる。なお、研削液温度 70℃以上で加工を行った際、表面粗さが極端に悪くなった。砥石ボンド材の電解現象は温度の影響を強く受けることから、研削液温度が 70℃を超えることで、ボンド材の電解が過度に進み、砥粒保持力が極端に低下したためと考えられる。良好な加工特性を確保しつつ、

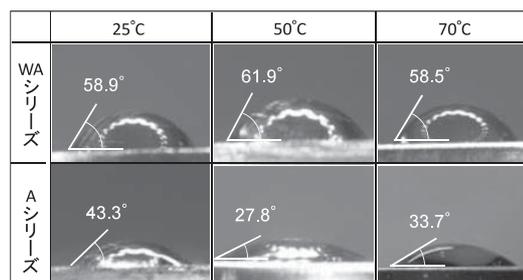


図 13 濡れ性評価試験の液滴の様子

砥粒元素拡散を発現するためには、50℃前後の温度条件が最適であると示唆される。

#### [今後の研究の方向, 課題]

本研究で述べたように、砥粒の種類、結晶状態、加工環境を選定することにより、ワーク表面に拡散させる砥粒成分元素の量を調整できること、さらに、親水性、耐食性などの表面機能を制御できる可能性があることは、非常に興味深い知見といえる。今後は、この表面改質層の生成メカニズムをさらに掘り下げて解明し、改質プロセスを自在にコントロールするための実験・検証を行い、バイオマテリアルのナノ表面改質加工技術、人に優しい医療用マイクロデバイスの生産技術の確立に向けた成果を狙う。また本研究成果は、耐食性、耐摩耗性が要求される他の高付加価値製品の高品位化、長寿命化にも対応でき、今後も幅広い製品を対象としたナノ表面改質加工技術開発への進展が期待でき、広大な波及効果が期待される。

#### 参考文献

- 1) 医療機器に関する技術動向調査, 特許庁総務部技術調査課報告, (2001).
- 2) 知恵の輪ニッポン “セラミックス被覆医療器具”,

<http://www.co-ip.jp/modules/wordpress>

- 3) Ohmori H., Marinescu I. D., Katahira K.: Electrolytic In-Process Dressing (ELID) Technologies: Fundamentals and Applications, Taylor and Francis CRC Press, (2011), ISBN: 978-1-4398003-6-2.
- 4) 大森 整, ほか, ELID 研削加工技術, 工業調査会, (2000) 9.
- 5) Katahira K., Watanabe Y., Ohmori H., and Kato T.: ELID grinding and tribological characteristics of TiAlN film, Int. Journal of Machine Tools & Manufacture, 42 (2002) 1307.
- 6) Ohmori H., Katahira K., Akinou Y., Komotori J., Mizutani M.: Investigation on Grinding Characteristics and Surface-Modifying Effects of Biocompatible Co-Cr Alloy, Annals of the CIRP, 55, 1 (2006) 597.
- 7) ナノコート TS(株) コロナサーフ測定原理  
<http://www.Nanocoat-ts.com/coronasurf/>
- 8) 石井淑夫, 小石真純, 角田光雄編集, ぬれ技術ハンドブック: 基礎・測定評価・データ, (2001), テクノシステム.

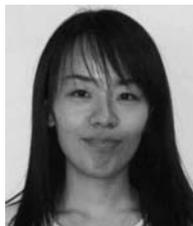
#### [成果の発表, 論文等]

- 片平和俊, 水谷正義, 大森 整, 小茂鳥潤, サージカルスチールの濡れ性を制御するアルミナ系砥粒を用いた表面改質加工法の研究, 砥粒加工学会誌, 56/8 (2012) 539-544.
- H. Kotani, J. Komotori, T. Naruse, M. Mizutani, K. Katahira, H. Ohmori, M. Wasa, K. Sumiya, Development of a New Grinding System for Finishing of Hemispherical Inside Surface, International Journal of nano-Manufacturing, accepted.

# 環境推定・適応機能を有しオペレータ協調する 自律型ロボットのための制御方策の確立

Controller Design for Operator-Cooperative Autonomous Robots  
with Ability to Estimate and Adapt Environment

2021007



研究代表者

大阪府立大学 工学域機械系学類  
航空宇宙課程

助教

金田 さやか

## [研究の目的]

本研究の目的は、未知環境においてオペレータ誘導により作業目的を達成する遠隔操作ロボットの実現である。既存の遠隔操作ロボットは、オペレータ指令を絶対とする。しかし、オペレータの取得情報には限りがあり、適切な制御指令を与えられるとは限らない。環境情報を直接取得可能なロボットが、オペレータの欠損情報を補いながら作業目的を達成する仕組みが必要である。そこで本研究では、環境中の不確かさと作業目的の両者を考慮した制御アルゴリズムの構築を目指す。本研究の成果を利用すれば、不確かさを多く含む社会環境においても、自然に協調作業できるロボットの実現に貢献し、人間と機械との相互作用に必要となる情報を明確にできる。

## [研究の内容, 成果]

人間が環境を整えること無く、ロボットが自律的に作業目的を達成するには、自身が未知環境に対して適応的な振る舞いを生成する必要がある。適応的な行動選択とは、未知環境における様々な不確かさのうち、目的達成に影響する特定の不確かさを推定するような行動（本書ではこのような行動を探索行動と呼ぶ）の選択を指す。本研究はロボットの環境適応性の実現を

目的とし、探索行動と目的達成行動とのトレードオフ関係に着目し、不確かさに依存した行動選択の設計原理を導出することを目標とした。

環境に不確かさがある状況において確実に作業目的を達成するシステム原理を解明するために、題材として未知環境における移動ロボットの目的地への誘導問題に取り組んだ。環境と直接相互作用する移動ロボットが直接観測できる情報は局所的であるが解像度が高い。一方、オペレータはロボットを介して環境情報を取得するため、取得可能な情報は大域的だが解像度は低い。ロボットとオペレータが相互的に制御方策を変化させ、探査行動と知識利用行動とを柔軟に使い分けながら、選択的に不確かさを減少させることで作業目的の達成を実現するシステム原理を解明することとした。

以上のことから、本研究では以下のサブテーマを設けて研究を進めた。

### 1. 行動に関する不確かさの定量化

不確かさに依存した行動選択原理を設計するために、行動そのものに伴う不確かさを定量化する必要がある。ロボットの移動機構として、ホップ機構や車輪機構が挙げられるが、どちらも地面の物理特性が既知であったとしても、地面との接触状態に依存して運動が変化するため、移動にともない状態に関する不確かさが増加する。このような複雑な運動に関する推定器とし

て、複数のカルマンフィルタを含有したハイブリッド型の推定器を用いることが有効である。ホップ運動は、空中の重力のみに依存する運動と、地面との衝突による速度変化、ならびにホップ運動が収束した状態とに分割することができる。車輪による移動も地面との滑りの有無や、地面の掘り下げに至る運動に分類することができる。このような各運動を記述する方程式に則ったカルマンフィルタを用意し、最も観測量と合致する推定結果を用いることで運動状態の推定が可能である。逐次的に推定誤差の分散を伴った状態推定量を得ることができるため、これまでに確立した推定手法[発表論文1]の推定結果や、サブテーマ4で構築するインタフェースでの推定誤差の提示に直接利用することが可能である。

本サブテーマは、ホップ移動するローバの位置同定法として数値実験による評価を行った。具体的には、探査機「はやぶさ」に搭載されていた探査ローバ「ミネルバ」を想定した。カルマンフィルタにより推定を行うこととし、時間伝搬のモデルを a. 小惑星上で静止状態, b. ホップ運動, c. 地表との衝突によるバウンド運動する3つを想定した。図1のように、これらの3つのカルマンフィルタを並列に処理し、もっとも確からしい位置を求める推定器を構築することとした。既存研究では、電波遅延時間を用いた位置同定はローバ移動を考慮できていなかった。本提案手法により、移動を考慮した高精度な位置同定の実現を目指した。本成果はロボット学会学術講演会にて発表予定である。

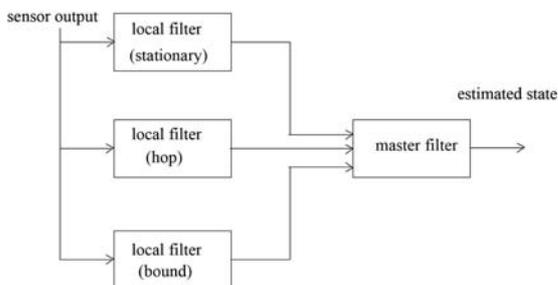


図1 複数のカルマンフィルタ並列処理による推定モデル

## 2. 環境推定を目的としたロボットの振る舞い形成原理の解明

目的達成行動と探索行動とをパラメータとする選択行動モデルを構築するために、ロボットの選択行動により得られる作業目的達成への価値、選択行動による環境推定精度の変化、ならびに行動コストを定量化する必要がある。これまでの研究で構築した環境推定手法[発表論文2]ならびにサブテーマ1で定量化した行動に関する不確かさに関して、推定精度と選択行動による不確かさの増加量、行動実行に必要なコストの関係性を解明する。解明した推定コストと利益との関係から、適当な重みづけによってロボットの適応的行動則を導出する。具体的には、環境の不確かさが大きい状況においては探索行動を選択し、環境の推定精度が比較的高い状況においてはロボットが目的地へ向かって移動をするような目的達成行動を選択するよう、不確かさの推定精度に依存した行動選択設計則を実現するような適切な重み付けモデルを構築する。

本サブテーマに関して、飛行ロボットを想定し、数値実験による姿勢決定精度の評価を行った。ジャイロにより加速度、磁気センサにより磁気方位角、GPS受信機により位置、気圧センサにより高度に関する計測値がそれぞれ得られるとした。従来、ジャイロと磁気センサを合わせた慣性計測装置（INS）と、GPSを融合したGPS-INS複合航法が自律飛行制御に利用されてきた。図2に示すように、GPS観測値の飛びはINSとの融合により解消できることが分かる。

しかし、GPS-INS複合航法はGPS観測値への依存度が高く、GPS衛星の隠蔽などによるGPS観測値の欠損に対してロボラストではない。気圧センサ（BARO）は高度方向に関して高い精度で計測値を得られるため、姿勢決定精度の向上、飛行安定性の向上が期待できる。そこで、GPS-INS-BARO複合航法システムを構築法を提案、より安定性の高い自律航法が実現できる

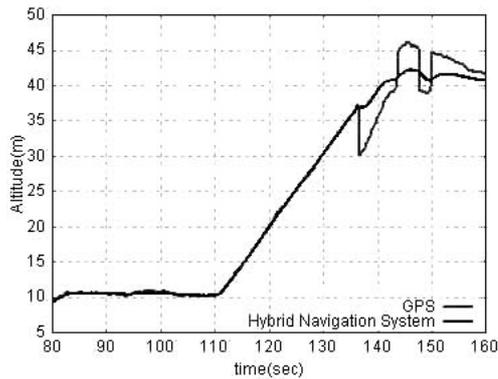


図2 GPS-INS 複合航法による推定精度向上の例：GPS 単独の出力値に飛びがあるのに対し、INS との複合により滑らかな推定値が得られていることが分かる

ことを示した。

### 3. 制御方策における合意形成を目的とした誘導における多目的関数化

未知環境下において、作業目的とロボットの実際の行動とが合致するには、サブテーマ2で明らかとした適応的振る舞いによる環境推定が、適切に作業目的に見合う不確かさの推定でなければならない。すなわち、ロボットの作業目的を把握しているオペレータと、直接環境と相互作用をもつロボットの間で何を目的とした行動か、という行動方策が一致していなければならない。一般に、オペレータの制御方策は、単一の基準ではなく複数の基準を持ち、これらの基準は多くの場合、互いに相反するため、オペレータはどの基準をどれほど優先するか、という選択を強いられる。このような意志決定過程は多目的評価関数の最適化過程としてモデル化でき、基準の優先関係を抽出することができる[発表論文3]。そこで、各基準の優先関係により制御方策を表し、この優先関係をロボットと共有する。このことにより、オペレータの制御方策における選好を反映した行動選択を実現する。

### 4. オペレータとロボットが相互干渉可能な制御システム原理の解明

制御方策が共有されていても、ロボットはオ

ペレータより詳細な情報を入手可能であるため、オペレータにとって未知の要因の影響によりその行動結果がオペレータの想定を超える可能性がある。このようなオペレータとロボット間の制御に関する齟齬を解消するには、ロボットが選択した行動による結果をオペレータが判断しやすい形で提示し、適切な介入を促すことが必要である。そこで、ロボットの選択行動による予測状態をオペレータに提示する。このことにより、オペレータは現在与えている行動方策の適切さを知ることができる。特に、環境の不確かさに起因した行動への影響がオペレータの許容範囲であるかを判断するために、予測に含まれる不確かさを提示することは重要である。このため、状態の予測値に加えて、予測に含まれる不確かさとして予測の分散をオペレータに提示することとする。サブテーマ3で明らかとしたオペレータとロボット間における制御方策の共有化のために定義した多目的関数を用いて、オペレータとロボット間で互いの目的間の選好関係を共有し、適切な介入により選好関係の変更を促すようなシステムを構築する。

#### [今後の研究の方向、課題]

サブテーマ3および4について、申請研究期間中には十分な研究成果が得られなかった。探索行動と目的達成行動とのトレードオフ関係が明確な課題設定として、サブテーマ2で取り組んだ飛行ロボットの経路設計が適切であると考える。これまで、飛行ロボットの搭載機器による高精度の位置・姿勢推定とその定量化に取り組んできた。現在、環境地図を作成するタスクを追加し、地図の精度と自己の位置・姿勢推定精度を同時に向上する問題に取り組んでいる。地図の精度と自己状態の精度とはトレードオフ関係にあり、両者の精度向上には、より多くの基準となる情報が必要である。たとえば、自己状態の算出に使うジャイロセンサはバイアス誤差があることが知られている。この誤差は時間

一定である。計測環境に動的障害物がほとんどなく、時間変化がないことを仮定すれば、長時間のジャイロセンサの計測値と広範囲の環境計測値からバイアス誤差を推定することができ、地図精度と自己状態の両方の推定精度を向上できる。同様のことが、ドリフト誤差や他のセンサ誤差に関しても成り立つ。

#### 参考文献

- [発表論文 1] 金田さやか, 中西弘明, 榎木哲夫, 吉光徹雄, 中谷一郎: 電波を用いた小天体探査ローバの位置同定, 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 9, pp. 1-8, 2009
- [発表論文 2] 金田さやか, 中西弘明, 榎木哲夫: 往復伝播時間測定による小天体の自転運動およびローバ位置の推定法, 計測自動制御学会論文集, Vol. 46, no. 5, pp. 296-305, 2010
- [発表論文 3] Sayaka Kanata, Hiroaki Nakanishi, Tetsuo Sawaragi: Accurate Localization for Space Rovers and Its Computational Reduction, Preprint of the 18th IFAC World Congress Milano, pp. 11233-11238, 2011

#### [成果の発表, 論文等]

- 1 Hiroaki Nakanishi, Sayaka Kanata and Tetsuo Sawaragi: GPS-INS-BARO Hybrid Navigation System Taking into Account Ground Effect for Autonomous Unmanned Helicopter, CD-ROM (Paper ID=31), 2012
- 2 岡本鷹文, 中西弘明, 金田さやか, 榎木哲夫, 堀口由貴男: 特異値分解による動作特徴抽出のための姿勢表現, 2P1-N06, 2012
- 3 金田さやか, 中西弘明, 榎木哲夫: 自律型無人ヘリコプタのための GPS-INS-BARO 複合航法, 第 30 回ロボット学会学術講演会論文集, RSJ2012 AC4F3-1, 2012
- 4 中西弘明, 金田さやか, 榎木哲夫: 自律型無人ヘリコプタによる高精度 3 次元地形計測のための姿勢推定第 55 回自動制御連合講演会講演論文集, pp. 761-765, 2012. 11. 17-18
- 5 岡本鷹文, 中西弘明, 金田さやか, 榎木哲夫, 堀口由貴男: 力学的パラメータ認知のための動作の環境適応成分の抽出, 第 55 回自動制御連合講演会講演論文集, pp. 551-556, 2012. 11. 17-18
- 6 角江政俊, 中西弘明, 金田さやか, 榎木哲夫: 3 次元地形情報収集のための一般化 Rodrigues parameters を用いた姿勢推定, 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 693-697, 2012. 12. 18-20

# 音声対話情報案内システムにおける機械学習理論に基づく 自律的精度向上の研究

Study on Autonomous Improvement Approaches based on Machine Learning for  
Speech-oriented Information Guidance Systems

2021008



研究代表者 奈良先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科

助教 川波 弘 道

共同研究者 奈良先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科

准教授 猿 渡 洋

## [研究の目的]

音声対話に基づく情報案内システムはユーザの負担が少ないことから、万人に優しい情報アクセス方法として期待されている。我々は用例ベースの実環境システムを開発し、大人と子供の発話に対してそれぞれ約 80%、60% の応答正解率を達成しているが、本研究では更なる応答性能の向上のため機械学習によるトピック分類を導入する。また、質問用例選択による応答生成は、一般に質問用例数の増加に伴い性能が向上するため、人手によるユーザ発話の書き起しをデータベースに追加することで精度向上を実現してきた。しかしながらこれは人手による開発コストが甚だしい。そこで性能改善に寄与するデータを自動選択する手法を研究する。

## [研究の内容, 成果]

我々はこれまで音声情報案内システムの研究開発に従事し、2002 年以来、生駒市のマスコットキャラクターをエージェントとした用例ベース対話システム「たけまるくん」を同市のコミュニティセンターに設置、常時誰でも使える実環境システムとして運用してきた (図 1)。

用例ベースの質問応答システムは、質問例とその応答のペアを用意しておき、ユーザ発話の

音声認識結果と最も類似した質問用例を選択、その対応する応答を出力する。本研究はシステム入力の音声認識結果を得た後の応答選択部に着目する (図 2)。

これまでは、実環境でのユーザ発話を書き起し、それを質問例に追加していくことで、ユーザが実際に行う質問内容や言い回しに頑健な応



図 1 音声情報案内システム「たけまるくん」(生駒市北コミュニティセンター「はばたき」に設置)

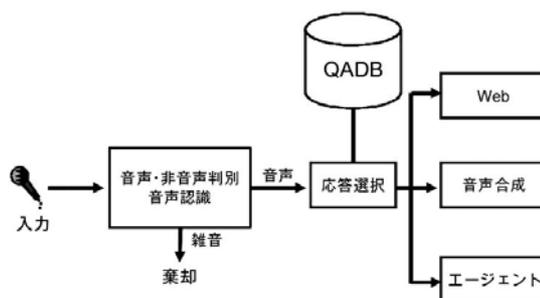


図 2 「たけまるくん」の処理の大まかな流れ (QADB は質問と応答のペアからなるデータベース)

答生成を実現してきた。現在のシステムでは、大人と子供別に用意した音声認識用モデルを用いて認識を行い、認識結果を参照する質問用例データベースも大人用と子供用とを別々に用意することで音響的・言語的に特徴の異なる幅広い年齢層に頑健なシステムを実現した。現行のシステムでは運用開始後の2年間で得られたユーザ発話の書き起しを用いた数万の質問用意例を用いて、約300種類の応答を行っている。

### ○ 現在のシステムの課題

本稿冒頭で述べたように収録されたユーザ発話を用いた応答性能を評価実験の結果から、現在のシステムの応答正解率（ユーザの質問総数に対して適切な応答を行った割合）は大人で約80%、子供では約60%である。ユーザはシステムが不適切な応答をした場合にはそれを察知して尋ね直すため、運用上の問題とはなっていないが、ユーザの負担軽減のために応答性能の更なる改善が必要である。本研究では、次の2つの観点で応答性能の改善に取り組んだ。

### ○ 研究内容

#### ① 機械学習理論に基づくトピック分類

ユーザ発話ともっとも似た質問用例の選択には類似度という尺度を用いているが、これには認識結果と質問用例とが共有する単語（実際には単語に準ずるより小さな単位の形態素）の数を、文全体の単語数で正規化した値を用いている。しかしながら応答内容に直接影響する単語も、「言い回し」の違いに相当する置き換え可能な単語も対等に評価している。単語の重要度を反映させる方法として人手でキーワードを設定し重要視することも考えられるが構築コストの増大になるばかりでなく、開発者の経験の依存するため客観的な性能評価が困難となる。そこで、単語の頻度ベクトルを特徴量とし、トピック分類規則を機械が自動的に生成する機械学習の手法を導入した。実際の「たけまるくん」の応答は前述のように約300種類あるが、

それぞれの応答に対応付けられた用例数にはばらつきがあり、学習データサイズも限定されるので、共通する話題（トピック）の応答文をまとめて27個のグループに分類した。トピックの例として「あいさつ」「館内施設案内」「生駒市紹介」「交通アクセス」「たけまるプロフィール」等を設定した。実際にシステムを運用する際はこれらのトピックに分類したのち、そのトピック内の質問用意例を用いて応答を行うことを想定しているが、ここではトピック分類性能の評価に限定する。主要な特徴量として単語の頻度ベクトル（BOW; Bag-of-Words）を用い、代表的な識別手法の分類性能を比較調査するとともに、応答性能の自律的改善の可能性を探るため半教師あり学習の有効性を調査した。

さらに、トピック分類の概念を拡大し、応答生成の前段で行われるシステム入力（つまり、雑音も含むすべてのシステム入力）に対してそれがシステムへの質問（有効発話）かそうでないか（無効入力）を分類する識別実験も行った。

#### ② 質問用例のための発話書き起しコスト削減

これまで質問用例の拡大は、すべてのシステム入力（あるいはその中から音響尤度により雑音と識別されたデータを除いたもの）に対して熟練したラベラーが聴取による書き起しを行い、システムへの有効な質問か判断し、対応する応答文のIDを付与して行っていた。これは人手がかかる高コストな作業である。そこで「いま書き起そうとしているユーザ発話は質問用例としてデータベースに追加することが性能向上に貢献するかどうか」という観点で選別する方法を研究する。例えば既存の用例と同一のものや著しく類似した質問は追加する必要がなく、また既存の用例と著しく異なる（類似度が低い）新奇な発話も、情報案内タスクから外れた発話や再現性の低い質問であると考えられる。それらをあらかじめ書き起しの対象とするデータから除外しておくことで書き起しコストの削減を目指す。本研究では既存質問用例との類似度、

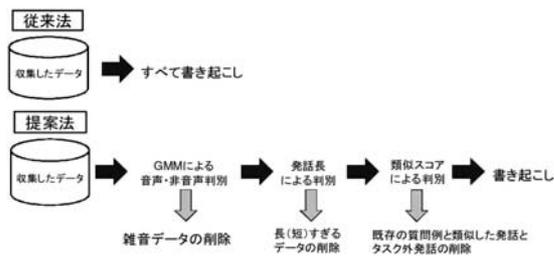


図3 応答性能向上に貢献する（書き起こし、追加することが有効な）データの選択のながれ

発話長についての閾値の区間設定、雑音と音声の音響モデルの尤度への重みづけを実験的に設定することで（図3）開発コストを削減する。

## ○ 本研究の成果

- ① 音声認識結果の BOW を特徴量とした機械学習によるトピック分類の有効性を確認、子供音声における半教師あり学習での分類性能の改善、および同手法による無効入力棄却性能の改善

一般にユーザ発話は 2~3 秒程度（1~10 単語程度）のものが大多数であり書き言葉からなるテキストコーパスを対象とした自然言語処理の手法がそのまま援用できるかどうかは不明であったが、後述の Stacked Generalization (SG) 法を適用した結果、27 トピック分類実験において大人発話の F 尺度（大きいほど高精度な分類がされている）は 95.1、子供で 89.2 に達した。（比較のための人手による書き起こしデータを学習に用いた識別では結果それぞれ 96.6、96.8。）実験では約 2 年分のデータの音声認識仮説の 1-Best を学習データとし、まず SVM（サポートベクターマシン）、pboost 法、最大エントロピー法のテキスト処理で使用される 3 手法の比較調査を行った。次にそれぞれの識別結果を用いて、2 段階目の識別を行う SG 法を導入することで更に高精度な識別ができることを確認した。3 手法を単独で用いた場合と SG 法を導入した場合との性能向上をまとめた論文は 2013 年 4 月の学術誌に掲載された [1]。

次にトピックラベルがまだ付与されていない大量のデータを活用する「半教師あり学習」による識別も検討した。人手でトピックラベルが

付与されたデータで学習した識別モデルを用いて未知のデータを識別し、ある条件を満たすとそのラベルを採用して識別モデルを再学習する。識別器として SVM を用いているためトランスダクティブ SVM と呼ばれる。最大 2 年 9 ヶ月分のラベルなしデータを用いた実験を行った。約 2 年間のラベル付きデータのみを用いて学習した SVM での分類性能の F 尺度は大人、子供でそれぞれ 93.0、83.5 であった。ラベルなしデータすべてを使用した場合、子供で 84.3 まで改善され教師ありデータのみを用いた学習を超える性能が得られることがわかった。ただし大人の場合は 92.8 程度に達したところで改善が頭打ちとなっており、教師ありデータのみを用いた学習での性能を超えなかった。子供データは全体に大人の倍以上の発話数があるため、発話の多様性ととも教師あり学習のデータ数とも関係していると考えられる。

最後に、BOW を用いた SVM による無効入力棄却実験を行った結果、特徴量として BOW のみを用いた場合で F 尺度が 89.1、さらに音声・雑音の音響尤度、S/N 比、発話長を加えた場合には 86.6 まで改善された。従来の音響尤度のみを用いた識別手法では 82.2 であったことから大幅な改善が見られ、その有効性を示すことができた [2]。

- ② 適切な閾値設定がなされれば、開発データの過半数を除去して書き起こしコストを削減しても応答性能の有意な低下は起こらない。（学習データ・開発データにそれぞれ 1 年分（1~2 万発話）程度のデータが利用できる場合）

既存質問用例との類似度、発話長、音声と雑音の音響モデルの尤度を用いて、新規のデータを書き起こすかどうか判定する。すべての開発データを書き起こしたときの応答正解率を維持したまま書き起こしデータ量をどの程度削減することができるか調査した。雑音入力も含め「たけまるくん」で収録した 22 ヶ月間のデータのうち、11 ヶ月分を初期質問用例および雑音・音声モデル作成の学習データとした。1 ヶ月分を評

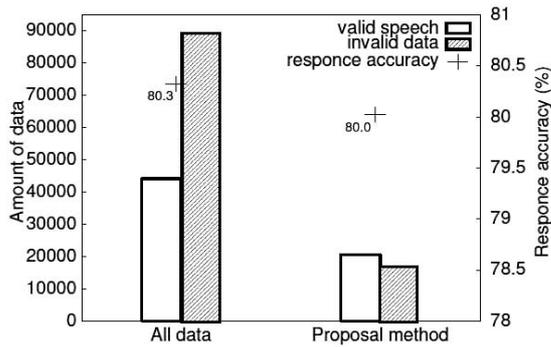


図4 開発データをすべて書き起した場合(左)と提案手法でデータを選択した場合(右)のデータ(棒の長さ)と応答正解率(+記号)の比較。白い棒は有効発話、灰色の棒は無効入力の数を示す。

価データ、10ヶ月分を開発データとした。大人発話と雑音のみを用いて実験を行った。開発データは16,316個である。この条件では0.3%以内の応答正解率の差は統計的に有意と言えないことから、その範囲内での応答正解率低下は許容するという条件で、いかに書き起しデータ量を削減できるかを調査した。発話時間と類似度スコアの上限と下限、雑音と音声モデルの尤度の重みづけを様々に変えて調査した結果、開発データの70%を除去しても性能が低下しないことが分かった(図4)。

#### [今後の研究の方向, 課題]

音声情報案内システムの応答性能改善のために、単語ベクトルを特徴量とした機械学習によるトピック分類と既存用例との類似度に基づく不要データ検出の有効性を示した。これらはいずれも未整理データを活用したものであり、トピック分類のみでなく質問用例拡張も半教師あ

り学習による自律的改良が期待できる。データ爆発時代～ビッグデータへの関心が高まっている現在、大規模な未ラベルコーパスをいかに活用するかが問われる。今後は自律的改良機能を実環境システムに実装することを目指したい。

#### [成果の発表, 論文等]

- [1] R. Torres, et al.: Comparison of Method for Topic Classification of Spoken Inquiries, IPSJ Journal, vol. 54, no. 2, pp. 157-167, 2013.
- [2] 真嶋温佳他: 音声情報案内システムにおける Bag-of-Words を用いた無効入力の棄却, 情報処理学会論文誌, vol. 54, pp. 443-451, no. 2, 2013.
- [3] H. Majima, et al.: Spoken Inquiry Discrimination using Bag-of-Words for Speech-Oriented Guidance System, INTERSPEECH, 2012.
- [4] R. Torres, et al.: Topic Classification of Spoken Inquiries using Transductive Support Vector Machine, IWSDS, pp. 231-236, 2012.
- [5] H. Majima, et al.: Evaluation of Invalid Input Discrimination using BOW for Speech-oriented Guidance System, IWSDS, pp. 339-347, 2012.
- [6] 真嶋温佳他: 音声情報案内システムにおける Bag-of-Words を特徴量とした無効入力の棄却, 情報処理学会研究報告, Vol. 2012-SLP-92, No. 7, pp. 1-6, 2012.
- [7] 真嶋温佳他: 音声情報システムにおける最大エントロピー法を用いた無効入力棄却の評価, 音響学会講演論文集, 3-1-8, pp. 113-116, 2012.
- [8] トーレス ラファエル: Semi-Supervised Learning Algorithms for Topic Classification using Maximum Entropy and Transductive SVM, 音響学会講演論文集, 3-P-34, pp. 209-302, 2012.
- [9] 真嶋温佳: 音声情報案内システムにおける Bag-of-Words を用いた無効入力棄却モデルの可搬性の評価, 音響学会講演論文集, 3-9-5, pp. 99-102, 2013.

## 多重散乱波を用いた超波長分解能 誘電体内部 UWB レーダセンサの研究

Super-resolution UWB radar sensor for dielectric medium by using multiple scattering signal

2021009



研究代表者 電気通信大学

助教 木寺正平

共同研究者 電気通信大学

教授 桐本哲郎

### [研究の目的]

本研究の目的は、超広帯域 (UWB: Ultra Wideband: 500 MHz 以上の周波数帯域) 電磁波を用いた、波長限界を超える高分解能内部レーダ技術の開発である。UWB レーダ技術は誘電体内部透過性に優れるとともに、高い測距性能 (数 mm 級) を有する。また同レーダは、従来の超音波・X 線・MR (磁気共鳴) 等の各種内部計測技術における問題点 (超音波: 高周波減衰による分解能の制限, X 線: 被験者の被曝等, MR: 装置の大型化・高コスト) を解決する技術として注目を集めている。同応用範囲は「乳癌検知等の非侵襲生体内部モニタリング」・「壁・道路内部の破損検知等の各種非破壊計測」など多岐に亘り、社会的需要が極めて高い。本研究では申請者が独自に提案してきた「周波数干渉計に基づく超波長分解能画像化 (RPM: Range Points Migration) 法」と「多重散乱波を用いた画像領域拡大原理」(何れも空間計測を対象) を誘電体内部イメージングへ拡張し、「1/10 波長分解能」・「不可視領域画像化」を実現する内部レーダセンサのための要素技術を開発する。

### ① マルチスタティックレーダによる高分解能内部イメージング法の開発

平成 23 年度後半に、拡張 RPM 法を用いた誘電体内部イメージング法を確立した。同手法は、高速かつ高精度に内部目標境界を推定するが、誘電体形状及び内部形状によっては、再現不可能な領域 (影領域) が生じる問題がある。同問題を改善するため、マルチスタティックレーダ (多点送信多点受信モデル) を導入した (図 1 参照)。

従来法では、一点送受信のモノスタティックを想定したが、同モデルでは、瞬間的な開口面積が小さいため、影領域の問題を回避できない。一方、マルチスタティックモデルでは、瞬間的な開口面積が大きくなるため、特に目標を包囲するようにアレイアンテナを配置する場合、同画像化領域を著しく拡大させることが可能であ

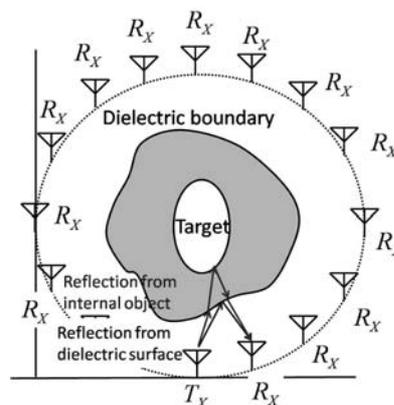


図 1 マルチスタティック観測モデル

る。このため、本課題ではまずモノスタティック型内部RPMをマルチスタティック型内部RPMへ拡張し、影領域の問題を改善させることを検討した。

拡張RPM法では、誘電体境界での入射点と出射点を推定する必要がある。モノスタティックレーダでの同点対は同じ位置をとるが、マルチスタティック（送受信素子位置が異なる）の場合では、入射点と出射点が異なる。これに対応するために、RPM法の特徴である法線ベクトルを用いて幾何光学的なアプローチにより、所望の入射点と出射点を推定するため定式化を実施した。推定された入射点、出射点により、各アンテナと距離によって決定される目標候補点の軌跡の交点の集積度を評価することで、モノスタティックモデルと同様に内部ターゲット点を再現することが可能である。

図2に数値計算による誘電体境界及び内部目標境界推定結果を示す。信号対雑音比(S/N)は20dBである。図2左にモノスタティックモデル（従来法）、右にマルチスタティックモデル（提案法）による内部推定像の結果を示す。は再現できなかった内部目標境界も再現することが確認できる。

この時の内部目標の位置推定誤差のRMSは、それぞれ従来法が $5.77 \times 10^{-2} \lambda$ 、提案法が $3.20 \times 10^{-2} \lambda$ である。内部目標境界再現率は従来法が58%、提案法が98%である。同図から確認できる通り、提案法により従来法では再現できなかった領域が推定可能になることが確認できる。

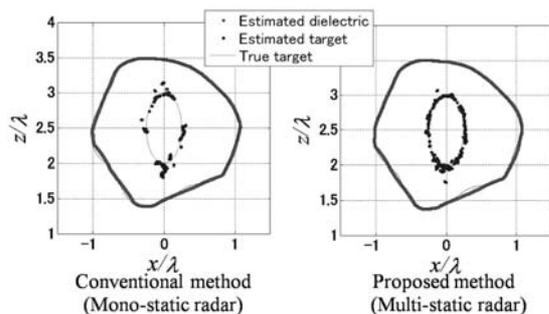


図2 左 従来法による内部画像推定像  
右 提案法による内部画像推定像

同成果は既に電子情報通信学会誌のLetterとして採録が確定しており（論文リストNo.1）、同成果を2件の国際会議で発表済みである。またそのうち一件はStudent Paper Contest及びBest Paper AwardのFinalist（8名が選出）に選出されており、同分野での評価も高いことを示している。

## ② 高精度誘電率推定法の3次元化と実験的検討

本年度では、透過伝搬遅延と散乱波形補正を用いた立体誘電体目標に対する高精度誘電率推定法を提案した。従来の誘電率推定法として領域積分方程式の数値解析に基づく手法があるが、膨大な計算量を必要とし、現実的な応用に適さない。

これに対し同手法は高速かつ高精度に誘電率を推定可能であるため、3次元化にも耐えうると予測する。図3に3次元化の観測モデルを与える送受信素子と受信素子の2素子を用いる。送受信素子では誘電体境界と内部目標からの反射波が得られるために、同データを用いて誘電体境界推定と内部目標境界推定を行う。受信素子は、送受信素子の位置に対して、誘電体ターゲットを挟みこむ位置に設置するため、透過波が観測される。同透過波により、比誘電率を推定する。但し、受信信号には透過波と誘電体境

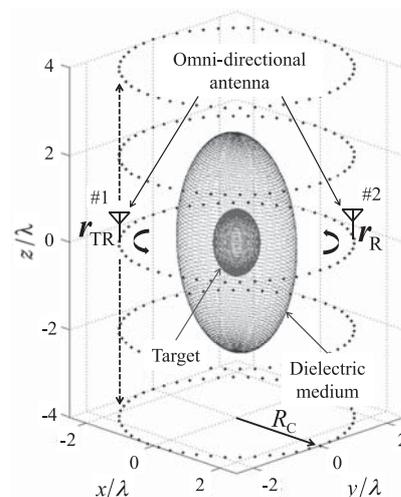


図3 誘電率推定3次元モデル

界を回り込んで到達する直接波が混在している。素子と目標の位置関係によっては、有意な透過波が得られない状況も想定され、同状況下の観測信号は誘電率推定データから除去する必要がある。目標形状等の先見情報なしに直接波と透過波の優位性を定量評価するために、同手法では第一フレネルゾーンを利用した、識別法を導入した。第一フレネルゾーンとは、送受信素子の伝搬において支配的な空間を示すものであり、同領域に誘電体目標がどの程度占めているかを定量評価することにより、直接波の到達割合を定量的に評価することが出来る。

同識別の後、本手法では、誘電体内部の比誘電率を推定するために、まず受信信号の第一到来波に対応する距離点群を抽出し、RPM法を適用することで誘電体境界点群及び同法線ベクトルを得る。

次に、透過伝搬パスに最も適する、誘電体境界上の入射点及び出射点の組合せを決定し、観測される透過波の距離情報から誘電率の伝搬遅延を考慮して誘電率を推定する。同手順を各アンテナ位置で行い、推定誘電率の最頻値を初期推定誘電率とする。

一方、一般に誘電体の大きさがUWB信号の中心波長オーダ(数十cm)である場合、各波長でのフレネルゾーンの違いから、同透過波は周波数特性を有する。このため、送信波形に対して、受信波形が歪み、Wienerフィルタ等を用いた距離推定では、波形歪みに対する距離誤差が生じる。このため、比誘電率推定精度にも大きな影響を与える。これを解決するため、本手法では更に、初期推定誘電率と推定誘電体境界を用いてFDTD法により受信データを再生成し、同波形との相関処理によって同距離誤差を補正し、同補正量より誘電率を再計算する。

図4に波形補正前後の誘電率推定結果(ヒストグラム)を示す。FDTD法での波形推定により、比誘電率推定の相対誤差は、約5%から0.5%にまで改善し、極めて高精度な誘電率推定が達成されたことが確認できる。同成果は

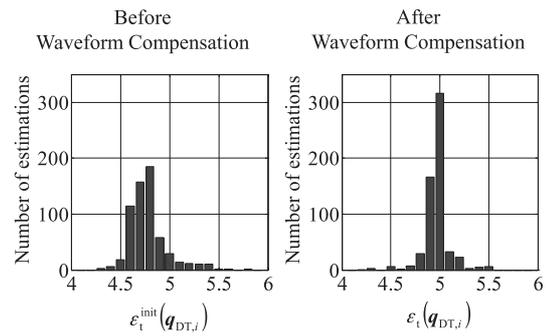


図4 誘電率推定結果  
左(波形補正なし) 右(波形補正あり)

既にIEICEで論文一件が採録され、2件国際会議で発表しており、高い評価を得ている。

### ③ 内部目標反射波と複数観測軌道を利用した誘電率推定法の開発

本課題では、特にアレイ素子(観測領域)が目標を完全に包括できない状況を想定する。これは乳がん検知(乳房の反対側からの計測は困難)や道路内部の亀裂探知(道路上側からのみ観測可能)等で想定される現実的な問題設定である。上記の状況下では、観測領域が制限されるため、内部目標画像化はより困難な問題となる。特に誘電率推定では、各素子で有用な透過波が得られないため、伝搬遅延推定に基づくアプローチが適用できない。これに対し、観測軌道(またはアレイ配置)を複数回変えた観測により、誘電率を同時に推定する手法を開発する。一般的に、目標が点であれば、観測素子の位置や配置を変えることで、誘電率の推定が容易に可能である(散乱中心位置は素子位置に依存せず、一定であるため)。しかし、通常のターゲットモデルは点ではなく、連続的な境界面を有する。連続的な境界面を有する目標の場合、散乱中心位置は素子位置に依存して変化するため、先述の空間干渉計を原理とした比誘電率推定は困難となる。

同問題を解決するため、観測軌道を変えた複数回観測による比誘電率推定法を検討した。

幾何光学近似においては、正しい伝搬経路上に複数配置されたアンテナからは同じ位置の散

乱中心からの反射波が返ってくると予測される。同予測に基づき、1回目と2回目の計測により得られた、遅延時間を比較することにより、誘電率を推定することができる。これは与えられた観測距離点に対し、入射誘電体境界点と内部目標境界の散乱中心が全て一対一対応するために、推定可能となる。既に数値計算により、同手法の有効性を確認しており、雑音環境下でも高精度に誘電率を推定することが可能であることを示している。

本成果は国際会議で発表予定である。RPM法の原理を融合させた本アプローチは、従来の誘電率推定とは全く異なった原理に基づき、その独創性は高い。また、観測側は、誘電体境界を取り囲むように素子を配置する必要がないため、同誘電率推定法の応用範囲を飛躍的に高める可能性を有する。

#### [今後の研究の方向, 課題]

今後は各課題においての実験的検討を実施する予定である。既に基本的な実験環境を構築している。実験モデルでは、円柱コンクリート内部に円柱アルミ目標を埋め込み、誘電率推定と内部目標イメージングの評価を実施する。同実験結果により提案技術の基本特性を評価する。また、不均質・分散性媒質に対応するため、領域積分方程式を用いた逆問題解析法を導入し、上記手法と融合させその相乗効果を創出することによって、革新的なUWB内部レーダセンサの開発を促進させる。特に「乳癌検知等の非侵

襲生体内部計測」及び「壁・道路・原子炉内部の非破壊計測」を想定した、より現実的な観測モデルに同手法を拡張し、各種の改良を加えることで、実用化に向けて本研究開発を加速させる。

#### [成果の発表, 論文等]

- [1] 学術論文 R. Souma, S. Kidera, T. Kirimoto, "Accurate Permittivity Estimation Method with Iterative Waveform Correction for UWB Internal Imaging Radar", IEICE Trans. Electronics, vol. E96-C, 2013 (in press).
- [2] 学術論文 Y. Niwa, S. Kidera, T. Kirimoto, "Image Expansion Approach for Target Buried in Dielectric Medium with Extended RPM to Multi-static UWB Radar", IEICE Trans. Electronics, vol. E96-B, No. 1, pp. 119-123, Jan., 2013.
- [3] 国際会議論文 Y. Niwa, S. Kidera, T. Kirimoto, "Accurate Image Expansion Method for Target Buried in Dielectric Medium Using Multi-static UWB Radar," 2012 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2012), Nagoya, Japan, Oct, 2012.
- [4] 国際会議論文 R. Souma, S. Kidera and T. Kirimoto, "Accurate Permittivity Estimation Algorithm by Compensating Waveform Deformation for UWB Internal Imaging Radar", 2012 IEEE International Conference on Ultra-Wideband ICUWB 2012, Syracuse, N. Y., U. S. A, 17-20 Sep., 2012.
- [5] 国内学会 相馬竜之介, 木寺正平, 桐本哲郎, "立体誘電媒質に対する再帰的散乱波形歪み補正を用いた高精度誘電率推定法" 電子情報通信学会 総合大会, C-1-28, 岐阜大学, Mar. 2013.
- [6] 国内学会 丹羽祥尋, 木寺正平, 桐本哲郎, "マルチスタティック UWB レーダを用いた誘電体内部画像化領域拡大法" 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, C-1-13, 富山大学, Sep. 2012.

# 視覚障害をもつ児童生徒のための移動ロボットを用いた プログラミング教育

Mobile Robot Programming Education for visually impaired students

2021010



研究代表者	福岡工業大学	教授	木室 義彦
共同研究者	福岡工業大学	准教授	山口 明宏
共同研究者	福岡工業大学	助教	家永 貴史

## [研究の目的]

急速に情報化社会が進みつつある現在、晴眼者だけでなく、視覚障害者の日常生活にも、PCやインターネットが浸透してきた。身の回りの様々な機器にもコンピュータが搭載されている。コンピュータを過信することなく、その動作原理を理解することが市民の常識の一つとなりつつある。このコンピュータの動作原理を理解するには、プログラミング学習が効果的であり、初学者でも扱えるグラフィカルな教材が作られている。しかし、視覚障害のある児童生徒にとっては、グラフィカルな環境はバリアそのものである。

視覚障害者に対するプログラミング教育の実践例は、いくつか報告されている。しかし、テキストプログラミングが障壁となり、プログラミングの楽しさを伝えるまでに至っていない。一方、国内では、各種ロボコンを始めとして、ロボットを題材とするものづくり教育が盛んに行なわれている。この教育効果が、ロボットの動きの視覚効果によるものなのか、ロボットの操作性によるものかは明らかではない。この視覚情報と操作性に係る部分を明らかにすることで、視覚障害を持つ児童生徒が、コンピュータを楽しみながら学習するための糸口となる(図

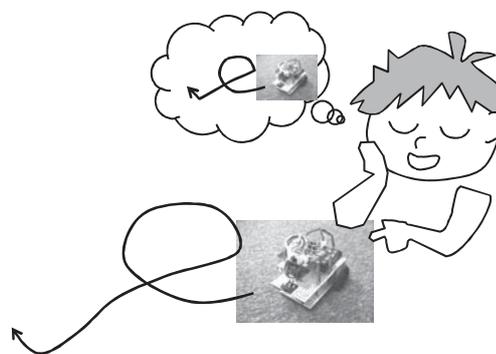


図1 移動ロボットプログラミング

1)。本研究では、視覚障害者でも学習可能なプログラミング教材およびカリキュラムの研究を行う。

## [研究の内容、成果]

本研究では、まず、晴眼の児童生徒の利用を前提とした移動ロボット教材を視覚障害のある児童生徒に利用してもらうことで、その教育効果が失われないことを確認した上で、その教材における課題を抽出した。次に、これらの課題を克服する教材とカリキュラムの設計を行なうこととした。開発した教材の有効性を確認するためには、実際に視覚障害のある児童生徒に使用してもらう必要がある。今回の研究では、盲学校教諭の指導を受け、実験授業のためのシラ

バスの設計およびアンケート調査の設計までを行なった。

### 移動ロボットプログラミング教材の課題抽出

図2は、我々が2005年から初等中等教育における技術教育教材として実験授業に用いてきた自律型2輪駆動の移動ロボットである。プログラム入力用のキー33個をロボット背面に有しており、このロボットのファームウェアを再設計することで、逐次処理、反復処理、条件分岐処理を簡単に実行、学習できるようにしている。

以上の教材を用い、福岡県立福岡視覚特別支援学校にて実施した実験授業の結果を課題抽出に利用した。対象者は、九州地域の全盲または弱視の中学生であり、13名を2クラスに分け、それぞれ90分の授業を行ったものである。実験に用いたロボットは、視覚障害に対する配慮は一切なされていない。ボタン配置は、講師の口頭の説明を通じて暗記することになるが、すべての生徒が、晴眼児童生徒と同様にプログラミングの課題をクリアし、このロボットプログラミング授業を楽しいと回答していた。この実験授業において、参加者の同意を得て、教材に関するアンケート調査を実施した[2]。なお、この実験授業に用いたシラバスや教育効果については文献[1]を参考にされたい。

図3は、アンケート項目の中の5つの結果を示している。それぞれ、5段階順位尺度の主観



図2 キーボード一体型移動ロボット

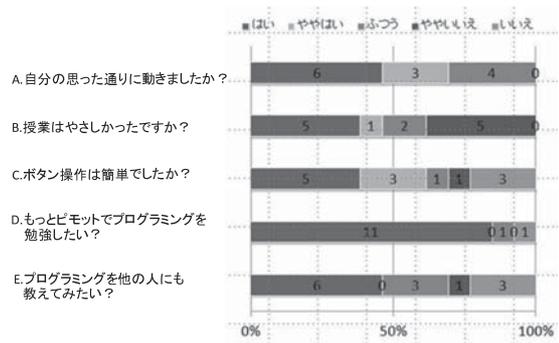


図3 アンケート集計結果 (部分)

表1 スピアマンの検定結果

設問項目の組	相関 $\rho$	$\rho = 1 - \frac{6\sum D^2}{N^3 - N}$
B C	0.724	
A D	0.694	D: 対応する X と Y の順位差
D E	0.496	N: 値のペアの数

評価で回答してもらった。

それぞれのアンケート項目は、ロボットの操作性と授業の主観的な難易度、自分の知識の習得とこれを他の人に教えたくなるかに着目したものである。このアンケート項目間の関連を調べるため、スピアマンの順位相関係数を求めた(表1)。この結果、ボタンの配置や操作性が授業の難易度と関係していること(B-C間)、ロボットの操作精度が学習者の意欲と関係していること(A-D間)などが分かった。また、プログラミングへの学習意欲が、学習した内容を他の生徒に伝えたいという意欲につながることも確認できた(D-E間)。また、アンケートの自由回答としても、移動ロボットプログラミングは難しいけど面白い、楽しいという感想と同時に、ボタン配置の暗記が難しい、入力ボタンの読み上げ機能が必要といった改善意見があった。これらの結果から、移動ロボットプログラミングの特徴を活かしつつ、晴眼者も視覚障害者も同じように簡単に扱えるプログラミング教材が開発可能と考えた。

### 新しい教材とプログラミング環境

前述の通り、実験授業を実施したところ、ロボットプログラミングの実施可能性と教育効果

が確認されたものの、課題も明らかになった。この課題は、A:ハードウェア(HW)、B:ソフトウェア(SW)、C:ユーザインタフェース(UI)の3つの要件に整理できた。

まず、A:HWは、学習者の興味をひくだけでなく、教材の入手性が課題であった。実験授業のみを目的とした特殊な教材ではなく、必要な時に誰もが簡単に入手できるものが望まれた。なお、これまで実験に用いてきたロボット玩具(図2)は、生産終了している。

B:SWは、対象HWに依存しない設計である。一度習得したプログラミングI/Fが、他のHWにも適用可能な方が望ましい。教育支援に有効な柔軟性のある教育コンテンツが求められる。

C:UIは、プログラムコード入力の手軽さである。初心者のがほとんどがタッチタイプが困難なように、できるだけ簡単な入力環境が求められる。現在、新しい様々な入力I/Fが利用可能になってきているが、現状のコミュニケーションツールを考慮すると、PCや携帯電話に共通するI/Fを利用した方が簡便と我々は予想した。また、視覚障害に対応し、音声読み上げが求められている。プログラムの内容を音声で読み上げることで学習者の操作ミスを減らす効果につながる。

#### 【HW:市販ロボット玩具の利用】

プログラミング対象として、市販のロボット玩具 KIROBO (MR-9132 イーケイジャパン社)を改造することとした。KIROBOは、これまで我々が使用してきた移動ロボットと同じ、自律型2輪駆動ロボットである。2つの光センサ、2つのタッチセンサの他に、プザーを搭載している。2種類のセンサはそれぞれ、前方左右と下部に再配置できる。以前のロボットと異なる点は、専用キーボードを有していないこと、マイクロプロセッサのファームウェア(FW)を新たに開発する必要があることであった。そこで、メーカーとも協議した結果、ファームウェア開発をオープンソースハードウェアの

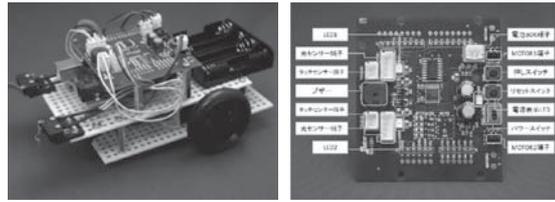


図4 KIROBO改とモータドライバシールド基板

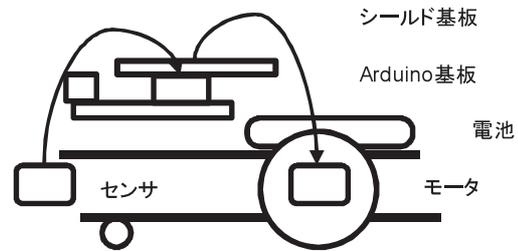


図5 接続構成

Arduinoで行なうこととし、KIROBOに搭載されているモータドライバ基板をArduino専用のモータドライバシールドに変更し、操作I/Fのみ、別途改良できるようにした(図4, 5)。

#### 【SW:移動ロボットの命令セット】

新しいプログラミング教材 KIROBO+Arduinoでは、少数のキーからなるPCのテンキーパッドでプログラミングする環境を構築した(表2)。

基本命令は、移動ロボットの移動方向および音に関するものである。移動方向と移動量の2語命令であるが、音に関してのみ、命令名と音色、鳴動時間の3語となっている。数字は、すべて0から9の1桁とし、文末の改行キーを不要とした。

表2 移動ロボット KIROBO (改) の命令セット

命令コード			説明
1語目	2語目	3語目	
前進 (FW)	数字	—	単位距離前進
後退 (BK)	数字	—	単位距離後退
左回転 (LR)	数字	—	4=90度
右回転 (RR)	数字	—	4=90度
音 (BEEP)	数字	数字	音種及び回数
FOR	数字	—	0= 無限回
NEXT	—	—	
IF	数字	数字	センサ種と on/off
ENDIF	—	—	

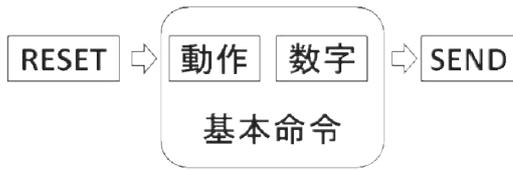


図6 移動ロボットの命令

制御命令は、繰り返し処理と条件分岐である。どちらもブロック構造とし、繰り返しは [FOR] と [NEXT] に囲まれた基本命令列を [FOR] に続く数字の部分だけ繰り返す。条件分岐の条件文はセンサ番号およびセンサのオン・オフの2語で表すことにしている。ロボットは、内部のプログラムをリセットし、その後、基本命令列を入力し、最後に実行キーを押下することで、動作する (図6)。

**[UI: テンキーパッドを利用した操作 I/F]**

図7は、テンキーパッド配置と移動ロボットの操作命令配置を示している。視覚障害者でも直感的に分かりやすいように、テンキーの [5] キーの凸部を中心として、上に前進 (FW)、下に後退 (BK)、左に左回転 (LR)、右に右回転 (RR)、と覚えやすく設定してある。なお、このキー配置は、後述の XML ファイルで自由に変更可能である。

旧教材での実験授業で要望の多かったキーの読み上げ機能も操作 I/F として実装した。TTS (Text To Speech) ソフトウェアとしては、Microsoft 社の提供する音声合成ソフトを利用している。操作 I/F の読み上げるテキストは、可能な限り、XML ファイルで設定を行えるようにした。これにより、視覚障害のある

Nun Lock	/	*	-				TTS
7	8	9	+	FOR	FW	NEXT	
4	5	6		LR	BEEP	RR	
1	2	3	Enter	IF	BK	ENDIF	SEND
0						RESET	

図7 テンキーパッドとロボット操作命令配置

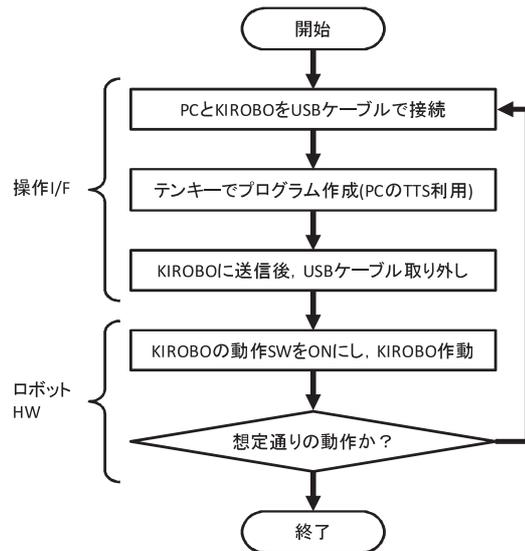


図8 操作手順

児童生徒にとって聴き取りやすく、誤聴の少ないテキスト読み上げとすることができる。また、移動ロボットに限定せず、さまざまなプログラミングキー配置が可能となる。もちろん、TTS の音声データが準備できれば、日本語を母語としない海外の児童生徒も利用可能となる。図8に、移動ロボットプログラミングの操作手順を示す。

**点字アンケート作成と模擬実験**

以上の教材を用いた授業カリキュラムを作成し、模擬実験を行なった。なお、このカリキュラムは、盲学校および普通校教諭と協力して設計したロボット本体のみで操作するカリキュラムに準拠している。アイマスクを着用した晴眼大学生を被験者とし、視覚障害児を対象としたカリキュラムや点字の説明書により授業を行ない、開発教材の課題抽出を行なった。機材の安全性やコマンド名の誤聴といった課題については、対応可能であることを確認している。以上の結果については、文献 [4] にて発表を行なった。

**[今後の研究の方向, 課題]**

試作した移動ロボット教材とシラバスに関し

ては、2013年8月と11月に、福岡視覚特別支援学校と北九州視覚特別支援学校にて実験授業を実施する。これにより教材の改良を進めると共に、視覚障害のある児童生徒が、プログラミングの先生役を務めるためには、どのような課題と効果が期待されるのか調査していく予定である。なお、ロボット玩具のベース機材は、メーカーの協力により一般発売が開始されたため(SU-1201 2012/11～)、教材の入手性については、大きく前進した [3]。

[成果の発表, 論文等]

- [1] 木室, 寺岡, 家永, 八木, 沖本, “視覚障害のある中高生のためのロボットを用いたプログラミング教育”, 信学論 D, Vol. J95-D, No. 4, pp.940-947, 2012.
- [2] 江頭, 家永, 木室, “視覚障害をもつ児童生徒のための移動ロボットプログラミング教材”, 計測自動制御学会九州支部大会, pp.225-226, 2012.
- [3] Arduino 専用モータードライバーシールド [SU-1201]  
<http://www.elekit.co.jp/product/53552d31323031>
- [4] 江頭, 井出, 寺岡, 家永, 山口, 木室, “視覚障害をもつ児童生徒のための携帯電話 I/F を想定した移動ロボットプログラミング教材”, 電子情報通信学会, 信学技報 WIT2013, Vol. 68, 2013.

# 人と機器の共創で高い安全性を実現する バイタルデータ自動入力システム

Automatic Vital Data Recording System to Support Clinical Safety  
under Harmonic Collaboration between Human and Machine

2021011



研究代表者

京都大学 医学研究科

准教授

黒田 知宏

## [研究の目的]

一般に「電子カルテ」と呼ばれる病院情報システム (Hospital Information System : HIS) は、病院業務全体を支える業務支援システムとして発達し、診療録を電子的に保存する機能を備えた情報システムである。近年の HIS の急速な発達と導入によって、いまや HIS なしでの診療業務遂行はほとんど考えられない。

HIS は会計・物流管理等の診療補助業務を効率化し、医療現場の安全性を向上させたが、管理に必要な情報入力業務を診療の前線に転嫁し、却って臨床現場の効率を悪化させたとの批判もある。加えて、臨床現場での HIS への依存度が高くなるにつれて、情報入力のエラーの重大性も高くなりつつある。例えば、体重の誤入力は抗がん剤の過量・過少投与を招き、場合によっては死すらもたらしかねない。

本研究では、病棟でのバイタル情報記録という、看護師の標準業務時間の約 20% を占める最も基本的な臨床情報収集業務を対象に、情報システムと現実世界の界面における情報授受のあり方を整理し、情報の信頼性を人間と機械に共有させて、両社の関係を「もたれ合いの関係」から「助け合いの関係」へと変えることで、IT による臨床業務のさらなる効率化と安全性の向上を目指した。

## [研究の内容, 成果]

### 1. システム設計

近年の医療機器のほとんどは電子機器である。現在の臨床現場では、電子機器によって生み出されたデジタル情報を人手というアナログチャンネルを介して HIS というデジタル情報環境に取り込んでいる。AD/DA 変換による作業負荷と情報劣化を排除し、効率と安全性を向上するためには、発生源「で」情報を入力するのではなく、発生源「が」直接情報を入力する環境を実現する必要がある。HIS の導入された病院は一台の巨大な計算機のようなものである。したがって、医療機器を丁度計算機の USB デバイスのように直接接続すれば、情報を直接導入することが出来る。

HIS への情報取得では、取得情報を患者へ紐づける方法の確立が重要である。患者 ID を取得するためのバーコードリーダを備えた医療機器も近年上市されているが、全ての医療機器に ID 取得機構を持たせることは容易ではない。本研究では、有るベッドサイドで行われるのはそのベッドに入院している患者への診療行為に他ならないことに注目し、デバイスの位置情報を用いて紐づけるべき患者等の付加的な情報を得られるシステムを構築することとした。

図 1 にシステム構成を示す。データ計測には、オムロンヘルスケア製 HBP-1600 を利用した。

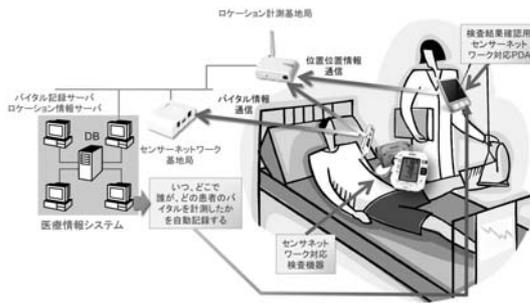


図1 システム構成

本システムは、血圧、脈拍、体温、血中酸素飽和度を、サーバを通じて電子カルテに自動送信する。一方、位置計測には、申請者らが開発した、屋内用位置計測システム (Real-Time Location System: RTLS) BTID を用いた。BTID は、Bluetooth の inquiry フェーズの通信を利用し、収集信号受信強度 (Received Signal Strength Indication: RSSI) を利用して、最も近傍にある基地局を確率的に推定する。全ベッドに基地局を設置することで、計測情報を紐づけるべき患者を推定する。最後に、ユーザは推定結果を PDA 装置等で確認し、電子カルテへの保存を確定する。この際、位置推定の尤度に応じて情報提示を行うことで、システムの「自信」をユーザと共有し、ユーザの確認行動を促すことを目指す。

## 2. 基礎実験

### 2.1. 模擬病棟環境での評価試験

京大病院透析室のベッドを利用し、図2のような模擬病棟環境を構築し、京大病院看護師を被験者として、提案システムの評価実験を行った。模擬病棟環境は、通常病棟の総室よりベッド間隔が狭いため、より位置推定エラーの起こる可能性が高くなる。

評価の結果、位置計測推定誤りが 12.6% 発生し、被験者はその内の半数程度を見逃した。テスト後のインタビューでは「システムの出力を信じ切っていた」との発言があり、システム出力を適切に調整しなければ安全性の担保は困難であることが明らかになった。

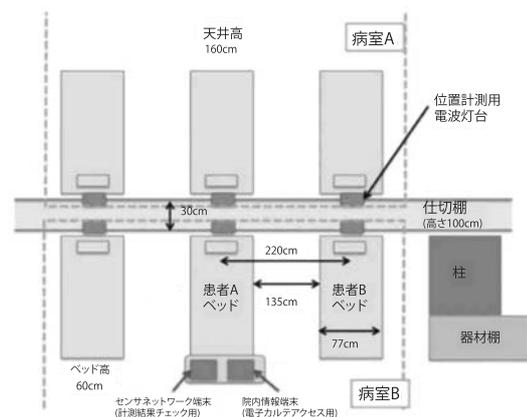


図2 模擬病棟環境の見取り図

### 2.2. 臨床現場での評価試験

病院情報環境に、バイタルデータ自動入力システムを導入し、導入効果について検証を行った。実際の診療現場への導入であることから、安全を考慮し、実験的要素の強い位置計測システムを用いた患者紐付け機能は用いず、患者紐付けについてはバーコードリーダ装置を利用することとした。図3に導入システムの構成を示す。

看護師は、既に京大病院に導入されている Bluetooth バーコードリーダを用いて患者リストバンドのバーコードと生体信号計測装置に貼り付けたバーコードを読み取り、患者と計測装置の紐付けを行う。生体計測装置で計測された情報は、紐付け情報に基づいて自動的に電子カルテに記録される。なお、バーコードリーダは京大病院に導入されている BTID 環境を用いて位置計測可能なことから、生体信号計測時の

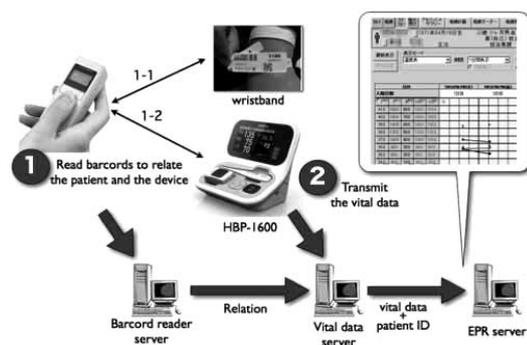


図3 導入システム構成

位置情報を取得する。

本研究では、機器導入の前後で他計式タイムスタディを実施し、看護師の業務時間がどれだけ変化したかを計測するとともに、位置計測情報とタイムスタディ結果の比較を行い、位置計測精度について実用に耐えるレベルであるかどうかを評価した。

評価の結果、半自動バイタル転送環境の導入によって、バイタルデータの計測・記録に要する時間は、一計測当たり、最頻値で12秒から7秒へと半分程度に減少した。なお、システム導入後にバイタルデータの計測・記録に要した時間の7秒の内、6秒がバーコード読み取りに要した時間で有った。位置計測誤りは、3.3%であった。

### 3. 結果と考察

基礎実験の結果より、バイタルデータ自動入力環境の実現と、人と機器の共創環境の実現によって、効率性の向上と安全性の向上が図れることが明らかになった。また、推定誤り率は5%を下回っており、位置計測情報を用いて患者推定を行ってもほぼ差し支えないことが明らかになった。

### 4. 共創を導くインタフェース

基礎実験より、バイタルデータ自動転送と患者推定を適用すれば大幅に業務効率の向上が図れることが明らかになった。また、推定誤りについても5%を下回る低い水準に有り、実用上の問題は無いことが明らかになった。

しかし、推定の誤りは完全になくすことは原理的に不可能で有り、患者安全確保のためにはスタッフによる確認作業は必須である。基礎実験より、誤り率が低いときにこそ見落としが発生する確率が高く、認識誤りが発生する際には第一位候補の推定尤度が高くない事が明らかである。したがって、推定尤度の高さを直接表現するインタフェースの実現が肝要となる。

本研究では、推定尤度に応じて表示面積を与

えるような確認インタフェースを提案した。確認画面は計測対象機器に最も近いモバイル端末や、計測対象機器が置かれたベッドに設置されたベッドサイド端末など、対象情報環境に応じた端末装置に提示されることとなる。この提示により、第一候補と第二候補の尤度の差が有意で無いときには、インタフェース上にほぼ同じ面積で二つの候補が大きく提示されることとなり、スタッフの確認行動の際に注意喚起を図れるものとする。

### [今後の研究の方向性、課題]

本研究では、病院業務運営上の必要性などから、病院環境への自動バイタルデータ転送システムの導入と、導入状況の評価を通じた実現性評価を中心に実施した。報告書執筆時点では、実現性評価実験の成果に基づき、関係スタッフとのディスカッションを行い、確認インタフェースの設計を行い、実装を進めている段階にある。

本実験の成果を受けて、京大病院では、2013年中に当該システムの導入を予定している。導入が完了して安定運用された段階で、提案インタフェースを追加導入し、提案手法の正否について慎重に評価を行う予定である。

情報システムによる文脈の推定は、業務の効率化に貢献するものであるが、完全な自動化は新たな危険を生み出しうる。今後情報収集だけでなく、情報提供においても文脈の導入とシステム状態の提供を行うことで、情報システムがパートナーとして働く状況を現出することで、臨床環境だけでなく、様々な業務環境の効率と安全性の向上を図れるものと考えられる。様々な事例を積み重ね、人と機械の共創を生み出す情報システムの有り様の一般原則を見いだすことが、今後の課題である。

[成果発表, 論文等]

- [1] K Sato, T Kuroda, T Takemura, A Seiyama : Feasibility Assessment of Bluetooth Based Location System for Workflow Analysis of Nursing Staff. IEEE EMBC Short Papers, no. 3316 (2013)
- [2] T Kuroda, H Noma, C Naito, M Tada, H Yamanaka, T Takemura, K Nin, H Yoshihara : Prototyping Sensor Network System for Automatic Vital Signs Collection. Method Inform Med 52(3) : 239-249 (2013)
- [3] 黒田, 竹村, 野間 : ユビキタスセンサネットワークの病院環境への導入. 信学大会, SS-49-SS-50 (2013)
- [4] T Kuroda, H Sasaki, T Suenaga, Y Masuda, Y Yasumuro, K Hori, N Ohboshi, T Takemura, K Chihara, H Yoshihara : Embedded Ubiquitous Services on Hospital Information Systems. IEEE Trans Inform Technol Biomed 16(6) : 1216-1223 (2012)
- [5] T Kuroda, T Takemura, H Noma, K Okamoto, N Kume, H Yoshihara : Impact of Position Tracking on the Outpatient Navigation System. Proc IEEE EMBC, pp. 6104-6106 (2012)
- [6] 野間, 多田, 黒田, 竹村 : Bluetooth による屋内位置計測装置の開発. 信学技報 111 (446) : 29-34 (2012)

# 主成分分析と画像エッジを用いたロバストかつ高速な パターンマッチング手法の開発

Development of Fast and Robust Pattern Matching Method  
Using Principal Component Analysis and Image Edges

2021012



研究代表者	熊本大学大学院 先端機構	特任助教	上 瀧 剛
共同研究者	熊本大学大学院 自然科学研究科	教 授	内 村 圭 一

## [研究の目的]

カメラで撮影した画像から、予め登録した画像パターンを見つけ出すパターンマッチングは画像処理の基本技術である。パターンマッチングはFA分野における産業用ロボットや文字読み取り装置などに用いられる。パターンマッチングに対する要求性能としては、高い位置合わせ精度、明るさや隠れなどの見かけの変化に対するロバスト性、および高速処理が挙げられる。

よく知られるパターンマッチング法として正規化相関法(NCC)がある。NCCではテンプレートの中心位置をずらしながら入力画像と照合を行うことでターゲットのXY位置を求めることができる。NCCを用いてターゲットの回転方向を特定する方法として、テンプレートを回転させながら何度も照合を行う回転サーチ法が知られる。しかし、この方法は多くの計算時間を要する。また、NCCではターゲットの一部が欠けたり、遮蔽した場合で検出精度が悪くなるという問題もある。

これに対して本研究では、主成分分析を用いて多数のテンプレート画像群を情報圧縮することで検出精度を維持しつつ計算量の削減を図る。さらに、2枚の画像間の類似性を評価する際に、物体の輪郭情報(エッジ)を利用することで、ターゲットの欠けや遮蔽に強いパターンマッ

ングの実現を目指す。評価実験では、シミュレーション評価および、悪条件下で撮影された画像を用いた、実画像実験での評価を行う。

## [研究の内容, 成果]

図1に従来の回転サーチによるパターンマッチング法(同図の上側)および主成分分析を用いたパターンマッチング法(同図下側, 固有値テンプレート法と呼ぶ)の概略を示す。

NCCでは入力画像に対して、様々な回転角でのテンプレートを畳み込むことで、各方向角での画像類似度を算出する。一方で、固有値テンプレート法では、様々な回転角のテンプレート群を主成分分析で情報圧縮して新たなテンプレート画像(固有値テンプレート)を生成する。図1の左下に生成した固有値テンプレートを示

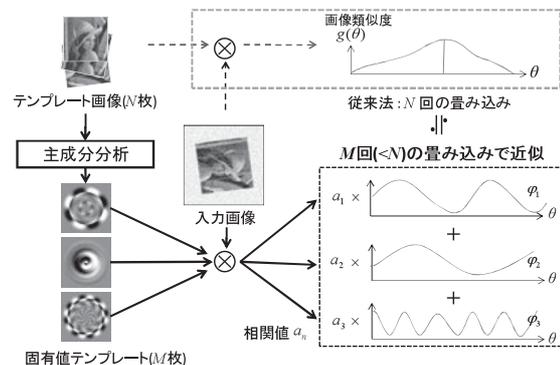


図1 固有値テンプレート法概略

す。この方法によって、入力画像と固有値テンプレートとの畳み込み結果から、回転サーチと同じ画像類似度が近似的に計算可能である。このとき回転サーチでは  $N$  回必要であったら畳み込み演算が  $M (< N)$  回に減らすことができる。すなわち、パターンマッチングの処理時間の大部分を占める畳み込み演算の回数を減らすことで、処理時間の削減ができる [2] [3] [4] [5]。

図2に画像のエッジ情報を用いたエッジ固有値テンプレート法の概略を示す。

エッジ固有値テンプレート法では、単純な画像の濃淡値ではなく一度、画像を水平方向と垂直方向の2枚のエッジ画像に変換した後に、それぞれに対して固有値テンプレート法を適用して照合を行う方法である。このときの画像類似度は水平および垂直方向のエッジ画像での照合結果の線形和で計算される。

ここで、画像エッジといってもいくつかの算出法がある。たとえば、図3(a)の入力画像に対してCannyエッジフィルタを用いた結果が同図(b)であり、エッジ強度で正規化を行った結果が同図(c)である。そこで、固有値テンプレート法に適した画像エッジ算出法の選定を

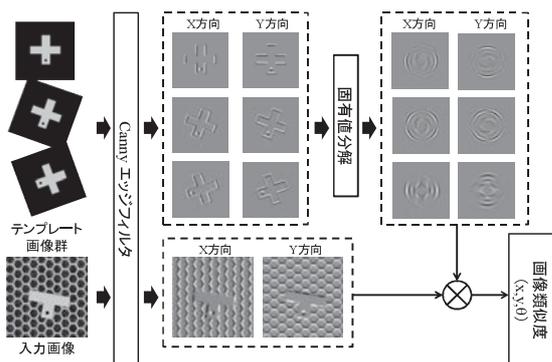


図2 エッジ固有値テンプレート法概略

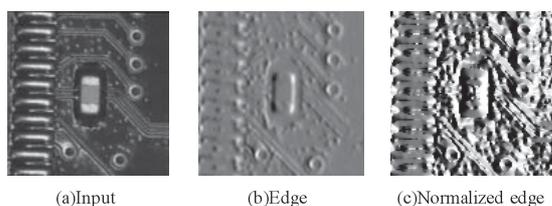


図3 エッジの種類

行う。図4に、Cannyエッジフィルタ/Sobelエッジフィルタ、および正規化あり/正規化なしの全4パターンでの固有値テンプレート法の情報圧縮効率をグラフ化した図を示す。横軸は近似次数で縦軸が圧縮効率である。同図よりCanny型の正規化なしのエッジフィルタを用いた場合に、最も少ない次数(すなわち、固有値テンプレートの枚数  $M$  が小さくてすむ)で情報圧縮できることが分かった [1]。ただし、エッジを正規化しないとシェーディング等の局所的な明るさ変動に弱くなる。そこで、入力画像を一度エッジ強度の分散値で除算した後に、エッジ固有値テンプレート法を適用する方法を用いる [1]。

固有値テンプレート法の性能を検証するために、人工的に生成した画像を用いたシミュレーション実験および実際にカメラで撮影した実画像実験を行った。

シミュレーション実験で用いた画像を図5に示す。同図(a)のテンプレートに対して、同図(b)のようなメッシュ状の背景にランダムに平行移動および回転を加えたターゲットを配置した画像を100枚用意した。また、同図(c)のようにターゲットの一部が欠けた画像を100枚用意した。

表1および表2に、それぞれ「欠けなし」および「欠けあり」の場合の性能評価結果を示す。

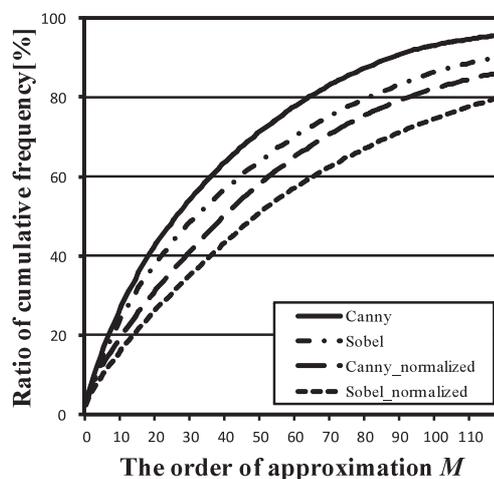


図4 各エッジに対する圧縮効率

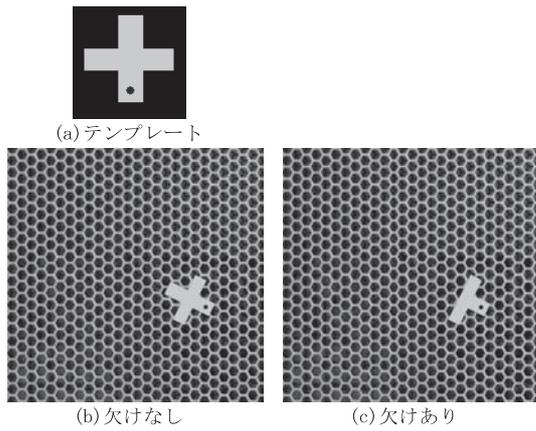


図5 シミュレーション画像

表1 欠けなしの結果

手法	位置誤差 [pix]	角度誤差 [deg]	成功率 [%]
NCC	0.36	3.29	96.0
RIPOC	0.07	0.11	99.0
Eigen	0.25	0.75	82.0
Edge Eigen	0.21	0.24	100.0

表2 欠けありの結果

手法	位置誤差 [pix]	角度誤差 [deg]	成功率 [%]
NCC	0.73	3.12	86.0
RIPOC	0.49	0.99	55.0
Eigen	0.50	0.75	82.0
Edge Eigen	0.38	0.44	100.0

NCCは正規化相関による回転サーチ，RIPOCは回転不変位相限定相関法，Eigenはエッジを使わない固有値テンプレート法，Edge Eigenはエッジ固有値テンプレート法である。表より，提案するエッジ固有値テンプレートの検出成功率は100 [%]となりロバスト性が確認できた。

続いて，実環境下での性能を検証するために図6に示す撮影装置撮影した実画像での評価を行った。撮影装置はCMOSカメラ，XYθ機械ステージおよびLED照明から構成される。評価に用いた画像を図7および図8に示す。図7はメモリモジュール（Memory）で，図8は基盤の一部（LSI）である。図8では片側から強い照明を当ててわざとシェーディングを加えている。画像のサイズは512×512 [pix]である。

位置精度評価のためにXステージを0.1 [mm] 間隔で移動させて100枚撮影し，方向

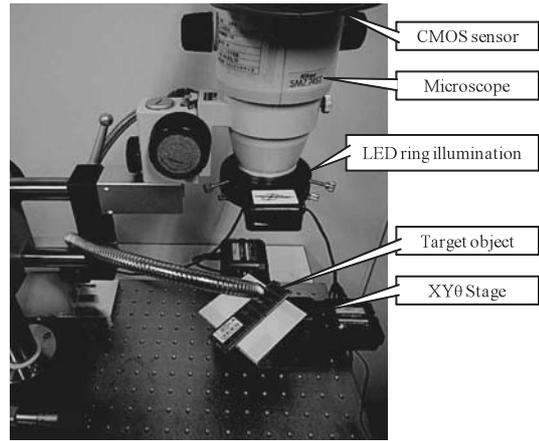


図6 実験装置

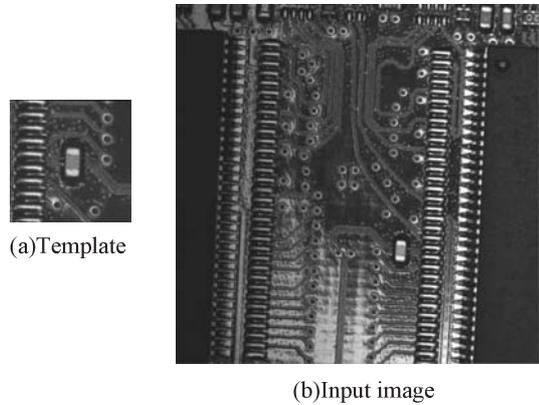


図7 実験画像（Memory）

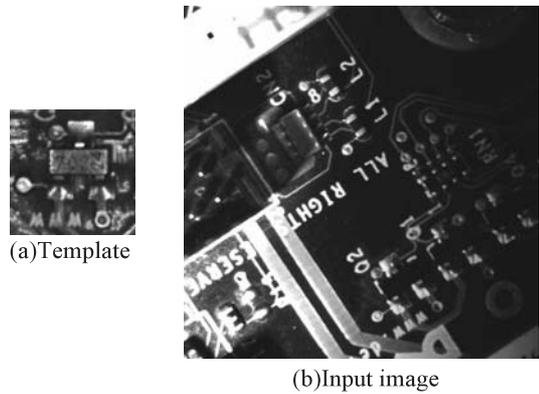


図8 実験画像（LSI）

角精度評価のために回転ステージを1.8 [deg] 間隔で100枚撮影した。

MemoryおよびLSIに対する評価結果を表3および表4に示す。NCCによる回転サーチでは半数以上が検出に失敗した。RIPOCはMemoryでは高い性能を得たが，LSIではほとんどが失敗した。失敗要因として，テンプレ

表3 Memoryの結果

手 法	位置誤差 [pix]	角度誤差 [deg]	成功率 [%]
NCC	5.42	—	8.5
RIPOC	0.24	0.55	98.5
Edge Eigen	0.28	0.30	100.0

表4 LSIの結果

手 法	位置誤差 [pix]	角度誤差 [deg]	成功率 [%]
NCC	3.06	2.99	13.5
RIPOC	1.24	—	1.5
Edge Eigen	0.33	0.35	98.0

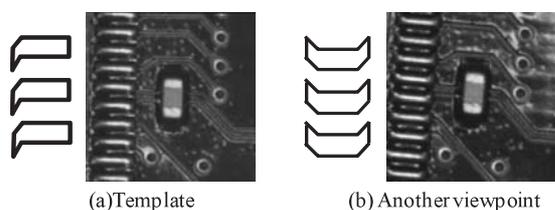


図9 撮影方向によるチップ足の見かけの形状変化

トとターゲットの見かけの相違がある。たとえば、図9に示すようにMemoryのターゲットが回転するとチップ足の形状の見え方が変化し、テンプレートとターゲットとの形状が合わなくなる。また、LSIではテンプレートと似た形状を持つ箇所が複数存在するため、誤検出が起きやすい。

このように難しいケースでありながら、提案するエッジ固有値テンプレート法がMemoryおよびLSIのどちらのケースでも最も高い成功率となった。

また、この時のエッジ固有値テンプレート法の処理時間は一枚当たり約100 [msec] (Corei7 3.4 GHz マシンを使用) であった。

#### [今後の研究の方向]

エッジ固有値テンプレート法により、ロバストかつ高速なパターンマッチングが実現できる

ことを確認できた。さらなる計算時間短縮のために、現在、多重解像度処理による効率化を図っている [6]。現状の固有値テンプレート法では、ターゲットの位置および回転方向の推定ができるが、実用上重要であるスケール変化には対応していない。そこで、Iterative Closest Points (ICP) アルゴリズム等の併用により、スケール変化の対応を行う。

今後の方向性としては、固有値テンプレート法は並列化が容易なアルゴリズムであることから、マルチコア処理やGPGPU等のハードウェアによる高速化を図り、3次元的な姿勢の推定を行うことを目指す。

#### [成果の発表、論文等]

- [1] 上瀧 剛, 矢田晃嗣郎, 内村圭一: 積分型正規化エッジに基づく固有値テンプレート法, システム制御情報学会論文誌, vol. 26, no. 8, 2013
- [2] 上瀧 剛, 内村圭一: 隠れにロバストな形状ベース固有値テンプレート法, 第56回システム制御情報学会研究発表講演会, pp. 378-379, 2012
- [3] 上瀧 剛, 矢田晃嗣郎, 内村圭一: 形状ベース固有テンプレート法によるパターンマッチングとその性能検証, 第18回画像センシングシンポジウム (SSII 2012) 講演論文集, 2012
- [4] Gou Koutaki, Koushiro Yata, Keiichi Uchimura, Michiaki Kan, Daisuke Asai, Makoto Takeba: Fast and High Accuracy Pattern Matching Using Multi-Stage Refining Eigen Template, Proceeding of 19th Korea-Japan Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV 2013), pp. 58-62, 2013
- [5] 矢田晃嗣郎, 上瀧 剛, 内村圭一, 菅 倫明, 浅井大介, 竹葉 誠: エッジに基づく固有値テンプレート法によるロバストな画像照合, 火の国情報シンポジウム 2013 論文集, 2013 (CD-ROM)
- [6] 矢田晃嗣郎, 上瀧 剛, 内村圭一, 菅 倫明, 浅井大介, 竹葉 誠: 多重解像度処理による高速かつ頑健な固有値テンプレート法, 電気学会情報処理/次世代産業システム合同研究会, pp. 45-50, 2013

## 大腿部痛の予防を目的とした人工股関節固定性の定量的評価法の構築

### Development of the Quantitative Evaluation Technique of Hip Stem Stability Aiming at Prevention of Thigh Pain

2021014



研究代表者

北里大学 医療衛生学部

講師

酒井利奈

#### [研究の目的]

人工関節使用数の増加に伴い置換術後の大腿部痛が臨床上深刻な問題となっている。申請者は術後の痛みは固定法上の問題であると推察している。その根拠は、人工関節を骨セメントで固定していた1990年代前半まで大腿部痛は問題とならなかったが、プレスフィット固定が支持されるようになった近年、大腿部痛の問題が顕在化してきているからである。

人工関節の固定は人間と機械の調和の問題であり医学分野と工学分野にまたがった複雑な様相を呈する。したがって人工股関節ステムの固定法の優劣を評価する方法の確立が国内外において急務とされているが、新規開発された人工関節について定量的に評価をするための具体的な指針はこれまで示されていない。

そこで本研究課題においては大腿部における疼痛の予防を目的とし、新規に開発された人工関節の固定法の良否を判定するための、定量的な評価法を構築した。判断基準として応力と変位を指標とし、審査の効率化が期待できる数値シミュレーションを用いた評価を行った。

上述の背景を鑑み当該研究においては、以下3つの項目を最重要検討課題とし、重点的に推進した。

- (1) 数値モデルによる動的有限要素解析により、ステムの固定部に生じる応力の最適化につ

いて検討した。

- (2) 臨床で用いられている代表的な人工股関節ステムを対象として、荷重試験器とレーザー変位計による変位量を算出し実験的、理論的な評価を試みた。
- (3) 人工股関節ステム周囲骨組織上の残留応力を動物実験レベルで推定した。動物実験に基づくデータを取得することにより、妥当性の高い評価を実現できる固定法の判定を目指した。

これらの結果を基に、人工関節の固定法を評価する基準を構築した。

#### [研究の内容, 成果]

有限要素解析と実験動物の比較を行うことにより、多面的な評価を行うことができ、臨床に直結した現場で有益となるデータを提供できたと考える。以下、最重要検討課題(1)~(3)について研究内容とその成果を報告する。

- (1) 疲労強度試験の労力を大幅に低減できる評価手法としてシミュレーションに着目し、効果的に研究を進めるため有限要素解析(LS-DYNA ver. 971, テラバイト)から着手した。整形系インプラントの力学特性評価において、代表的な指標である応力について調べるため、代表的な3種類の人工股関節ステムを対象とし有限要素モデルを

構築した。Stem A は両側に局所的な高い応力が現れ、荷重条件の変化にともなう応力部位の移動を確認した (図 1a)。Stem B はステム本体部、横止めピン周囲部において両側とも均一な応力分布を呈した (図 1b)。Stem C では、近位内側に高い応力部位を認めた (図 1c)。Stem A の高い応力は荷重条件変化後に移動を生じたことから、機械的な固定性が得られにくいと推察した。Stem B は両側とも均一な応力分布を呈したことから、初期固定において有利な形状であることが示唆された。Stem B の荷重を主に横止めピンで受けるという独特な固定機構により、近位の適切な部分に力が伝達し良好な初期固定が得られると推察した。Stem C では近位内側に高い応力

部位を認めたが、骨と人工股関節ステムとの界面の力学状態が周囲条件変化後に安定していることより固定性に問題は生じないと推察した。

- (2) レーザー変位計 (HLC-203BEMK) を用いた測定によって得られたステムの空間的変位量、骨の空間的変位量、骨とステム間の相対変位量を表 1 に示した。相対変位量が最も大きい値を示したのは Stem A であった。Stem A の特徴的な固定部位であるフランジは沈み込みを防ぐ目的で施されている。この固定部位は変位を防止する機能としては作用していないことが明らかになった。相対変位量が小さい値を示した Stem C は、設計・製作上の固定方針としてフィンが骨に噛みこみ安定性を増す目的で施されている。この特徴的な部位が変位を抑制していると推察した。続いて相対変位量が小さい値を示したのは Stem B であった。Stem B は Anterior-Posterior 方向に貫通するピンのロッキング機構により骨とステムの機械的な固定が得られ、変位を防いだと判断した。
- (3) 人工股関節の固定の際、発生する残留応力が骨にどのような影響を与えるかという問題は、大腿部痛の発生原因と関連して重要である。一方、骨には力学的刺激による骨形成や骨吸収が起きることが知られている。しかし、従来の研究において力学刺激は生理的な変動荷重に依存しており、人工関節

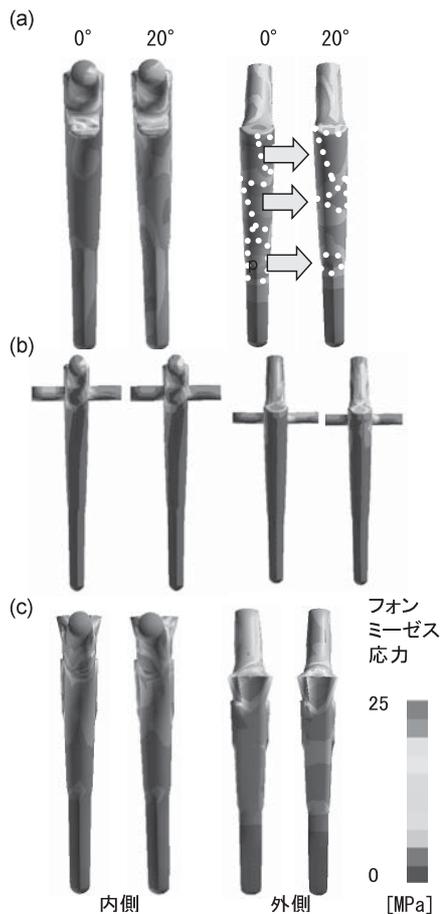
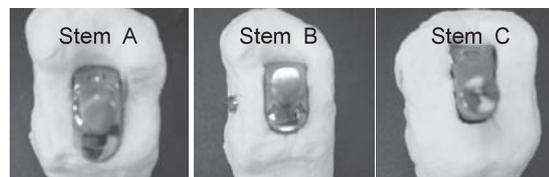


図 1 有限要素解析による各種ステムの 0° 屈曲位と 20° 屈曲位における応力分布  
(a) Stem A 矢印は荷重変化後の圧力領域の変化を示す (b) Stem B (c) Stem C

表 1 実験計測により得られた各ステムの変位量  
(a) Stem A (b) Stem B (c) Stem C

		Stem A	Stem B	Stem C
displacement [mm]	Stem	1.90	0.42	0.29
	Femur	0.07	0.03	0.04
Relative displacement [mm]		1.87	0.37	0.25



固定部に発生する定常荷重の骨への影響については推定されていない。そこで本研究では、実験動物の長管骨に形状記憶合金のピンを挿入して、その弾性力により髓腔内から定常荷重を加える方法を開発した。本法により、定常荷重が骨組織に与える生理的な影響と骨形態の変化について検討した。形状未記憶 Ni-Ti 合金線 (0.4  $\phi$ , アクトメント) を、図 2a の形状に加工した後、形状回復温度が体温より十分低い温度になるように熱処理を行い、荷重ピンを作成した。ロードセル (TUSB-S01LC, タートル工業) と金属板により 9 週齢ラットの大腿骨髓腔と同等の間隙 1.4 mm を作成し、荷重ピンを挿入した後、時系列的に荷重の変化を測定した。ネンプタル麻酔下で、6 匹の 9 週齢 Wistar ラット右大腿骨に対し、荷重ピンを顆間部より髓腔内に挿入した (荷重群)。左足は非荷重のコントロールとした (非荷重群)。軟 X 線撮影を行い、X 線透過度、骨梁構造の変化につ

いて検討し、 $\mu$ -CT により骨形態の変化を検討した。荷重ピン挿入処置後 3 週において、荷重群では皮質骨と形状記憶合金の接触が認められた。しかし軟 X 線像において、皮質骨の非薄化、骨硬化像、骨透過像等の X 線透過度変化、骨梁構造の変化に著しい変化は認められなかった (図 2b)。荷重群では形状記憶合金と骨幹部皮質骨の内環状層板の接触領域で金属表面に一致していたと思われる領域に骨形成像と思われる変化を確認した。皮質骨における骨吸収像や骨層板の変化は認められなかった。In vitro において荷重ピンの 1 週の時間経過による著しい荷重の減少は認められなかった。 $\mu$ -CT 像から挿入処置 3 週後、皮質骨と形状記憶合金が接触していたことが確認された。よって、本モデルは長期に渡って皮質骨に荷重を加えることが可能であると考えられた。処置 3 週後、 $\mu$ -CT 像にて接触領域で骨形成像と思われる像が認められた。しかし、金属によるアーチファクトの可能性は否定できなかった。骨吸収像、骨層板の変化等の皮質骨変化などは認められなかった。従って、新生骨形成は荷重によるものではなく Ti の骨親和性によるものと考えられた。今後、長期的観察と骨組織像によるさらなる検討が必要であると考えられた。

#### [今後の研究の方向, 課題]

骨組織上の残留応力を推定した動物実験は骨変化のメカニズムを解明することで人工股関節置換術後の合併症の関係を明らかにできるため、今後も引き続きラット長官骨に対して、定常荷重が骨組織へ与える影響について検討する。このモデルに対しても数値解析を行うことで、どの程度の応力で骨変化が生じるか、接触応力の大きさと骨組織の変化の関係が解明できる。また骨とステム間の応力がどこに集中し、どの程

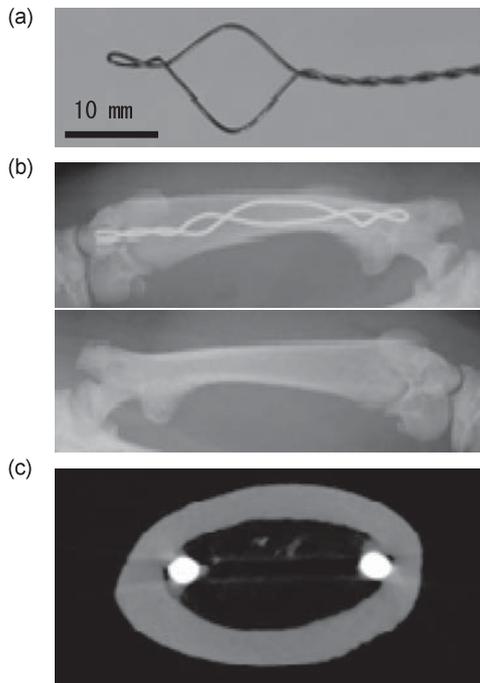


図 2 (a) 形状記憶合金ピンの形状  
(b) 上はピン挿入後 3 週のラット右大腿骨の X 線像。  
下は同じ週齢におけるラット左大腿骨 (コントロール)  
(c) ピン挿入後 3 週のラット大腿骨  $\mu$ -CT 像

度の歪みが生じているかが明らかになる。

整形系インプラントの評価は、薬事法に引用される規格も数多くあるため、薬事行政上のニーズを把握し、今後も臨床医と連携をとりながら進めていく必要がある。そのため必要に応じて、評価方法と手順の技術的な妥当性、および基準を定めるための根拠を確認するため追加実験と数値シミュレーションによる追加計算などを行い、信頼性の高い評価手法として取り纏める必要がある。

[成果の発表，論文等]

1. 酒井利奈 他：定常荷重が骨組織へ与える影響—骨形態計測と有限要素解析を用いた検討—。第43回日本人工関節学会，京都，2013.2.22-23。(抄録 p. 364)
2. 玄 峰俊，酒井利奈 他：大腿骨髄腔形態と人工股関節ステム周囲部における圧力分布の関係。第43回日本人工関節学会，京都，2013.2.22-23。(抄録 p. 363)
3. 伊藤大器，酒井利奈 他：インプラント界面における定常荷重が骨組織に及ぼす影響。第33回バイオトライボロジシンポジウム，白金，2013.3.16。(抄録 p.11)
4. 玄 峰俊，酒井利奈 他：塩化ナトリウム性骨モデルを用いた大腿骨髄腔形態と人工股関節ステム周囲部における圧力領域の関係。第33回バイオトライボロジシンポジウム，白金，2013.3.16。(抄録 p.15)
5. 中尾将輝，酒井利奈 他：インプラント界面に残留する定常荷重の骨組織への影響：骨形態計測と有限要素解析を用いた検討。第39回日本臨床バイオメカニクス学会，幕張，2012.11.9-10。(抄録 p.151)

# ピエゾ抵抗型両持ち梁を用いた3軸触覚センサに関する研究

## A TRIAXIAL TACTILE SENSOR USING PAIRS OF PIEZORESISTIVE BEAMS WITH SIDEWALL DOPING

2021016



研究代表者

東京大学 IRT 研究機構

特任研究員

高橋 英俊

### [研究の目的]

我々の生活する環境の中でロボットが安全に活動するためには、人間や周囲の物体を傷つけないように、多くのセンサが必要となる。なかでも物体に接触したときの力を計測・制御するため、物体との接触面に加わる圧力及びせん断力を検知する MEMS 触覚センサが重要であると考えられる。

しかし、従来研究における MEMS 触覚センサは、平面構造の上に突起や直立したカンチレバーを必要とし、これらの構造と平面との間の変形を検知して、せん断力としていたため、センサに一定の高さが必要であった。また製作プロセス上個体差が大きく、またセンサ素子が検出方向以外の力にも反応するため実用化が困難であった。

そこで本課題では、側面にピエゾ抵抗層を持つビーム構造をせん断力検出素子として用いることで、製作上の個体差が少なく、また3軸方向の力を独立分離して計測できる MEMS 触覚センサの実現を目指す。また構造が単純であるため、全ての工程を半導体プロセスで製作することができる利点を有する。

### [研究の内容, 成果]

本課題で提案するセンサの原理を図1に示す。

せん断力検出素子として、側面にピエゾ抵抗層を形成したビーム2対、圧力検出素子として表面にピエゾ抵抗層を形成したビーム1対を用いる。せん断方向用のビームは側面にピエゾ抵抗層が形成されている。これらのビームが弾性体に埋められており、弾性体表面に加わる3軸方向の力を計測することができる。

せん断力検出素子の1対のビームに対して垂直方向のせん断力を弾性体表面に加えた場合、弾性体の変形に倣って、2本のビームは図2(a)に示すように変形する。このとき対になったビームの対称な側面にピエゾ抵抗層が形成されているため、それぞれの側面が伸長及び圧縮されて、抵抗値がそれぞれの伸縮にあわせ正負逆方向に増減する。その抵抗値変化をブリッジ回路により計測し、せん断力を検出する。また、2本のビームの抵抗値変化を計測しているため、温度変化や他軸との干渉をキャンセルすることが可能である。

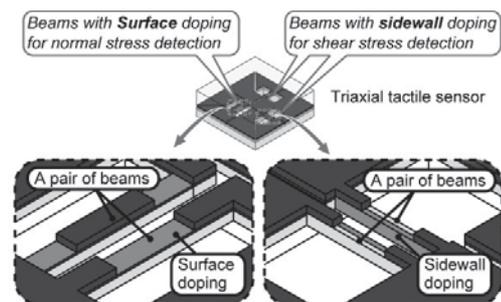


図1 本課題で提案する3軸触覚センサのコンセプト図

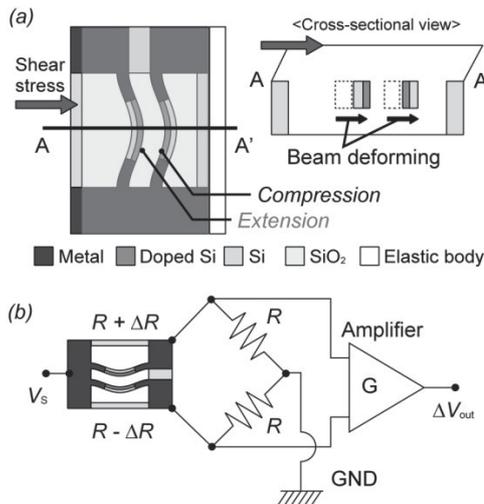


図2 (a) せん断力の検出原理 (b) 計測回路図

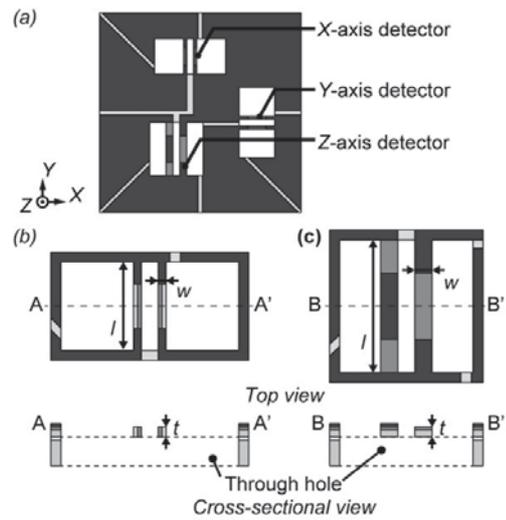


図3 触覚センサの各ビームの設計図

圧力検出素子は2つのビームに対して、圧力を加えた場合、抵抗値が正負逆方向に変化する位置にピエゾ抵抗層を形成している。せん断力検出素子同様、温度変化や他軸との干渉をキャンセルできる。

センサチップの設計値を図3及び表1に示す。センサチップにはそれぞれx軸方向せん断用、y軸方向せん断用、z軸方向圧力用のセンサ素子が配置されている。せん断力検出素子のビームは大きさ  $180\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$  に設計した。また圧力検出素子のビームは大きさ  $250\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$  に設計した。センサチップの大きさは  $2.0\ \text{mm} \times 2.0\ \text{mm} \times 0.3\ \text{mm}$  に設計した。

センサの製作プロセスを図4に示す。基板材料に、PタイプのSOIウェハを用いた。ウェハはアクティブ層厚さ  $20\ \mu\text{m}$ 、BOX層厚さ  $2\ \mu\text{m}$ 、ハンドリング層厚さ  $300\ \mu\text{m}$  のものを利用した。始めに、ICP-RIEによりアクティブ層を  $20\ \mu\text{m}$  掘ることでトレンチを形成する(図4(a))。このトレンチはサイドウォールドーピングの際に不純物を注入するための穴である。トレンチの側壁がせん断力計測用のビームのピエゾ抵抗層になる。次にドーパントをスピコートによりデバイス表面に塗布し、窒素雰囲気化で炉に入れ、熱拡散を行う。その後、リフトオフプロセスにより、金薄膜を蒸着し、

表1 各ビームの設計値

	Length $l$	Width $w$	Thickness $t$
Sidewall-doped beam	$180\ \mu\text{m}$	$15\ \mu\text{m}$	$20\ \mu\text{m}$
Surface-doped beam	$250\ \mu\text{m}$	$50\ \mu\text{m}$	$20\ \mu\text{m}$

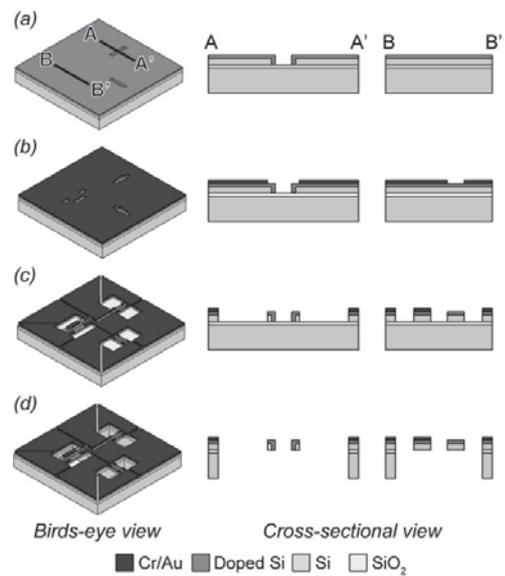


図4 プロセスフロー

配線のパターンニングを施す(図4(b))。次にアクティブ層を再びICP-RIEによりエッチングする。これにより、ビーム構造が形成される。その後、裏面からハンドリング層及びBOX層をエッチングする(図4(d))。

試作したセンサの写真及び各ビームのSEM

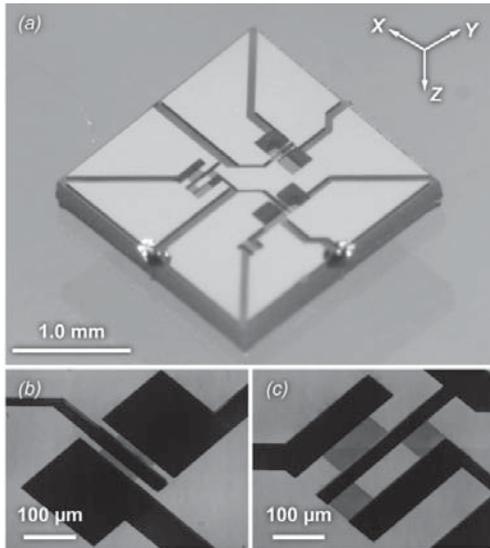


図5 (a) 製作したセンサチップの写真  
(b) (c) 各ビームのSEM写真

写真を図5に示す。せん断力検出素子及び圧力検出素子のビームのピエゾ抵抗層の抵抗値はそれぞれ1.0 kΩ及び0.5 kΩ程度であった。センサチップを基板に貼り付け、センサチップの外側に形成されている電極と基板間にワイヤボンディングし、その後弾性体に埋め込むことで触覚センサを作製した(図6(b))。

製作した触覚センサの3軸方向の力に対する応答を評価した。触覚センサの各ビーム対はそれぞれブリッジ回路に接続し、アンプ回路を通じてオシロスコープで応答を計測した。圧力及びせん断力を与える方法として、図6(a) (c)に示すよう、触覚センサ表面をアクリルプレートに押し付け、6軸力センサの応答を計測した。力のレンジとして、0から400 kPaまでの圧力に対する抵抗値変化を、また0から100 kPaまでのせん断力に対する抵抗値変化をそれぞれ計測した。

圧力に対する応答を図7(a)に示す。圧力検出用のビームの抵抗変化率が最も大きく、圧力に対して線形に変化した。 $x, y$ 軸方向せん断力検出用のビームの抵抗変化率は若干変化した、これはせん断力検出用のビームがPDMSの中心からずれた場所に位置しており、そのため、圧力を加えた時にPDMSが外側に広がる際の

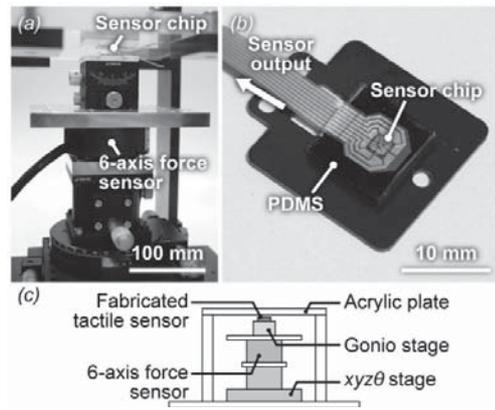


図6

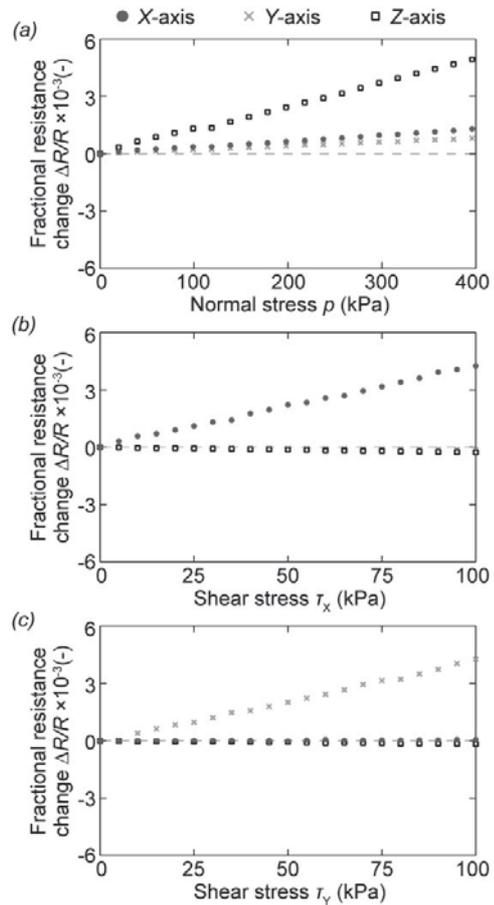


図7 各軸に対する応答

せん断力を検出しているためと考えられる。

$x$ 軸方向せん断力及び $y$ 軸方向せん断力に対する応答をそれぞれ図7(b) (c)に示す。各せん断力に対して、対応するビームの抵抗変化率が最も大きく、せん断力に対して線形に変化した。また圧力検出用のビームはほとんど反応し

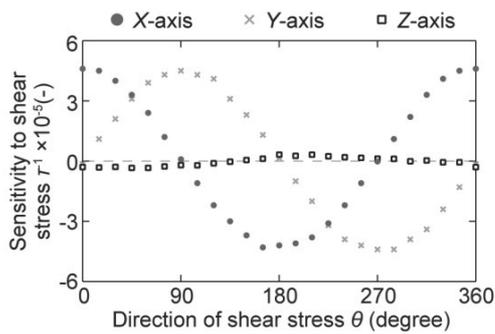


図8 せん断力方向を変化させた時の応答

なかった。

また図8に示すように、せん断力の方向を変化させた場合のそれぞれの応答を計測した。 $y$ 軸方向検出用のビームに対して垂直方向を0 degreesと定義し、せん断力に対する感度を評価した。各角度に対するビームの抵抗変化率を図8に示す。せん断力検出用のビームは角度に応じて、正弦波的に応答が出ていることが分かる。また $x$ 軸方向せん断力検出用ビームと $y$ 軸方向せん断力検出用ビームは応答が90 degrees位相がずれている。一方、全ての角度において、圧力検出用のビームはほとんど反応しなかった。

これらの結果から、製作した触覚センサは3

軸方向の力を各軸に対応したビームでそれぞれ独立に計測できることを示した。

#### [今後の研究の方向, 課題]

本研究では、MEMS 3軸触覚センサを試作し、その有用性を示した。今後は目的でも述べたように、実際のロボットなどに取り付け、実際の環境での使用を見据えて、研究を推進する予定である。

#### [成果の発表, 論文等]

高橋英俊, 中井亮仁, 松本 潔, 下山 勲, “サイドウォールドーピングを用いた3軸触覚センサ,” 第29回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, P. 4-3, 北九州国際会議場および西日本総合展示場, 福岡, Oct. 22-24, 2012.

Hidetoshi Takahashi, Akihito Nakai, Nguyen Thanh-Vinh, Kiyoshi Matsumoto and Isao Shimoyama, “A triaxial tactile sensor without crosstalk using pairs of piezoresistive beams with sidewall doping,” *Sens. Actuators A: Phys.* (2013), Vol. 199, pp. 43-48.

# 色覚バリアフリーインタフェースの実現にむけた 個人色覚モデルと再配色手法の提案

Estimation of personal color vision model and image modification for color blindness

2021017



研究代表者	岡山県立大学 情報工学部 情報通信工学科	助教	滝本 裕 則
共同研究者	慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科	准教授	満 倉 靖 恵

## [研究の目的]

これまでに、色覚特性者のための色覚バリアフリーシステムや画像の再配色法がいくつか提案されている。しかし、撮影した画像を計算機に取り込んで再配色処理を行う必要があることや、最適な画像を生成するための複数パラメータを手動で操作する必要があるなど、限られた状況下でのみ有効であった。また、再配色の過程において、弁別しやすい色の組合せにのみ着目しており、正常色覚者の見えを考慮しているものは少ない。また、処理コストが高いことも実用化に向けての課題であった。

本申請課題では、色覚バリアフリーに対応したヒューマンインタフェースの実現に向けて、個人の色覚特性モデルを簡便に取得できるシステムを提案し、さらには、もとの配色情報を考慮しつつ知覚しやすい画像へと色補正を行うユニビタスな技術の開発を目的とする。

## [研究の内容, 成果]

### 1. モバイル端末による色覚特性モデルの推定

各個人の色覚特性に適した色補正を行うため、色覚特性モデル(特性の種類と度合い)を求める必要があり、そのために必要な特性計測は、被験者に対して労力と負担をかけずに行うことが求められる。

そこで我々は、色覚特性の型と度合いを診断する方法である The Farnsworth-Munsell D-15 Test をモバイルタブレット端末上で簡便に行えるシステムを開発した。The Farnsworth D15 Test は、16 個の色票を被験者に提示し、その色票を色相順に並び替えさせる検査法である。本来、The Farnsworth D15 Test では、色票の並びから専門医が色覚異常の有無や、その型と度合いを判定する。我々は、Vingrys らによって提案された The Farnsworth D15 Test の採点法を Android OS が動作するモバイルタブレット端末上で実装するため、Java Development Kit と Android Development Tool 等を用いた。システムでは、並べ替えた色票における隣り合う色票間の色差を合計したトータルエラースコア、異常の型を特定する confusion angle、色損失の程度を定量的に示す confusion index を計算する。本システムを用いることにより、被験者による色票選択も含めて、色覚特性の種類とその度合いを 2 分程度で得ることが可能となった。

### 2. 高速かつ正常色覚者に違和感を生じさせない再配色手法

色覚特性者にとって弁別しやすい色の組合せを用いてカラー画像を補正する研究がいくつか報告されている。先行研究において、色覚特性者が混同しやすい色の組合せは、 $xy$  の 2 次元

平面で色の種類を表現する xy 色度図において求められる混同色線から推測可能であること (混同色線理論) が明らかになっている。しかし、先行研究<sup>[1]</sup>で提案された再配色手法を用いた場合、正常色覚者の見えを大きく損なう可能性がある。また、これら既存手法の処理コストが高いことも実用化に向けての課題であった。

そこで我々は、一般色覚者の見え (自然さ) を保ちつつも、色覚特性者にとって視認性の良いカラー画像を作成する手法を提案した。まず、原画像に対して色の量子化を行うことで減色化を行う。次に、Color2Gray 法に基づいて、各色クラスタの明度と彩度修正量を求める。最終的に、得られたクラスタごとに重み付けした明度修正量と彩度修正量を原画像に対して反映させることで、高速かつ一般色覚者と色覚特性者どちらに対しても効果的な画像再配色を実現する。提案手法の処理過程は以下のとおりである。

- 手順 1: 色の量子化 (メディアンカット法)
- 手順 2: 色クラスタ間の符号付き色距離に基づく明度修正量と彩度修正量の計算
- 手順 3: 色域を考慮した補正

以下、これらについて詳しく述べる。なお、画素  $i$  の彩度  $C_i^*$  と色相  $H_i^*$  は刺激値  $a_i^*$  と  $b_i^*$  を用いて以下のように定義される。

$$C_i^* = \sqrt{a_i^{*2} + b_i^{*2}} \quad (1)$$

$$H_i^* = \arctan\left(\frac{b_i^*}{a_i^*}\right) \quad (2)$$

従来法<sup>[1]</sup>では、各画素間の符号付き色距離を求めるための計算コストが課題であった。我々は、メディアンカット法を用いて色を量子化することにより、原画像の減色化を行う。量子化されたそれぞれの色クラスタ間の符号付き色距離を求めることで計算コストの軽減を図る。

さらに、人の目が、色の変化に比べ明るさの変化に敏感であることから、明度と彩度修正に基づく再配色手法を提案した。なお、色の量子化による減色後の色数を  $K$  とする。修正後の

各色クラスタの輝度成分  $\bar{\mathbf{L}}^* = (\bar{L}_1^*, \bar{L}_2^*, \dots, \bar{L}_K^*)$  と彩度成分  $\bar{\mathbf{C}}^* = (\bar{C}_1^*, \bar{C}_2^*, \dots, \bar{C}_K^*)$  は以下の最小化問題を解くことによって得られる。

$$E(\bar{L}_1^*, \bar{L}_2^*, \dots, \bar{L}_K^*) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=i+1}^K ((\bar{L}_i^* - \bar{L}_j^*) - \delta_{ij}^L)^2$$

subject to  $\sum_{i=1}^K L_i^* = \sum_{i=1}^K \bar{L}_i^*$  (3)

$$E(\bar{C}_1^*, \bar{C}_2^*, \dots, \bar{C}_K^*) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=i+1}^K ((\bar{C}_i^* - \bar{C}_j^*) - \delta_{ij}^C)^2$$

subject to  $\sum_{i=1}^K C_i^* = \sum_{i=1}^K \bar{C}_i^*$  (4)

ここで、 $L_i^*$  と  $C_i^*$  はそれぞれ  $i$  番目クラスタの修正前の輝度と彩度である。

符号付き色距離  $\delta_{ij}^L$  と  $\delta_{ij}^C$  は  $i$  番目と  $j$  番目の画素の色差を考慮し、以下の式で定義される。

$$\delta_{ij}^L = \Delta L_{ij}^* + \text{sign}^L(\Delta a_{ij}^*) w_{ij} \Delta BM_{ij} \quad (5)$$

$$\delta_{ij}^C = \Delta C_{ij}^* + \text{sign}^C\left(\frac{C_i^*}{C_j^*}\right) w_{ij} \Delta BM_{ij} \quad (6)$$

ここで

$$w_{ij} = \alpha e^{-\left(\frac{\bar{d}_{ij}}{\beta}\right)^2} \quad (7)$$

$$\bar{d}_{ij} = \min(d_{ij}, d_{ji}) \quad (8)$$

$$\Delta BM_{ij} = \sqrt{(a_i^* - a_j^*)^2 + (b_i^* - b_j^*)^2} \quad (9)$$

なお、 $\Delta L_{ij}^*$  は  $L_i - L_j$ 、 $\Delta a_{ij}^*$  は  $a_i - a_j$ 、 $\Delta C_{ij}^*$  は  $C_i - C_j$ 、 $\bar{d}_{ij}$  は混同色線理論に基づいて計算される 2 色の混同度合い、 $\alpha$  と  $\beta$  は修正度合を決定するパラメータであり正の実数である。符号付き色距離の符号を決定する関数は以下のように定義される。

$$\text{sign}^L = \begin{cases} +1, & x > 0 \\ -1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{sign}^C = \begin{cases} +1, & x > 1 \\ -1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

我々は、式 (3) (4) で定義した最小化問題を解くために共役勾配法を用いる。最小化問題を解くことで、色クラスタごとに修正された輝度

$\hat{L}_m^*$  と彩度  $\hat{C}_m^*$  が得られる。したがって、クラスタ  $m$  に属する画素  $i$  の輝度と彩度の修正量は以下の様に定義される。

$$\Delta L_i^* = L_m^* - \hat{L}_m^* \quad (12)$$

$$\Delta C_i^* = C_m^* - \hat{C}_m^* \quad (13)$$

しかし、人はその視知覚特性より明暗の変化に敏感である。加えて、 $a^*b^*$  色空間では、D型とP型色覚者の混同色線は  $a^*$  軸とほぼ平行である。したがって、混同色である2色の  $b^*$  値の絶対値が  $a^*$  値の絶対値より小さくなる場合、弁別困難色を改善するために彩度成分を修正してもあまり効果が得られない。そこで我々は、各画素に適した明度と彩度の修正量を求めるため、以下の式に基づいて画素  $i$  の明度と彩度を修正する。

$$\hat{L}_i^* = L_i^* + \Delta L_i^* \frac{|H_i^*|}{90.0} \quad (14)$$

$$\hat{C}_i^* = C_i^* + \Delta C_i^* \left(1 - \frac{|H_i^*|}{90.0}\right) \quad (15)$$

ここで、 $H_i^*$  はクラスタ  $i$  の色相であり、その範囲は  $-90.0$  から  $+90.0$  までをとる。

その後、式(14)(15)によって修正された色 ( $\hat{L}_i^*$ ,  $\hat{C}_i^*$ ,  $H_i^*$ ) がディスプレイにおける表示可能範囲 (色域) 外となる場合があるため、 $\hat{L}_i^*$  と  $\hat{C}_i^*$  が色域内におさまるように補正を行う。

提案手法の有効性を検証するため評価実験を行った。本実験では、2色型色覚において大半を占めているP型とD型の色覚特性に対して評価を行う。

評価指標として、一般色覚者の見え (自然さ) を保ちつつも、色覚特性者にとって視認性の良い画像再配色を行うため、色覚特性者のための評価指標  $E_{\text{cont}}$  と、正常色覚者のための評価指標  $E_{\text{natu}}$  を用いる。それぞれの評価指標を以下に示す。

$$E_{\text{natu}} = \sum_{i=1}^n \Delta E(I_i, T(I_i)) \quad (16)$$

$$E_{\text{cont}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( |I_i - I_j| - \left| \text{SIM}(T(I_i)) - \text{SIM}(T(I_j)) \right| \right)^2 \quad (17)$$

ここで、 $I_i$  は原画像  $I$  の  $i$  番目の画素値を、 $T(\cdot)$  は提案する色変換関数を、 $\text{SIM}(\cdot)$  は Brettel モデルによる色覚特性者の見えをシミュレートする関数を、 $n$  は原画像の画素数をそれぞれ示している。なお、これら評価指標の値は小さいほど良いことを意味している。実験条件として、Intel Core i7 CPU 870 2.93 GHz, 8 GB メモリー搭載器上にて実装した。実験に用いた画像は、 $360 \times 355$  画素の 24-bit RGB カラーであり、図1(a)に示す。

実験結果として、D型の色覚特性者に対する再配色結果を図1(b)~(d)に、評価指標による結果を表1に示す。パラメータとして、色クラスタ数  $K$  は 1000、図1(b)~(d)での再配色パラメータ  $\alpha$  と  $\beta$  はどちらも 0.5 としている。また、図2に2つの評価指標  $E_{\text{cont}}$  と  $E_{\text{natu}}$  の値をプロットしたものを示す。また、 $K=1000$  の場合の処理時間は 1.25 秒であった。結果より、高速かつ一般色覚者と色覚特性者どちらに対しても効果的なカラー画像の再配色を実現した。

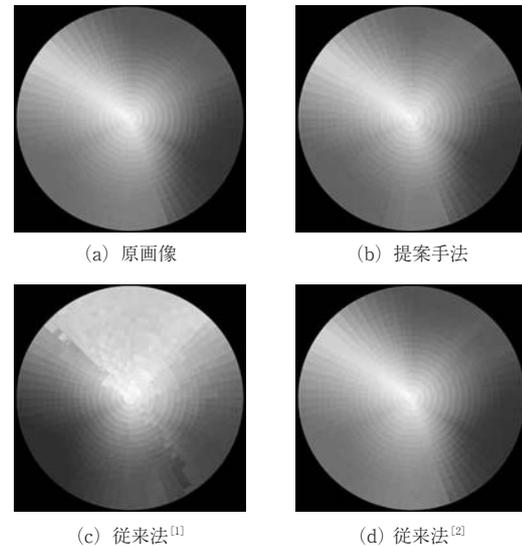


図1 D型色覚特性者に対する再配色結果

表1 各再配色結果に対する再配色パラメータと評価指標（自然性・識別性）

$\alpha$	$\beta$	提案手法		従来法 [1]		従来法 [2]	
		$E_{natu}$	$E_{cont}$	$E_{natu}$	$E_{cont}$	$E_{natu}$	$E_{cont}$
0.1	0.1	2.207	22.200	2.520	23.783	2.770	23.431
0.1	0.3	2.696	21.772	3.259	23.343	3.834	22.901
0.1	0.5	2.946	21.431	3.842	23.009	4.326	22.485
0.3	0.1	2.807	21.254	4.132	22.735	4.202	22.202
0.3	0.3	4.271	21.158	8.873	22.673	7.018	22.074
0.3	0.5	5.200	21.162	11.254	22.171	8.197	21.788
0.5	0.1	3.239	21.119	6.505	21.846	5.492	21.679
0.5	0.3	6.763	21.079	14.792	21.644	9.635	21.622
0.5	0.5	8.480	21.047	18.750	21.642	11.569	21.574

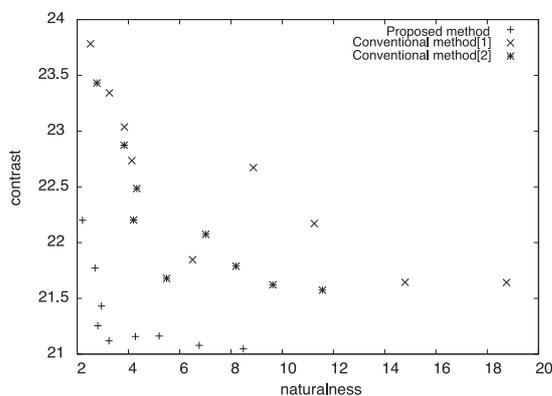


図2 従来法との比較

### 3. 視覚的顕著性に基づく注視誘導

これまでに、色覚特性者のための色覚バリアフリーシステムや画像の再配色法が複数提案されている。しかし、色覚特性者に関する無意識的な視覚的注意の引かれやすさである誘目性についての研究はほとんどない。

我々は、人の注視を遮ることなく、より自然に視線を誘導する視線インタフェースの実現を目指して、視覚的顕著性に基づく違和感のない画像修正法を提案した。見る対象の様子によって注視のしやすさは変わるという発想に基づき、注視の引き込みやすさを示す指標として、L. Ittiらによって提案された視覚的顕著性マップの計算モデルを利用する。そして、画像中で指定した領域の視覚的顕著性が最も高くなるように輝度と色相を画素ごとに調整した。本年度は、その第一歩として、正常色覚者を対象とし、提案手法の有効性を検証するため、視線計測装置を用いて意図した領域に視線を誘導できている

か検証した。また、提案手法を用いて修正した画像が、従来法よりも被験者に違和感を与えないことを確かめるため、主観評価実験を行った。

#### [今後の研究の方向性、課題]

色覚特性者に対して自然かつ効果的な注視誘導を行うため、視覚的顕著性に基づき、誘目性に影響を及ぼす画像の特徴を明らかにし、様々な色覚特性の型に応じた誘目性モデルの構築が今後必要である。我々は、誘目性モデルによる色覚特性者に対する注視誘導技術を確立し、新しい概念のカラーユニバーサルデザイン基盤技術を提案する予定である。

一方、人がある単色の色刺激を受けると、この刺激に応じた感性情報を受けるが、この感性情報には、様々な要因により個人差が生じる。したがって、より被験者に対して違和感を与えない再配色を実現するために、色と感性に関する個人モデルを求める必要がある。そして、その計測には、被験者に対して労力と負担をかけずに行うことが求められる。我々は、この問題に対して、香川大学工学部佐藤敬子助教との共同研究を行っており、今後も継続して取り組む予定である。

#### 参考文献

- 1: G. Tanaka, N. Suetake, and E. Uchino: "Lightness Modification of Color Image for Protanopia and Deuteranopia", Optical Review, Vol. 17, No. 1, pp.

- 14-23, (2010)
- 2: H. Takimoto, S. Kamio, H. Yamauchi and M. Jindai :  
“Modification of Indistinguishable Colors for Color Defective Vision”, Proc. of NCSP 2012, pp. 337-340, (2012)
- [成果の発表, 論文等]
1. H. Takimoto, H. Yamauchi, M. Jindai, and A. Kanagawa: “Modification of Indistinguishable Colors for People with Color Vision Deficiency”, Journal of Signal Processing, Vol. 16, No. 6, pp. 587-592, (2012)
2. 滝本, 山内, 神代, 金川: “色覚特性者に対する彩度修正に基づく再配色手法”, 平成 24 年電気学会電子・情報・システム部門大会 講演論文集, pp. 1040-1045, (2012)
3. 国井, 滝本, 満倉, 山内, 神代, “視覚的顕著性に基づく視線誘導のための画像変換”, 動的画像処理実利用化ワークショップ DIA2013, pp.72-76, (2013)

## 検診用 PET/CT 画像を対象とした肺がん自動検出システムの開発

Development of automated scheme for lung cancer detection in screening PET/CT images

2021018



研究代表者	藤田保健衛生大学 医療科学部 放射線学科	准教授	寺本 篤司
共同研究者	岐阜大学大学院 医学系研究科	教授	藤田 広志

### [研究の目的]

肺がんは日本人の主たる死因になっており、生存率を高めるためには早期発見が必要不可欠である。本邦では欧米に先行し、PET/CT装置を用いたがん検診が多くの医療施設で行われている。PET/CT装置は、CT装置から得られる形態情報に加え、PET装置から得られる組織の糖代謝情報を同時に収集するため、糖代謝が盛んである悪性腫瘍を高い精度で検出することができる。肺野の画像診断においては、この特徴を利用して良悪性の鑑別を行うことができるほか、血管や気管支などの正常組織が密集している肺門部などの、CT画像を用いるだけでは発見しにくい病巣も正確に検出することができる。

このようにPET/CTは診断上有効な情報が得られるものの、1回の撮影で得られる画像枚数が1,000枚以上と膨大である。特に、健康診断ではほとんどの画像が正常であり、読影際には膨大な画像群から異常部位を的確に指摘することが求められる。この作業は読影医にかかる負担が大きいと見られ、見落としや医師間の診断結果の相違など、診断精度の低下が懸念される。

本研究では、医師の診断を支援するために、検診用に撮影されたPET/CT画像を用いて肺がんを自動検出するシステムを開発することを目的とする。

### [研究の内容、成果]

#### 1. 画像データベース

本研究では検診目的で撮影された105症例のPET/CT画像を利用した。全症例中、84症例は肺野内に肺がんの存在が認められたものであり、残りの21症例は正常症例である。医師の診断結果を元に84症例から217個の肺がん部位をリストアップし、データベース化した。

#### 2. 検出手法

##### 2.1 手法概要

与えられたPETおよびCT画像に対して、それぞれの画像特徴を利用した検出アルゴリズムを適用し肺がんを独立に検出する。その後、2つの検出結果を統合し、最終的な候補領域とする。

##### 2.2 CT画像を用いた結節検出

CT画像を用いて肺野領域内に存在する肺がん（主に孤立状結節）を検出する。

まず、肺野領域を抽出し、得られた領域を検出対象領域とする。本研究では、CT値が-400未満を白、-400以上を黒にする2値化処理を行い、続いて寝台などの背景領域を消去する。そしてクロージング処理を用いて末梢気管支や血管を含む領域を塗りつぶす処理を行った結果を肺野領域とした。

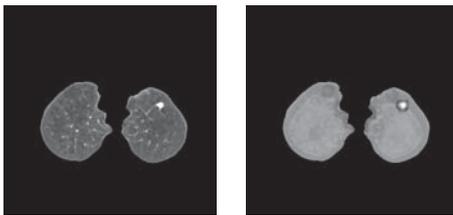
抽出された肺野において、塊状構造をもつ結

節を強調した後にしきい値処理を適用し初期候補領域を得る。塊状構造の強調には、我々が開発した円筒型フィルタ (Cylindrical filter, CF) を利用した。CF は半径  $r_1$ 、高さ  $2r_1$  を有する円筒形であり、1 画素毎に次式の演算を行うことでフィルタ処理画像が得られる。

$$c(x, y, g) = f(x, y, z) - \max_{(x_c, y_c, z_c \in K_{CF})} \left\{ f(x-x_c, y-y_c, z-z_c) \right. \\ \left. \begin{array}{l} x_c^2 + y_c^2 \leq r_1^2 \text{ and } z_c = \pm r_1 \\ x_c^2 + y_c^2 = r_1^2 \text{ and } -r_1 < z_c < r_1 \end{array} \right\}$$

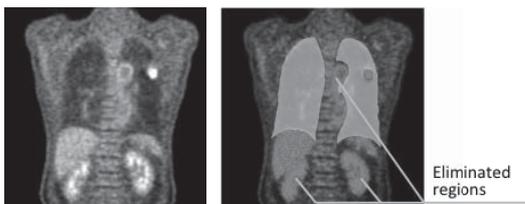
ここで、 $f(x, y, z)$ 、 $c(x, y, z)$  はそれぞれ入力画像、フィルタ処理画像を示し、 $K_{CF}$  は円筒型のフィルタカーネルを示す。CF を胸部 CT 画像に適用した結果を図 1 に示す。図中、矢印で示した領域が充実性結節であり、同図 (a) の原画像では血管などの正常組織とほぼ同等の CT 値を有する。CF を適用した同図 (b) においては、血管などの陰影が抑制され、結節が選択的に白く描出されている。

次に強調処理画像に対して 2 値化処理とラベリング処理を行うことで候補領域を得る。



(a) 原画像 (b) 結節強調画像

図 1 結節強調画像



(a) PET 画像 (b) 検出結果

図 2 PET 画像における結節検出結果

## 2.3 PET 画像を用いた結節検出

PET 装置による画像収集では、グルコースに放射性核種を結合して作成された 2-deoxy-2-[18F]fluoro-D-glucose (FDG) を体内に投与し、体内の集積分布を画像化する。集積が高いほど糖代謝が活発であることを示しており、糖代謝と腫瘍の悪性度には相関があることが報告されている。PET 検査ではこの性質を利用して悪性腫瘍の診断を行っている。

本手法では、PET 画像の画素値を体重と投与された放射能で規格化した後、しきい値処理とラベリング処理によって FDG が集積した部位、すなわち腫瘍の候補領域を得る。このとき、肺に近接する臓器 (心臓や肝臓) は正常な状態でも FDG が集積するため、2.2 節にて述べた CT 画像の処理にて検出した肺野領域を利用して、肺の外部に存在する候補領域は削除する。

## 2.4 候補領域の統合と偽陽性削除

CT 画像および PET 画像から得られた肺がん候補領域を論理和により統合し、少なくともいずれかの画像から検出されたものを候補領域とする。このようにして得られた候補領域には 1 症例あたり 50 個程度の偽陽性 (過剰検出) が含まれるため、それぞれの候補領域にて形状や画素値に関する特徴量を算出し、それらを複数の識別器にて偽陽性と真陽性に分類する。識別器は多段構造とし、最初に単一の特徴量によって容易に真陽性と偽陽性に分類できるものをルールベース識別器にて選別する。この作業にて候補領域の約半数が識別される。残りの候補領域については、3 種類のサポートベクターマシンにて真陽性と偽陽性を識別する。これらの処理にて、最終的な候補領域が得られる。

## 2.5 肺がん自動検出ソフトウェア

上述の検出アルゴリズムを用いた、肺がん自動検出ソフトウェアを開発した。図 3 にその画面レイアウトを示す。

症例データは医用画像の標準フォーマットである DICOM 形式にて読み込まれ、肺がん検出処理はすべて自動で行われる。検出処理は

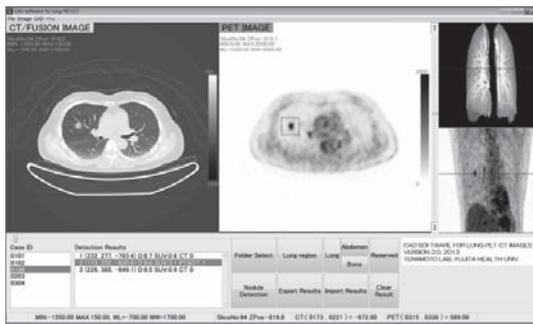


図3 肺がん自動検出ソフトウェア

パーソナルコンピュータ (Apple 社製 MacPro) にて約1分で終了する。この時間は画像収集に要する時間の1/30程度であり、日常の検査業務において全く支障なく自動検出処理を導入できるレベルに達している。ここで自動検出した結果は一覧形式で表示され、それぞれの候補領域に関する解析結果(検出した物体の面積、体積、CT値、FDG集積値など)を医師が診断時に確認できる。

### 3. 検出性能の評価

開発したシステムにて肺がんを自動検出した結果を図4に示す。2枚の画像は同一の位置でスライスした画像である。同図(a)のCT画像では、直径10mm以下の結節が正しく検出されている。本症例は画像中央付近の肺門部にも腫瘍が存在しているものであるが、CT画像からは検出されなかった。一方、同図(b)に示したPET画像では、肺門部の腫瘍にて高い集積を呈しており、これが候補領域として自動検出された。このように、2種類の画像を利用することで補完的な検出が行われることが確認さ

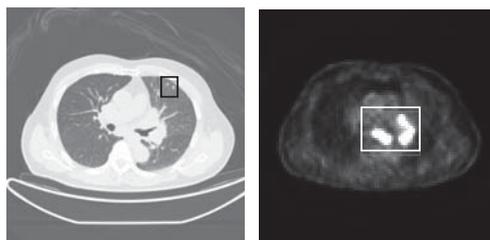


図4 肺がん検出結果

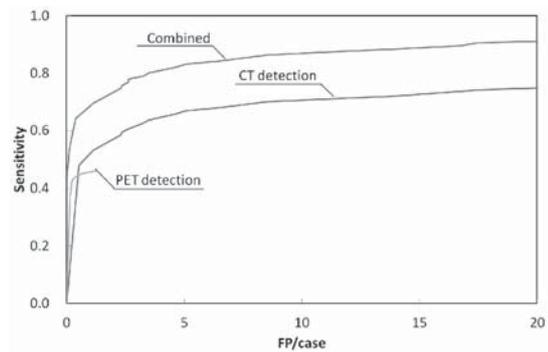


図5 検出特性 (FROC カーブ)

れた。

また、画像データベースの全症例について、検出パラメータを変化させながら真陽性率と1症例あたりの偽陽性数を算出しグラフ化したものを図5に示す。同図はCT単体、PET単体で検出した際の特性も示されている。2つの画像を利用した結果はCT単独で検出した場合に比べ15%程度高い検出能力を示した。トータルの肺がん検出率は偽陽性数が1症例あたり5個のときに83%であり、十分な検出性能が得られていることが明らかとなった。

#### [今後の研究の方向, 課題]

本研究では、医師の診断を支援するために、検診用に撮影されたPET/CT画像を用いて肺がんを自動検出するシステムを開発した。今後は本システムを臨床応用するために、大規模データベースを用いた評価を進める予定である。

#### [成果の発表, 論文等]

- [1] 寺本篤司, 池谷 愛, 藤田広志, 富田陽也, 高橋克彰, 山室 修, 玉木恒男, “PET/CT画像における肺結節の自動検出～偽陽性削除手法の改良と検診用画像データベースを用いた性能評価～,” 第68回日本放射線技術学会総会学術大会, April, 2012.
- [2] 寺本篤司, 藤田広志, 高橋克彰, 尾崎香帆, 村田誠也, 山室 修, 玉木恒男, “PET/CTにおける肺結節の自動検出～確率的検出感度マップを用いた検出能力の改善～,” 第69回日本放射線技術学会総会学術大会, April, 2013.

- [3] A. Teramoto, H. Fujita, K. Takahashi, K. Ozaki, S. Murata, O. Yamamuro, T. Kobayashi, T. Tamaki, M. Nishio, "Development and evaluation of automated nodule detection in lung PET/CT images," IFMIA 2012, Nov. 2012.
- [4] A. Teramoto, H. Fujita, K. Takahashi, O. Yamamuro, T. Tamaki, M. Nishio, T. Kobayashi, "Hybrid method for the detection of pulmonary nodules using positron emission tomography/computed tomography: A preliminary study," International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2013, online first.

# 弾性表面波デバイスを用いた悪臭計測用匂い濃縮素子の研究

## Study of odor preconcentrator for bad-smell measurement using a SAW device

2021019



研究代表者 東京工業大学 精密工学研究所 教授 中本高道

### [研究の目的]

人間と機械の調和を促進する上で、感性情報は重要であり、なかでも嗅覚は情緒面に大きな影響を与える。しかし、視覚や聴覚と異なり嗅覚はまだ機械の中にはあまり取り込まれていない。匂いセンサに関しては多数の報告があるが、実用化していく上で感度や湿度依存性の問題を解決していくことが重要である。本研究では新しい濃縮法を提案し、匂いセンサにおける感度向上と湿度依存性の解消を目的とする。これらの問題が解決できれば、匂いセンサの実用性が大幅に向上する。

匂いの濃縮には従来から熱濃縮管が用いられてきた。濃縮管では濃縮材により匂いを吸着させて、蓄積した匂いを加熱脱着させ濃度を高める事によりセンサに匂いを供給する。従来の濃縮管では濃縮材間の空気のギャップにより熱伝達が阻害されるため、匂いの脱着に時間がかかるという問題があった。また、ヒーターを均一に巻きつけるのが難しく同一素子作製が困難であった。そのため、濃縮が速く、素子間のばらつきが少ない濃縮素子が望まれる。そこで、本研究では新しい原理の濃縮素子の研究を行った。

さらに本研究では悪臭の計測も行った。人間は悪臭を実際に嗅ぎたくないの、悪臭計測をセンサが行うことは意味がある。しかし、悪臭は低濃度でも人が感じるために濃縮により感度を向上させる必要がある。

### [研究の内容, 成果]

#### 1. 気相中の匂い濃縮

本研究では気相中のセンサで計測する濃縮素子と液相中のセンサで計測する方法の両方の濃縮素子を検討した。図1に気相中のセンサで計測する方法を示す。SAW (Surface Acoustic Wave) デバイスを冷却し、その表面に匂いを凝結させて蓄積する。蓄積した匂い物質を acoustic streaming 現象で霧化してそばに別のガスセンサを設置して検出すると、凝結した匂い物質が瞬間的に霧化するので、匂いの濃縮を行うことができる。ガスセンサとしては、QCM (Quartz Crystal Microbalance) センサ (20 MHz, AT-CUT) を用いる。

濃縮素子の写真を図2に示す。同図(a)に示すようにガスは Inlet から導入して outlet から排出する。そして、同図(b)に示すように SAW デバイスが底面に設置され SAW デバイスの下には冷却用にペルチェ素子を設置している。

SAW デバイス用圧電基板は  $\text{LiNbO}_3$  128°回転 Y 板 X 伝搬である。また、SAW デバイス

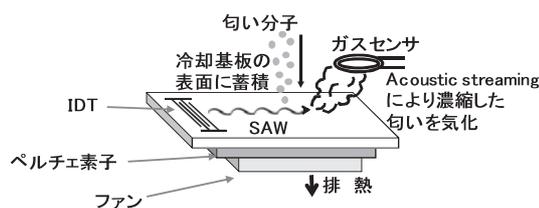


図1 気相中での匂い濃縮

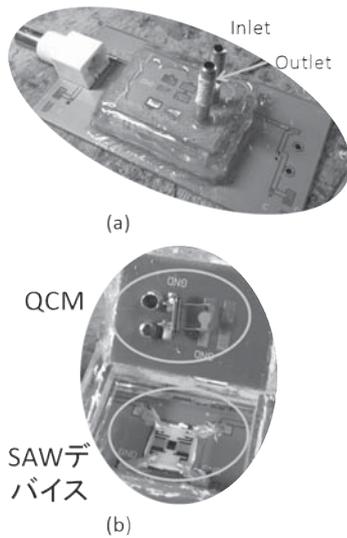


図2 気相検出用濃縮素子の写真  
(a) 全体図, (b) 濃縮素子の内部

の共振周波数は 60 MHz である。IDT 対数は 10 対で外側には 100 本の反射器を配置した。実験では片側のみを駆動した。また、ペルチェ素子の冷却温度は  $-5^{\circ}\text{C}$  ~  $-20^{\circ}\text{C}$  である。

実験では、乾燥空気とサンプルガスの二個のサンプリングバッグを用い、片方には乾燥空気もう片方には対象臭を入れて、電磁弁で切り替え、匂い濃縮素子へ送る。匂い濃縮素子はペルチェ素子と SAW デバイス、ファンから成り、ペルチェ素子の上に SAW デバイスを置き、密閉している。匂い分子はペルチェ素子により冷却され、ペルチェ素子上の SAW デバイス上に凝縮される。凝縮された匂いは SAW デバイスによって霧化され、常に一定の流量 (200 ml/min) でエアポンプによって吸引される。ガスの濃度は QCM (20 MHz, AT-CUT, 感応膜: Siponate DS-10) で発振周波数の変化として FPGA に実装した周波数カウンタを通して記録され、パソコンに転送される。

1-ブタノール 1,000 ppm の濃縮結果を図 3 に示す。匂いを計測開始から 60 秒後に濃縮素子に送り、測定開始後 180 秒から冷却を開始した。冷却は 120 秒間行われ、冷却停止後ただちに匂いサンプルを乾燥空気に戻して霧化を開始した。図 2 で示したのはセンサが SAW デバイ

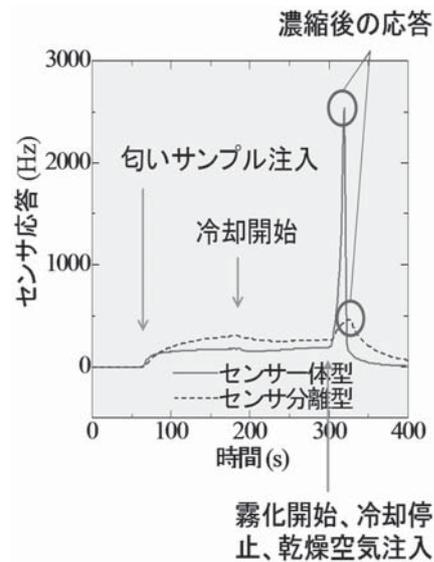


図3 1-butanol (1,000 ppm) の濃縮実験

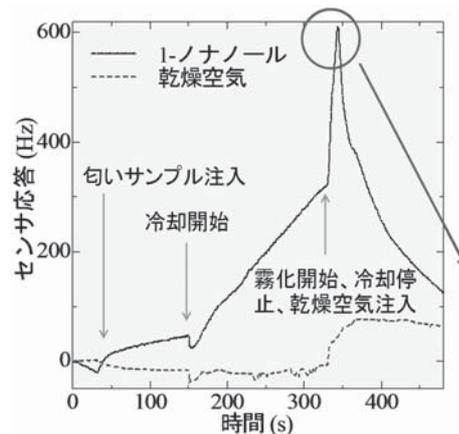


図4 1-ノナノール (3 ppm) 濃縮実験

スと同じハウジングにあるが、図 3 では比較のために両者が分離したタイプの測定も行った。その結果、分離型に比較して一体型の方が大きなセンサ応答が得られた。

次に、低揮発性香気成分である 1-ノナノールを濃縮した結果を図 4 に示す。この時はペルチェ素子を 3 枚用いている。冷却性能が向上したため、低濃度の匂いサンプルを用いて濃縮実験を行った。本実験で用いた匂いサンプルは 1-ノナノールである。匂いサンプルは 200  $\mu\text{l}$  の 1-ブタノールに 20  $\mu\text{l}$  の 1-ノナノールを入れ、その混合溶液を 10  $\mu\text{l}$  サンプリングバックの中に入れ気化させた。1-ノナノール濃度は約

3 ppm である。乾燥空気では明確なピークは得られないが、1-ノナノールでは濃縮後にピークが得られていることが分かり、3 ppm の1-ノナノールに対する濃縮性能を確認した。冷却開始からセンサ応答が増加していく現象が見られたが、これは QCM センサに匂いサンプルが凝縮しているためであると考えられる。

## 2. 液相中での匂い濃縮

図5に液相中で濃縮した匂いを検出する原理を示す。SAW デバイスに供給する電力を下げると SAW デバイス上に凝結した匂いは霧化せず SAW デバイス上を移動する。そこで、プールの中に QCM センサ (9 MHz, AT-CUT) を浸しておけば液相センサで匂いを検出することができる。このようにすると、湿度の影響なしで濃縮した匂いを検出することができるようになる。

液相 QCM センサでは、寄生素子の影響を取り除くために片面のみ液体に接するようにする。そして、ネットワークアナライザにより水晶振動子のアドミタンスを測定し動アドミタンス法によりコンダクタンス最大の周波数を追尾することにより共振周波数測定が可能になる。しかし、液体粘性の影響で水晶振動子の共振抵抗は大幅に増加して Q 値が低下し、共振周波数が安定しない。

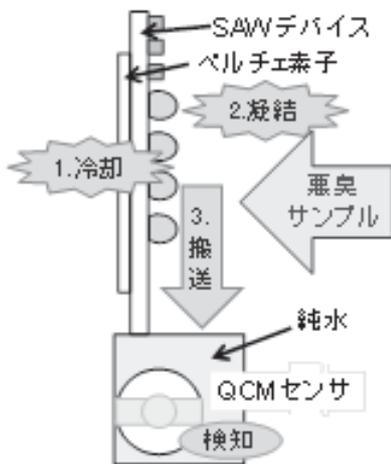


図5 液相中で匂いを濃縮する原理

そこで、ネットワークアナライザで測定された周波数に対するコンダクタンスの波形データを PC で読み込み、その波形の自己相関を取ることによって雑音を除いた波形を得、元の波形との相互相関を取ることによって共振周波数変化を測定する方法を考案した。

液相で QCM を静置した場合の共振周波数変化をネットワークアナライザ (アンリツ: MS4630B) の内部機能による動アドミタンス法と提案手法により 5 分間計測し、その安定性の違いを調べた。水相で QCM を静置した場合に得られた共振周波数変化を図6に示す。同図より、単にコンダクタンス最大の点から共振周波数を求める従来法よりも、提案手法のほうが安定して共振周波数を測定できることがわかった。

次に濃度の異なるグリセロール水溶液を用い、その粘度変化に対する QCM 応答を 2 分間

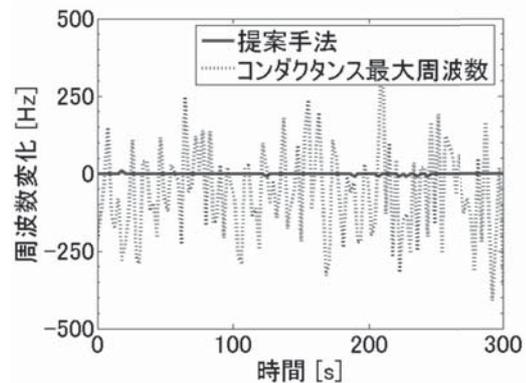


図6 提案手法と従来手法の共振周波数測定結果の比較

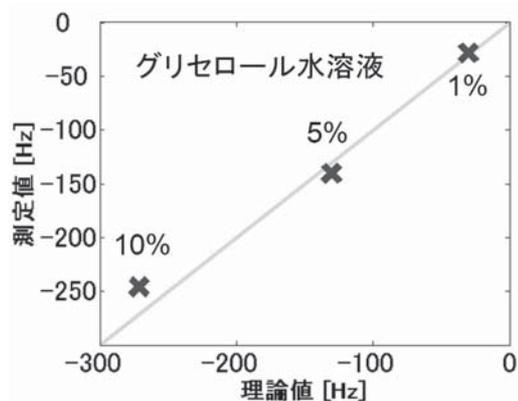


図7 濃度の異なるグリセロール水溶液に対する共振周波数の理論値と実験値の比較

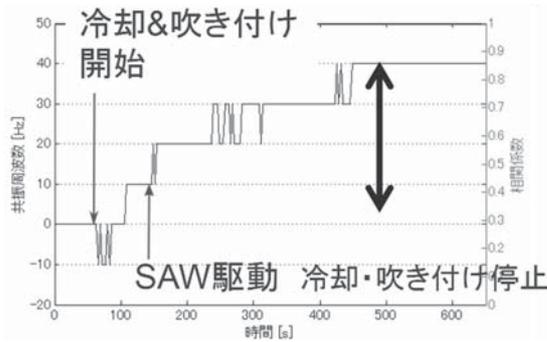


図8 トリエチルアミン濃縮実験のセンサ応答

測定し、その平均値を実験値とし純水に対する応答からの周波数変化を求め、理論値と実験値を比較した。濃度の異なるグリセロール水溶液に対する提案手法で得た応答と25℃のグリセロール水溶液の濃度と密度の文献値から求めた周波数変化の理論値を図7に示す。理論値と実験値は一致し提案した手法により正しく共振周波数変化が計測可能なことがわかった。

次に液相で匂いを検出する装置を構成した。図5の原理の基づき共振周波数は提案手法によりネットワークアナライザで測定する。そして、悪臭物質の1種であるトリエチルアミンの検出を行った。濃縮実験のセンサ応答を図8に示す。センサとしては金ナノ粒子リポポリマ複合膜を塗布したQCMを用いた。冷却によるサンプルの凝結及びSAWによる水中への搬送が

観測され、SAWデバイス駆動後にQCMの共振周波数変化が発生して、悪臭の濃縮、検出を実験で原理的に確認することができた。

#### [今後の研究方向, 課題]

現在は、実験でその動作原理を検証した段階である。今後、装置の安定性を高めて容易に測定できるようにして、低濃度の悪臭物質の検出を行いたい。また、生物の嗅覚受容体は液相で動作するので、嗅覚受容体センサに大気中の匂いを取り込む方法としても実験を行う予定である。

#### [成果の発表, 論文等]

1. 横式, 中本, 弾性表面波デバイスを用いた匂い濃縮素子による低揮発性香気成分の濃縮, 電気学会全国大会, 2013, 3-143.
2. 井沼, 中本, 液相QCMセンサの共振周波数測定法の改善, 電気学会全国大会, 2013, 3-146.
3. 横式, 中本, 弾性表面波デバイスを用いた匂い濃縮素子の研究, 電気学会論文誌E, 132 (2012) 269-274.
4. Y. Yokoshiki and T. Nakamoto, Study of Odor Pre-concentrator Using SAW Device, Proc. International Meeting on Chemical Sensors 2012, 477-480.

## 圧縮センシングに基づく磁気共鳴画像 (MRI) の高速撮像法の開発

### Development of Fast Magnetic Resonance Imaging Technique Based on Compressed Sensing

2021020



研究代表者 立命館大学

共同研究者 広島市立大学

教授 平 林 晃  
(受領時 山口大学 准教授)  
准教授 三 村 和 史

#### [研究の目的]

磁気共鳴画像 (MRI) は現代医療に欠く事のできない技術である。この技術は有益な情報を多くもたらす一方で、撮像時間が長いという問題がある。狭い装置に15分以上患者は閉じ込められ、体の動きに弱いという問題点も生じる。これらの問題点を解決する為に、データ取得を高速に行う手法の開発が求められてきた。

高速化には大きく分けて2種類のアプローチがある。第1は信号取得の並列化などによってハードウェア的に高速化するものであり、現在の高速撮像の多くはこのアプローチに基づく。第2は取得する信号そのものを削減するソフトウェア的なアプローチであり、ハードウェアに依らずに高速化が可能であり、第1のアプローチと組み合わせる事によって更なる高速化が可能になる。本研究は後者に基づくものである。

第2のアプローチにおいて肝要となる画像の性質がスパース性である。この性質は、ベクトルや行列においてほとんどの成分が0であり、残りの少数の成分、例えば10%以下の成分のみが非零であることを意味する。当然のことながら、画像において90%以上の画素が0であるということは一般に起こりえない。ところが、特別な変換を適用した結果、その係数のほとんどが0あるいは非常に小さな値になるのである。このような変換には、医療画像に対しては

ウェーブレット変換などがよく知られている。実際、この性質に基づいてJPEGなどの圧縮処理は行われている。しかしこれらの従来技術では、大量のデータを取得してから圧縮を行っており、高速撮像という観点からは意味がない。圧縮後のデータと同程度の信号を直接取得し、かつJPEGと同程度の品質の画像を復元するための技術が圧縮センシングである。本研究ではMRIに圧縮センシングを適用する事により、高速撮像法を開発する。

#### [研究の内容, 成果]

圧縮センシングにおける信号の復元手法で、最もよく知られたものは $l_1$ ノルム最小化である。この手法を内点法を用いて実現したときの計算量はデータサイズの3乗に比例する。この計算量を削減するために反復アルゴリズムが提案されてきた。この中で、 $l_1$ ノルム最小化による再構成と同じ圧縮率を実現できるものが近似的メッセージ交換 (Approximate Message Passing, AMP) アルゴリズムであり、反復回数をデータサイズによらない値としたとき、その計算量はデータサイズの2乗に比例するにとどまる。このアルゴリズムはもともと、1次元データに対して提案されたものであり、2次元データをラスタスキャンして大規模データに適用すると、観測行列の大きさがデータサイズの

2乗に比例するために、膨大なメモリ領域が必要となるという問題点があった。観測過程が非可分な場合にはこのように対応せざるを得ない。しかし、2次元離散フーリエ変換 (DFT) などのように可分な観測を行う場合には、データ  $X_0$  に対する観測過程を

$$Y = AX_0B \quad (1)$$

と、両側からの行列演算で定式化できる。この表現を用いれば、メモリ領域や計算量をラスタスキャンを用いた場合に比べて大幅に削減できる。このことは即ち、処理可能データサイズを大幅に向上できることを意味する。本稿では、式(1)に基づく AMP アルゴリズムを提案する。

AMP アルゴリズムを直感的に説明すれば、いわゆる繰り返し弱閾値アルゴリズム (Iterative Soft Thresholding Algorithm, ISTA) に、Osager 項と呼ばれる調整項を加える事によって圧縮率を向上させたものである。また、ISTA は最小2乗誤差基準の  $\ell_1$  ノルム正則化に対する勾配法である。

詳細は省略するが、 $X_0$  の各要素が複素数である場合の2次元 AMP アルゴリズムは以下のように導出できる [1]。命題  $P$  が真の場合に1、偽の場合に0を返す指示関数を  $\mathbb{I}(P)$  で表し、画素毎に適用される弱閾値関数  $\eta_t: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  を

$$\eta_t(x) = (x^R - \theta_t \text{sgn}(x^R)) \mathbb{I}(|x^R| > \theta_t) \in \mathbb{R},$$

と定義する。ここで  $\text{sgn}$  は符号関数であり、 $\theta_t \in \mathbb{R}$  は経験的平均2乗誤差 (eMSE) に比例した閾値である。

アルゴリズム 1 (2D-CAMP)。初期値  $X^0 = O$  および  $Z^0 = Y$  を設定し、

$$X^{t+1} = \eta_t(A^*Z^tB^* + X^t), \quad (2)$$

$$Z^t = Y - AX^tB + \frac{1}{2\alpha} \langle H_t^{\text{RR}} \rangle Z_{t-1}^t \quad (3)$$



(a) 原画像



(b) 再構成結果

図1 提案手法による128×128画像の再構成

によって  $X^t, Z^t$  を更新する。ここで、 $A^*, B^*$  はそれぞれ  $A, B$  の共役作用素であり、 $\alpha$  は  $(Y \text{ の要素数}) / (X_0 \text{ の要素数})$  で定義される圧縮率である。また、

$$H_t^{\text{RR}} := \partial_{\mathbb{R}} \eta_t^{\text{R}}(A^*Z^tB^* + X^t),$$

である。 $\langle \cdot \rangle$  は行列成分の平均であり、 $p \times q$  行列  $A = (a_{ij})$  に対して  $\langle A \rangle := (pq)^{-1} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q a_{ij}$  によって計算される。適切な終了条件が成立した場合にアルゴリズムを停止し、 $X^t$  を再構成結果とする。

式(3)の右辺第3項が Onsager 項であり、この項が無い場合の ISTA に比べて提案アルゴリズムの圧縮率を向上させる役割を果たしてい

る。

提案手法による再構成シミュレーションを示す。図1(a)に示す画素数 $128 \times 128$ の画像に対して、式(1)により $112 \times 112$ の観測結果を取得した。圧縮率は $\alpha = 112^2 / 128^2 \approx 0.766$ である。観測行列 $A$ 、 $B$ および観測結果 $Y$ を用いて、提案手法により再構成した結果を図1(b)に示す。平均2乗誤差は $6.89 \times 10^{-7}$ であり、完全再構成できていることがわかる。本シミュレーションは、2.99 GBのメモリを搭載したWindows 7コンピュータ上のMATLABで実装した。再構成にかかった時間は42.07秒であった。この値は、C言語などを用いた実装により更なる高速化が可能である。なお、同じ画像をラスタスキャンにより観測し、1次元AMPアルゴリズムを適用しようとしたところ、同一の計算機環境では実現できなかった。これにより、提案手法の有効性がわかる。

次に、信号密度 $\rho$ に対してどの程度の圧縮率を提案手法により実現できるかを、実験的に評価した。信号の次元は $N \times N = 32 \times 32$ ,  $48 \times 48$ ,  $64 \times 64$ である。いずれの場合にも、スパース率が $\rho = 10/256$ ,  $20/256, \dots, 100/256$ となるように乱数行列 $X$ を100回生成した。得られた行列を式(1)を用いて観測した。このとき、 $A$ 、 $B$ には同一の1次元ランダムDFT行列を用いた。観測数 $M \times M$ における $M$ を1つつ増加させ、100個の乱数行列 $X$ を全て完全再構成できる最小の $M$ から求まる圧縮率 $\alpha = (M \times M) / (N \times N)$ をもって、100%完全再構成閾値と推定した。また、50%完全再構成閾値の結果を図2に示す。赤線、青線、緑線それぞれが、 $N \times N = 32 \times 32$ ,  $48 \times 48$ ,  $64 \times 64$ の場合の結果である。破線は1次元ベクトルに対してランダムセンシングを行った場合の、 $l_1$ ノルム最小化再構成における弱閾値理論値を表している。センシング行列が異なるので直接比較する事はできないが、目安値として表示してある。信号密度 $\rho$ が0.2以上においては、理論値を下

回る圧縮率を実現しており、提案手法の有効性がわかる。図3は $64 \times 64$ 次元画像に対する提案手法(2D-CAMP)の100%および50%復元のための圧縮率をそれぞれ赤線、青線で示している。破線は1次元ベクトルに対するランダムセンシングの圧縮率理論値である。100%圧縮率は50%圧縮率より高い値になっているが弱閾値の理論値を下回っており、提案手法の有効性が示されている。

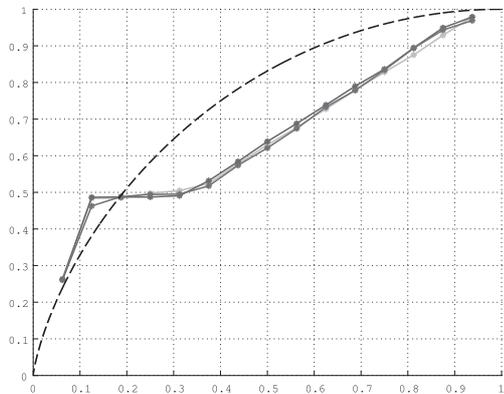


図2 提案手法(2D-CAMP)の50%復元のための圧縮率の実験的評価  
横軸、縦軸はそれぞれ信号密度 $\rho$ および圧縮率を示す。赤、青、緑の線はそれぞれ、 $32 \times 32 = 1,024$ ,  $48 \times 48 = 2,304$ ,  $64 \times 64 = 4,096$ 次元画像に対する結果を表す。破線は1次元ベクトルに対してランダムセンシングを行った場合の圧縮率理論値である。

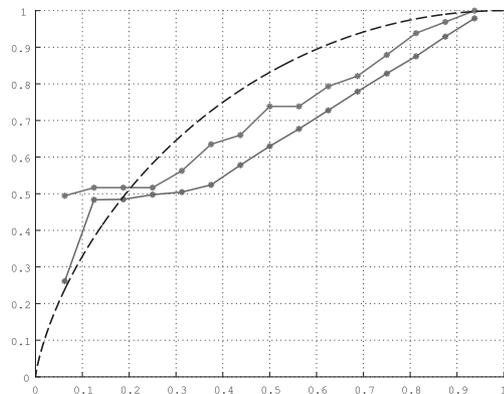


図3  $64 \times 64$ 次元画像に対する提案手法(2D-CAMP)の圧縮率の実験的評価  
赤線、青線がそれぞれ100%、50%復元のための圧縮率を示す。破線は1次元ベクトルに対するランダムセンシングの圧縮率理論値である。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では高速アルゴリズムを提案したが, その評価は理論データに留まっており, 実データに対する有効性は検証できていない。従って今後の研究課題は, 実際の MRI データを用いて提案アルゴリズムを評価する事である。このためには, 圧縮センシングによるデータ取得が必要になるので, 病院などに協力を依頼していくことが今後の課題となる。

[成果の発表, 論文等]

- [1] A. Hirabayashi, J. Sugimoto and K. Mimura, "Complex approximate message passing algorithm for two-dimensional compressed sensing," IEICE

Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, conditional acceptance on April 25, 2013.

- [2] A. Hirabayashi, J. Sugimoto and K. Mimura, "Complex approximate message passing algorithm for two-dimensional compressed sensing," submitted to Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC) 2013.
- [3] 杉本純兵, 平林 晃, 三村和史, "2次元データ圧縮センシングの為に反復再構成法," 第27回信号処理シンポジウム, no.C11-1, pp.602-607, 石垣, Nov. 2012.
- [4] 三村和史, 杉本純兵, 平林 晃, "2次元データ圧縮センシングの為に反復再構成法," 第35回情報理論とその応用シンポジウム, no.3.5.3, pp.241-245, 別府, Dec. 2012.

## 眼底画像における緑内障診断補助ツールの開発

Development of a computer-aided diagnostic tool for glaucoma on retinal fundus images

2021022



研究代表者

岐阜大学大学院 医学系研究科 特定研究補佐員  
知能イメージ情報分野 (客員准教授)

村松 千左子

### [研究の目的]

緑内障は本邦で失明原因の第一位であり、進行を遅らせ完全失明を防ぐためには早期発見が非常に重要である。しかし、緑内障は徐々に進行するため、患者は症状に気づきにくく診断が遅れる可能性がある。眼底画像検査は、検査が比較的容易で安価なため、検診や眼科での診察の際等に頻繁に用いられ、緑内障の早期発見や経過観察にも有用である。

眼底画像上での緑内障の所見として、網膜神経繊維層欠損や陥凹の拡大等があるが、陥凹の拡大は陥凹乳頭径比やリム乳頭径比で反定量的に判定できる。しかし、眼科医は通常時間の制約により、実際にものさしや電子ツールを利用して陥凹比などを計測することは極めて稀で、目視で判断しているのが実情である。そのため、医師間で診断のばらつきが見られ、経過観察での比較が容易でない。また、網膜神経繊維層欠損部と陥凹拡大部は関連性があるが、電子カルテなどに欠損部の範囲を正確に記入することは煩雑である。そこで、これらを自動計測することにより、医師の診断を援け診断効率の改善に寄与できる緑内障診断補助ツールの開発を本研究の目的とした。

### [研究の内容, 成果]

#### 1. 統計モデルを利用した乳頭検出

視神経乳頭部の形状解析を行うには、まず初めに眼底画像より視神経乳頭の位置を検出しなければならない。本研究グループでは、これまで主に輝度値をもとに視神経乳頭位置を特定していた。これは、乳頭は眼底画像で比較的明るく楕円形で描出されるという特長に基づくものである。しかしこの手法では、白斑などの明るい病変が存在した場合や、撮影条件等により輝度値のムラが生じた場合、正しい位置の検出に失敗することがある。そこで本研究では、学習画像より作成した主血管の統計モデルと輝度値モデルを利用した検出法を検討した。

学習画像から太い血管を大まかに検出し、乳頭位置で重ね合わせることにより、血管確率モデルを作成した。また、乳頭部が楕円形に描出される輝度値画像を重ね合わせることにより、輝度値モデルを作成した。モデルの適用には、テスト画像から主な血管を検出し、確率モデルを走査させ、確率スコアが最も高くなる位置を一次候補とした。その後、微調整のため局所領域で輝度値モデルを走査させ、最終位置を決定した。

本手法を学習画像とは撮影機器や画像サイズの異なる、多治見データベースと3つの公開データベース (ROC データベース, DRIVE データベース, STARE データベース) でテス

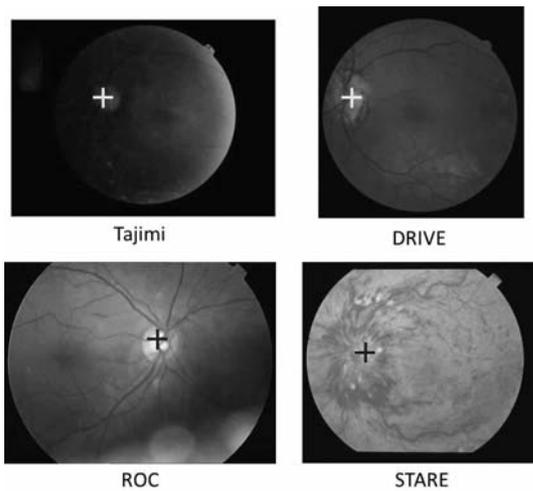


図1 視神経乳頭検出結果

トした。その結果、多治見データベースとROCデータベースでは100%（それぞれ162/162症例，100/100症例），DRIVEデータベースでは97.5%（39/40症例）という良好な成功率を得た。しかしながら，STAREデータベースでは77%（62/81症例）の成功率であった。これは，STAREデータベースには，大きな病変が含まれる症例や，視神経乳頭が一部欠けて写っている症例が含まれることが原因と考えられた。図1に結果の例を示す。今後更なる改良が必要であるが，検診を対象とした場合，概ね良好な結果といえる。

## 2. 網膜血管の検出

眼底画像の解析では，血管の検出は重要な処理の一つである。高血圧性網膜症などの診断のために血管そのものを対象とした場合の他，糖尿病網膜症の診断のため出血や微細動脈瘤と血管を区別したい場合などでも血管検出が必要となる。また，緑内障診断では陥凹辺縁位置を特定するのに血管が妨げとなるため，血管領域を画像から取り除いた血管除去画像を作成する。本研究グループでは，これまでにトップハットフィルタと2重リングフィルタを用いた血管抽出法を開発している。しかし，血管の抽出精度は十分とは言えず，特に，血管壁が滑らかに抽出されない傾向が見られた。その原因の一つと

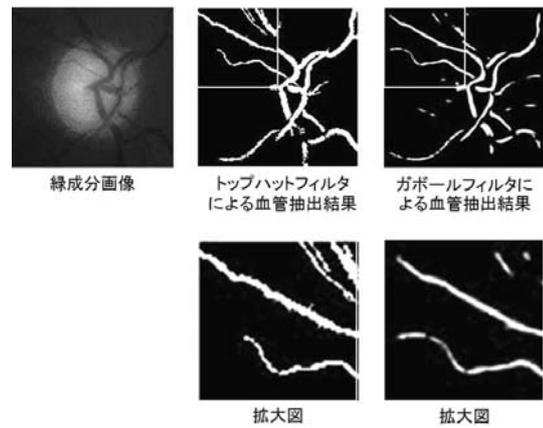


図2 トップハットフィルタとガボールフィルタによる血管抽出結果の比較

して，これらのフィルタは血管が線状構造を持つという性質が利用されていないことが考えられた。そこで，本研究では線状フィルタを利用した血管抽出手法を検討した。

線状フィルタとして，ガボールフィルタを用い，幅の異なる2サイズのフィルタを用意した。各ピクセルにおいて，2サイズのガボール関数をそれぞれ8方向に回転させ，最も高い出力を採用することで血管強調画像を作成した。次に，血管強調画像にミディアンフィルタを適用し，線状要素を減弱させた。両者の差分をとることで線状要素のみを抽出した。その結果，トップハットフィルタを用いた手法と比較して，滑らかな血管壁を持った状態で抽出することが可能となった。図2にトップフィルタとガボールフィルタを用いて血管を抽出した例をそれぞれ示す。

## 3. 陥凹乳頭比の計測と血管の特徴を用いた緑内障のステージ分類

本研究では新しく取得した，ステレオ眼底画像を対象として，陥凹乳頭比（CD比）の計測手法をテストした。手法の全体の流れは，以下の様である。(1) 視神経乳頭位置の特定，(2) 血管抽出と血管除去画像の作成，(3) 乳頭辺縁の抽出，(4) 視差計算による深さ画像の作成，(5) 陥凹辺縁の抽出，(6) 陥凹比の計測。図3に各処理の結果の例を示す。

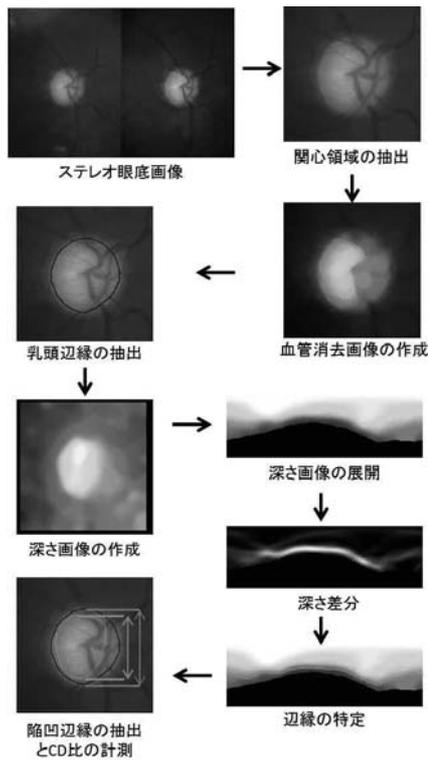


図3 CD比計測処理の流れ

まず初めに、視神経乳頭の大まかな位置を特定し、処理の対象領域を限定するために関心領域を抽出する。次に、乳頭辺縁の抽出に妨げとなる網膜血管を抽出し、血管領域を周辺の画素値を用いて補間した血管消去画像を作成する。乳頭辺縁の抽出は動的輪郭モデルを用いた。Canny フィルタにより検出したエッジを初期モデルとし、エッジ情報と輪郭上の隣接点との平滑性を考慮し各輪郭点を調節する。2枚のステレオ画像より、相互相関を用いて局所領域のマッチングを行い、視差をもとに深さ画像を作成する。最後に最も深い位置を基準に深さ画像を極座標展開し、各列（角度方向）ごとに一定距離で差分をとり、差分値の高い位置を境界と定めた。

また、本手法では新たに血管の情報を用いた緑内障判別法について検討を行った。緑内障が進行すると、陥凹の拡大に伴い乳頭内の血管の走行方向が変化し、血管が鼻側に変位することが報告されている。そこで、乳頭内の血管の分布を表す特徴量を考案した。深さ情報の特徴量

表1 特徴量による緑内障分類結果

ステージ分類	分類結果			
	非緑内障	初期	中期	末期
非緑内障	11 (100%)	0	0	0
初期	2 (22%)	5 (56%)	2 (22%)	0
中期	0	1 (11%)	8 (89%)	0
末期	0	0	1 (16%)	6 (84%)

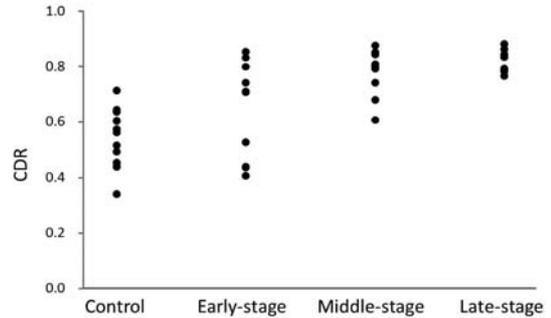


図4 CD比の計測値

6つと、血管特徴量4つをもとに、前向き逐次選択法により特徴量選択を行った結果、深さ特徴量4つ血管特徴量3つの7つの特徴量が選択された。それらの特徴量を用い、k近傍法により緑内障の初期、中期、末期と非緑内障症例の4グループの分類を試みた。

初期的検討として、36症例（9, 9, 7の初期、中期、末期緑内障, 11の非緑内障）を用い、Leave-one-out cross validation法により評価したところ、4クラス分類精度は83.3%であった。また、結果を用いて緑内障と非緑内障の2クラス分類としたとき、分類精度は94.4%であった。結果を表1に示す。これらの症例に対するCD比の計測結果を図4に示す。CD比単独での分類は難しいが、血管の特徴量などと組み合わせることで、分類精度の向上が期待できる。今後さらに多くの症例を用いた検討が必要である。

#### [今後の研究の方向, 課題]

本研究では、眼科医による緑内障の診断を補助するためのツールの開発を行った。乳頭検出、血管抽出、CD比の計測などの基本的な処理ツールの改善を行い、良好な結果が得られた。

しかしながら、CD 比の計測については今後大規模なデータベースでのテストが必要である。また、新たに血管の分布情報を用いた緑内障のステージ分類を行った。こちらについてはまだ初期的検討であるため、今後特徴量の改善を含めた更なる検討が必要である。

本研究では、CD 比計測と緑内障分類の検討にステレオ眼底画像を用いた。しかし、ステレオ画像はまだ一般的に広く普及されていないため、より適用範囲を広げるために、2次元の眼底画像を対象とした技術開発・性能評価を行う必要がある。2次元の画像に対しては、過去にプロファイルを用いた陥凹辺縁の抽出法の開発を行っているため、本研究で新たに検討した、血管情報を用いた手法と組み合わせて今後検討していく予定である。

[成果の発表、論文等]

1. 村松千左子, 畑中裕司, 原 武史, 藤田広志. 眼底

画像における視神経乳頭検出のための眼底モデルの検討. 医用画像情報学会平成 24 年度年次 (第 163 回) 大会.

2. Muramatsu C, Hatanaka Y, Sawada A, Yamamoto T, Fujita H: Computerized analysis of glaucoma detection and staging by depth information and vessel routing in the disc on stereo retinal fundus images. Proceedings of International Forum on Medical Imaging in Asia (IFMIA), 2012.
3. Mizukami A, Muramatsu C, Hatanaka Y, Hara T, Fujita H: Improvement on extraction of low-contrast vessels for assessment of arteriolar narrowing on retinal fundus images. Proceedings of International Forum on Medical Imaging in Asia (IFMIA), 2012.
4. Hatanaka Y, Muramatsu C, Sawada A, Hara T, Yamamoto T, Fujita H: Glaucoma risk assessment based on clinical data and automated nerve fiber layer defects detection. Proc IEEE Eng Med Bio Soc. 2012: 5963-5966, 2012.
5. Muramatsu C, Fujita H: Chapter 19 Detection of Eye Diseases. Eds: Li Q, Nishikawa: Computer-Aided Detection and Diagnosis in Medical Imaging. Taylor & Francis Books, Inc. 2013 (in press)

## 人間機械協調系のための自律ロボット群における 知識獲得・利用法の開発

Knowledge Acquisition and Utilization of Autonomous Robots for Human-Robot Cooperation

2021023



研究代表者

広島大学大学院 工学研究院  
機械システム・応用力学部門

助教

保田 俊行

共同研究者

広島大学大学院 工学研究院  
機械システム・応用力学部門

教授

大倉 和博

### [研究の目的]

近未来において、自律人工物であるロボットと人間が様々な場面で協同作業をする場面に出くわすことが容易に想像される。しかし、現在の知能システムのメインストリームでは、効率・最適指向の組み込み制御に力点が置かれるあまり、Rodney Brooks が必須の性質と指摘した身体性・立脚性などが軽視され過ぎている。ゆえに、本研究では実ロボット群の制御に対して、研究代表者が開発してきた知識獲得と知識利用を適応的に切替える手法の有効性を検証する。特に、これまでに行ってきたマルチロボットシステム (Multi-Robot System : MRS) の実験の拡張として、人間機械協調系に対する創発的問題解決に適用する。

### [研究の内容, 成果]

#### 自律的機能分化に基づく MRS の協調行動獲得とその人間機械協調系への応用

自律的機能分化とは、我々が提案している適応的行動生成のための概念である。これは、複数の均質なロボットで構成される MRS において各ロボットが機能や役割を適応的に見出し、それらを動的に割り当てるといったものである。従来の非均質なロボットで構成される役割が固定の MRS は、ロボットの台数が増減すると

いった環境変化に対し往々にして対応できない。一方、均質なロボット群から状況に応じて自律的に機能分化ができれば、頑健性の向上が期待できる。これまでに、アーム型ロボットの協調荷上げ問題や移動ロボットの協調搬送問題において、均質な複数台のロボットによる協調行動獲得を実現している。

それらの先行研究では、各ロボットはパートナーの台数やタスク、さらには環境変化に関する情報などを与えられていないにも関わらず、自律的機能分化によって協調行動の獲得に成功している。このことから、ロボットはたとえパートナーが人間であったとしても協調的に振る舞えると考えられる。すなわち、人間機械協調系への拡張が期待できる。本研究では、この自律的機能分化に基づくロボット群と被験者との協調行動獲得実験を行う。特に、実験成功後の被験者交代という環境変化に対して適応できるか否かを検証することで、MRS の頑健性について検証を行う。

#### 連続な状態・行動空間を自律的に分割する機構を持つ強化学習法とその拡張

自律的機能分化する MRS は、個々の行動だけでなく他ロボットとの間での役割分担も発現し得る高い知能を持たなければならない。そのような観点から、我々はロボットが自らの経験に基づき連続な状態・行動空間を自律的に

分割する強化学習法 Bayesian-discrimination-function-based Reinforcement Learning (BRL) を研究・開発している。BRL は状態空間をガウス分布によるパラメトリックモデルを用いて記述し、ベイズ判別法により実行する動作を決定する。BRL では、ベイズ判別法により入力データがどの状態にも識別されなかった場合、新しくガウス分布を追加して状態空間を分割する。既存の状態に識別された場合、ガウス分布のパラメータを修正して状態空間の分割を逐次更新する。そのため、未知環境など入出力データが少ない状況でも状態空間を分割することが可能となり、タスク達成に有用な行動を迅速に獲得することができる。

しかし、BRL はガウス分布のパラメータを逐次更新するため実験によっては過学習が発生し、汎化能力が低下するという問題があった。BRL が入力データを充分収集した段階で、その入力データを基にノンパラメトリックモデルを用いて類似状態を記述し、Support Vector Machine (SVM) によって状態空間を分割する手法を提案した。この手法は、SVM を用いることで汎化能力を維持しつつ意思決定することが可能であり、既に獲得した有用な行動をより有効に利用できる。

#### 協調荷上げタスクによる検証

被験者一名とアーム型ロボット二台が、荷物を傾けることなく規定の高さまで持ち上げることがタスクである (図1)。ロボットは床に置かれており、タスク開始時の荷物の高さは床か

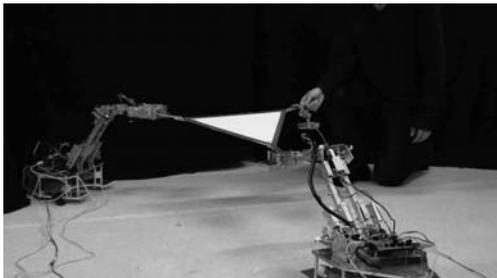


図1 ヒトとロボット群の協調荷上げタスク

ら約 100 mm であり、タスク達成に必要な荷物の高さは床から約 450 mm である。実験の特徴は以下のように表される。

- 各ロボットは二関節のアーム型ロボットで、各関節にサーボモータとポテンシオメータが取付けられている。
- 各ロボットに搭載されている PC や CPU は同一のものを用いる。すなわち、各ロボットは均質である。
- 各ロボットが知覚できるセンサ情報は、関節の角度と先端の荷物の傾きのみであり、直接的に他ロボットや被験者の状態を知覚できない。明示的な通信を用いていない。
- 各ロボットはそれぞれ独立した学習器により非同期で制御される。
- 持ち上げの成否は、被験者の荷の把持部と各ロボットのアーム先端に取り付けられた IR センサによって判定する。ただし、IR センサはロボットと独立に制御されており、IR センサの情報をロボットが知覚できない。さらには、ノイズによって正しくゴール判定が行われない場合があり、評価系にも不確定な要素を含んでいる。
- 被験者に対し、これまでの研究で観察された振る舞いのうちのリーダ役を担うように指示する。被験者は常に各ロボットのアーム先端を下に見るように、アームを高く保つ行動をとる。荷の傾きの保ち方などについては被験者に一任する。

【ロボットの設定】自作したロボットはアーム部分、台車、制御系から構成される。アーム部分は台車にマウントされている。各関節にはサーボモータが取り付けられており、0.35°の精度で、0~120°の範囲で制御できる。また、実際の姿勢についての情報を得るために各関節にポテンシオメータを装備している。台車の車輪は受動車輪であり、全方向に回転する。

【制御器の設定】 入力 は 各 関 節 角 度 と 荷 の 傾 き、

出力はサーボモータの角度変化量である。入出力の1サイクルを1ステップとし、70ステップ経過するかタスクを達成するまでを1エピソードとする。エピソード終了後はロボットを初期位置に戻し、エピソードを更新する。ロボットへの報酬はタスク達成時に与えられ、罰は荷を10°程度以上傾けた場合に与えられる。10エピソード連続でタスク達成したとき、学習成功と定義する。BRLのパラメータはこれまでの研究で得た推奨値を用いた。

【実験結果】まず、基礎実験として、ロボット一台と被験者一名で実験を行う。学習成功後、学習結果を複製したロボットを一台新規投入し、追加実験を行う。

基礎実験において、全10試行中、従来型・拡張型BRLのいずれでも9試行が学習成功した。学習成功までには、従来手法で36.67、拡張手法で31.44エピソードを要した。このことから、提案したSVMによる知識利用法により、学習が高速化できた。そのうち、9試行全てでロボットを一台追加した場合でも再び学習成功することができた。

図2に提案手法を用いた基礎実験での学習履歴の一例を示す。13エピソードまでは一度のみタスク達成をしているが、それ以外では多くの罰を受けている。14エピソード以降は連続してタスクを達成している。

続いて、基礎実験と追加実験におけるアーム

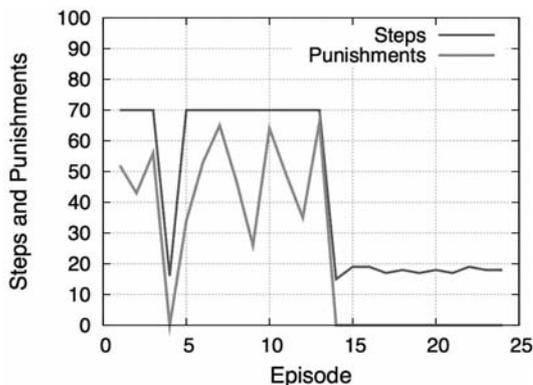
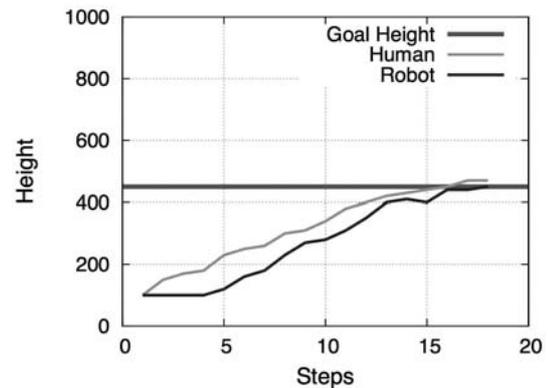
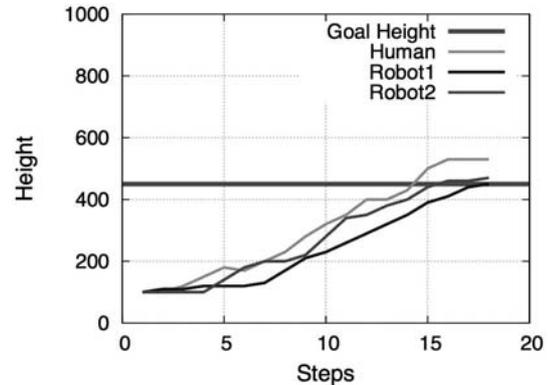


図2 学習履歴の一例

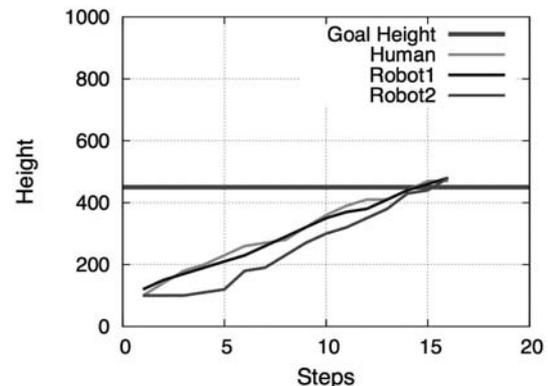
先端高さの推移の例を図3に示す。(a)からロボットはリーダ役の被験者に追従していることがわかる。その後、追加実験では追加投入されたロボットは元のロボットと同一の知識を持つが、(b)と(c)に示すように、同じ行動をするわけではない。また、エピソードの更新後には別のルールを用いたり、異なる方法でルールを切替えていることが確認できた。



(a) 14エピソード



(b) 24エピソード

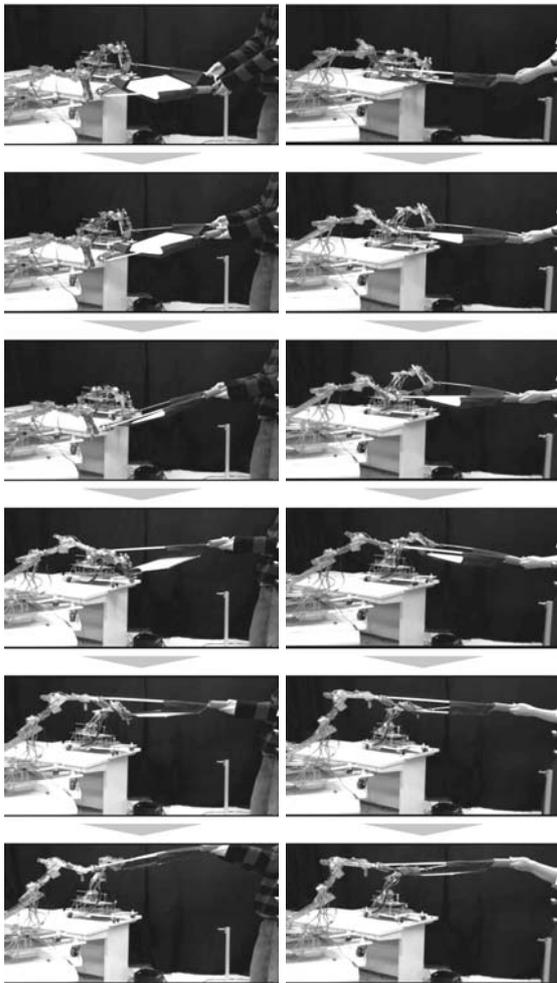


(c) 25エピソード

図3 アーム先端高さの推移

【考察】 その他の実験として、未学習のロボット二台と被験者一名での協調荷上げタスクなどを取り扱った。その際、被験者との行動獲得後に (i) 同じ役割の別被験者と交代, (ii) 被験者はそのまま異なる役割を変更するなどといった環境変化を行った。被験者が担当するリーダー・フォロワといった役割に関する知識を持たないにも関わらず、ロボットは様々な状況に適應することを確認できた (図 4)。学習の

過程で、未経験な状況に遭遇すると新しいルールを生成し、既存のルールを利用した場合にはパラメータを更新する。特に、既存ルールの利用において拡張型 BRL は有効であった。このような知識獲得・利用を通して、様々なパートナーと協調することを確認した。これらの結果から、自律的機能分化に基づく人間機械協調系という新しい知能システム設計論の実現可能性を示すことができた。



(a) リーダの被験者 (b) フォロワの被験者  
図 4 スナップショット

#### [今後の研究の方向, 課題]

MRS を構築するロボットの台数やそれらと協働する被験者数の増加を予定している。さらに、より多くの被験者との実験を繰り返すことで協調行動獲得に対する BRL の汎化性能評価を行う。また、本実験では評価の対象外とした獲得行動の効率性や正確性、そしてユーザビリティなどについても、将来的にはより詳細に議論していきたい。

#### [成果の発表, 論文等]

1. T. Yasuda, S. Nomura and K. Ohkura: Self-Organized Task Allocation between Reinforcement Learning Robots and a Human Partner, International Journal of Advancements in Computing Technology, Vol. 4, No. 22, pp. 230-238, 2012.
2. S. Nomura, T. Yasuda and K. Ohkura: Validation of Robustness of Reinforcement Learning Robots Cooperating with a Human, Proceeding of the 16th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, pp. 158-163, 2012.
3. T. Yasuda, K. Kage and K. Ohkura: Robust Reinforcement Learning Technique with Bigeminal Representation of Continuous State Space for Multi-Robot Systems, Proceedings of the SICE Annual Conference 2012, pp. 1552-1557, 2012.

## デザイン性と作業性を両立した対向3指を備えた 作業用電動義手の開発

Electric Prosthesis Having Three Opposed Fingers with Functionality and Design

2021024



研究代表者	(独) 産業技術総合研究所 知能システム研究部門	特別研究員	吉川 雅博
共同研究者	国立障害者リハビリテーション センター研究所 運動機能系障害研究部	室長	河島 則天

### [研究の目的]

現状、前腕切断者が使用可能な作業用の義手には、能動フックと筋電義手がある。能動フックは切断肢と反対側の肩の動きを利用してケーブルを牽引しフック状の手先の開閉を操作する義手であり、作業性が高く精緻な作業に適している。ただし、能動フックはケーブルを牽引するハーネスを体に装着するため装着性が悪く、フックの外観が損ねているため。使用に際しての心理的負担が大きい。

一方、筋電義手は人間の手に近い外観を有し、切断端の筋電を用いた直感的な操作性が特長である。能動フックのようにハーネスを必要としないため、装着性も良い。現状の作業用義手の研究開発は、5指の筋電義手をいかに実現するかに注力されている。ただし、5指の筋電義手は複数のアクチュエータ、複雑な機構、高性能なプロセッサが必要となり、必然的に高価となる。そのため、日本国内の補装具の支給制度では入手が困難である。また、1kg近い重量のためようやく入手しても使用を中止するユーザも多い。

以上の理由により、前腕切断者の多くは作業用義手を使用せず、消極的選択として機能性のない装飾義手を使用しているのが現状である。

そこで、本研究では作業性、操作性、装着性

などの機能性とデザイン性に優れた軽量・低コストの電動義手を開発し、切断者に新たな作業用義手の選択肢を提案する。開発する義手は人間同様の5指が必要という発想を転換し、対向配置の3指をリニアアクチュエータで制御する機構とすることで、低コスト・軽量化を図るとともに、優れた作業性を実現する。また、安価な距離センサを用いることで、筋電センサ同様の直感的な操作性を低コストで実現する。切断端とのインタフェースとなるソケットは、普段は装飾義手を使用している場合でも、自宅や職場における作業用として使い分けられるように、容易に着脱可能とした。そして、愛着を持って使えるように、道具として洗練された外観を備える。本稿では、上記開発方針に基づいて試作した電動義手と、上肢機能の評価テストSHAP (Southampton Hand Assessment Procedure) に基づいた切断者による試作義手の評価結果について報告する。

### [研究の内容と成果]

#### 1. 試作義手の概要

図1に試作した電動義手(左手用)の外観と図2に内部機構を示す。義手の構成要素は、大きく分けてハンド、ハンドホルダ、ソケット、距離センサ、サポータに分けられる。ハンドは

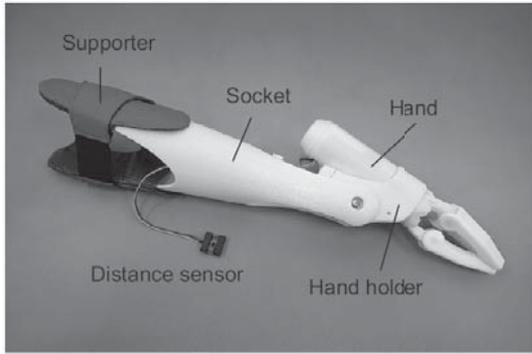


図1 試作した義手の外観

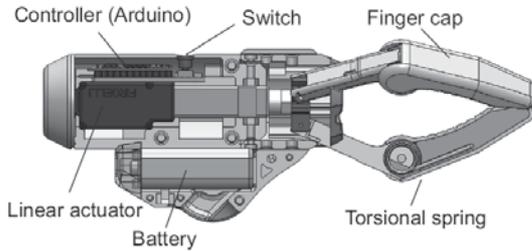


図2 義手の内部機構

リニアアクチュエータで開閉する対向配置の3指を備える。前腕に距離センサを装着し、筋収縮時におけるセンサと皮膚表面間の距離変化に応じて指の開閉を行う。切断端を挿入するソケットは、サポータの留め具で締め付けることで容易に装着できる。ソケットを含む重量は300 g、低コスト（4万円程度）で試作可能である。

### 1.1 対向配置の3指

提案義手は対向に配置された同一形状の3指が同時に開閉することにより対象を把持する。図3のように手先の位置を二等辺三角形となるように配置することによって、各指が干渉することなくペットボトルなどの円筒形の物体を把持（握力把持）することが可能となっている。図4の左図に示すように、OttoBock社などの3指の筋電義手は、リンクの運動方向が回転軸に対して直交しているため、平板状の対象を把持する場合、回内外を行わずに把持可能な方向は1種類のみである。一方、図4の右図に示すように、3指を対向に配置すると、回内外を行わずに3種類の把持方向が可能である。そのため、肩や体幹の動きで回内外の動きを補償する

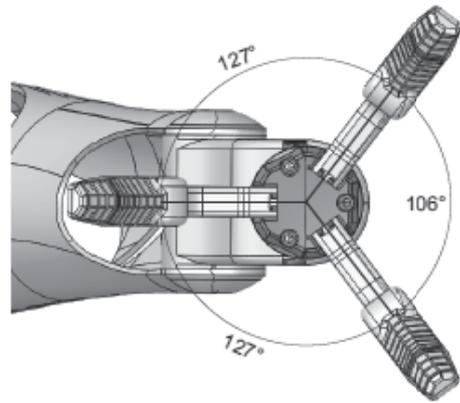


図3 手先の配置

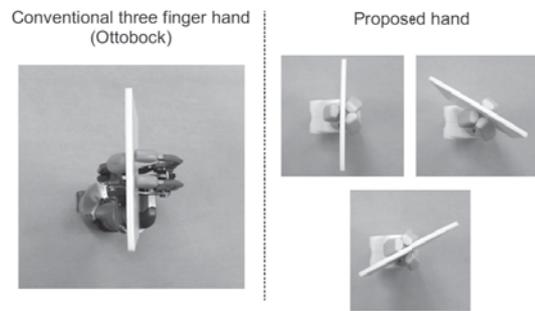


図4 既存の義手との把持可能方向の比較

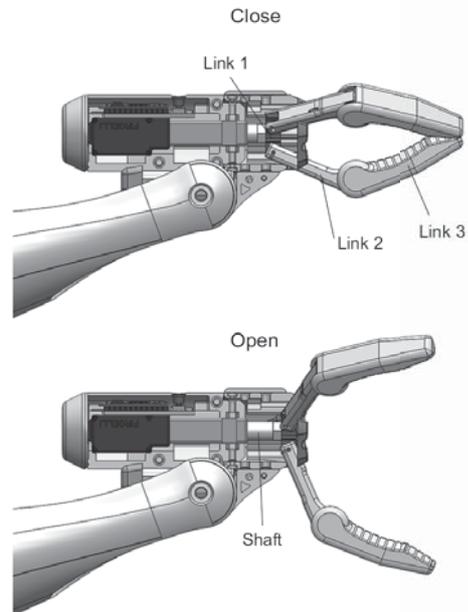


図5 指開閉の機構

代償動作を抑制し、無理の無い姿勢での操作が可能となる。図5に示すように、リニアアクチュエータで3指を直接制御するシンプルな機構により、軽量・低コスト化も実現できる。

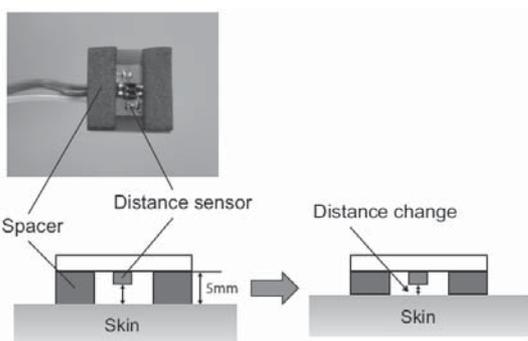


図6 距離センサ

### 1.2 離センサに基づく操作システム

図6に示す反射型光距離センサ（フォトリフレクタ）で捉えた、筋収縮時におけるセンサと皮膚表面間の距離変化に基づく操作システムを備える。筋電義手の筋電センサと同様の直感的な操作性が、低コストで（1,000分の1程度）実現できる上、非接触のため汗による誤動作を起こしにくい。安静時と筋力発揮時のセンサデータを用いて、短時間で個人に適応可能なアルゴリズムを実装している。

### 1.3 容易に着脱可能で快適なソケット

従来の義手は切断端を挿入するソケットを、義肢装具士が時間をかけて適合・製作する必要があり、気軽に義手を製作することを困難にしていた。本ソケットは、切断端のサイズに合わせて調整可能であり、専用サポータで締め付けることで容易に装着できる（図7）。サポータ裏地は、抜け落ち防止と快適性を実現する特殊素材となっている。このソケットとサポータによって、装飾義手ユーザでも本義手を容易に着脱して作業に用いることができる。

### 1.4 道具として洗練されたデザイン

提案義手は、人間の手の外観を模倣するのではなく、日常作業に用いる道具としての機能美を重視して外観をデザインしている。対向配置の3指、着脱が容易なソケット、距離センサを用いた操作システムなどの機能性を担保しながら、身体と調和する滑らかな曲線から成る外観デザインにアプローチしている。指先キャップとサポータの色の組み合わせを変更するだけで、義手の印象を変えることが可能である。

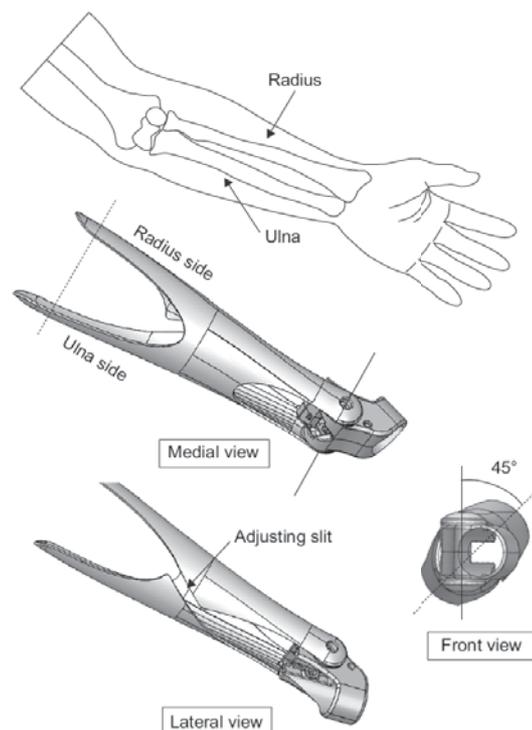


図7 切断端を挿入するソケットのデザイン

## 2. 切断者による評価

試作義手の有効性を検証するため、前腕切断者による評価を行った。被験者は1名の左前腕切断者（男性、60代）である。評価には上肢機能の評価テストであるSHAPを用いた。SHAPは日常生活における把持タイプの使用頻度の分析などに基づき、図8に示すような手が日常的に行う6種の把持の能力を評価する。軽量物（木材）または重量物（金属）から成る12種の抽象物体を、机上の規定の位置へ移動に要する時間により評価を行う。

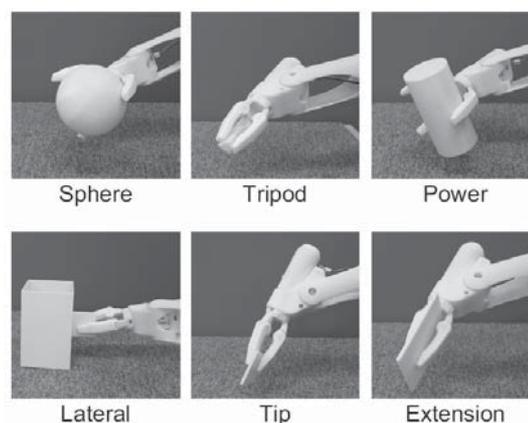


図8 義手による6種の抽象オブジェクトの把持

表1 SHAP テストの結果

Crip type	Time [s] (weight [g])	
	Light	Heavy
Sphee	5.1 (18)	9.8 (530)
Tripod	5.1 (1)	6.5 (21)
Power	4.8 (12)	8.1 (530)
Lateral	6.0 (2)	F (143)
Tip	6.2 (1)	5.0 (71)
Extension	6.5 (21)	6.1 (236)

表1にテストの結果を示す。軽量物に関しては、すべての把持タイプで7秒以内に達成できた。重量物については、側面つまみ(Lateral)を除いて10秒以内で達成できた。重量物の側面つまみ以外の11課題は困難なく達成出来たことから、前腕切断者が試作した義手を用いて6種の把持を反映した抽象物体の操作が可能であることを確認できた。日常的に作業用義手を使用しない切断者が10分程度の練習で操作できるようになったことから、距離センサを用いた操作システムが有効であることが示された。また、被験者は短断端であったが、物体を把持した状態でもソケットから切断端が抜け落ちず、十分な懸垂力が発揮できることが示された。

#### [今後の研究の方向, 課題]

今後はSHAPテストで洗い出された課題を解決し、より多数名の切断者についてユーザ評価を行う。特に、日常生活場面での長期使用における使用感や耐久性などについて評価を行う。また、従来の筋電義手や能動義手のユーザを対象に使用中の義手と本義手との比較を行いたい。さらに、単なるユーザ評価だけでなく、本義手を用いることで起こる脳の可塑的变化(道具の身体化)や幻肢痛への影響について研究する予定である。

#### [成果の発表, 論文]

- [1] Masahiro Yoshikawa, Yuya Taguchi, Shin Sakamoto, Shunji Yamanaka, Yoshio Matsumoto, Tsukasa Ogasawara, Noritaka Kawashima, "Trans-Radial Prosthesis with Three Opposed Fingers," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013), Tokyo, Japan, Nov. 2013 (accepted).
- [2] 吉川雅博, "機能性とデザイン性を兼ね備えた作業用電動義手," 第4回電動義手研究会, 兵庫, 3月, 2013.
- [3] 吉川雅博, 松本吉央, 田口裕也, 小笠原司, 阪本真, 荒牧 悠, 中村耕太, 大長将之, 角尾 舞, 山中俊治, 河島則天, "操作性とデザイン性を両立した作業用電動義手," SATテクノロジーショーケース2013, pp.54, 茨城, 1月, 2013. (プレゼンテーション表彰 ベスト・アイデア賞)
- [4] 阪本 真, 荒牧 悠, 中村耕太, 大長将之, 山中俊治, 河島則天, 吉川雅博, 田口裕也, "前腕切断用電動義手," 慶應義塾大学 SFC 研究所 SFC Open Research Forum 2012, 東京, 12月, 2012.
- [5] 田口裕也, 吉川雅博, 河島則天, 松本吉央, 小笠原司, "筋収縮に伴う断端の形状変化で操作する対向3指を備えた作業用電動義手," 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (LIFE2012), pp. GS1-5-2, 名古屋, 11月, 2012.
- [6] 吉川雅博, 田口裕也, 河島則天, 松本吉央, 小笠原司, "筋電センサとフォトトリフレクタを組み合わせたハイブリッドセンサによる手の動作認識," 第30回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 4C2-4, 北海道, 9月, 2012.
- [7] Masahiro Yoshikawa, Yuya Taguchi, Noritaka Kawashima, Yoshio Matsumoto, Tsukasa Ogasawara, "Hand Motion Recognition Using Hybrid Sensors Consisting of EMG Sensors and Optical Distance Sensors," 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (Ro-Man 2012), pp. 144-149, Paris, France, Sep. 2012.

(特許出願)

「電動把持装置およびハンドユニット」, 吉川雅博, 田口裕也, 河島則天, 山中俊治, 特願 2013-008761

## 画像距離センサによる脳性麻痺者インタフェースの開発

### Development of Interface for Cerebral Palsy Patient by Image Range Sensor

2021025



研究代表者	(独)産業技術総合研究所 サービス工学研究センター	主任研究員	依田 育士
共同研究者	国立障害者リハビリテーション センター研究所 障害工学研究部	室長	中山 剛
共同研究者	国立障害者リハビリテーション センター研究所 福祉機器開発部	室長	伊藤 和幸

#### [研究の目的]

切実にパソコン操作を望んでいるにもかかわらず、特に痙性や不随意運動により、従来の既存インタフェースである各種スイッチ・視線入力装置等が利用困難な脳性麻痺者が存在する。このような重度障害者を対象としたマンマシンインタフェースを安価に実現するために、画像距離センサを利用した非接触非拘束インタフェース開発を目的として研究を行った。

人が見れば理解可能な重度障害者の意図した動きを距離画像センサで読み取り、障害者とその介助者らと協調したアジャイルなシステム開発を通して、人間と機械の調和を促進する基礎研究として行った。

#### [研究の内容, 成果]

1年間という研究期間を考慮して、既存インタフェースの利用困難な典型的な脳性麻痺者1名を対象として、実働するシステムをユーザの意見を最初から汲んだアジャイルなシステム開発を行い、移動や振動する認識対象に対するロバストなジェスチャ認識の実現を目指した。

また、一般ユーザへの普及を目指し、安価なシステムにするために、既に研究を進めてきたステレオビジョンを利用することで培った距離

画像に関する技術を、屋内限定(直射日光不可)ではあるが近距離で高精度な市販された安価なパターン投影法センサに用いた。

以下に研究開発の手順を示した。

- ・他のユーザの規範になり得る脳性麻痺の典型的なユーザ1名を選定。
- ・具体的な達成目標をパソコン上の文字入力とする。
- ・ジェスチャ認識と意図理解以外の部分は、市販されているPCのオンスクリーンキーボード入力ソフトに接続し、ユーザの希望を取り入れながら開発を行い、安価に入手可能なパーツから構成する。
- ・複数のジェスチャ認識に対応可能にすべく、認識部分をモジュール化する。
- ・距離画像からのジェスチャ認識エンジン、適合部分の改良に注力する。

#### 1. 対象者のデータ収集

中心対象は脳性麻痺者の指の動きとした。現状の対象者は、特殊に作り込んだ押し込み式のスイッチを中指に装着して利用している。この指の動きを認識ジェスチャの対象とした。また、同時に舌の出し入れ、頭部の左右の振り、膝の開閉という計4種のジェスチャに関しても、計3名の脳性麻痺者らの協力を得て表1に示すようなデータを取得した。これは、1回のデータ

表1 取得データの種類と日数

実験協力者	ジェスチャ	日数
1	指の動き	42
1	舌の動き	2
2	頭部の左右の振り	27
3	両膝の開閉	19

取得時間は約5分と短くし、その代わりに、日数を増やした。これにより、特に中心対象とした指の動きデータに関しては、日々の変動に対応すべく、重点的に多数のデータを取得した。

## 2. 各モジュールの認識

### 2.1 指ジェスチャ認識モジュール

指ジェスチャ認識に関しては、実験協力者が最もやりやすい方法として1本の指の折り曲げとし、対象とする指に色つきの指サック（カラー手袋の指1本部分と同等品）をつけて、以下の仕様とした。

- ・1本の指が曲がった状態か否かの判定
- ・指サックを利用して5本の指のどれでも可能
- ・指サックは赤・緑・青の三色から選択（服と被らない色を選択）

今回の認識実験では、特定1ユーザに対するインタフェースへの利用であるため、ユーザに合わせたパラメータを実験的に構築し、画面表示されているように（図1）、各種パラメータを手動で調整する機能を実装した（長期的には



図1 指ジェスチャ認識モジュールの画面

表2 手動調整可能なパラメータ

設定項目	内容
Parameter Settings ・ min-depth ・ max-depth ・ hue ・ bright	認識対象とする距離画像の最小値と最大値の指定 色相と明るさの指定
Hue Hand and Finger	手の彩度の最小値と最大値の指定 使用指サックの色指定
Finger Base	指曲げ判定の閾値の設定
Check	指曲げ時に動作する挙動の指定 (Click, a ボタンを押す, 音を鳴らす)

この部分の自動化、日々の変動への対応を自動化する)。

認識アルゴリズムとしては、指定された距離空間の中で、指を発見し、指位置を基に手を抽出、指と手の関係から指の折り曲げ度合いを計算する。

以下のそのアルゴリズムを示した。

#### 指検出

- ・手が入り得る3D空間を設定
- ・3Dでテクスチャ画像を抽出
- ・テクスチャ画像から指サックと同じ色を抽出
- ・抽出範囲をラベリング
- ・最大ラベルを指と認識

#### 手検出

- ・3Dで抽出された指近傍のテクスチャ画像から肌色領域を抽出
- ・抽出領域内をラベリング
- ・指に最も近いオブジェクトを手と認識

#### 指曲げ判定

- ・指と手のモーメントを計算
- ・モーメントから2軸の角度を計算
- ・指と手の角度の差を計算し、設定閾値を超えたときに指曲げを判定

### 2.2 頭部ジェスチャ認識モジュール

頭部ジェスチャ認識に関しては、鼻を中心とした領域の距離画像から法線方向を求め、その向きを顔の向きとした。そして、ユーザの希望する動き方をスイッチとして割り当てる仕様とした。

- ・顔向きのリアルタイム推定
- ・設定する特定の向きに顔を向けたときにス

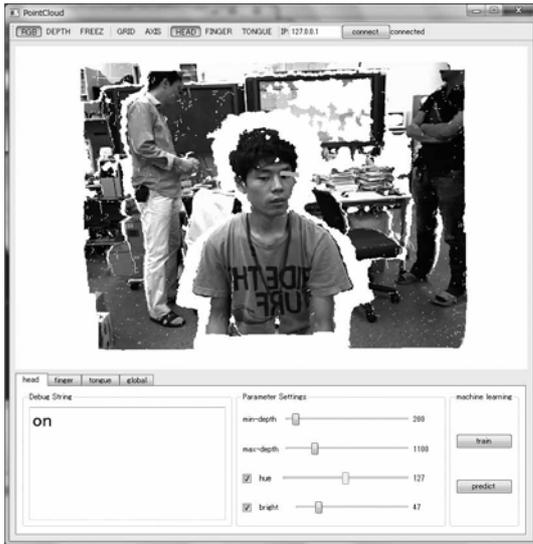


図2 頭部向き認識モジュールの画面

イッチとして動作

- ・右を向いたときにクリックイベントを発生
- 図2の顔の眉間部分に示されたバーが、顔の法線方向を示す。スイッチが入る法線方向の変化と、動作を記述して使用する。

頭部向き推定のアルゴリズムは、顔のトラッキング、鼻のトラッキング、顔領域の法線の計算の順に実施される。

#### 顔のトラッキング

- ・距離情報を元に頭部の大まかな領域を計算
- ・ラベリングによって、顔のラベルのみ抽出

#### 鼻のトラッキング

- ・抽出された顔画像をズーム、回転、位置に関して正規化
- ・最もカメラへの距離が近い点を鼻とする

#### 顔領域の法線計算

- ・鼻を中心とした領域の距離情報から、顔の法線（向き）を計算

### 2.3 舌ジェスチャ認識モジュール

舌ジェスチャ認識は、単純に舌を意図して出しているか否かの判断を行い、その舌を出している時間が一定時間を超えたときにスイッチをONとする仕様とした。そして、ユーザの希望する動き方をスイッチとして割り当てる仕様とした。個人の舌の色や照明環境に合わせて色の閾値設定において、個人や照明環境の依存度



図3 膝ジェスチャ認識モジュールの画面

が現在は大きい。

### 舌ジェスチャ認識のアルゴリズム

- ・頭部認識のアルゴリズムと同様に顔のトラッキングを実施
- ・顔のラベル内のRGB情報をHSV情報に変換
- ・設定した舌のHue閾値によってフィルタリング
- ・ラベリングにより、一定サイズ以上のラベルを舌と認識

### 2.4 膝ジェスチャ認識モジュール

指、頭部、舌ジェスチャに関しては、全てが同時に実行可能な、カメラ設定であったが、膝（脚部）の認識に関して、膝を中心に映るように、アームを使ってカメラをディスプレイよりも高く設置し、見下ろすような配置とした。

- ・両膝位置をリアルタイム推定
- ・両膝を閉じた時にスイッチとして動作

膝位置推定のアルゴリズムは、膝領域を切り出し、左右の各端側から山登り法による両膝位置を推定する。ここでのユーザは、一定時間以上両膝をつけた場合をスイッチオンとした。

### 3. 指ジェスチャの認識実験

4つのジェスチャ認識モジュールの同時実装を行ったが、最終的に、指ジェスチャに関して実際のユーザによる詳細な評価実験を実施した。実験方法は、図4に示すようなスクリーン走査型の文字入力ソフトを簡易化した入力インタ



図4 評価用入力課題画面

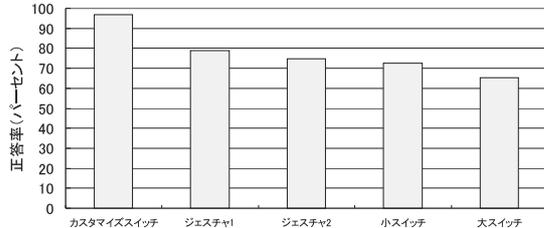


図5 各スイッチの平均正答率

フェースを自作し、利用した。画面上には、5つのボタンが表示され、青色のハイライトボタンが2秒単位で左から右に移動する。赤色に表示されたボタンにハイライトが来たときに、指ジェスチャによるスイッチを入れる実験を実施した。1回の操作で、連続して10回の入力を行う。また、表示される場所は、毎回ランダムに変化させた。

比較実験として、今回のジェスチャインタフェース、本人が現在半年以上使用している作り込んだ指装着型スイッチ、既存のスイッチ(大型と小型)の4種のスイッチに関して全く同条件で、実験を行った。ジェスチャインタフェースとカスタマイズスイッチ、ジェスチャインタフェースと市販スイッチ大小2種の2回に分けて、各スイッチで同じ課題を交互に3回行った。1巡目で正しく押せなかった場合は、2巡目、3巡目と正しいタイミングで押されるまで入力作業を行った。

図5に示したように、平均正答率は、カスタマイズスイッチ > ジェスチャ1回目 > ジェスチャ2回目 > 市販スイッチ小 > 市販スイッチ大という結果になった。

また、図6は、操作時の録画ビデオ画像を目視確認することで、誤入力の原因を手動で分類した。詳細な内訳を見ると、特に2回目のジェスチャインタフェースは、認識能力の向上により改善可能と思われる不随意運動とシステムの

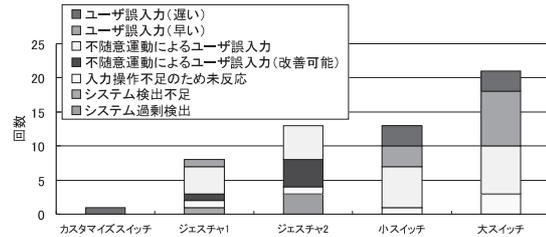


図6 各誤答の回数と原因

検出過剰による誤認識が5割を占めており、個人の動きを学習することで誤認識を半分程度まで削減可能と予測される。また、既存のスイッチは、ユーザの慣れが必要とされることが伺える。

#### [今後の研究の方向, 課題]

本研究においては、1年間という短期間で特定ユーザを対象に、認識部分をモジュール化したシステムを構築し、指ジェスチャ認識に関する基本機能を実証した。また、対象とした認識部位は、指の動作を中心としながらも、頭部の左右の首振り、舌の出し入れ、膝の開閉に対する、計4つの基礎モジュールを作成した。しかしながら、より多くの重度障害者に対応するには、さらに対象部位を増やす必要がある。具体的には、特に上肢、上腕、肩の動きに対する対応モジュールが考えられる。そのために対応する障害者の人数を、各部位に関して、5名程度ずつデータを収集し、それらに対応可能になるように認識モジュールを開発する必要がある。これは、基本的に実験協力者を増やせば可能と考えている。

同時に、ユーザの長期変動に対する対応に関しては、1年以上の長期に渡り、その変動データを収集し、その変動に対応しつづける進化する認識機構の研究開発が望まれ、今後の研究の中心課題となる。

#### [成果の発表, 論文等]

システム論文を今年度夏に論文誌に投稿予定。

## 国際交流報告の抄録一覧

〔派遣〕

- ◆ Computer Assisted Radiology and Surgery 26th International Congress and Exhibition (CARS2012) (2022001) ..... 129  
     河合俊和      大阪工業大学 工学部 ロボット工学科 准教授
- ◆ International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications 2012 (NOLTA2012) (2022101) ..... 129  
     井岡恵理      青山学院大学 理工学部 電気電子工学科 助教
- ◆ The 2012 International Conference on Brain Informatics (2022102) ..... 130  
     植山祐樹      東京工業大学大学院 総合理工学研究科 特別研究員
- ◆ IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2022103) ..... 130  
     大脇大      東北大学 電気通信研究所 助教
- ◆ IEEE SENSORS 2012 (2022104) ..... 131  
     グエンタン ヴィン      東京大学 情報理工学系研究科 博士課程
- ◆ Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA2012) (2022105) ..... 131  
     蔡振宇      筑波大学大学院 システム情報工学研究科 博士課程
- ◆ ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST) 2012 (2022106) ..... 132  
     佐藤宗彦      東京大学大学院 工学系研究科 博士課程
- ◆ The 7th International Conference on Innovative Computing, Information and Control (2022108) ..... 132  
     村上泰樹      広島市立大学 情報科学研究科 博士課程
- ◆ The 32nd International Acoustical Imaging Symposium (2032004) ..... 133  
     山田尚人      東京農工大学 工学府 電子情報工学専攻 博士課程
- ◆ IEEE World Haptics Conference 2013 (2332005) ..... 133  
     吉元俊輔      大阪大学大学院 基礎工学研究科 助教
- ◆ The 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2332007) ..... 134  
     松野隆幸      岡山大学大学院 自然科学研究科 講師

〔特別招聘〕

- ◆ 2012 International Conference on Flexible and Printed Electronics : ICFPE2012 (2023001) …… 134  
染谷 隆夫 東京大学大学院 工学系研究科 教授

〔国際会議〕

- ◆ APCHI 2012 : The 10th Asia Pacific Conference on Computer Human Interaction (2015003) …… 135  
郷 健太郎 山梨大学大学院 医学工学総合研究部 教授

- ◆ 第13回 ACIS ソフトウェア工学, 人工知能, ネットワークと並列分散処理に  
関する国際会議 (SNPD2012) (2015008) …… 135  
寶 珍 輝 尚 京都工芸繊維大学 工学科学研究科 教授

- ◆ International Joint Symposium on Single-Cell Analysis (2025001) …… 136  
植 田 充 美 京都大学大学院 農学研究科 教授

- ◆ 2012 International Workshop on Perceptual Learning (2025003) …… 136  
川 人 光 男 (株) 国際電気通信基礎技術研究所 脳情報通信総合研究所 所長

- ◆ 第2回国際セマンティックテクノロジー合同会議 (JIST 2012) (2025004) …… 137  
來 村 徳 信 大阪大学 産業科学研究所 准教授

- ◆ Asia Pacific HCI Development Workshop (2025005) …… 137  
北 村 喜 文 東北大学 電気通信研究所 教授

- ◆ 1<sup>st</sup> International Conference on Maintenance Science and Technology for  
Nuclear Power Plants (ICMST Tokyo 2012) (2025007) …… 138  
出 町 和 之 東京大学大学院 工学系研究科 准教授

- ◆ アジア南太平洋設計自動化会議 2013 (ASP-DAC2013) (2025008) …… 138  
富 山 宏 之 立命館大学 理工学部 電子情報工学科 教授

- ◆ 第16回化学・生命科学マイクロシステム国際会議 (2025010) …… 139  
藤 井 輝 夫 東京大学 生産技術研究所 教授

- ◆ The 4th International Workshop on Empirical Software Engineering in Practice (2025011) …… 139  
枡 本 真 佑 神戸大学大学院 システム情報学研究所 特命助教

- ◆ 1st CIRP BioManufacturing 2013 (CIRP-BioM2013) (2025012) …… 140  
光 石 衛 東京大学大学院 工学系研究科 教授

- ◆ 第43回 IEEE 多値論理国際シンポジウム (IEEE ISMVL2013) (2025013) …… 140  
弓 仲 康 史 群馬大学大学院 工学研究科 准教授

## 〔派遣〕

派遣研究者	大阪工業大学 工学部 ロボット工学科 准教授 河合 俊和	2022001
研究集会名	Computer Assisted Radiology and Surgery 26th International Congress and Exhibition (CARS2012)	
出張期間	平成24年6月26日～平成24年7月2日	
開催場所	イタリア ビサ市	
発表論文	Elasticity sensing forceps with stepper motor ステッピングモータによる臓器硬さ計測可能な鉗子	

## 概要：

低侵襲な内視鏡下手術が広まる中、遠隔操作の手術支援ロボットが開発され高精度の位置決めが可能となった。しかし、従来の手術ロボットは力覚が無く、医師に過度の負担を強いると考えられる。そこで、立石科学技術振興財団の研究助成を受けて「触診機能搭載型オーダーメイド手術支援マニピュレータの開発」を進めている。

本会議の参加目的は、上記の研究成果の一部を国際的に発信し、また、討論を通じて先駆的な研究者からの示唆を得て、さらに、手術支援システムに関する世界の研究動向を調査することである。これにより、本研究成果を適用した臓器損傷の少ないロボット手術をワールドワイドに提案し、今後の展開に有用な知見を得て、患者に優しい機械と人間の調和を促進できると考えた。

参加した国際会議は、診断治療をコンピュータ支援する医工学分野の会議であり、34カ国から400件以上の研究発表と50件以上の招待講演が行われた。発表論文では、患者の臓器硬さに応じて把持力を調節可能な手術支援マニピュレータの実現を目指し、ステッピングモータが過負荷で空回りする位相差を活用した臓器硬さ計測可能な鉗子の開発として、システムの設計試作と計測実験、および本手法の有用性と課題を示した。会議参加者らと基礎データの取得内容、臨床対応の機構形状や駆動方法、医師への情報提示手法などについて討論し、今後の研究展開に向けた技術的・臨床的な知見を得ることができた。また、ロボット技術など治療分野ではアジア勢、画像処理など診断分野では欧米勢が先駆的な研究を進めており、本分野における研究の方向性を知り得たことも大きな成果であった。

## 〔派遣〕

派遣研究者	青山学院大学 理工学部 電気電子工学科 助教 井岡 恵理	2022101
研究集会名	International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications 2012 (NOLTA2012)	
出張期間	平成24年10月21日～平成24年10月29日	
開催場所	スペイン マヨルカ	
発表論文	Synchronization in coupled excitatory and inhibitory neurons with ladder structure ラダー結合した興奮性・抑制性ニューロンにおける同期現象	

## 概要：

本報告では、脳内にて観測される神経細胞ネットワークを構成するサブネットワーク（興奮性・抑制性ニューロンのラダー型結合）の同期発火現象について神経細胞のモデルを用いて現象のパラメータの依存性を明らかにしている。ニューロンネットワーク内で観測される同期発火現象は、脳の情報処理機構や神経病の病症の原因解明の鍵として生理学的にも工学的にも注目を集めている。

したがって、同期発火現象とパラメータの関連性は生理学研究のみならず脳機能を模したハードウェア開発に対しても非常に有益な情報となるためNOLTA2012にて発表を行う。NOLTA2012は非線形問題研究が主催する国際会議の中でも規模が大きく、国内外から非常に多くの研究者が参加する。同期発火現象を始めとした脳内のニューロンにみられる現象の多くは非線形現象であり、そのモデル解析やハードウェア研究について数多くの研究報告がなされる。したがって、本会議で研究成果を報告することは、モデル解析のみならずハードウェア開発に携わる他の研究者との情報を共有するためにも必要である。

成果報告をNOLTA2012で行った結果、解析に用いたニューロンモデルの妥当性に関する質問を中心に議論をかわすことが出来た。さらに申請者の研究はニューロンの膜電位の変位に着目した解析であったが、位相縮約モデルを用いることで、結合ニューロン系において観測出来た『位相進み』について、より詳細にパラメータとの関係を調査できるとの助言も得ることが出来た。

また、バンケットでは国内外の制御工学やネットワーク工学、電気回路の専門家の方々と研究のみならず各国のカルチャーについてなどの多岐にわたる話題で盛り上がり、充実した交流を行うことが出来た。

## 〔派遣〕

派遣研究者	東京工業大学大学院 総合理工学研究科 特別研究員 植山 祐樹	2022102
研究集会名 出張期間 開催場所	The 2012 International Conference on Brain Informatics 平成 24 年 12 月 3 日～平成 24 年 12 月 7 日 中国 マカオ市	
発表論文	Estimation of Visual Feedback Contributions to Limb Stiffness in Visuomotor Control 視覚運動制御における腕の剛性変化に対する視覚フィードバックの影響	

## 概要：

本国際会議は、ヒトの情報処理システムに関する研究を対象として開催された。特に、今年はアラン・チューリング生誕 100 周年を記念し、他の 4 つの情報技術に関する国際会議との同時開催となり、非常に大規模なものであった。また、今回の会議の様相については、マカオ市内のテレビニュースおよび新聞等でも大きく報道されたようである。また、今回は中国での開催にもかかわらず、中国からの参加者は比較的少なく、参加者の出身国は多様であったように思われる。また、他の 4 つの会議も含め、日本からの参加者は少なく、特に、BI において日本から採択されたのは、私一人のみであった。

私の発表は、体性感覚および視覚によるフィードバックの効果について、剛性に着目し、検討したものである。今回の発表では、体性感覚および視覚のフィードバックの影響を切り離すことが可能な実験手法を新たに提案しており、今後、生体における感覚フィードバックの役割に関する研究を遂行する上で非常に有効な方法であると考えている。また、シミュレーションを実施した結果、視覚フィードバックの役割として、外乱に対する強いロバスト性が必要であることが推測された。そこで、視覚フィードバックの効果を説明可能なモデルとして、制御工学で用いられるロバスト設計思想に基づいたミニマクス制御理論を提案し、視覚の影響を説明するのに有効なモデルとして考えられる可能性についても提示した。今回の論文は、Runner-Up Award に選出され、私の提案モデルを広く認知していただけたこと、およびその可能性について高く評価していただいた結果であると考えている。

## 〔派遣〕

派遣研究者	東北大学 電気通信研究所 助教 大脇 大	2022103
研究集会名 出張期間 開催場所	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 平成 24 年 10 月 6 日～平成 24 年 10 月 14 日 ポルトガル アルガルベ州 ビラモウラ市	
発表論文	Adaptive Bipedal Walking through Sensory-motor Coordination Yielded from Soft Deformable Feet 柔軟な足から生み出される感覚運動協調を介した適応的二足歩行	

## 概要：

当国際会議参加の目的・意義：

当国際会議に参加する目的は、立石科学技術振興財団研究助成によって研究を推進することが可能となった研究テーマ「柔軟な足裏の変形から生み出される感覚情報処理メカニズムの解明」によって得られた研究成果を国際的な学術会議にて全世界的に公表することにある。ロボティクスの分野において最大級の規模を誇る国際会議 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems にて研究成果を公表することによる波及効果は非常に大きいのみならず、当該分野の世界の第一線で活躍する参加者からの質問や議論を通して、今後の研究を進める上での有意義な議論が可能となる。

得られた成果・効果：

本研究で提案する柔軟な足部の機構と、そこから得られる感覚情報を活用する制御モデルに関する研究は世界的に見ても少ない。本研究成果を世界規模の国際会議で発表し、その成果を広めることができた。また、このような国際会議で発表し、質疑応答において世界的な研究者からの意見を吸収し、議論を経ることができ、今後の研究を進展させる上で重要な機会となった。また、身体の柔軟性に着目する「Soft robotics」における世界の最前線の研究発表を聴講することを通して、人間と機械の調和の促進につながる「ソフト・コンティニュームロボティクス」技術を導出する上での有益な情報を獲得することができた。さらに、本会議で同時に発表した関連研究である「Listen to Body's Message: Quadruped Robot That Fully Exploits Physical Interaction between Legs」が JTCF Novel Technology Paper Award for Amusement Culture Finalist (IROS2012) を受賞することができ、世界的な評価も得られた。

## 〔派 遣〕

派遣研究者	東京大学 情報理工学系研究科 博士課程 グエン タン ヴィン	2022104
研究集会名	IEEE SENSORS 2012	
出張期間	平成 24 年 10 月 27 日～平成 24 年 10 月 31 日	
開催場所	台湾 台北市	
発表論文	Measurement of Pressure Distribution during the Onset of Slip 滑り発生時における圧力分布の計測	

## 概 要：

国際会議参加の目的・意義：

国際会議 IEEE SENSORS 2012 に参加した目的はすべりの発生時に接触面の圧力分布の計測に関する研究成果を発表することであった。また、発表により成果を広く周知するとともに、学会参加者との意見交換から研究に活かされる知見を得ることも目的であった。研究者たちとのディスカッションにより得られた知見は、研究課題に対する解決策を模索する上で、また自分自身の研究を客観的に分析する上で非常に重要となる。また、他の研究者の発表を聞くことにより、自分の知識を深め、より良質の研究活動につながると考えられる。

IEEE SENSORS はメカニカル、バイオ、化学など様々な分野に応用できるセンサに関する最新研究が発表されている。この学会の参加者は大学などの研究機関の研究者だけではなく、企業の専門家も多い。そこで自分の研究発表を行うことにより、色々な分野の専門家からコメントやアイデアをもらうことができ、今後の研究課題を解決するために非常に役立つ経験である。

得られた成果：

IEEE SENSORS 2012 において、私は滑りにおける圧力分布の計測に関する研究発表を行い、研究の成果が高く評価された。具体的に、滑りの現象を解明するための圧力センサそのものに関して注目され、様々なコメントやアドバイスを得た。計測目的に応じてセンサの構造や計測手法の改善案も提案され、今後の研究を継続するために非常に役立つと考える。特に圧力だけではなく、今後は圧力・せん断力の両方の計測を実現することを強く期待された。

また様々なセンサに関する最新研究の発表を聞くこともできた。自分の専門分野である力センサだけではなく、世界中で注目されているガスセンサ、バイオセンサに関する研究発表の知見を得ることができた。

## 〔派 遣〕

派遣研究者	筑波大学大学院 システム情報工学研究科 博士課程 蔡 振宇	2022105
研究集会名	Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA2012)	
出張期間	平成 24 年 12 月 2 日～平成 24 年 12 月 8 日	
開催場所	米国 ロサンゼルス市	
発表論文	Multichannel analysis of ERP at early and P300 latencies in application for spatial auditory BCI improvement 空間的聴覚 BCI の性能改善のための初期及び P300 ERP のマルチチャンネル分析	

## 概 要：

スペシャルセッションにおける招待講演。本研究は水平音刺激に対する人間の聴覚特性を利用して、脳で考えるだけで機械やコンピュータなどを操作することを目指している。目の障害者及び体不自由の方々に対する新たなコミュニケーション手段の研究であり、ブレイン・コンピュータ・インターフェイス (BCI: Brain Computer Interface) と呼ばれている。今回の APSIPA への参加において、最新の実験結果と研究成果を発表するだけでなく、本研究の実用化に際して存在する問題点や解決方法についても様々な分野の研究者と議論したいと考える。APSIPA は脳信号処理に限らない、生体信号処理、マルチメディア、音声・言語・オーディオなどを含めた会議であることから、この会議で発表することによって幅広い分野へのアピール可能である。また、各分野の研究者から質問やコメントを受けつつ、多様な分野への応用も検討できるため大変に有意義である。

成果・効果：

- ・会議での発表を通じてこれまでの研究成果が幅広い分野に応用可能であるか、各分野の研究者と議論した上で近い未来に応用さえる可能性を明らかに示していた。
- ・聴覚 BCI を実用化するまでに存在する問題や解決策については、BCI 分野の研究者から質問やコメントを受け、問題や解決策などを位置づけられた。
- ・現在の手法の性能をさらに向上させるため、BCI 分野の研究者と議論しつつ、新たなアイデアを生み出した。

## 〔派遣〕

派遣研究者	東京大学大学院 工学系研究科 博士課程 佐藤 宗彦	2022106
研究集会名 出張期間 開催場所	ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST) 2012 平成 24 年 9 月 26 日～平成 24 年 10 月 15 日 アメリカ合衆国 ポストン市	
発表論文	Capacitive Fingerprinting : Exploring User Differentiation by Sensing Electrical Properties of the Human Body 人体の静電容量の周波数特性を用いた個人識別に関する研究	

## 概要：

本会議は、Human Computer Interaction の特にユーザーインターフェースの分野において最も権威がある国際学会であり、本年は 2012 年 10 月 8 日～10 日の 3 日間、アメリカ・ポストンにて開催された。62 件の論文発表があり、採択率は 22% であった(投稿数 288 件)。

申請者はここで、タブレットデバイスのようなタッチパネルにおいて複数ユーザが協調作業を行う際にどのユーザによるタッチであるかを検出するシステムを開発し、フルペーパーの口頭発表と共にデモンストレーション発表を行った。本会議は、この分野をリードする研究者が一堂に会する場であり、ここで研究内容を発表することで深い議論が可能である。申請者の研究成果を広く伝えると共に、更に推し進めるためのフィードバックが得られた。申請者らの手法は、従来手法のようにユーザが何らかの装置を身につけたり特定位置に立ったりする必要がなく、タッチパネル内部にシステムを完全に実装することが可能であり、この点での優位性と実際のアプリケーションに即座に応用可能な点が高く評価された。

また、本会議はポストンで行われたため MIT media lab のオープンハウスも併せて行われるなど、会議参加者ではない研究者との交流や意見交換も非常に高密度に行うことが出来、とても意義深いものであった。更に今回は、Media lab で招待講演をさせていただく機会を得、会議開催の前週に一時間ほどのトークを行い、ここでも非常に有意義なディスカッションとフィードバックを得ることが出来た。

## 〔派遣〕

派遣研究者	広島市立大学 情報科学研究科 博士課程 村上 泰樹	2022108
研究集会名 出張期間 開催場所	The 7th International Conference on Innovative Computing, Information and Control 平成 24 年 11 月 4 日～平成 24 年 11 月 7 日 中国 上海市	
発表論文	Relationship between psychologically estimated cochlear input-output functions and physiological function 心理学的に推定された蝸牛の入出力特性と生理学的機能の相関性	

## 概要：

現在の情報技術は、先進的な発展と共に、すその部分の発展にも及んでいます。このことが、情報技術に対する敷居を低くしています。これにより、従来は情報技術の習得を不得手としてきた研究者が容易にその技術を習得することができるようになりました。本会議では、そのような研究者が人にやさしい情報技術の研究について活発に議論しました。これらから、財団の趣意である人と機械の調和について議論を行うことができました。

本会議で、申請者は人の聴こえに基づく先進的な補聴機器の開発のための聴覚系に関する基礎研究について発表を行いました。発表内容は基礎研究から応用研究にまで多岐に及び大変な刺激になりました。その中で、特に基礎研究を産業応用していく過程については、今後の申請者の研究を発展させていく上で非常に参考になりました。その中で、申請者が提案している数理モデルの利点と欠点が明らかになりました。そして、どの利点を生かしていくことで申請者の目的が達成されるかが明らかになってきました。また、産業応用だけでなく医学応用への波及効果も示唆できることが明らかになりました。これは、今後発展が期待されている再生医療に対する応用です。

本会議を通じて、申請者の提案する数理モデルを産業・医療応用していく道筋が生まれたことは大きな成果です。

## 〔派 遣〕

派遣研究者	東京農工大学 工学府 電子情報工学専攻 博士課程 山田 尚人	2032004
研究集会名 出張期間 開催場所	The 32nd International Acoustical Imaging Symposium 平成 25 年 4 月 28 日～平成 25 年 5 月 2 日 シンガポール	
発表論文	Magnetic imaging by ultrasonic techniques 超音波技術による磁気イメージング	

## 概 要：

本国際会議に参加する目的は、超音波を利用した磁気イメージング法の結果を海外で発表することである。近年、我々は音波により誘起される微弱な電磁場（ラジオ波帯）を検出する新たな手法（音響誘起電磁（ASEM）法）を提案し、誘電体、磁性体および骨などの生体組織からの ASEM 応答の観測に成功してきた。また、「音響誘起電磁（ASEM）法の医療応用へ向けた開発」の題目で、平成 24 年度貴財団研究助成（登録番号 2021001）に採択され、本研究を強力に推進している。今回、新たに超音波による磁気イメージングに成功したので、本シンポジウムにて発表を行った。本国際会議に参加する意義は、1) 本手法を関連専門家に対して国際的にアピールし、海外研究者との交流をつくる、2) 最新の技術動向を知る、3) 今年度の博士号取得のために、国際会議での発表実績をつむ、ことである。発表内容は、磁化を有する固体における ASEM 応答の理論的考察、および ASEM 法による磁気イメージングの実演である。これは将来、神経・筋肉活動に起因した磁場発生を超音波により検出しようとする貴財団研究助成の基礎となるものである。

今回の会議は例年に比べて参加者は少なかったが、アジア、欧米等から参加者があり、音響イメージングに関する活発な意見交換が行われた。本研究の発表においても参加者の方から、質問やコメントを頂き、今まで超音波では測定されることのなかった電気・磁気特性の測定をアピールすることができたと思われる。また、本会議に参加して音響イメージングにおける最新技術についての知識を深めることで、本研究に応用が可能なイメージング手法の情報も得ることができた。

## 〔派 遣〕

派遣研究者	大阪大学大学院 基礎工学研究科 助教 吉元 俊輔	2332005
研究集会名 出張期間 開催場所	IEEE World Haptics Conference 2013 平成 25 年 4 月 13 日～平成 25 年 4 月 18 日 韓国 大田広域市	
発表論文	Electrically Multiplexed Tactile Interface : A Fusion of Spatially Transparent Tactile Sensor and Display 電気的多重化触覚インタフェース：空間透明型触覚センサとディスプレイの融合	

## 概 要：

本国際会議は触覚技術に関する最も権威のある学会であり、世界中の専門家より最新の研究成果発表が寄せられる。報告者がこれまで行ってきた研究では、人の触覚を計測・提示し、本来感じている触覚を別の感覚に変化させる（変調する）ことで運動や認識の支援を行うことを目指している。この触覚変調システムにおいて人間と機械の調和を目指す上で、触覚の計測と提示装置を利用したシステムの小型・単純化は基礎的な課題である。その基礎的な課題を解決するために、報告者は生体の電気的特性を利用した触覚センサとディスプレイの多重化を世界で初めて実現した。本国際会議では以下の三つを参加目的として掲げ、全て達成することができた。

- (1) 研究成果を発表し、専門家に技術を周知すること。
- (2) 最新の触覚に関する研究に関して情報収集を行うこと。
- (3) 国外の共同研究者と研究打ち合わせを行うこと。

発表では、報告者が開発してきた生体の電気特性を利用した触覚センシング手法に興味を集めることができ、遠隔手術ロボット（Eindhoven University of Technology, Netherland）への技術導入を検討いただいた。情報収集に関しては、すべてのセッションを聴講し最新動向を知ることができた。また、30 件以上のデモ体験や、テクニカルツアーへの参加など、本会議ならではの情報収集ができ、非常に有意義であった。さらに、共同研究の打ち合わせとして、Seokhee Jeon（Kyung Hee University, Korea）との現地会合を開き、研究内容に関する議論および役割分担を行うことができた。

## 〔派遣〕

派遣研究者	岡山大学大学院 自然科学研究科 講師 松野 隆幸	2332007
研究集会名	The 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (米国電子電気学会主催ロボットと自動化に関する国際会議)	
出張期間	平成 25 年 5 月 6 日～平成 25 年 5 月 10 日	
開催場所	ドイツ カールスルーエ市	
発表論文	Fault Detection Algorithm for External Thread Fastening by Robotic Manipulator Using Linear Support Vector Machine Classifier ロボットによるネジ締め作業におけるサポートベクタマシンを用いた異常検出アルゴリズム	

## 概要：

The 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation への国際会議参加に助成をいただいた。本会議は米国電子電気学会が毎年主催する、ロボットと自動化に関する国際会議であり、IEEE Robotics and Automation Society 部門の大会の中で最も権威がある。今年度の採択件数が 873 件で、採択率は 38.5% であった。会議ではインタラクティブプレゼンテーションによる発表を行った。研究題名は「Fault Detection Algorithm for External Thread Fastening by Robotic Manipulator Using Linear Support Vector Machine Classifier」である。本発表ではロボットによるネジ締め作業で発生する振動からネジの推定挿入量を計算することを提案し、また、推定挿入量などを特徴量とするサポートベクタマシンにより異常検出を実現するアルゴリズムを提案した。質疑応答ではドイツのロボットメーカー KUKA のエンジニアから、面白い研究であるという評価をいただいた。本学会参加により研究成果を広めることができたと考える。議論の中で、異常検出機能を向上するためのアドバイスをいただいたので今後の研究に反映する予定である。また、コンピュータの研究動向や、医療支援ロボットの先端研究の情報を収集することができ、今後の研究を推進する上で非常に有用であったと考えている。このような機会を与えていただいたことに感謝の意を申し上げる。

## 〔特別招聘〕

招聘者	東京大学大学院 工学系研究科 教授 染谷 隆夫	2023001
研究集会名	フレキシブル・プリントド・エレクトロニクス国際会議 (2012 International Conference on Flexible and Printed Electronics: ICFPE2012)	
出張期間	平成 24 年 9 月 6 日～平成 24 年 9 月 9 日	
開催場所	東京大学	
被招聘者	Michael Graetzel, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)・教授	

## 概要：

フレキシブル・プリントド・エレクトロニクス国際会議 (ICFPE2012) は、平成 24 年 9 月 5 日から 4 日間にわたり東京大学で開催され、日本を含め 23 か国から 1,100 名を超える参加者を迎えた。この研究分野は現在、世界で熾烈な競争が繰り広げられている。このたびの会議では、ノーベル賞受賞者や名高い研究者、グローバル企業経営者たちが大局的見地から技術動向と将来ビジョンを示したことにより、最新の研究視点を提供する結果となった。立石科学技術振興財団のご援助により招聘された Michael Graetzel 教授 (EPFL スイス連邦工科大学ローザンヌ校) は、有機色素増感太陽電池における第一人者である。同氏の基調講演は、フレキシブル太陽電池の開発を通して人間と機械の調和を目指す新技術の可能性を明確にした。フレキシブル・プリントド・エレクトロニクスの発展のためには、極めて広い学際基盤の確立が望まれる。本国際会議では、最先端の技術や知見を有する研究者が集結したことにより、学際領域の形成を大きく促進した。また、それぞれ独自の活動を展開している関連学協会が一堂に会したことにより、議論の活性化を導き出し、分野の発展に貢献した。一方で、日本の先端素材やプロセス装置の優れた技術について研究成果を発信し、我が国のプレゼンスを世界に示した大変有意義な会議となった。

## 〔国際会議〕

申請者	山梨大学大学院 医学工学総合研究部 教授 郷 健太郎	2015003
研究集会名	APCHI 2012: The 10th Asia Pacific Conference on Computer Human Interaction (第10回人間とコンピュータとの相互作用に関するアジア・パシフィック会議)	
開催期間	平成24年8月28日～8月31日	
開催場所	くにびきメッセ (島根県立産業交流会館)	
申請者の役割	大会長	

## 概要:

本会議 APCHI は、アジア大洋州地域における HCI (人間とコンピュータとの相互作用) 研究の中心的な国際会議として、各国もちまわりでおよそ2年に一度の頻度で実施されている。HCI は「人間と機械の調和の促進」を一つの基本命題としている研究実践の分野であり、記念すべき第10回となる APCHI 2012 では「Reflect, discover and innovate」をテーマに、これまでの HCI の歴史を振り返り、HCI 領域における科学的発見と技術革新について、今後の方向性を議論した。本会議では、学際的な HCI 領域の研究者・実践者に最新の研究や取り組みを議論する場を提供することを目的の一つとしており、キーノートスピーカーとして、安西祐一郎教授 (独立行政法人日本学術振興会)、Shumin Zhai 氏 (Google Research)、Marc Hassenzahl 教授 (Folkwang University)、木村朝子教授 (立命館大学) をお迎えして議論を行った。最終的な会議の参加登録者は26ヶ国255名で、盛況のうちに幕を閉じた。

本会議に採択された論文は ACM Digital Library に収録されている。また最上位の論文は、学術文献・引用索引データベースの SCI に登録されている論文誌 (具体的には、International Journal of Human-Computer Interaction 及び International Journal of Innovative Computing, Information and Control) に、上位の論文については Ei Compendex に登録されている論文誌 (具体的には、ICIC Express Letters) に推薦を行った。すなわち本会議の論文は、参加者のみならず数多くの研究者に公開されることになる。このことが当該分野の学術的発展に大きく寄与すると考えられる。

## 〔国際会議〕

申請者	京都工芸繊維大学 工芸科学研究科 教授 寶珍 輝尚	2015008
研究集会名	第13回 ACIS ソフトウェア工学, 人工知能, ネットワークと並列分散処理に関する国際会議 (SNPD2012)	
開催期間	平成24年8月8日～8月10日	
開催場所	キャンパスプラザ京都	
申請者の役割	実行委員長	

## 概要:

開催した国際会議は、国際計算機・情報科学会 (ACIS) が毎年世界各地で開催している国際会議の第13回目の会議である。この会議では、ソフトウェア工学, 人工知能, ネットワーク, 並列・分散処理について議論する。人工知能は人間と機械の調和を図る上で非常に重要であり、近年のインターネット環境を考えるとネットワークや並列・分散処理は今や人間と機械の調和に不可欠なものとなってきている。また、ソフトウェア工学は、人間 (ソフトウェア開発者) と機械 (ソフトウェア) が調和しながらソフトウェア開発を行うための重要な技術である。この会議では、人間と機械の調和にとって重要なこれらの分野を、個別的ではなく、横断的に議論することを目的としている。個々の分野に閉じた議論ではなく、これらの分野を横断した開かれた議論を行うことで、既存の手法とは全く異なる新しい解決方法が見出される可能性があり、学術的に高い意義がある。

本国際会議への投稿論文は最低2名の査読者により入念な査読が行われ、査読を経て選出された149件の質の高い論文をもとに議論が行われた。また、当初予定の3並行セッションを、一部4並行セッションとして開催した。会議では25ヶ国から参加した研究者が、ソフトウェア工学, 人工知能, ネットワーク, 並列・分散処理の分野を横断した議論を活発に行った。セッションの中には座れない数の参加者が参加したセッションも多くあり、興味の深さが伺える。また、熱心な議論により、深く、かつ、幅広い、様々な視点からの意見や見解を得ることができた。2日目のバンケットにも多数の参加があり、グローバルな交流を促進することができた。

## 〔国際会議〕

申請者	京都大学大学院 農学研究科 教授 植田 充美	2025001
研究集会名	International Joint Symposium on Single-Cell Analysis (単一細胞解析国際シンポジウム)	
開催期間	2012年11月27日～2012年11月28日	
開催場所	京都市リサーチパーク内京都バイオ計測センター	
申請者の役割	組織委員長	

## 概要：

急速に発展するヘルスケアの最先端研究である「1細胞解析」において、ゲノムバイオとエレクトロニクスの融合に基づく技術開発が急務である。そこで、「単一細胞解析」分野を世界的に先導するシングルセルサーベイヤー研究会が企画し、京都市リサーチパーク内に新設の京都バイオ計測センターで標記の国際会議を開催した。京都バイオ計測センターは、主催の京都大学の植田充美が代表を務めており、国内外の研究者には魅力的なロケーションであると同時に、成果発表と実質的な研究交流を効果的に実施でき、我が国のプレゼンスもアピールできる。ゲノム工学、オミクス解析、装置開発等に携わる研究とその成果の実用化を見据えて、企業の研究者も多数参加した。具体的には、遺伝子配列の自動解析、オミクス解析、ImagingやMEMS解析などを基盤としたバイオ計測を生命機能の理解に向けた1細胞の精密解析に浸透させ、この分野で世界的に著名な海外研究者と国内研究者たちの最近の話題の議論により、本分野の進展が図れた。これまで、スウェーデンやスイスで招待開催されてきており、その内容は、著名な世界的なNature Material誌にも紹介されてきている。また、日本のリーダーシップにより、アジア・アフリカにおける若手研究者の参画を促し、若手研究者（ポスドク、大学院生）を中心としたポスターセッションと若手賞も設け、関連分野の若手の育成にも着手できた。これは、新しく若い国際的で、かつ、持続的なネットワークの強化につながり、新しい分野の開拓をもめざしたものでその重要な目的も実現できた。

## 〔国際会議〕

申請者	(株)国際電気通信基礎技術研究所 脳情報通信総合研究所 所長 川人 光男	2025003
研究集会名	2012 International Workshop on Perceptual Learning	
開催期間	平成24年12月4日～12月8日	
開催場所	奈良県新公会堂	
申請者の役割	実行委員長	

## 概要：

全体で28名による招待講演を実施した。討論を含め、1人40分の時間を設け、実験のデザインに至るまで可能な限り詳細な最新研究成果を披露して頂いた。知覚学習に絞った専門家ばかりの会議であったため、具体的な議論も多く、いずれも時間を超過しながらの、しかしながら密度の濃いワークショップとなった。

知覚学習のメカニズム解明、あるいは知覚学習が脳に与える影響、知覚学習を課題とした実験による研究成果など、同トピックスに関する最新の研究が一同に会し議論できたことにより、相互理解を深めるだけでなく、例えば今後、情報通信インタフェースへの応用が可能な要素技術の存在を印象づけた。

特に知覚学習のメカニズムを解明することにより、インターネット等における効果的な視覚情報提示に貢献しうることを再確認し、さらに情報通信における視覚情報は重要度を増している状況下において、視覚情報のセンシングを推進することが重要であるということを結論付けられたことは意義深い。また、これらの成果の一部を学術誌Vision Researchの特別号として公開することが決定した(Elsevier社より出版予定)

## 〔国際会議〕

申請者	大阪大学 産業科学研究所 准教授 来村 徳信	2025004
研究集会名	第2回国際セマンティックテクノロジー合同会議 (JIST 2012)	
開催期間	平成24年12月2日～12月4日	
開催場所	奈良県新公会堂	
申請者の役割	国内運営委員長	

## 概要:

本会議開催の目的は、ウェブなどの情報を「意味に基づいて知的処理」することを目指す「セマンティックテクノロジー」に関して議論する場を主にアジア地域に提供することで、学界と産業界における研究と応用を促進することでした。

実際に、本会議には26ヶ国から90本という多くの論文投稿があり、その中から厳密な論文査読の結果、一般論文：22本、In-Useトラック論文：7本、特別トラック論文：6本が採録されました。In-Useトラック論文は応用的技術を扱っている論文であり、特別トラックは今回初の試みとしてボトムアップ的にホットなテーマの提案を募ったもので、「Linked Dataの実践」などのホットトピックに関する論文が採録されました。本会議では、4つの招待講演、1つのチュートリアル講演に加えて、これらの論文が7つのセッションに分かれて、セマンティックウェブ、Linked Data、オントロジーなどの幅広いトピックについて熱心な議論が行われました。

会議には、計110名（一般：71名、学生：39名）の参加者があり、その内訳は日本国内から55名、海外16ヶ国から55名でした。アジア諸国に加えてヨーロッパ諸国からの参加者も多く、アジア内に加えて、アジアとヨーロッパの相互交流を促進する効果がありました。また、学界に加えて、産業界からも多くの参加がありました。

このように本会議は、計算機が「情報の意味」を捉えて人間と調和するために不可欠な情報科学技術の学術的理論と応用的技術の両方について有意義な議論と交流の場を提供することができたといえ、成功を収めたと言えます。

## 〔国際会議〕

申請者	東北大学 電気通信研究所 教授 北村 喜文	2025005
研究集会名	Asia Pacific HCI Development Workshop	
開催期間	平成25年2月2日～2月4日	
開催場所	東北大学 電気通信研究所	
申請者の役割	日本代表（主催者）	

## 概要:

2011年3月以来、アジア太平洋地域の各国の代表者が会合を重ね、この地域でHuman-Computer Interaction (HCI) 分野の新しい学会を作ろうという活動が進められ、少しずつ構想を具体化してきました。この地域の国々との間の格差やさまざまなユニークな特徴を理解した上で、相互理解と協力を通して教育や研究レベルの活性化と底上げ、さらにこの地域らしい新産業創出の流れを作り出すことによって、人々の生活の質(QOL)を向上させたい。そのために、これを理念とするような新しい学術団体(学会)を設立する必要があるという結論の上に議論が進められてきました。またこの学会は、主に北米を基盤とするACMやIEEE、そして主に欧州を基盤とするIFIPなどの既存の国際的な学術団体とは協力はするものの、独立性を保った形で設立・運営するという方針で準備が進められてきました。

今回、新学会設立に向けた具体的な手順を話し合うためのワークショップを、域内各国の代表者とともに、2013年2月2日～4日に東北大学電気通信研究所で開催しました。第7回目となる今回は、インド、中国、韓国、台湾、シンガポール、ニュージーランド、そして日本の計7か国から13人の代表者が集まりました。そして、2013年度中を目標に新しい学会を設立することを決め、そのための役割分担とスケジュールを作成しました。また、今、せっかく新しく学会を立ち上げるのであれば、HCI研究の特徴や現状の問題点を踏まえてこの分野を大きく飛躍・発展させる新しいチャレンジができるような機能を持たせるべきだとして、新学会の組織や役割などについても議論を行いました。

## 〔国際会議〕

申請者	東京大学大学院 工学系研究科 准教授 出町 和之	2025007
研究集会名	1 <sup>st</sup> International Conference on Maintenance Science and Technology for Nuclear Power Plants (ICMST Tokyo 2012)	
開催期間	平成 24 年 11 月 11 日から 11 月 14 日	
開催場所	東京大学弥生講堂	
申請者の役割	運営委員長	

## 概要：

本会議は、原子力発電所の保全（機器の検査や補修、交換）に着目した、世界最初の国際会議である。既設の原子力発電所の運転時の安全性を維持するために、保全活動が重要なことは論を待たない。一方で、現実の保全活動では、従業員の被曝量低減や、稼働率向上による経済効果も考慮される。つまり、科学的な根拠に基づく効率的な保全活動を希求する必要がある。

本会議は、こうした現状に鑑み創設され、第一回の開催を迎える。開催の学術的意義は、以下の三点である。

- 1) 機械、電機、計測、制御、材料等の幅広い学術分野から、保全活動の向上に資する研究開発成果を持ち寄り、最新の知見を共有すること。
- 2) 従来は事業所毎に蓄積されてきた経験知を収集して、分析し、保全に関する推奨事例を共有すること。
- 3) アカデミアという自由な議論の場を活用して、運転プラントの安全性向上に資する忌憚のない意見交換を促進すること。

第一回目の開催にも関わらず、当初の予想を大きく上回る 180 名を超える多くの参加者があり、国内外の研究者・技術者が深くディスカッションを行うことが出来た。今回の成功を受け、ICMST は約 1 年半ごとに国内外で交代で開催されることが組織員会で決定した。

## 〔国際会議〕

申請者	立命館大学 理工学部 電子情報工学科 教授 富山 宏之	2025008
研究集会名	アジア南太平洋設計自動化会議 2013 (ASP-DAC2013)	
開催期間	平成 25 年 1 月 22 日～25 年 1 月 25 日	
開催場所	パシフィコ横浜 会議センター	
申請者の役割	Finance Chair	

## 概要：

ASP-DAC (Asia and South Pacific Design Automation Conference) は、大規模集積回路 (Very Large Scale Integrated Circuit, VLSI) と電子システムの設計自動化をテーマとするアジア・南太平洋地区最大の国際会議であり、VLSI の物理設計、論理・機能設計、テスト、電子システムの仕様記述から、組込みシステムのためのプロセッサやそのソフトウェアの設計に至る種々の技術を対象としています。1995 年の第 1 回開催から今回で 18 回目を迎えました。

ASP-DAC は米国の DAC (Design Automation Conference)、ICCAD (International Conference on Computer Aided Design)、欧州の DATE (Design Automation and Test in Europe) の姉妹会議として国際的にも認知度の高い国際会議であり、今回の会議には日本を含む 19 カ国から 462 名 (国内 287 名、海外 175 名) の研究者が出席し、活発な議論が行われました。

国内外より 311 件の一般投稿論文がありその中から 97 件を採択 (採択率 31.2%) し、設計開発者・研究者が最新の研究成果について発表を行いました。

アジア・南太平洋地区からは日本を除いて 91 名の参加者があり、本会議の趣旨の一つでもあるアジア・南太平洋地区における VLSI 設計と自動化分野の研究活性化に貢献できたものと考えております。

## 〔国際会議〕

申請者	東京大学 生産技術研究所 教授 藤井 輝夫	2025010
研究集会名	第16回化学・生命科学マイクロシステム国際会議 The 16th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences	
開催期間	平成24年10月28日～11月1日	
開催場所	沖縄コンベンションセンター	
申請者の役割	実行委員長	

## 概要：

本会議は、本助成を始めとする多くの団体・企業からの支援・賛助の下、沖縄国際会議場において5日間にわたり開催された。会議の学術的内容としては、微細加工技術・微小流路技術・MEMS技術など、マイクロ・ナノ科学における最先端の基礎技術開発から、それらの化学・生化学・医学等への応用に至る、幅広い研究発表が行われた。既存の化学・生化学分析装置や診断装置とは大きく概念の異なる、微小システム・微細加工・微小流路をキーワードとする最先端の研究結果が多数報告されており、それらの多くが高く注目されていた。また、本会議は当研究分野に関する世界最大の学術会議の一つであり、33の国・地域より900名を超える参加者があり、600件以上の発表がなされた。口頭発表・ポスター発表のいずれにおいても活発な議論や意見交換がなされ、研究交流の場としても非常に有意義であった。なお、全体の3分の2は海外からの参加者であり、日本国内で開催される国際学会としては、海外からの参加者割合が非常に高く、この点は特筆すべきことである。さらに、優れた学生発表に対する表彰も行われ、研究者を目指す学生を奨励する活動として有意義であった。また、国内外の30以上の企業・団体からの展示もなされ、産学連携や企業技術プロモーションのための機会を提供することもできた。

以上をまとめると、本会議は学術レベルが高度であり、参加者の数・国を含め世界的に最先端をいく研究者間での学術交流が活発に行われ、産業界との交流も活発であり、さらにまた、論文集発行・会議の運営などが円滑に進行した点など、いずれにおいても大きな成功であり、きわめて有意義な会となった。

## 〔国際会議〕

申請者	神戸大学大学院 システム情報学研究科 特命助教 梶本 真佑	2025011
研究集会名	The 4th International Workshop on Empirical Software Engineering in Practice	
開催期間	平成24年10月26日～10月27日	
開催場所	大阪大学中之島センター	
申請者の役割	General Chair	

## 概要：

The 4th International Workshop on Empirical Software Engineering in Practice を大阪・中之島センターで開催した。本会議は、実践的及び経験的な見地からより良いソフトウェア開発の実現を目指すエンピリカルソフトウェア工学に関するワークショップである。ソフトウェアが誕生して約60年、「いかにうまく、いかによいソフトウェアを作るか」という問いに対する議論は現在でも絶えない。エンピリカルソフトウェア工学は、データ工学的な観点からこの問いに対する答えを得る方法である。データという明確な根拠から得られた経験的な知見を活用することで、高効率かつ高品質なソフトウェアの実現が期待できる。

本会議では、当該研究分野の発展、及び当分野の若手研究者の養成を大きな目標として掲げている。この目的のために会議の実行委員会を35歳以下の若手研究者を中心に構成しており、各実行委員に対して会議の運営経験を始め、海外研究者との共同作業の場を与えることが出来た。また会議参加の修士・博士課程の学生に対しても大きな刺激を与えることが出来た。本年度は過去最大となる計66名の参加を集め、参加者同士での非常に活発な議論が行われた。基調講演ではカナダ・ビクトリア大学から Dr. Daniel M. German 准教授を招待し、ソフトウェア開発リポジトリに対する最新のマイニング技術についての講演を頂いた。近年のIT社会においてソフトウェアの社会的責務は拡大する一方である。本会議による本研究ドメインの促進と活性化は将来の高度IT社会の発展に大きく貢献するだろう。

## 〔国際会議〕

申請者	東京大学大学院 工学系研究科 教授 光石 衛	2025012
研究集会名	1st CIRP BioManufacturing 2013 (CIRP-BioM2013)	
開催期間	平成 25 年 3 月 4 日～3 月 7 日	
開催場所	東京大学工学部	
申請者の役割	主催責任者	

## 概 要：

生産加工分野で世界トップレベルの組織である CIRP（国際生産加工アカデミー）では、生産加工技術の医療・医学・生命科学・情報分野への応用を進めるべく、BioManufacturing と名付けたワーキンググループを設立しており、各国の研究者が参加して活発な議論を行っている。本国際会議 CIRP-BioM 2013 は、そのワーキンググループの成果を発表すべく企画された国際学会であり、記念すべき第 1 回会議を我が国で開催する運びとなった。

本国際会議は、医療・医学・生命科学・情報分野におけるあらゆる生産加工技術を対象としており、世界各国の研究者および関連企業から 68 件の発表が行われた。研究発表を通して、当該分野に関わる様々な情報を共有して研究を加速させるとともに、日本企業の実践的活動を海外に知ってもらい良い機会となった。この国際会議が、医療・医学・生命科学分野における生産加工技術の資質向上を図る機会となることを期待している。

## 〔国際会議〕

申請者	群馬大学大学院 工学研究科 准教授 弓仲 康史	2025013
研究集会名	第 43 回 IEEE 多値論理国際シンポジウム (IEEE ISMVL2013)	
開催期間	平成 25 年 5 月 22 日～5 月 24 日	
開催場所	富山国際会議場大手町フォーラム	
申請者の役割	プログラム委員長	

## 概 要：

「多値論理国際シンポジウム (ISMVL)」は、IEEE コンピュータソサエティ主催の多値論理に関する最も権威のある国際会議である。第 43 回を迎える今年のシンポジウムは、平成 25 年 5 月 22 日から 3 日間にわたり、富山国際会議場で開催された。多値論理は、通常の 2 値以上の信号表現に基づく情報処理技術であり、既に USB メモリの多値記憶およびファジィ論理を用いた制御等に実用化されている。本会議は、代数・論理等の数学者からハードウェア技術者、プログラマに至る広い分野の研究者が内外より参加し、アットホームな雰囲気での技術討論が可能な点が大きな特徴であり、今回は 93 名（日本から 58 名、海外より 35 名）の参加者があった。

本国際シンポジウムでは、3 件の招待講演および 56 件の一般講演が行われた。Martin Goldstern 教授（ウィーン工科大）の Lukaszewicz 論理に関する招待講演および木村啓明博士（ローム株式会社）による不揮発ロジックに関する招待講演が行われた。さらに、“Computational Medical and Health Care Technology” と題する畑豊教授（兵庫県立大学）の招待講演が行われ、ファジィ論理の医療応用に関する興味深い講演内容が参加者の注目を集めていた。一般セッションにおいても、近年注目されているスピントロニクス素子の多値応用による超低消費電力回路技術等、多値論理に関する学際的な議論が行われた。特に、2 値の限界を打破する可能性を探求し、人間と機械の調和のとれた豊かな情報化社会、グリーンエネルギー社会の実現を目指す多値情報処理技術が本シンポジウムにおいて活発に討論された。

- 
- 平成 24 年度活動報告
  - 平成 25 年度助成報告
  - 受領者投稿
  - 研究室訪問
  - 第 24 回 (平成 25 年度) 研究助成課題一覧
  - 第 23 回 (平成 24 年度後期) 国際交流助成課題一覧
  - 第 24 回 (平成 25 年度前期) 国際交流助成課題一覧
  - 平成 25 年度研究助成課題の紹介
  - 平成 26 年度助成候補募集案内

## 平成24年度活動報告

## (1) 主要業務日程

年月日	内容
平成24年4月1日～	平成24年度後期国際交流助成課題の申請受付開始
5月24日	平成24年度国際会議等開催助成課題の申請受付開始 第2回立石賞表彰式・記念講演
6月12日	平成24年度(第23回)助成金贈呈式及び懇親交流会を開催 第11回理事会, 第5回評議員会開催 ・平成23年度事業報告及び決算報告承認 ・平成25年度助成課題募集方法の承認 ・評議員の退任及び理事・監事選任 等
6月30日	第12回理事会開催 ・理事長(代表理事), 常務理事(業務執行理事)選定
8月1日	平成24年度後期国際交流助成課題の申請締切(44件受付) 平成24年度国際会議等開催助成課題の申請締切(47件受付) 平成25年度研究助成課題の募集案内発送 財団ホームページでの募集案内開始 電子申請システムの導入(研究助成のみ)
9月1日～	平成25年度研究助成課題の申請受付開始
9月28日	助成研究成果集第21号発行
10月1日～	平成25年度前期国際交流助成課題の申請受付開始
10月31日	平成25年度研究助成課題の申請締切(113件受付)
12月31日	平成25年度前期国際交流助成課題の申請締切(19件受付)
平成25年1月25日	第25回選考委員会開催 ・平成25年度研究助成課題, 前期国際交流助成課題の選考
3月15日	第14回理事会, 第6回評議員会開催 ・平成25年度事業計画及び収支予算案の承認 ・平成25年度助成課題の承認 ・平成26年度助成課題募集案内の承認 等

## (2) 会計報告

## 収支計算書

(自 平成24年4月1日 至 平成25年3月31日)

(単位:千円)

## 貸借対照表

(平成25年3月31日)

(単位:千円)

I 事業活動収支の部		I 資産の部	
1. 事業活動収入		1. 流動資産	
基本財産運用収入	73,500	現金	152
特定資産運用益	17,282	普通預金	26,684
寄付金収入	20,500	有価証券	0
雑収入	13	2. 固定資産	
2. 事業活動支出		(1) 基本財産	
事業費支出	95,819	有価証券	6,090,000
管理費支出	7,687	(2) 特定資産	
事業活動収支差額	7,789	事業運営資産	1,100,000
II 投資活動収支の部		事業積立資産	140,000
1. 投資活動収入		(3) その他の固定資産	150
助成事業積立資産取崩収入	70,000	資産合計	7,356,986
2. 投資活動支出		II 負債の部	
助成事業積立資産取得支出	80,000	1. 流動負債	0
投資活動収支差額	△10,000	2. 固定負債	0
III 財務活動収支の部		負債合計	0
1. 財務活動収入	0	III 正味財産の部	
2. 財務活動支出	0	1. 指定正味財産	7,330,000
財務活動収支差額	0	寄附金	1,100,000
当期収支差額	△2,210	寄附株式	6,090,000
前期繰越収支差額	29,046	事業積立資産	140,000
次期繰越収支差額	26,836	2. 一般正味財産	26,986
		正味財産合計	7,356,986

## 平成 25 年度助成報告

本年は、平成 25 年度研究助成課題に対し平成 25 年 5 月 23 日助成金贈呈式を開催し、次の助成を行なった。

研究助成	22 件	5,479 万円
国際交流助成（前期）	5 件	116 万円
合計		5,595 万円

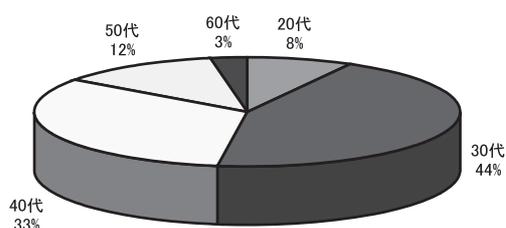
なお、後期国際交流助成と国際会議等開催助成は、平成 25 年 10 月に実施する。

この結果、財団設立以来の助成顕彰事業は、研究助成 518 件、国際交流助成 276 件、立石賞 5 件、助成総額約 13 億 3,001 万円となった。

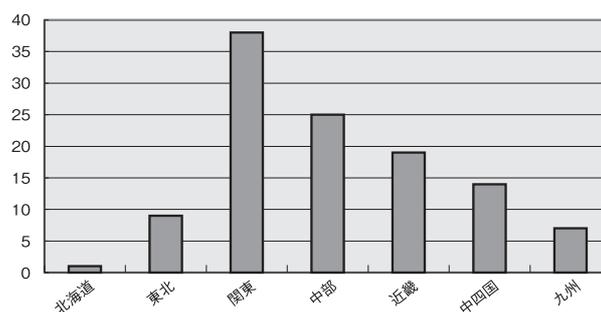
### ● 平成 25 年度助成の応募状況

#### (1) 研究助成（平成 25 年度）

##### ① 年令別

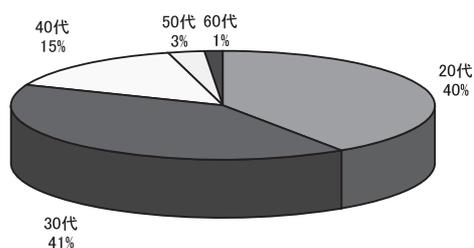


##### ② 地域別

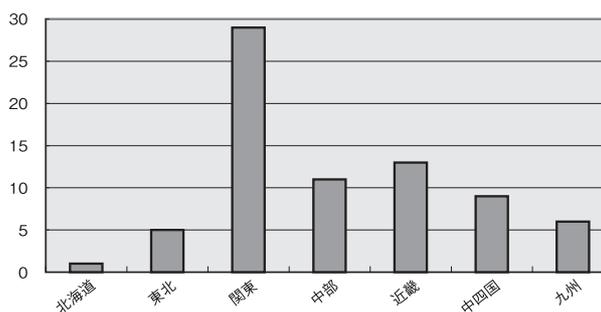


#### (2) 国際交流（派遣）助成（平成 24 年度後期～平成 25 年度前期）

##### ① 年令別



##### ② 地域別



## 平成 25 年度助成金贈呈式

日時：平成 25 年 5 月 23 日（木）  
場所：グランドプリンスホテル京都

平成 25 年度助成金贈呈式は、ご来賓の文部科学省大臣官房審議官 菱山 豊様、京都府商工労働観光部部長 田中準一様、オムロン(株) 取締役会長 作田久男様、平成 25 年度研究助成金受領者、過年度助成金受領者、財団関係者、オムロン関係者を含めて、約 120 名の出席のもとに開催しました。立石義雄理事長より研究助成金目録の贈呈を行いました。



表彰式・贈呈式会場



立石理事長挨拶



目録の贈呈

なお、過年度受領者 4 名には成果発表を実施していただき、今年度の研究助成受領者には懇親交流会の中で研究課題の内容や目標についてポスターを用いてご説明いただきました。

※課題発表は、155～157 頁に掲載



研究助成課題の発表

## 受領者投稿

自然な3次元映像を再生する大画面ホログラフィック  
ディスプレイの開発を目指して

神戸大学大学院 システム情報学研究科 教授 的場 修

(第17回受領者)

最近、少し下火になりつつあるが、2010年の映画「アバター」やステレオ型立体テレビの発売と一部テレビ放送の開始により3次元テレビの第3次ブームが起こった。我々の研究室では、2000年頃よりホログラフィー方式の3次元テレビに関する研究を開始している。ホログラフィー方式は、ステレオ型の立体視とは異なり、空間中に3次元物体を実像または虚像として復元することが可能であるため、ステレオ視における輻輳と調節の不一致などの問題がない、理想的な3次元ディスプレイ方式の一つである。しかしながら、ホログラフィック3次元テレビの実現に向けては、光波の振幅と位相を自在に変調できる空間光変調素子の開発や干渉を利用するためにコヒーレンスの高い薄型の大画面光源の開発、ホログラムデータの高速計算など多くの課題を抱えている。ただし、韓国の企業などは2025年にはホログラフィー式の3次元テレビが実現できるというロードマップを描いている。

2005年度に助成して頂いた、「大画面ナチュラル3次元ホログラフィックディスプレイ」では、コヒーレントな大画面光源の開発に向けて、2次元光導波路アレイによる分岐型の光源開発を行った。研究当時では空間光変調素子として1,920×1,080 (2k×1k)画素のハイビジョンクラスの素子がある程度であったと思われるが、

現在では、8k×4k画素の空間光変調素子が実現されている。しかしながら、ホログラフィー方式においては、50インチサイズを想定すると、200万×100万画素

(2M×1M)以上の空間光変調素子の開発が望まれる。それに対して当時の研究では最大81個の光源アレイでしか達成できていない。1本の光導波路のコア径が4.5 $\mu\text{m}$ としており、理想的な空間光変調素子では、0.5 $\mu\text{m}$ 以下の画素サイズとなるため、22万×11万本のアレイ型面光源が必要になる。そのため、モジュール化するなどの工夫を行い、薄型の高コヒーレンス面光源の開発に向けて、今後も研究を続けて行きたいと考えている。

立石財団で研究助成を頂いた後は、日本学術振興会のA-STEPや放送技術財団の研究助成、民間企業との共同研究などの更なる研究の発展に繋がっている。研究者としては若手の頃に大きな研究助成金を頂いたことは、研究設備の充実化が図れるとともに、選んで頂いた名誉が自信となる。ホログラフィック3次元テレビの開発は非常に困難な道ではあるが、ブレークスルーとなる技術開発に向けて研究に励みたい。



受領者投稿

ロボットに心を宿す情報技術で人間と機械の調和に挑む

名古屋工業大学大学院 工学研究科情報工学専攻 准教授 加藤昇平  
(第18回受領者)

産業におけるロボット技術開発の成功体験を経て、近年、ロボットと人の共生をめざした社会や人々の暮らしに役立つロボットの開発が期待されています。私は、自身の卒業研究で人工知能の学問を初めて知って以来、しばらく記号論理の知識表現と推論処理の研究に従事していました。人工知能の理論と計算技術を用いてロボットに人間の持つ知能や社会性を与えるためには、形式知の情報表現と計算処理だけでは限界があり、感情知や暗黙知のような柔軟で人間らしい知能を実現すべきと考えていました。そんな中、指導教授のご恩やベンチャー企業の方々とのご縁が重なり、2002年に産学官連携プロジェクトに参加する幸運に恵まれました。

「感情豊かな会話コミュニケーションを通じて人の心を癒すロボットをつくらう」の合言葉に、感性会話型ロボット ifbot を開発しました。ifbot のデビューとなった2003年3月、横浜で開催されたロボット展示会 ROBODEX 2003 のイベントでは、展示会の前日から連日にわたり会場に隣接するホテルで点検・修正・プログラミングの作業を徹夜で行ったものでした。その後、いくつかの改良や実証実験などを経て、2005 World Expo (愛知万博) への出展も無事終了し、次なるステージへ研究開発をシフトさせたいと思っていました。このロボットは顔からの表情表出に特徴があり、眼、瞼、首に設けられた多数のモータと LED 発光装置で様々な顔表情を表現できる機能が搭載されています。しかしながら、会話処理と表情制御は作りこみの部分が大半で柔軟性に欠け、ハードウェアの特長が十分に活かされていませんでした。

そこで、このロボットをプラットフォームに

感情認識・感情生成・感情表出の三位一体の技術を研究しようと考え、2006年の秋に「感性コミュニケーションロボットのための感情制御と感情生成」の研究

計画を申請し、2007年春に採択いただきました。晴れやかな新緑の日に京都まで出かけて参加した厳かな贈呈式と華やかな懇親パーティーが懐かしく思い出されます。また、懇親パーティーにてオムロンの若手の技術者・研究者の方が大勢参加され、私を含め受賞者達の研究に対して大変積極的にご質問やコメントを下さったことに大きな感銘と刺激を受けたことを覚えています。

2007年に、立石科学技術振興財団からの多大なご支援の下で培った感情制御と感情生成の研究(詳細は助成研究成果集【第17号】を御覧ください)をきっかけに「気分の遷移モデルによるロボットの性格付け・個性化」や「会話の間や発話リズムのゆらぎ特徴を用いて感情の同調傾向を促すロボットの音声発話制御」など多くの研究が立ち上がり、感性会話ロボットのための感情情報処理の研究を大きく発展させることができました。現在では、これらの研究に加えて、助成期間に研究した「会話音声の非言語的特徴から発話者の感情を推定する技術」から派生・発展した健康長寿社会を実現する新しい研究プロジェクト「高齢者の発話音韻解析に基づく認知機能障害の早期スクリーニング」に邁進しています。



## 研究室訪問

熊本大学大学院 自然科学研究科

松永信智 教授 訪問記

(第20回受領者)

7月16日、畑豊選考委員（兵庫県立大学大学院工学研究科教授）及び荒尾眞樹選考委員（オムロン株式会社技術・知財本部長）にご同行いただき、熊本大学大学院自然科学研究科の松永信智教授の研究室を訪問させていただきました。例年よりも早い梅雨明けで、すっかり真夏の日差しを浴びた熊本大学黒髪キャンパスが我々を迎えてくれました。

## ○ まずは貴研究室を簡単にご紹介願います。

私の所属は、情報電気電子工学専攻、人間環境情報講座のシステムインテグレーション研究室です。

システムインテグレーションとは、問題に合わせて既存のコンポーネントや要素を有機的に結合してシステム構築・設計を総合的に行なう技術です。単なる寄せ集めの技術ではなく統合化により新たな価値や卓越した機能を実現することが大きな特徴です。当研究室では、その統合化において人間中心の制御問題の解決を行っています。

具体的な体制としては、教授の私と岡島寛助教とで研究を推進しています。私が人間中心の人間機械系の研究やアドバンス制御技術の産業応用に、岡島助教がロバスト制御系の設計や動的量子化に関する研究に取り組んでいます。そして博士後期課程2名、博士前期課程6名、学部生7名がこれらの研究に参画しています。

研究の進め方としては、問題を解く方法を固定化せず、多面的に問題解決を考えることを念頭に、「現場」「現物」「現象」を常に考えることを方針としています。また、非常に幅広い問題を扱うので、学内でもいろいろな研究室と連携を取る必要があります。

## ○ 当財団が助成した研究課題についてご説明願います。

2009年度から2010年度の2年間にわたって「人間の操舵特性・認知特性を考慮した次世代SBW制御系の構築」という課題で助成をいただきました。

次世代の自動車では、高齢者、身体障害者などの個々のドライバの状況に応じて最適な性能を得ることが期待されています。そのためには人間がシステムに物理的に介在することを考慮した制御システムの構築が必要です。現在の自動車の操舵系は、ドライバのハンドル操作量をアシストする電気式パワーアシストシステムであり、操舵量が試行錯誤で決められます。近年、自動車の高度化に伴い操舵の機械的結合をエレクトロニクスに置き換えたステアバイワイア（SBW）が注目されています。本研究では、人間の認知特性を実現する動的なスケーリング手法を明らかにして、系の受動性に基づくロバストなSBWシステムの構成手法を開発しました。

## ○ それはその後、どのように進みましたでしょうか？

御財団に助成をいただいていた当時は、人間機械系の構築と福祉機器への応用を目指しており、①医療装置に関する研究・開発、②小型自動車の制御に関する研究、③人間の痛み感覚を有するロボットの研究に取り組んでいました。この中で、御財団に支援いただいた研究は②です。現在は、特に自動車の分野では人間中心の設計が進んでおり、近年は車にも衝突防止システムや横滑り防止装置など様々なドライバーを支援する機能が搭載されています。



松永信智教授



STAViと(左から)松永教授, 畑選考委員, 荒尾選考委員, 田中(後列は研究室の皆様)

その後、当時の②をさらに具現化した電動車椅子 STAVi (写真) の研究を開始しました。STAVi の長所として、「おんぶ型」の搭乗スタイルや座席の昇降機構などがありますが、その操縦が困難であるという欠点もありました。これらの問題の改善に関して International Conference on Control, Automation and Systems 2011 の Outstanding Award をはじめ多くの賞をいただきました。また STAVi を商品化した地元企業も 2012 年度熊本県工業大賞を受賞しました。ところが皮肉にも私自身は、商品化準備中の 2011 年に脳卒中で倒れました。電動車椅子の研究者が、一夜にして電動車椅子のユーザ(患者)に

なったのです。

○ 研究者だったのが突然患者に！研究への考え方はどのように変化しましたか？

お蔭様で、その後リハビリを経て、研究に復帰することができました。しかし、障害者として現場に復帰してみると、今まで患者の気持ちが理解出来ていなかったと痛感しました。研究は、単純に STAVi を作るだけで終わりではなかったのです。人間は病気になったり、年老いていたり、決して楽な方向には進みません。人間の要求は、「健康で長生きし生活を楽しみたい」ことだろうと思います。様々な福祉車両を自分用に自動で調整し、コミュニティを越えて乗り継いでいくことで行動範囲も広がり、多くの刺激を受けて生活が活性化する。これが本当の Quality of Life の向上であり、あるべき障害者や高齢化社会の姿であろうと思います。それに向かって専門の制御だけではなく運用システムの観点でも貢献していきたいと思っています。

○ 研究成果の活用される分野、そして長期的な目標についてお聞かせ下さい。

二つのビジョンがあります。一つは先に述べましたように、本当に障害者や高齢化社会の役に立つものを作りたいということです。

もう一つは、制御の未来「最適化から自律化へ」を見極めたいと思っています。25 年前に御財団の設立者である故立石一真氏の SINIC (Seed-Innovation to Need-Impetus Cyclic Evolution) 理論を読んでその先見性に感銘を受けた記憶があります。若い頃、これから訪れる最適化社会、自律化社会はどんな時代だろうと考えていたのを思い出します。今まさに最適化社会は到来しています。しかし、最適化社会はこれからどの様に発展するのでしょうか？ STAVi の例を考えると、自分が



ACC (Adaptive Cruise Control, 車間制御) のデモンストレーション



畑選考委員



プレゼンテーション  
(右：松永教授，左：畑選考委員)

障害者になると健常者用の操縦モデルとうまく合わせることができません。そうすると今までの一般的な最適化ではなく、私への最適化つまり個性化が進みます。つまり、ユーザーはコントローラを積極的に設計・管理する時代になります。それからもっと未来の自律化社会がどんな世界になるかはわかりませんが、これからは、障害者の立場での研究者として自律化における制御はどうあるべきかを考えていきたいと思っています。

○ 研究室では多くの学生を指導されていますが、教育者として留意されていることは？

「まずは、学生ごとにストレッチゴールを作りチャレンジさせることを指導していま

す」といいたいところですが、なかなか上手くいきません。実際は、学生という成長時期に細かに指導を行い磨き続けなくては宝石の原石もただの石です。ですから、とにかく多くの研究ミーティングを行います。ミーティングで一番時間をかけるのは、「なにをやるか」、「なぜやるか」です。ここで「今研究していることが価値があるのか」を学生に問いかけます。わからなかったら、様々な観点から何回も考えさせる。そのようなトレーニングをするうちに、自立した研究が出来るようになります。私の研究室は実際のモノがそこにあるので、とにかく現場・現物・現象をじっくり眺めて、リアルな答えを考える習慣を身につけてほしいと思っています。

○ 最後に、当財団に望まれることがあればお聞かせ下さい。

私は、企業に勤めた後、40歳で大学に赴任しました。気持ちは若手ですが、大学に来たときから、すでに若手ではありませんでした。その中で研究費を獲得していくのに苦労しました。そのような中、御財団からは年齢に関係なく採用していただいたこと、2年の期間で支援していただいたことで本当に助かりました。特に福祉や介護という分野の研究は年齢に依らない仕事かなとも思います。その意味で、年齢を問わず御財団には「いい研究」を支援していただければと思います。



STAViの運転席

あとがき

松永教授のお言葉からは、ご自身のキャリアや闘病経験を強みに変えて研究に精進されていることがひしひしと伝わってきて感銘を受けました。また、STAViの準備やデモをしていただいた学生の皆さんからも、社会に役立つ研究やもの作りに取り組んでいるというモチベーションを感じ取ることができ、炎天下でのデモだったにもかかわらず、さわやかな気分になれました。松永教授と研究室のますますのご活躍、ご発展を祈念申し上げます。ありがとうございました。

(レポート：常務理事 田中敏文)

## 平成 25 年度 助成課題一覧

〔研究助成〕

(五十音順)

申請者氏名・所属機関・職名	申請課題名
天野 敏之 和歌山大学 システム工学部 情報通信システム学科 准教授	懐中電灯型プロジェクタカメラ系による視覚補助に関する研究
荒田 純平 名古屋工業大学大学院 工学研究科 情報工学専攻 助教	駆動力を人体の自然な動作から抽出する柔軟メカニズムによる手指動作支援装置
和泉 慎太郎 神戸大学 自然科学系 先端融合研究環 重点研究部 助教	ウェアラブルな生体情報常時計測システムのための心拍抽出手法の開発
梅田 智広 奈良女子大学 社会連携センター 地域イノベーション推進室 特任准教授	新生児の異常監視を支援する非接触方式の新生児呼吸見守り装置の開発
王 龍標 長岡技術科学大学 産学融合トップランナー 養成センター 特任准教授	多様な環境における会議音声の音声認識と発言者識別に関する研究
田中 一品 大阪大学大学院 工学研究科 特任助教	対話相手とのリアルな接触感覚を生み出す携帯デバイスの開発
谷口 浩成 津山工業高等専門学校 電子制御工学科 准教授	リラクゼーションと関節可動域訓練を両立するソフトリハビリシステムに関する研究
年吉 洋 東京大学 先端科学技術研究センター 教授	MEMS 可変共振子アレイによるテラヘルツ光スキャナ
中妻 啓 熊本大学大学院 自然科学研究科 産業創造工学専攻 助教	肺気道断面積の音響的推定に基づく肺機能検査システムの研究
西岡 靖貴 滋賀県立大学 工学部 機械システム工学科 助教	人の付属肢骨格に能動的に装着する軽量・柔軟なアクチュエータ
西川 淳 北海道大学大学院 情報科学研究科 生命人間情報科学専攻 特任講師	聴覚中枢神経マイクロインプラントに応用する音情報神経符号化の基礎技術開発
西出 俊 京都大学 白眉センター 助教	モーショニーズに基づく人間・ロボットの行動模倣によるロボットの道具身体化
林 隆介 産業界技術総合研究所 ヒューマンライフ テクノロジー研究部門 主任研究員	視覚野の神経情報を用いたロボットハンド制御技術の開発
飛田 哲朗 名古屋大学 医学部附属病院整形外科 医員	BIA 法を用いたサルコペニア診断法開発とメタボリックシンドロームとの関連性解明

## 平成 25 年度 助成課題一覧

〔研究助成〕

(五十音順)

申請者氏名・所属機関・職名	申請課題名
藤井 文武 山口大学大学院 理工学研究科 システム設計工学系学域 准教授	生体信号に依らないロボットスーツと装着者運動の同調制御システムの開発
細野 美奈子 静岡県工業技術研究所 沼津工業技術支援センター 研究員	MEMS 3 軸力センサを用いた貼付型フレキシブル褥瘡予防シートに関する研究
真下 智昭 豊橋技術科学大学 テニユアトラック助教	血管内超音波神経観察を実現する二自由度アクチュエータの開発
谷田部 淳一 福島県立医科大学 医学部 助教	家庭血圧を含むパーソナルヘルスレコードを用いた新しい医療コミュニケーションの試み
山際 伸一 筑波大学 システム情報系 准教授	運動の音変換による身体バランス制御誘導システムの開発
山口 堅三 香川大学 工学部 材料創造工学科 助教	アクティブプラズモン及び Wood アノマリセンサの開発
山崎 俊太郎 (独)産業技術総合研究所 デジタルヒューマン 工学研究センター 主任研究員	高運動機能性製品設計のための高分解能 4 次元計測技術の研究
中内 茂樹 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科情報・知能工学系 教授	分光スペクトル修飾に基づく機能性 LED 照明に関する研究

助成件数：22 件

助成額：5,479 万円

平成 24 年度後期 助成課題一覧

〔国際交流（派遣）〕

（五十音順）

申請者氏名・所属機関・職名	派遣先研究集会／主催者名
井岡 恵理 青山学院大学 理工学部 電気電子工学科 助教	2012 International symposium on Nonlinear Theory and its Applications Claudio Mirasso, Tohru Ikeguchi
植山 祐樹 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 博士課程	The 2012 International Conference on Brain Informatics Web Intelligence Consortium, IEEE Computational Intelligence
大脇 大 東北大学 電気通信研究所 助教	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IEEE Robotics and Automation Society, RSJ (Robotics Society of Japan)
グエン タン ヴィン 東京大学大学院 情報理工学系研究科 博士課程	IEEE SENSORS 2012 IEEE Sensors Council
蔡 振宇 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 博士課程	Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA 2012) Asia-Pacific Signal and Information Processing Association (APSIPA)
佐藤 宗彦 東京大学大学院 工学系研究科 博士課程	ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST) 2012 Association for Computing Machinery (アメリカ計算機学会)
村上 泰樹 広島市立大学 情報科学研究科 博士課程	The Seventh International Conference on Innovative Computing, Information and Control Prof. Yan Shi

助成件数：7 件

助成額：145 万円

平成 25 年度前期 助成課題一覧

〔国際交流（派遣）〕

申請者氏名・所属機関・職名	派遣先研究集会／主催者名
藤ノ木 健介 大島商船高等専門学校 助教	The 9 th ISAAC Congress 2013 (第 9 回数理解析とその応用に関する国際会議) The International Society for Analysis, its Applications and Computation
山田 尚人 東京農工大学大学院 電子情報工学専攻 博士課程	The 32nd International Acoustical Imaging Symposium International Commission For Acoustics
吉元 俊輔 大阪大学大学院 基礎工学研究科 助教	IEEE World Haptics Conference 2013, The 5th Joint Eurohaptics Conference and IEEE Haptics Symposium Dong-Soo Kwon (KAIST, Korea)
松野 隆幸 岡山大学大学院 自然科学研究科 講師	The 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (米国ロボットと自動化に関する国際会議) The Institute of Electrical and Electronics Engineers (米国電気電子学会)

〔国際交流（一般招聘）〕

申請者氏名・所属機関・職名	派遣先研究集会／主催者名
藤江 正克 早稲田大学 理工学術院 教授	The 9th Asian Conference on Computer Aided Surgery (ACCAS2013) Qixin Cao (曹 其新) Shanghai Jiaotong University・Professor

助成件数：5 件

助成額：116 万円

## 平成24年度 助成課題一覧

〔国際会議等〕

(五十音順)

申請者氏名・所属機関・職名	派遣先研究集会／主催者名
植田 充美 京都大学大学院 農学研究科 教授	International Joint Symposium on Single-Cell Analysis (単一細胞解析国際シンポジウム)
岡部 寿男 京都大学 学術メディアセンター 教授	IEEE COMPSAC2013 (IEEE International Computer Software and Applications Conference 2013)
川人 光男 ㈱国際電気通信基礎技術研究所 脳情報通信総合研究所 所長	2012 International Workshop on Perceptual Learning
來村 徳信 大阪大学 産業科学研究所 准教授	第2回国際セマンティックテクノロジー合同会議 (JIST 2012)
北村 喜文 東北大学 電気通信研究所 教授	Asia Pacific HCI Development Workshop
佐々木 実 豊田工業大学 工学部 先端工学基礎学科 教授	第18回 光 MEMS・ナノフォトニクス国際会議 (International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics 2013)
出町 和之 東京大学大学院 工学系研究科 原子力専攻 准教授	1st International Conference on Maintenance Science and Technology for Nuclear Power Plants (ICMST Tokyo 2012)
富山 宏之 立命館大学 理工学部 電子情報工学科 教授	アジア南太平洋設計自動化会議 2013 (ASP-DAC2013)
廣瀬 明 東京大学大学院 工学系研究科 教授	Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR) 2013
藤井 輝夫 東京大学 生産技術研究所 教授	第16回化学・生命科学マイクロシステム国際会議 (MicroTAS 2012) The 16th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (MicroTAS2012)
裕本 真佑 神戸大学大学院 システム情報学研究科 特命助教	The 4th International Workshop on Empirical Software Engineering in Practice
光石 衛 東京大学大学院 工学系研究科 教授	The First CIRP Conference on Biomanufacturing 2013 (略称：CIRP-BioM2013)
弓仲 康史 群馬大学大学院 工学研究科 准教授	第43回 IEEE 多値論理国際シンポジウム (IEEE ISMVL2013)

助成件数：13件

助成額：520万円

平成 25 年度研究助成課題の紹介

掲載順は、助成課題一覧〔研究助成〕の掲載順

**第24回 助成金贈呈式**

**研究助成課題の紹介**

平成25年5月23日

**(財)立石科学技術振興財団**

懐中電灯型プロジェクタカメラ系による視覚補助の研究 (1年間)

和歌山大学システム工学部情報通信システム学科  
准教授 天野 敏之

**【研究の目的と意義】**  
- 視かけの制御を応用することで視覚補助の補助を実現し、人間と機械の調和の促進に貢献する。  
- プロジェクタカメラをコンパクトな手持ち式の筐体を実現し、懐中電灯を扱うように視覚世界の視認性を向上させる。

**【研究の位置づけ】**  
白内障や二色性色覚のための映像変換技術を用いたカメラ付き携帯端末: ○実用、×視線やサイズが不一致。  
HMDへの応用: ○視線が一致、×視野角が狭い。

**【本研究の目標と方法】**  
プロジェクタとカメラによるフィードバックで実世界の物体の見かけを操作し、視覚を補助する技術を開発した。  
しかし、大掛かりで持ち運びできない。  
1) 小型軽量な両軸光学系の実現。  
2) 投影光の手置れ補償技術の確立。

駆動力を人体の自然な動作から抽出する  
柔軟メカニズムによる手指動作支援装置 (1年間)

名古屋工業大学 大学院 情報工学専攻 助教 荒田純平

リハビリテーションや国民健康維持の観点から、人体へ装着し、日常生活動作を支援するロボットの開発が広く行われているが、そのほとんどは、産業機械技術の転用であり、人体へのいわば「お仕着せ」に過ぎない。

巧緻な動作を要する手指について、柔軟メカニズムによる効果的動作支援

・ばね要素を複合的に構成し、人体手指に自然になじむ柔軟メカニズムを開発  
・さらに人体の自然な動作から駆動力を生成、モータなどの駆動部品を必要としない装着型手指動作支援装置へと発展

リハビリテーションや障害者補助などで社会へ貢献

ウェアラブルな生体情報常時計測システムのための  
心拍抽出手法の開発 (1年間)

神戸大学 自然科学系先端融合研究環 重点研究部  
助教 泉 慎太郎

**貼り付け型センサに対する要求**  
Patch, Battery, RF Antenna, Sensing SoC, Electrode

**提案技術**  
電極とアナログ回路領域, デジタル回路領域

自己相関法: 自己相関係数からQRS群の周期性を抽出し、心拍に変換する  
R波位置推定方法  
不整脈の検出方法  
計算量削減とリアルタイム処理を実現するアーキテクチャと専用ハードウェア化

新生児の異常監視を支援する非接触方式の新生児呼吸見守り装置の開発 (1年間)

奈良女子大学 社会連携センター地域イノベーション推進室  
特任准教授・梅田 智広

**【呼吸数の計測】**  
被験者に負担の少ない計測法が求められている。  
従来: 接触方式 (インピーダンス法、サーモスタ方式、ベルト/シート状センサなど)  
非接触方式 (赤外線や近赤外線が検出されているが、高精度、セーフティ確保)  
本研究: 非接触方式 (レーザーを活用したシステムであり安価、普及に期待、セーフティ確保)

**【レーザーによる新生児 (特に未熟児) の呼吸データの蓄積、解析、評価】**

医学的見地に基づく新生児の異常監視を支援する呼吸見守り装置の開発

多様な環境における会議音声の音声認識と発言者識別  
に関する研究 (1年間)

長岡技術科学大学  
産学融合特任准教授・王 龍楳

**【(1) 音響信号処理】**  
通話音, 雑音音  
音源検出, 音源判定  
音源数 > 1  
No  
Yes  
音源分離

**【(2) 高精度な音声認識】**  
チャンネル・発話者変動に対して  
本研究: スペクトル減算による雑音除去 + 特徴空間の非線形変換 + 話者適応

**【(3) 高精度な発言者識別】**  
従来: 標準スペクトルをベース情報量基準法に入力  
本研究: 音源情報、声道情報、空間情報を因子分析法 + 線形判別分析法に入力

対話相手とのリアルな接触感覚を生み出す携帯デバイスの開発 (1年間)

大阪大学大学院工学研究科 知能・機能創成工学専攻  
特任助教 田中 一晶

**目的**  
リアルな接触感覚を生み出す携帯デバイスを開発し、対話相手の存在感を強化する。  
■ 従来の携帯電話  
- 対話相手の存在が身近に感じられない。

**研究計画**  
効果的なデザインを設計するため、接触感覚を生み出す要因を実験的に解明する。  
■ 複数のモダリティを持つデバイスの開発  
- 視力、体温、脈拍を伝達・再現。  
- 人の手のような柔軟性を持つ。

人と機械の接触により「接触感」をリアルに知覚。

リラクゼーションと関節可動域訓練を両立する  
ソフトリハビリシステムに関する研究 (1年間)

津山工業高等専門学校 電子制御工学科 准教授 谷口 浩成

**研究目的と意義**  
【患者にとって求められるリハビリ課題とは?】  
- 患者: 不安を取り除き、効果的に治療を受けたい。  
- 医療者: 患者の負担を軽減し、効果的に治療を受けたい。  
- 作業療法士: 患者の負担を軽減し、効果的に治療を受けたい。

**研究目標**  
作業療法士の治療を提供する足首関節用ソフトリハビリシステムの開発

**研究方法**  
作業療法士のリハビリ課題を適用  
足首関節用ソフトリハビリシステム  
足首関節用可動域訓練ユニット

平成 25 年度研究助成課題の紹介

**MEMS可変共振子アレイによるテラヘルツ光スキャナ** (研究期間: 1年)

東京大学 先端科学技術研究センター  
教授・年吉 洋

【最終目標】 MEMS技術でテラヘルツ光をON/OFF制御する可変ピセルを構成し、それをアレイ状に並べてスキャナ・レンズ・シャッタ等の機能にプログラム可能な透過型可変フィルタを構成する。

【研究期間の目標】 (1) 製造誤差を含めたMEMS可変THzフィルタの体系的設計手法の確立、(2) 静電駆動型MEMS可変容量を集積化したSRR型テラヘルツ光フィルタの作製と評価 SRR = Split Ring Resonator

**肺気道断面積の音響的推定に基づく肺機能検査システムの研究(1年間)**

熊本大学・自然科学研究科・産業創造工学専攻  
助教 中妻 啓

【肺機能の検査】  
従来: スパイロメトリ、FOT  
→ 間接的な検査、上部気道の影響  
本研究: 肺気道断面積を音響的に推定  
→ より直接的な検査  
上部気道の影響を除去  
末梢気道インピーダンスを測定

【提案法の構成】  
音源(1)から、肺気道内にパルス波を入射、音圧(3)と粒子速度(4)を検出入射波と反射波を分離、反射波から気道軸に沿った断面積分布を推定、上部気道(61)の影響を除き、声門(63)から見た末梢気道インピーダンスを計算

【平成25年度の研究計画】  
パイプを用いて模擬肺気道を作製、断面積分布と末端音響インピーダンスの推定を行い、検査原理を検証

**人の付属肢骨格に能動的に装着する軽量・柔軟なアクチュエータ** (1年間)

滋賀県立大学  
助教 西岡 靖貴

【従来技術: プリーツ構造による極軽量空気圧ソフトアクチュエータ】  
・ プラスチックフィルムによる空気圧ソフトアクチュエータの極軽量化(図1)  
・ プリーツ構造による屈曲運動の実現(図1)

【本研究目的: 「身に着けやすい」安全な装着型機械システムへの応用】  
・ 「身に着けやすさ」に対して「軽量化」と「柔軟性」、「能動的な装着」に着目  
・ これまでのプリーツ構造極軽量ソフトアクチュエータを応用  
・ プリーツの斜め加工により螺旋運動が可能(図2) ⇒ 不均一径を持つ対象にも対応  
・ 膨張順を制御するための軽量バルブを内蔵 ⇒ 根本から順に巻き付く技術

**聴覚中枢神経マイクロインプラントに応用する音情報神経符号化の基礎技術開発 (1年間)**

北海道大学 大学院情報科学研究科 生命人間情報科学専攻  
特任講師 西川 淳

ハードウェア: 人工聴覚神経デバイス(1.0mm x 2.0mm) 神経組織への挿入  
ソフトウェア: 音情報の中枢神経符号化構造的モデル化 (音響的符号化、逆符号化、符号化/復号化、符号化/復号化)

【研究の目的と意義】  
人間と機械の協働を進めるためには、機械にあわせて人間の行動が制約される状況を改善し、人間の思い通りに機械を動かすことができるインターフェースを開発する必要がある。本研究は人間の動作を機械的に認識することによって機械を制御できよう。聴覚情報に頼る機械的動作を制御に直接利用するプレシジョン・インテイクエンス(BMI)を提案する。そのための基礎研究として、大規模視野とロボットハンドを接続し、視覚フィードバックによる閉ループ制御を行うBMIシステムの構築をめざす。

【研究の位置づけ】  
BMI研究は、神経のProsthesis(人工神経)技術として発展してきた。初期臨床実験ではあるが、電極を四肢麻痺患者の運動野(手足の運動を直接司る脳領域)に埋め込み、記録された神経活動のコンピュータからのリアルタイムシステムを駆動して運動を達成している(Hastings et al. 2005; Hochberg et al. 2006; Hochberg et al. 2012)。しかし、運動野の神経活動による複雑な動作には同手法を適用できない。そこで、複雑な形状情報を保持しやすい視覚野の神経活動に着目し、視覚フィードバックを用いてロボットハンドの閉ループ制御を行うことを意図した。

【研究の目的】  
従来、運動野の神経活動を用いて行われていたBMI制御に比べ、視覚野の神経活動を用いてロボットハンドの5指個別制御を可能にする。

【具体的な研究手法】  
1. 聴覚野の神経活動を記録するための電極の埋め込み  
2. 5指の個別制御を可能にするモデル動物による神経活動の記録  
3. 聴覚野の神経活動から、想起している物体の形状を推定し、ロボットハンドを制御

**モーションーズに基づく人間・ロボットの行動模倣によるロボットの道具身体化**

京都大学 白眉センター 助教 西出 俊

【モーションーズとは】 模倣学習において親の教示動作を段階的に複雑化することで幼児の学習能力が向上する現象

【研究目的】 ①モーションーズのモデル化による学習能力向上と②道具身体化応用

【研究方法】 Multiple Timescales Recurrent Neural Network (MTRNN)を用いる  
① MTRNNのニューロン特性を学習時に自己組織化する手法を開発  
② ナイフで切る・ハンマーでベルを鳴らす動作などを人間が教示する、道具保持、道具持ち上げ、道具使用動作と、段階的に構造化した動作学習を実現。

【期待される成果】 人間とロボットの協調学習を通じた道具理解モデル  
(1) モーションーズによる人間・ロボットの発達的な模倣学習機構の構築  
(2) 機能性に着目したロボットの道具使用能力の獲得

**視野野の神経情報を用いたロボットハンド制御技術の開発 (1年間)**

産業技術総合研究所 ヒューマンライフテクノロジー研究部門  
主任研究員・林 隆介

【研究の目的と意義】  
視覚野の神経活動を用いて行われていたBMI制御に比べ、視覚野の神経活動を用いてロボットハンドの5指個別制御を可能にする。

【具体的な研究手法】  
1. 聴覚野の神経活動を記録するための電極の埋め込み  
2. 5指の個別制御を可能にするモデル動物による神経活動の記録  
3. 聴覚野の神経活動から、想起している物体の形状を推定し、ロボットハンドを制御

**BIA法を用いたサルコペニア診断法開発とメタボリックシンドロームとの関連性解明 (1年)**

名古屋大学医学部附属病院整形外科 医員 飛田 哲朗

Bioelectrical Impedance Analysis による身体組成測定

疫学調査 北海道八雲町 1,000人の住民検診  
運動機能・動脈硬化リスクを網羅的に調査

加齢に伴う変化: 筋量減少、骨密度減少、体脂肪増加  
メタボ: 動脈硬化、高血圧  
サルコペニア: 筋量減少、運動機能低下  
身体活動: 筋量増加、運動機能向上

BIA法診断基準を確立  
サルコペニアとメタボの連鎖を断ち切る。

**生体信号に依らないロボットスーツと装着者運動の同調制御システムの開発(1年間)**

山口大学大学院理工学研究所システム設計工学系学域  
准教授 藤井 文武

【研究の目的と意義】  
視覚野の神経活動を用いて行われていたBMI制御に比べ、視覚野の神経活動を用いてロボットハンドの5指個別制御を可能にする。

【具体的な研究手法】  
1. 聴覚野の神経活動を記録するための電極の埋め込み  
2. 5指の個別制御を可能にするモデル動物による神経活動の記録  
3. 聴覚野の神経活動から、想起している物体の形状を推定し、ロボットハンドを制御

平成 25 年度研究助成課題の紹介

### MEMS3軸力センサを用いた 貼付型フレキシブル褥瘡予防シートに関する研究 (1年間)

静岡県工業技術研究所 沼津工業技術支援センター 研究員・細野 美奈子

**【研究背景・目的】**  
 褥瘡対策  
 ・シリコンゴムなどの緩衝剤の好発部位への貼付  
 ・センサによる好発部位に働く力のモニタリング  
 既存のカンサでは、実際に皮膚と接触している貼付型緩衝剤との間に働く力をモニタリングできず、有効な予防手段として機能していない  
 緩衝剤にMEMS3軸力センサチップを埋め込み接触面に働く力の直接モニタリング

**【研究課題】**  
 ・構造解析シミュレーションによる予防シートの設計  
 ・MEMS3軸力センサチップを埋め込んだ予防シートの製作  
 ・肩甲骨に貼付して3軸力の計測および予防シートの評価

**皮膚との接触面に働く3軸力を計測可能な褥瘡予防シートの実現**

### 血管内超音波神経観察を実現する二自由度アクチュエータの開発 (1年間)

豊橋技術科学大学 エレクトロニクス先端融合研究所  
テニュアトラック助教・真下 智昭

**【問題点】**  
 超音波ならば血管壁の先にある神経を見られるが、カメラのような二次元画像を得ることは難しい (原因: 音波の干渉)

**【解決策】**  
 そこで超音波素子を小型アクチュエータで二方向に駆動させ、干渉を回避することにより二次元画像を作成する。

**【実現するための方法】**  
 約3mmの大きさで優れた応答性を有する二自由度の駆動を実現できるアクチュエータの開発を行う。

**【予想される効果】**  
 血管の中から神経位置の特定が可能に、カテーテルアブレーション治療などに有効。

### 家庭血圧を含むパーソナルヘルスレコードを用いた 新しい医療コミュニケーションの試み (研究期間: 1年0ヶ月)

福島県立医科大学医学部 助教 (学内講師)・谷田部 淳一

**【研究のねらい】**  
 (1) センサーシステムから取得したデータから音をつくるソフトウェアを開発する  
 (2) 「うごきのおと」データベースを開発する  
 (3) 身体バランス-音変換をリアルタイムに行うセンサーシステムを開発する

**【研究のねらい】**  
 トップアスリートの能力  
 認知体験システム  
 スポーツのスキル獲得  
 リハビリテーション

**「音をつかって身体バランス制御をみちびくシステムを開発」**

### 運動の音変換による身体バランス制御誘導システムの開発 (1年0ヶ月)

筑波大学システム情報系  
准教授・山原伸一

**【研究のねらい】**  
 (1) センサーシステムから取得したデータから音をつくるソフトウェアを開発する  
 (2) 「うごきのおと」データベースを開発する  
 (3) 身体バランス-音変換をリアルタイムに行うセンサーシステムを開発する

**【研究のねらい】**  
 トップアスリートの能力  
 認知体験システム  
 スポーツのスキル獲得  
 リハビリテーション

**「音をつかって身体バランス制御をみちびくシステムを開発」**

### アクティブプラズモン及びWoodアモリセンサの開発 (1年間)

番川大学 工学部 材料製造工学科  
助教・山口 堅三

**【プラズモンチップの原理】**  
 ① 数値計算による構造の最適化  
 ② CO<sub>2</sub>センシング用光学系の構築  
 ③ プロトタイプ作製と光学特性評価

**①~③をクリアし、  
高感度・小型、リアルタイムなマルチガス検出装置の開発**

### 高運動機能性製品設計のための高分解能4次元計測技術 (1年間)

産業技術総合研究所デジタルヒューマン工学研究センター  
主任研究員 山崎 俊太郎

**【高分解能4次元計測】**  
 ・高時間分解能 = 5kHz  
 ・高空間分解能 = VGAサイズ密距離画像  
 ・高精度 = 誤差0.1mm以下  
 ・ロボタネス = 精密化光ステレオ  
 ・実時間 = GPUによるパイプライン処理

**【運動中の人体形状と着製品の計測】**  
 ・人体の形状と皮膚変形の推定  
 ・着製品の形状推定  
 ・製品の運動機能性評価

**【運動機能性デザインへの応用】**  
 計測 → 解析 → 設計 → 評価

計測に基づいたエルゴノミックデザイン

### 分光スペクトル修飾に基づく機能性LED照明に関する研究 (研究期間: 2年間)

豊橋技術科学大学 情報・知能工学系  
教授・中内 茂樹

**【LED照明の可能性】** *省エネ・長寿命だけではない!*  
 ★ LEDの登場: 照明の分光スペクトル設計の自由度向上  
 従来: 演色性 (太陽光にどれだけ近い) だけの評価  
 本研究: 目立ち、質感コントロールなどの機能付加  
 不快グレアなどの生体に対する影響の低減

**【照明の分光スペクトル設計】**  
 ・分光修飾することで、照明の機能として新たな視覚的効果を付加できる!  
 (1) 目打ち (2) 質感コントロール (3) 生体への影響低減 (例: 低グレア)  
 ・狭波長帯域LEDの最適組み合わせ問題として定式化  
 一分光修飾による視覚的効果が最大となる照明スペクトルを設計・試作

**機能性LED照明の設計手法確立と試作・評価**

## 公益財団法人 立石科学技術振興財団 平成 26 年度 研究助成 (A), (B) 候補 募集案内

公益財団法人立石科学技術振興財団においては、下記の通り平成 26 年度の研究助成 (A), (B) の候補募集を行なうこととお知らせいたします。(詳細については募集要項をご覧ください)

～ 記 ～

### (1) 助成対象

エレクトロニクス及び情報工学の分野で、人間と機械の調和を促進するための研究活動に助成します。

「人間と機械の調和を促進する」とは、人間重視の視点に立った科学技術の健全な発展に寄与したい、という願いからきているものです。上記の範囲で、科学技術を人間にとって最適なものとするための、若手研究者による萌芽的な基礎研究活動も歓迎します。

### (2) 金額および件数

研究助成金 (A)	1 件 250 万円以下 20 件程度
	研究期間 平成 26 年 4 月 1 日 ～原則 1 年
研究助成金 (B)	1 件 500 万円以下 2 件程度
	研究期間 平成 26 年 4 月 1 日 ～原則 2 年

### (3) 応募資格

- ① 日本国内に居住する研究者であれば、個人またはグループを問いません。
- ② 類似内容で現在、他の財団等から既に助成を受けているか、または受ける予定になっている個人またはグループは、ご遠慮下さい。

### (4) 募集期間と助成金交付時期

募 集 期 間：平成 25 年 9 月 1 日～平成 25 年 10 月 31 日（郵便局消印有効）  
助成金交付時期：平成 26 年 5 月の予定

### (5) 申請書類請求および問合せ先

当財団の所定様式（ホームページからダウンロードして下さい）に記入して、電子申請にて応募して下さい。

〒 600-8234 京都市下京区塩小路通堀川東入南不動堂町 801 番地  
公益財団法人 立石科学技術振興財団 事務局  
TEL：(075) 365-4771 FAX：(075) 365-3697  
E-mail：tateisi-f@omron.com

募集要項、申請書類に関しては当財団ホームページをご覧ください。  
URL：http://www.tateisi-f.org/

# 公益財団法人 立石科学技術振興財団

## 平成 26 年度 前期国際交流助成候補 募集案内

公益財団法人立石科学技術振興財団においては、下記の通り平成 26 年度前期国際交流助成の候補募集を行なうことのお知らせいたします。（詳細については募集要項をご覧ください）

～ 記 ～

### (1) 助成対象

エレクトロニクス及び情報工学の分野で、人間と機械の調和を促進するための研究活動を行なう研究者の海外派遣、特に国際会議での論文発表及び短期在外研究のための海外派遣に対し、応募者本人に助成します。

「人間と機械の調和を促進する」とは、人間重視の視点に立った科学技術の健全な発展に寄与したい、という願いからきているものです。上記の範囲で、科学技術を人間にとって最適なものとするための、若手研究者による萌芽的な基礎研究活動の一環としての国際交流を歓迎します。ことに、渡航経験の少ない若手からの応募を期待します。

### (2) 金額および件数

国際交流助成金	国際会議発表	1 件 40 万円以下	} 平成 26 年度 前期助成件数
	短期在外研究	1 件 60 万円以下	

国際会議発表では、国際会議参加のための費用を助成対象とします。  
短期在外研究では、30 日以上 90 日以下の滞在と渡航を助成対象とします。  
またその期間内の同一渡航先での国際会議参加のための費用を含むことも可能です。

### (3) 応募資格

- ① 日本国に居住する 40 歳以下（申請日の満年齢）の研究者とし、国籍・所属機関を問いません。
- ② 類似内容で現在、他の財団等から既に助成を受けているか、または受ける予定になっている個人またはグループは、ご遠慮下さい。

### (4) 募集期間と助成対象期間および助成金交付時期

募 集 期 間：平成 25 年 10 月 1 日～平成 25 年 12 月 25 日（郵便局消印有効）  
助成対象期間：平成 26 年 4 月 1 日～平成 26 年 9 月 30 日（日本出発日）  
助成金交付時期：平成 26 年 4 月の予定

### (5) その他

従来実施していた外国人研究者の特別招聘と一般招聘については、国際会議開催助成でご申請下さい。  
なお、国際会議開催助成は年 1 回の募集となりますので、募集期間にご留意下さい。

### (6) 申請書類請求および問合せ先

当財団の所定様式（ホームページからダウンロードして下さい）に記入して、電子申請にて応募して下さい。

〒 600-8234 京都市下京区塩小路通堀川東入南不動堂町 801 番地  
公益財団法人 立石科学技術振興財団 事務局  
TEL：(075) 365-4771 FAX：(075) 365-3697  
E-mail：tateisi-f@omron.com

募集要項、申請書類に関しては当財団ホームページをご覧ください。  
URL：<http://www.tateisi-f.org/>

## 公益財団法人 立石科学技術振興財団 平成 26 年度 後期国際交流助成候補 募集案内

公益財団法人立石科学技術振興財団においては、下記の通り平成 26 年度後期国際交流助成の候補募集を行なうこととお知らせいたします。(詳細については募集要項をご覧ください)

～ 記 ～

### (1) 助成対象

エレクトロニクス及び情報工学の分野で、人間と機械の調和を促進するための研究活動を行なう研究者の海外派遣、特に国際会議での論文発表及び短期在外研究のための海外派遣に対し、応募者本人に助成します。

「人間と機械の調和を促進する」とは、人間重視の視点に立った科学技術の健全な発展に寄与したい、という願いからきているものです。上記の範囲で、科学技術を人間にとって最適なものとするための、若手研究者による萌芽的な基礎研究活動の一環としての国際交流を歓迎します。ことに、渡航経験の少ない若手からの応募を期待します。

### (2) 金額および件数

国際交流助成金	国際会議発表	1 件 40 万円以下	} 平成 26 年度 後期助成件数
	短期在外研究	1 件 60 万円以下	

国際会議発表では、国際会議参加のための費用を助成対象とします。  
短期在外研究では、30 日以上 90 日以下の滞在と渡航を助成対象とします。  
またその期間内の同一渡航先での国際会議参加のための費用を含むことも可能です。

### (3) 応募資格

- ① 日本国に居住する 40 歳以下（申請日の満年齢）の研究者とし、国籍・所属機関を問いません。
- ② 類似内容で現在、他の財団等から既に助成を受けているか、または受ける予定になっている個人またはグループは、ご遠慮下さい。

### (4) 募集期間と助成対象期間および助成金交付時期

募 集 期 間：平成 26 年 4 月 1 日～平成 26 年 6 月 30 日（郵便局消印有効）  
助 成 対 象 期 間：平成 26 年 10 月 1 日～平成 27 年 3 月 31 日（日本出発日）  
助 成 金 交 付 時 期：平成 26 年 10 月の予定

### (5) その他

従来実施していた外国人研究者の特別招聘と一般招聘については、国際会議開催助成でご申請下さい。  
なお、国際会議開催助成は年 1 回の募集となりますので、募集期間にご留意下さい。

### (6) 申請書類請求および問合せ先

当財団の所定様式（ホームページからダウンロードして下さい）に記入して、電子申請にて応募して下さい。

〒 600-8234 京都市下京区塩小路通堀川東入南不動堂町 801 番地  
公益財団法人 立石科学技術振興財団 事務局  
TEL：(075) 365-4771 FAX：(075) 365-3697  
E-mail：tateisi-f@omron.com

募集要項、申請書類に関しては当財団ホームページをご覧ください。  
URL：http://www.tateisi-f.org/

# 公益財団法人 立石科学技術振興財団

## 平成 26 年度 国際会議開催助成候補 募集案内

公益財団法人立石科学技術振興財団においては、下記の通り平成 26 年度国際会議開催助成の候補募集を行なうことをお知らせいたします。(詳細については募集要項をご覧ください)

～ 記 ～

### (1) 助成対象

エレクトロニクス及び情報工学の分野で、人間と機械の調和を促進するための国際会議の開催を対象として助成します。「人間と機械の調和を促進する」とは、人間重視の視点に立った科学技術の健全な発展に寄与したいという当財団の願いからきています。エレクトロニクス及び情報工学の分野で、開催されるシンポジウム、ワークショップ、フォーラム等の国際的な研究集会を歓迎します。

(注1) 従来国際交流助成で実施していた外国人研究者の特別招聘と一般招聘についても、本助成にご申請ください。

(注2) 海外で開催される国際会議での論文発表への助成は、国際交流助成でご申請ください。

### (2) 金額および件数

1 件 50 万円以下で 10 件程度を標準として助成金を交付します。

### (3) 応募条件

① 当該会議の開催場所は日本国内とし、応募資格者(申請者)は日本人研究者とし、次の要件を満たすこととします。

応募資格者(申請者)の要件は、当該会議において、組織委員長もしくはプログラム委員長ならびにこれに準じた責任ある役割を担っていること、あるいは国際会議からセッション・オーガナイザー等の役割を依頼されていること、とします。

小規模の国際会議(100 名未満)で若手の方のご応募を歓迎します。

② 当該会議に対する他の財団等からの助成(予定を含む)、または共催または後援等の有無は問いませんが、申請前に先方での問題の有無をご確認願います。

### (4) 募集期間と助成対象期間および助成金交付時期

募 集 期 間：平成 26 年 4 月 1 日～平成 26 年 6 月 30 日(郵便局消印有効)

助成対象期間：平成 26 年 10 月 1 日～平成 27 年 9 月 30 日

助成金交付時期：平成 26 年 10 月の予定

### (5) その他

当該会議の開催期間が助成対象期間をまたがる場合や募集期間内に開催日程が確定しないなどの場合には事務局にご相談ください。(但し、助成交付までに開催日程が確定しない場合は、助成対象外となりますのでご留意願います。)

### (6) 申請書類請求および問合せ先

当財団の所定様式(ホームページからダウンロードして下さい)に記入して、電子申請にて応募して下さい。

〒600-8234 京都市下京区塩小路通堀川東入南不動堂町 801 番地

公益財団法人 立石科学技術振興財団 事務局

TEL：(075) 365-4771 FAX：(075) 365-3697

E-mail：tateisi-f@omron.com

募集要項、申請書類に関しては当財団ホームページをご覧ください。

URL <http://www.tateisi-f.org/>

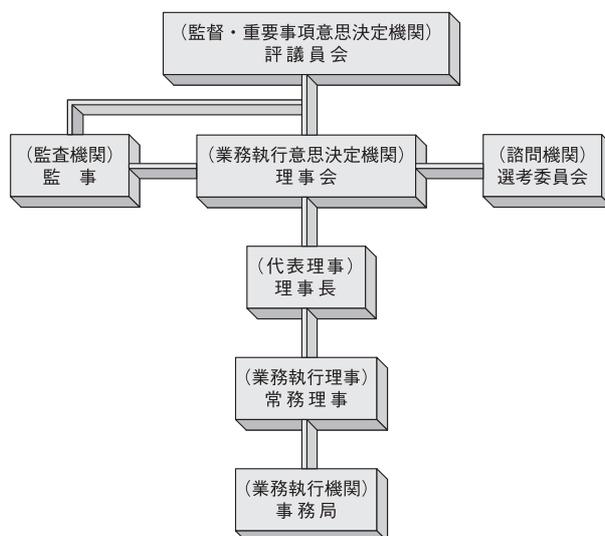
---

■ 財団の概要

■ 評議員・役員

## 財 団 の 概 要

- 名 称 公益財団法人 立石科学技術振興財団  
(英文名 Tateisi Science and Technology Foundation)
- 所 在 地 〒 600-8234 京都市下京区塩小路通堀川東入南不動堂町 801 番地  
TEL. (075) 361-4771 FAX. (075) 365-3697  
<http://www.tateisi-f.org/>
- 理 事 長 立石 義雄
- 設立年月日 1990年3月6日
- 目 的 エレクトロニクス及び情報工学の分野で、人間と機械の調和を促進する研究に関する活動を支援し、もって技術革新と人間重視の両面から真に最適な社会環境の実現に寄与することを目的とする。
- 事業内容 エレクトロニクス及び情報工学の分野で、人間と機械の調和を促進するための研究に関する活動を支援する事業内容
  1. 研究への助成
    - 研究助成(A) 250万円以下/件, 20件程度/年
    - 研究助成(B) 500万円以下/件, 2件程度/年
  2. 国際交流への助成
    - 国際会議発表 40万円以下/件
    - 短期在外研究 60万円以下/件 } 合わせて10件程度/年
    - 国際会議開催 50万円以下/件, 10件程度/年
  3. 研究成果に対する顕彰
    - 立石賞 功績賞 副賞 500万円/件, 2件程度/隔年
    - 立石賞 特別賞 副賞 500万円/件, 2件程度/隔年
  4. 研究成果の普及
    - 成果集の発行 1回/年
  5. その他、本財団の目的を達成するために必要な事業
- 基本財産 オムロン株式会社株券 2,625,000株
- 特定資産 現金 11億円
- 財団の組織





## 編 集 後 記

本助成研究成果集は、当財団の助成研究成果普及事業の一環として毎年秋に継続発行して、助成金受領者の皆様はじめ、国立国会図書館、全国主要大学・研究機関ならびに同図書館等の約 1000ヶ所に拝送させていただいておりますが、今号で第 22 号を数えるに至りました。これもひとえに皆様のご支援の賜と感謝いたしております。

本助成研究成果集では、第 23 回（平成 24 年度）研究助成課題を中心にこの 1 年間に研究計画の終了した研究成果報告を収録しています。また、国際交流助成につきましては平成 24 年度後期から平成 25 年度前期に助成いたしました成果報告の抄録を収録し、国際会議等開催助成は平成 24 年度の成果報告抄録を収録しております。

ご寄稿いただきました葉原評議員、投稿文をお寄せいただきました神戸大学大学院システム情報学研究科 教授 的場 修様、名古屋工業大学大学院 工学研究科 准教授 加藤昇平様、事務局取材に快く応じていただきました熊本大学大学院 自然科学研究科 教授 松永信智様をはじめ、編集にご協力いただきました研究者の皆様や関係各位に紙面をお借りして厚く御礼申し上げます。

本号がお手元に届くころ、平成 26 年度助成候補の募集期間になっていますので、当財団ホームページをご覧くださいと思います。また、国際交流助成については前期と後期の 2 回に分けて募集しておりますので合わせてご覧くださいと思います。

当財団の活動ならびに本誌に関する皆様のご意見などお待ちしております。

公益財団法人 立石科学技術振興財団 事 務 局

公益財団法人 立石科学技術振興財団  
Tateisi Science and Technology Foundation  
助成研究成果集 第22号  
平成25年9月(2013)

発行 公益財団法人 立石科学技術振興財団  
〒600-8234 京都市下京区塩小路通掘川東入南不動堂801番地  
TEL (075) 365-4771 FAX (075) 365-3697  
E-mail: tateisi-f@omron.com  
URL: <http://www.tateisi-f.org/>

印刷 明文舎印刷株式会社  
〒601-8316 京都市南区吉祥院池ノ内町10  
TEL (075) 681-2741

(本紙の一部又は全文の掲載を希望される時は、財団と研究代表者の許可を得てください。)