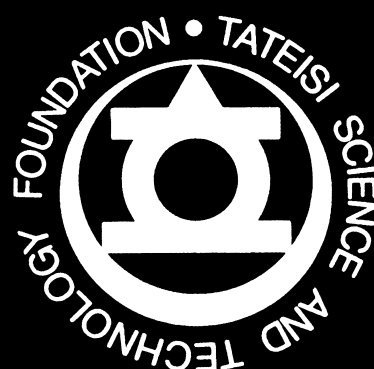


立石科学技術振興財団

助成研究成果集

【第23号】

2014年(平成26年)



人間と機械の調和を促進する助成研究成果集

第 23 号

2014 年 9 月 (平成 26 年)

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。

1990 年 3 月

助 成 研 究 成 果 集

目 次

1. 理事長挨拶	2
2. 財団関係者寄稿	
京都大学 名誉教授 松江工業高等専門学校 名誉教授 荒木光彦（評議員）	3
3. 立石賞の受賞記念講演概要	4
立石賞 功績賞 東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 教授 江刺正喜 マイクロシステム融合研究開発センター長	4
立石賞 特別賞 東北福祉大学 感性福祉研究所 特任教授 小川誠二	8
4. 研究助成成果の抄録一覧	14
5. 国際交流報告の抄録一覧	115
6. 2013 年度活動報告（業務日程・会計）	131
7. 2014 年度助成報告	132
8. 第 3 回立石賞表彰式及び 2014 年度助成金贈呈式	133
9. 受領者投稿	134
福岡大学工学部 教授 野田 賢（受領時：奈良先端科学技術大学院大学）	134
同志社大学 スポーツ健康科学部 准教授 上林清孝（受領時：筑波大学）	135
10. 研究室訪問	136
東京都立産業技術高等専門学校 教授 福田恵子	136
慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科 准教授 桂誠一郎	139
11. 2014 年度助成課題一覧	143
12. 2014 年度研究助成課題の紹介	147
13. 2015 年度助成候補募集案内	152
14. 財団の概要	159
15. 評議員・役員・選考委員	160
16. 編集後記	162

ごあいさつ

助成研究成果集第23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25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、立石賞も
含めて累積でそれぞれ857件、約14億3千万円と
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。

また本年は、隔年で実施している立石賞の第3回目の表彰を行いました。受賞
者のお二人とも、当財団の趣意である「人間と機械の調和」を促進する研究に真
正面から取り組まれて、世界の第一線でご活躍されている研究者で、その真摯な
研究姿勢は受賞記念講演を通してひしひしと伝わってきました。助成を受けられ
た皆様には、近い将来の立石賞を目指して、引き続き研究に邁進されることを期
待します。

ところで今日日本は、経済不況からの回復途上にあり、大変に重要な岐路に
立っております。そしていつ襲ってくるかわからない大災害の脅威にさらされて
います。さらに、少子高齢化も確実に進んでいます。これらを克服し、日本が活
力を再び取り戻し、国際社会に貢献するためには、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、それに対して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な
いと思います。

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

寄 稿

適正な選考とは？

私は1989年から21年間、本財団の選考委員を勤めさせていただいた。就任当時の私（46歳）にとって、助成申請を評価するという仕事は「大変なこと」であった。

勿論、それまでにReviewerやAssociate Editorとして専門誌の編集にかかわっていたから、研究の評価という事には一応慣れていたはずである。しかし、論文が「やってしまった研究」の報告であるのに対し、助成申請は「これからやる研究」の計画である。



その分不確定要素が大幅に増え、選考委員には色々な面での推定・予測能力が要求される。しかも、本財団では「人間と機械の調和」という大きな目標が掲げられている。この大目標と研究計画についての標準的評価項目との折り合いがまた難題であった。試行錯誤の結果、“新規性・独創性、学術的・社会的意義、計画の具体性・実現可能性などの標準的評価項目を一定レベルでクリアしているものについて、「人間と機械の調和」の視点から順位を付ける”という自分なりの方針を決めて選考にあたることにした。

さて、実際選考会議に出席してみると、葉原委員長が見事にご指導くださり、他の選考委員の方々との議論の中で結論に辿りつけば良いことがわかり、大変さも薄れていった。しかし、ある年、自分が委員長になってしまい、「大変なこと」が一気に蘇ってきた。選考委員を離れたいまも、“どうすれば適正な選考が出来るか”という問題には結論を出せないままである。

現在は評議員を務めさせていただいている。その役目は“財団が道を外すことがないように監視する”ことと理解している。これは、生起確率実質0の事象を監視することであるから、かなり気楽に会議に出席させて貰っている。

京都大学 名誉教授・
松江工業高等専門学校 名誉教授 荒 木 光 彦（評議員）

立石賞功績賞の受賞記念講演概要

豊かで安全な社会を支える MEMS の研究と実用化

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 教授 江 刺 正 喜
マイクロシステム融合研究開発センター長

立石科学技術振興財団より 1992 年度に「集積化加速度センサの開発」(図 1) で助成を頂きました。それ以来、安全な社会に役立つ技術の研究を行って参りましたが、多くの方に支えられ、今回第 3 回立石賞の功績賞を頂くことになりました。立石財団他関係者の皆様に厚くお礼を申し上げます。

はじめに

半導体微細加工技術を用い、集積回路だけでなくセンサや運動要素などをつくることもできます。この技術はマイクロシステムや MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) と呼ばれ、いろいろなシステムの鍵を握る部品として使われています。私は学生時代から 45 年程この研究をしてまいりました。その中から企業と研究をしてきた安全のための研究をいくつか紹介します。

加速度センサ・ジャイロ

加速度センサは 1990 年頃から自動車のエアバッグシステムの衝突検出に使われています。またジャイロ (角速度センサとも呼ばれる) は 2000 年頃から自動車の安全システムに使われると同時に、デジタルカメラの手振れ防止などにも使われてきました。最近はスマートホンで、楽しく便利なユーザインターフェースを提供しています。

加速度による錘の動きを静電容量の変化として検出する静電容量型を開発しました (図 1) [1]。

内部に静電容量検出用の回路を集積化しています。またシリコンウェハにガラスを接合し、チップに分割すると封止した状態にできる

「ウェハレベルパッケージング」[2] を用いています。

自動車のスピンや横滑りを検出して防止する安全装備用のセンサがトヨタ自動車で開発され、100 万台以上の

車に使われています (図 2) [3]。このセンサは

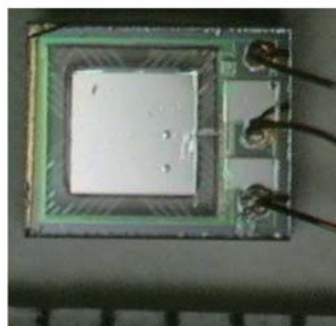
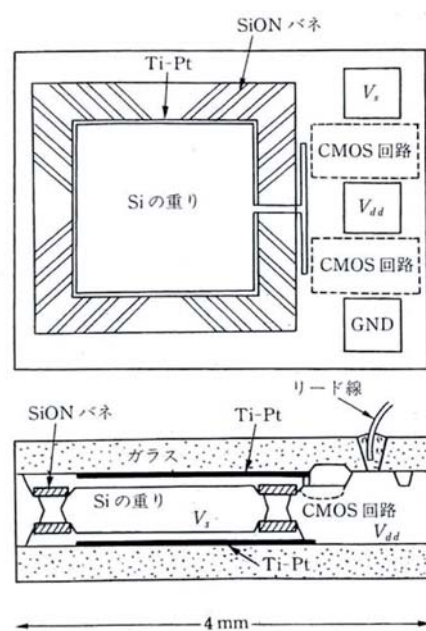


図 1 集積化容量型加速度センサ

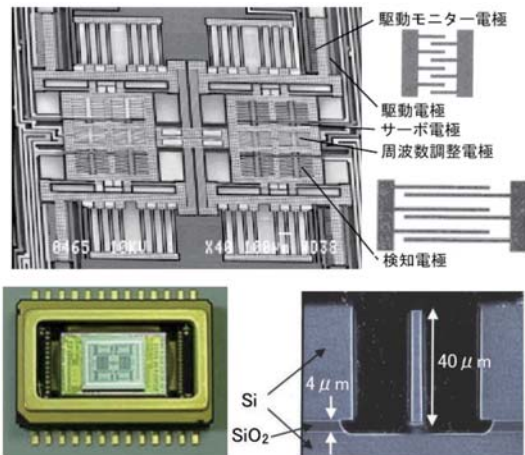


図2 ヨーレート・加速度センサ (トヨタ自動車㈱)

シリコン基板を垂直に加工した構造を静電引力で音叉振動させ、車の回転によるコリオリ力で生じる振動を静電容量変化で検出しています。

高精度な回転ジャイロが東京計器で開発されました (図3) [4]。直径 1.5 mm のシリコンリングを浮上させ、毎分 7 万 4 千回転させています。これによって 2 軸周りの回転を検出できるだけでなく、3 軸の加速度も同時に検出することができます。これは錘の位置を静電容量で検出し、電圧を印加して静電引力で浮上させることを、高速デジタル制御により全方向で行っているためです。このセンサはモーションロガーとして東京の地下鉄に使われています。

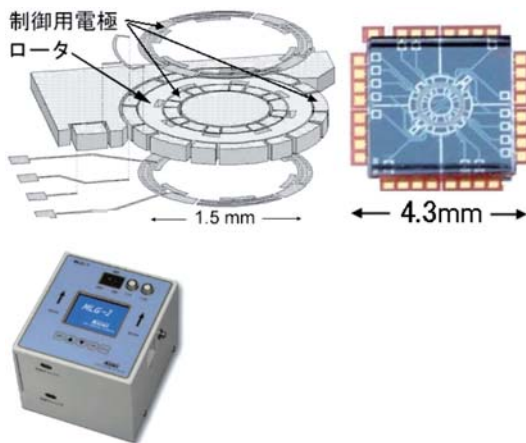


図3 静電浮上回転ジャイロ (上) とモーションロガー (左) (東京計器㈱)

光スキャナ

電磁力で鏡を動かす 2 軸光スキャナが開発されました [5]。光が対象物にあたって戻ってくるまでの時間を測ることによって距離を知る方法を、この光スキャナと組み合わせると、図 4 のような距離画像センサをつくることができます [6]。これは東京の JR 山手線のプラットフォームドアなどに使われて、安全に役立っています。

触覚センサネットワーク

介護ロボットの実用化を考えた時に、ぶつかったときの安全性が懸念されます。そこでトヨタ自動車や豊田中央研究所と一緒に、ロボットの体表面に多数の触覚センサを分布させて、人間と同じように接触を即時に検知する研究を行っています。図 5 のように柔らかいケーブルに通信機能を持つセンサを多数取り付け、接触を感じるとセンサが、信号をコンピュータに送るイベントドリブンというものです [7]。人間のように多数のセンサから、それぞれの神経が脳へつながっているわけではありませんが、インターネットと同様に共通の通信線で高速に信

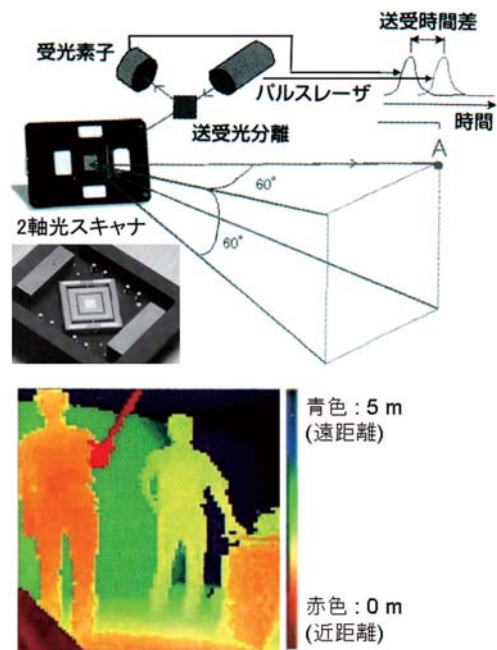


図4 2軸光スキャナによる距離画像センサ (日本信号㈱)

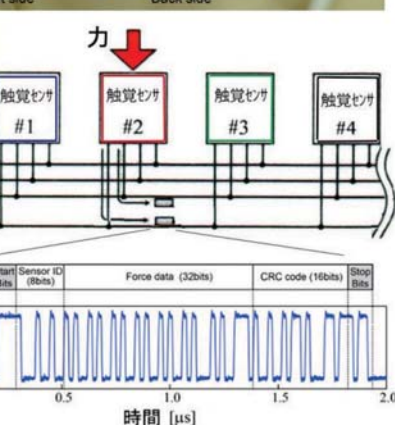
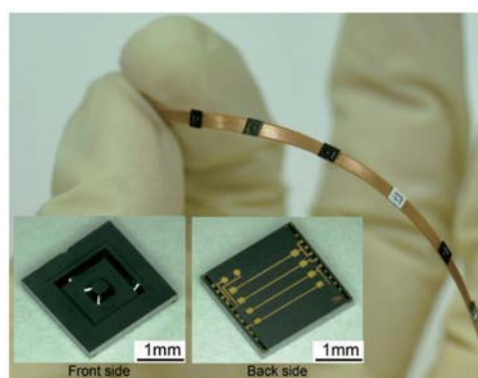


図5 触覚センサネットワーク

号を送ります。半導体技術は高度な機能を持つ多数のセンサを安価に作れるため、このようなシステムを可能にします。

災害などでも途切れないワイヤレス通信

私達が暮らしている仙台は、東日本大震災で津波の被害を受けました。このような災害時にも、ワイヤレス通信が途切れないようにすることが求められています。またネット配信などでワイヤレスの通信量は毎年2倍以上の割合で増大しており、周波数資源が枯渇しないようにするためにも、電波帯を有効利用する通信モジュールの開発を、情報通信機構（NICT）や村田製作所、千葉大学と協力して行ってきました。

デジタルテレビには470 MHz から770 MHz が使われていますが、実際に使われている周波数は地域によって異なるため、その地域で使われていない周波数帯域を通信に使うコグニティブ無線が研究されています。集積回路を

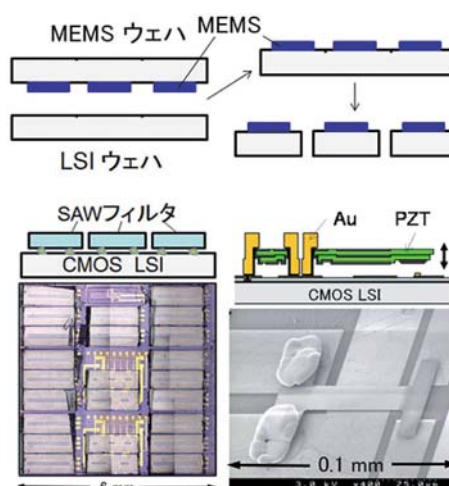


図6 LSI 上へのウェハレベル転写（上）によって作られたマルチ、SAW フィルタ（左）と圧電スイッチ（右）

壊さないでその上に形成するため、MEMSなどをウェハレベルで転写します[8]。図6のように、多チャンネルの弾性表面波（SAW）フィルタや、圧電スイッチ[9]などを集積回路上に形成しました。

おわりに

MEMS 技術による安全のためのシステムを紹介してきました。この技術には大掛かりな一連の設備を必要としますが、製品ごとに異なりしかも多様な技術を用いるため、大量に使われない限りはコストに見合わず、開発や設備の投資を回収できないことが多いのが現状です。このため東北大学にある4/6 インチウェハ用の遊休施設を有効活用し、会社が人を派遣して利用する「試作コインランドリ」を運営しています。[<http://130.34.94.150/coin/index.html>]これは以前トランジスタ工場として使われていた施設で、さらに企業から多くの設備が寄付されています。企業からの利用は毎月400件以上で、全国から150社以上の企業が利用に来ています。設備を借りて参入障壁を下げ、技術や人を育てながら製品化する、組織間の垣根を越えたこのような方法は、産業競争力向上や雇用創出に役に立つ一つの方法だと思っています。

文 献

- 1) Y. Matsumoto and M. Esashi : Integrated silicon capacitive accelerometer with PLL servo technique, *Sensors and Actuators A*, 39 (1993) 209-217.
- 2) M. Esashi : Wafer level packaging of MEMS, *J. of Micromechanics and Micro-engineering*, 18 (2008) 073001 (13pp).
- 3) M. Nagao, H. Watanabe, E. Nakatani, K. Shirai, K. Aoyama and M. Hashimoto : A silicon micro-machined gyroscope and accelerometer for vehicle stability control system, 2004 SAE World Congress, 2004-01-1113 (2004).
- 4) T. Murakoshi, Y. Endo, K. Sigeru, S. Nakamura and M. Esashi : Electro-statically levitated ring-shaped rotational-gyro/accelerometer, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 42, Part1 (2003) 2468-2472.
- 5) N. Asada, H. Matsuki, K. Minami and M. Esashi : Silicon micromachined two-dimensional galvano optical scanner, *IEEE Trans. on Magnetics*, 30 (1994) 4647-4649.
- 6) 齊藤徹夫, 松原達也, 池本善行, 笹川健一 : MEMS 光スキャナ「ECO SCAN」を用いた測距センサ 3次元距離画像センサの鉄道事業への応用, *日本信号技法*, 34, 2 (2010) 33-36.
- 7) M. Makihata, M. Muroyama, Y. Nakano, S. Tanaka, T. Nakayama, U. Yamaguchi, H. Yamada, Y. Nonomura, H. Funabashi, Y. Hata and M. Esashi : A 1.7 mm³ MEMS-on-CMOS tactile sensor using human-inspired autonomous common bus communication, *Transducers2013 & EurosensorsXXVII*, Balcerona, Spain (2013, June 16-20) 2729-2732.
- 8) M. Esashi and S. Tanaka : Heterogeneous integration by adhesive bonding, *Micro and Nano Systems Letters*, 1, 3 (2013).
- 9) K. Matsuo, M. Moriyama, M. Esashi and S. Tanaka : Low-voltage PZT-actuated MEMS switch monolithically integrated with CMOS circuit, *Technical Digest IEEE MEMS 2012*, Paris, France (2012, Jan. 29 - Feb. 2) 1153-1156.

立石賞特別賞の受賞記念講演概要

マクロなレベルでの脳機能活動を非侵襲的に可視化：

脳の働きの理解を一步・二歩進めうる。

東北福祉大学 感性福祉研究所 特任教授 小川 誠 二

序 言

この頃では、news media や TV の game show で脳の機能マップ(図 1c)がよくでてくる。これらは MRI(図 1a)を使って、脳の機能活動が起きている場所を示しているものとされる。Magnetic Resonance Imaging(MRI, 磁気共鳴画像法)は頭の外から内にある脳の構造(例えば図 1b)が測れる方法で、病院で脳に構造的な異常が生じたかどうかを検査するのに普通に使われている。この構造(かなり詳細な空間情報)を非侵襲的に測れるという特長が MRI の最もすぐれた点であり、さらに脳が働く時に、対応する機能活動が何時・何処で、どの様に起きているかが測れれば、神秘的に考えられがちな脳の働きの自然科学的理解が大いに進められると期待される。MRI を用いたこの種の研究は、脳科学の広い分野にわたって、世界中の大勢の人達によってなされてきている。

MRI による脳の「構造と機能」の測定、fMRI の誕生

磁気共鳴現象は、強い磁場内に置かれた磁気スピン(電子やいくつかの原子核が持つ磁性のもと)がそれに特有な周波数の電磁波を選択的に吸収する共鳴現象で、核磁気共鳴吸が一般である。各種原子核のうちで吸収感度のもっとも高い水素核を持ち、且つ、生体内で最も存在量の多い“水”(H₂O)がイメージングの対象になる。MRI は、厚い金属の壁がなければ、磁気共鳴現象を外部からの操作で生体内におこせうる、即ち非侵襲的測定法である。また、共鳴磁場が体内の空間位置でわずかつ異なるよう

にする(磁場勾配を印加する)操作でその共鳴現象に空間的な区別をつけ、分解度の高いイメージングが可能になる。この空間的区別の分解能は、使う電磁波の波長と関係なく、磁場勾配などの操作で、測定感度の許す限り高くできる。といっても、ヒトの脳の MRI では、分子・細胞のようなミクロなレベルのものではなく、せいぜいサブミリメートルの空間分解度でマクロな現象(多くの神経細胞の集団的活動)をイメージ上にみることになる。

MRI の画像には構造を示すコントラスト(図 1-b)がある。これは水の濃度分布や MR 現象の信号特性が、水がおかれた環境によって変わることによっている。脳の表面に沿った黒っぽくみえる層の灰白質・その内側の白質の区別が MRI 画像にはっきりと表れる。灰白質

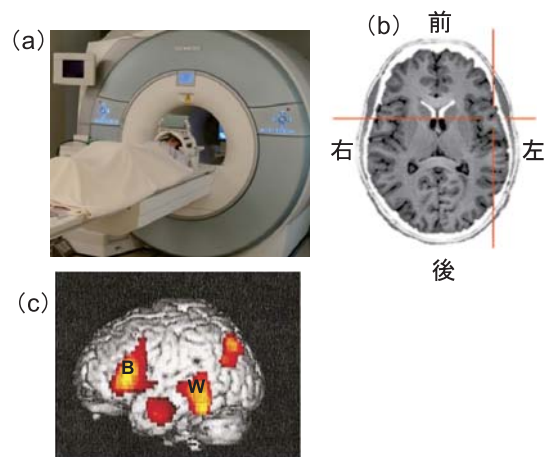


図1 MRI 装置 (a) と脳の画像 (b)・機能マップ (c)

はニューロンが集り機能活動をする部分であり、白質は情報伝達を行うケーブル (axon) の束で、灰白質部位間を繋げている。この繋がり (connectivity) を画像化 (拡散測定による fiber-trajectory の MRI 画像) するのが現今のおおきなトピックスになっている (1)。

このように、MRI は soft-tissue の構造をみる、特に脳の構造を調べる、のに最も優れた非侵襲測定法とされており、最近では局所的な脳構造の異常さを観察し得そうな詳細な構造画像も示されてきている。このような脳の構造画像ではあるが、それをみても、脳皮質 (灰白質) は皆同じ様で、何処で、どんな機能活動がなされるのか、をしめすものは画像コントラストに現れていない。すなわち、構造のなかに機能はみえてこない。MRI の構造画像とともに、機能活動を示す事ができたらとの夢はおおくの人 (MRI 関係の分野) が持ってきていたが、残念ながら、神経の電気活動を直接に MRI 信号の中にとらえる事は出来ないというのが常識であったし、現在でも可能になっていない。

1980 年代の後半に、脳画像の MRI 信号の中に、構造以外の特性を表示する様な成分を探索するという基礎的な研究をしているうちに、脳のエネルギー代謝に関係するような現象をマウスの脳画像上にみた。非常に高い空間分解度で測定したとき、小さな静脈血管と考えられる黒い線が見られたが、血液の赤血球中のヘモグロビンの酸素結合度が 100% 近くになると消えて

しまう事が観測された。

この現象は、ヘモグロビンが酸素分子を結合していない時 (deoxyhemoglobin) には常磁性を持ち、磁場内で静脈側の血管とその周りの組織との間に磁化度の相異が生じ、血管の内外にわずかな“磁場の歪” (図 2-a) を引き起こしそこでの磁場の均一性を損なわせる。その為、MRI 信号の減衰時間 (緩和時間、みかけの T2) が短くなり、測定される信号が小さくなってコントラストを生じると説明される (図 2-a)。このような Blood Oxygenation Dependent (BOLD) コントラストは血管の大きさの 2-3 倍ほど血管外の部分にひろがっており、血管の存在の効果を画像上に観測し易くしている (2)。

局所的な脳活動増加があると、その部分で血流が増加することは 100 年も前から知られている (3)。脳外科医によれば、そのような活性化を起こす部位は赤っぽくなるという。そこでの血流増加は酸素の消費増加以上に酸素の供給をもたらし、静脈血液の deoxyhemoglobin が減り (青い血色が赤っぽくなる)、BOLD コントラストの度合いを減らす事 (信号の増加) が期待される (図 2-b)。この現象が脳の機能活動を MRI 画像上に示し得る方法になると推論したのが 1990 年である (2)。1992 年 (4) に、ヒトの脳で外からの刺激に応答する局所的神経活動の存在をしめす信号増加を MRI で観測した (図 3)。この MRI の方法は全く自然な状態での測定で、頭がい骨を開いたり、外から造影剤

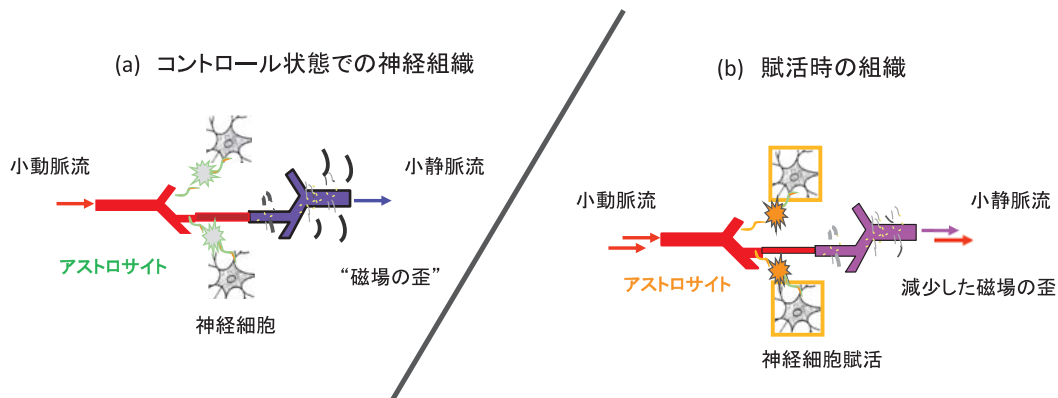


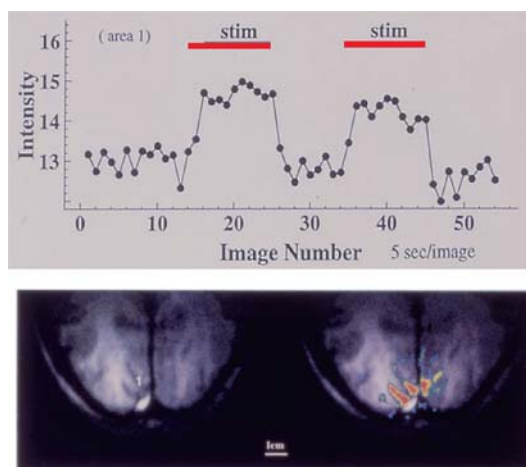
図2 BOLD 効果 (a) 神経組織普通の状態 (b) 神経活性化などによる血流増加

や、放射能担体を注入する必要の無い非侵襲的なものである。よって、健常者を対象にした実験が可能になり脳科学への応用につながる。Functional MRIはこの年に始まった。

fMRIの信号変化は脳機能活動に付随して起きる血管系の変化をベースにしているゆえ、fMRIが機能活性の存在を本当に代表しているものがどうかの議論は永く続いた。大事な事は、BOLDと神経反応との関係である。fMRI信号は神経系の末端(synapse)の活動に由来するものが主で、神経細胞のfiring活動をかならずしも示していないとされ、誘引されるlocalなfield potentialが対応する神経活動との対応が容易にしめされうる。(5, 6)。

もうひとつ重要な事は神経活動と血管系との連動メカニズム(coupling mechanism)である。神経細胞のそばにあって神経細胞の活動をささえているとされるグリア細胞(astrocyte)の関与があげられ(図3-b)、神経末端の活動に沿ってのastrocyte内 Ca^{++} イオンの変化が血管拡張剤の放出につながるとされてきた(7)。これに代りうるメカニズムもあげられており、このcouplingメカニズムの同定は完了したとは言えない。しかし、いずれにしても神経活動との連動性は非常に強い。

fMRIを使った脳活動の探索の妥当性は神経



視覚刺激による活性化はV1の灰白質のcorticalリボンにそっておきている。また、fMRIはこの様にrealtime測定である。ただ応答時間は遅く、秒オーダーである。

図3 視覚刺激によるヒトの視覚野の活性化

活動の一つの側面をみるものとして一般に受け入れられている。研究方法として、fMRIの示す信号変化はかなり小さく(大きくても1%ほど以下で、ノイズの大きさと同様かそれ以下)、数回あるいはそれ以上の平均をとる必要もあるが、脳の高次機能の活性化現象も観測にかかる事がしめされ、fMRIの利用分野がどんどん広がった。しかしながら、上記のBOLD fMRIにはreal-time測定という大きな長所がある(図3)とはいえ、ひとつの重要な弱点として、信号の応答が大変遅い秒単位である事があり、100分の1から10分の1秒の時間で進む神経活動のダイナミックスを追うのが困難である。

機能マップとマクロ network

脳の機能活動が局在的サイトで起きることは古くから知られている。Paul Brocaは発語障害のあるTanとよばれていた患者(タンタンとしか言えない人ながら、そのほかになにも精神障害が見当たらない)の死後解剖で前頭野に欠陥を見つけ、そこが局在した発語機能をつかさどるサイトであると1861年に発表している。図1-cの機能マップで“B”とマークした場所である。Wernickeは1874年にスピーチの把握機能障害のあった患者の死後解剖の結果を発表し、その機能サイトを側頭野上部の後方側に見つけていた(図1-cで“W”マーク)。いろいろな機能活動に関連し局在して現れるいろいろなサイトについて、その機能的役割の同定は神経学者による長年にわたるlesion研究(脳欠陥の箇所を死後解剖で同定し、その箇所と欠如していた機能を対応させる)でなされてきた。脳に課題を与えたときにどの部分が活動するかを調べるfMRIでも、脳全体が空間的に区別なく活動するのではなく、このような局所的賦活が諸所に見られ、その課題に対応する脳の機能マップが作れる。さきのlesion研究では、特別の機能のみに障害を及ぼす一つのサイトが見つけられるケースは少なく、また外から見受けられる神経障害を引き起こす脳内サイトがーか

所であるとの保障はない。健常者を対象にして課題をいろいろ変えて脳活動を調べられるfMRIではこの点で有利である。Brocaのサイトは現今では、主にsyntax（文脈・文法）をチェックするサイトとされている(8)が、semantics（語彙の理解）への関与も挙げられているし、発語の為の運動野につながる部位も隣あわせにある。

おおくの心理学者・認知学者がfMRIでいろいろ新たな知見を得てきている。例えば、ヒトの顔を認識・区別するのに重要なサイト(FFA, fusiform face area)はfMRIで見つけられた(9)。fMRIによるbi-lingualの人の言語野についての研究では、幼児からの人では2か国語が同じ部位で処理されるのに対し、成長後に第2外国語として習った人ではその部位が分かれた独立したものになっているとする報告に対して、2か国語に優れたヒトであれば、習得時期に差はないとの結果もでている。言語networkのどの部分をおもに対象とする課題を使うかによって異なる結論を引き出す事の例が示されたわけで、それだけ言語系の理解が進んだと言える(10)。最近のfMRI応用の興味ある例として、植物状態と考えられる人（運動応答やその他の行動サインが全然見られない）に意識があるのかどうかをfMRIでテストした報告がある(11)。話しかけて、テニスをしていることを想像するように、と指示したとき、この人のsupplemental motor野が賦活されるのが観測され、これは健常者での想像実験で見られるのと同様な部位であった。また、同じ人のテストで、自宅の家の中を歩いてまわる事を想像させると、健常者が想像で示す活性化パターン（空間情報に関与するサイト、景色・物体の識別に関わるサイト等）と非常によく似た賦活が観測された。この人は、はっきり意識があるのは明白で、聞いた指示を無視することも出来たし、全然異なる事を考えたかもしれない事を勘案すると、指示を理解して、適切な脳内行動をしているといわざるを得ない。植物人間的状態

といっても、その脳内活動の様子は多種あると考えられるが、外から見える行動からの判定とはかなり異なっている可能性がある事を指摘している。

脳は大人になってもそう硬く固定してしまっているものでなく、訓練などで関連する部位の活性化に変化が出る脳の柔軟性(plasticity)がfMRIに顕現する事もしられている(10)。この事は継時的に進む“教育”の効果を追跡できることをも示唆している。

ヒトが経済的(12)或いは道徳的(13)判断をするとき、哲学的問題を考えるとき、感情的（悲しさ、幸福感、恐怖感）になる心の問題(14)、など、多くの分野に興味ひろがっている。薬学の面でも、薬効のもたらす脳内生理現象を時間的に追いかける事も意味がある。

一般にfMRIで留意しておかねばならぬ事として、その信号が神経末端の活動に付随してたものである故、そこから神経活動の情報内容(コンテンツ)を知ることができない。脳のどの部分が活性化したかを知るだけである。尤も、この活性部位がどのような機能を担う处かについては、与える課題などから推定されてきている。この脳内の部位の機能特性の知識からでも、いかなるタイプの脳活動が起きているかについてかなりの判断がなされうる。空間分解度の低い測定では、いくつかの機能部位が重畳している場合、或いは脳機能部位内のサブモジュールを区別する必要がある場合などで困難が生ずる。サイトの持つ機能処理のspecificityを細かく知る事はfMRIの結果を解釈するのに重要であり空間分解度の高い測定が望まれる。これまで、7TのMRI測定でヒトの視覚1次野のorientation-column（見る物体の線の方角を区別する機能要素でサブミリメートルの大きさ）をマップした結果が報告され(15)、高分解度fMRIの将来像がはっきりしてきた。

前述のように、脳では局所的機能活動が起ることから、脳の機能を局在化したものとして

理解する観点が古くからとられてきた (localizationist view)。fMRI の結果も機能的に特化した局在的賦活を示す。しかし、脳は課題をあたえられると、課題に関連したいろいろの機能部位を動員して活動する。fMRI でも、脳全体を通して散在したサイトの賦活が観測される。これらのサイトは脳への最初の入力点から情報伝達の経路を前向きに進む (bottom up) だけではなく、サイト間では相互の情報交換・プロセス制御などがおきているはずである。高次機能サイトからの Top down のようなコントロールも働く。このような network 的活動により (分散型 network モデル)、課題への結果に到達すれば、答えに対応する output がどこかの機能サイトから出される。このようなマクロな現象で、脳が課題処理にあたってどのように働くか、を理解するためには、サイトの特化した機能を知る事と共に、関与するサイト間の繋がりが (axonal connection) を知る事、および、サイト間相互作用の時間的ダイナミックスの詳細を知る必要がある。脳の axon の束のイメージングからは、サイト間の繋がりが、connectivity のインフラ構造が判る(1)。機能的連結 (functional connectivity, 後述) はマップが示すサイト群にあるが、機能活動間の相互作用の様子を測る事はまだまだである。

Restless brain at resting state

これまで、覚醒状態で何もしていない状態 (resting state) をベースラインにして課題賦課による信号変化を測って fMRI (task, tfMRI) としてきた。このベースラインでの信号はノイズだけのように見えるが、数分から 10 分ほどの測定による時系列信号をフーリエ変換すると、心拍、呼吸による変動成分の他に 1/10 Hz より遅い頻度で揺らぐ信号成分があることが見られる。一方、tfMRI で活性化するようなサイトの休息時での時系列データを seed にして、MRI の多くのサイトの信号の時系列データとの相関をとると相関係数の割に高いサイトがいく

つか現れる。これら相関しているサイトはその tfMRI で見られるいくつかの賦活サイトとよく似た部位にある。すなわち、これらのサイトのグループは tfMRI での賦活サイトがつくる機能 network と同様な network を形成している (resting state, rsfMRI)。このサイト群内の相関に寄与しているのは前述の遅い頻度でおきる信号変化成分で、その信号変動の由来は神経系の振動現象 (主にガンマー波) がその遅い頻度で数秒ほど続く事による。この神経活動の変動をもとに BOLD 効果として MRI 信号の時系列上にでているわけである(16)。

全脳に亘る時系列データを統計処理法の一つである independent component analysis (ICA) によって、同じ時系列を持ついくつかのサイトのグループ (ICA 成分) にわけると、これらの ICA 成分のサイト群はそれぞれ tfMRI でみる機能 network のどれかと非常に近い。Resting 状態にあるはずの脳であるが、脳内ではこの様に神経系が restless に働いているわけである。尤も、これら機能 network が形成されている時に resting 状態の脳で、ものが見えたり (視覚系 network)、記憶を引き出したり (メモリー系) などの perception を感ずるわけではない。ただ、脳はこのようにいくつかの機能 network を黙っていても自発的に活動させているわけである。これが何の為か、まだ議論は尽きていない。しかしながら、脳がこのようなマクロな network を組んで機能処理を行うことを明白にしている。rs fMRI の network 内サイトの間では機能的にお互いに連結している筈であり、functional connectivity として、前述の seed を使って機能的に connect されているであろうサイトを探す事にも使われている。この機能的 connection は infra-structure としての axon による直接的な連結と異なることもある。

このような rs fMRI でみられる network はその構成要素、活動頻度、被験者間の個人差等によって、細かい変動がありうる。このことは、脳神経系に異常があるときによく現れるので、

この rs fMRI の臨床応用がおおきな話題になってきている (17)。異常認定には個人差によって異常性の現れ方に変動があるなど、現象の理解への努力が更に必要のようである。健常者を対象にして課題をいろいろ変えて脳活動を調べられる fMRI ではこの点で有利である。

ま と め

上記のように、BOLD 効果をベースにした fMRI は、ヒトの脳の機能活動を非侵襲的に測る事を可能にするとして、脳科学の広い分野の発展に係ってきている。すみやかに変動するダイナミックな神経現象を直接追跡出来ないとしても、健常者及び患者を測定対象に出来ること、1mm 程の高い空間分解度、手の届く感度、あたえる課題の選択の容易さ等の利点は他の非侵襲的脳機能研究の方法を遥かに抜き出ている。

BOLD 効果は、脳神経現象のうちの神経末端 (シナプス) 活動に付随して起きる血流変化と神経活動による酸素消費との兼ね合いでおきる MRI 信号の変化として現れ、機能活動と共に、その信号変化が脳内各所で局所的におこる。主に神経末端活動の存在を表示するこの信号賦活からは、神経細胞群が処理する情報のコンテンツを引き出すことは出来ないが、脳内全体を通して賦活活動が何処で起きたかが判る。その賦活サイトの機能特性を知っていれば、脳がどのような機能活動をしているかを知る事が出来るわけである。これらサイトは脳が携わる機能活動によって異なる network を形成し、そのなかで情報の伝達・交換が行われる。このような機能 network の存在に対して、同様なサイト構成をもつ network 群が、課題無しの状態 (resting state) での脳内で自発的のおきる神経活動においても形成されており、それら是对応する BOLD 信号の時系列相関をもつグループ群として観測される。このことも、脳の機能活動が network ベースで進む事を示している。

脳の機能活動に可塑性のあることが訓練など

の効果として観測され、教育のもたらす行動・知能活動の進展の測定への応用が期待されている。医療面では、脳外科手術の前後での脳機能能力の保全の測定のような応用はもとより、前述の resting state での network の構成変動・時系列特性の異常などが神経疾患の存在で顕現することがしめされ、新たな臨床診断の可能性がおおきの興味をひいている。MRI 信号で見たわずかな変化の測定で始まった fMRI は脳機能の理解に役立つ方法に発展し、教育・医療への応用にもつながるものとして、人間社会と多大な接点を創造している。

References

- (1) Van Essen DC et al, NeuroImage 80, 62-79 (2013)
- (2) Ogawa S et al, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 87, 9868-9872 (1990)
- (3) Roy CS & Sherrington CS, J. Physiol. 11, 85-; 108 (1890)
- (4) Ogawa S et al, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 89, 5951-5955, (1992)
- (5) Ogawa S et al, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 97; 11026-11031 (2000)
- (6) Logothetis NK et al, Nature 412, 150-157 (2001)
- (7) Koethler RC et al, Trends in Neuroscience 32, 161-169 (2009)
- (8) Fadiga L et al, Ann. N.Y. Acad. Sci. 1169, 448-458 (2009).
- (9) Kanwisher N, et al, J Neurosci 17, 4302-4311 (1997)
- (10) Démonet J-F et al, Physiol Rev 85, 49-95, 2005
- (11) Monti MM et al, Ann. N.Y. Acad. Sci. 1157, 81-89 (2009).
- (12) Tobler PN et al, J Neurophysiol 97, 1621-1632 (2007)
- (13) Greene J and Haidt J, Trends in Cognitive Sciences 6, 517-523 (2002)
- (14) Kringelbach ML and Berridge KC, Trends in Cognitive Science 11, 479-87 (2009)
- (15) Yacoub et al, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 105, 10607-10612 (2008)
- (16) Smith SM et al, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 106, 13040-45 (2009)
- (17) Fox MD and Greicius M, Frontiers in Systems Neuroscience 4, 1-13 (2010)

研究助成成果の抄録一覧

(年度順五十音順)

- ◆ 片麻痺患者のための健側歩容を活用した装着型歩行支援システム (2011901) 17
 Walking support for hemiplegic patients wearing Robot Suit HAL
 using unaffected side's motion data
 河 本 浩 明 筑波大学 サイバニクス研究センター 助教

- ◆ 傍半規管膨大部刺激型の人工前庭器開発に関する基礎的研究 (2021004) 22
 Basic Research for developing a vestibular implant stimulating
 the ampulla of the semicircular canals
 牛 尾 宗 貴 東京山手メディカルセンター 耳鼻咽喉科 部長
 東京大学医学部耳鼻咽喉科学教室 非常勤講師

- ◆ 振る舞いの多様性に基づいた適応的運動機能を発現するロボットの開発 (2021005) 26
 Development of life-like robots that generate supple, versatile, and adaptive behaviors
 梅 館 拓 也 広島大学大学院 理学研究科

- ◆ 人間支援ロボットののための座標変換を用いたタスクの抽象化技術の開発 (2021013) 30
 Abstraction of Tasks by Using Coordinate Transform for Human Supporting Robots
 境 野 翔 埼玉大学 助教

- ◆ 「硬くて柔らかい」人の運動特性を模したモーターサーボ制御 (2021015) 35
 'Rigid, but flexible' motor servo control mimicking human motion properties
 杉 原 知 道 大阪大学大学院 工学研究科 准教授

- ◆ 眼電位操作デバイスのための基礎技術 (2021021) 39
 A basic study of EOG control device
 南 哲 人 豊橋技術科学大学 エレクトロニクス先端融合研究所
 テニユアトラック准教授

- ◆ ロボットアバターを制御する脳波コミュニケーション技術の開発 (2021901) 44
 Development of an EEG-Based communication system to control a robot avatar
 長谷川 良 平 (独)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
 ニューロテクノロジー研究グループ 研究グループ長

- ◆ 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 (2031003) 48
 Heart beat extraction algorithm for wearable biosignal monitoring systems
 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

- ◆ 定在波レーダを利用した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 (2031004) 53
 Non-contact measurement of body pose and respiration for baby with radar sensor
 梅 田 智 広 奈良女子大学 特任准教授

◆ 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 (2031006)	57
Development of a mobile device producing the real touch sensation between remote people	
田 中 一 晶 大阪大学大学院工学研究科 特任助教	
◆ 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 (2031007)	61
Ankle rehabilitation device with the function of muscle relaxation and ROM exercise	
谷 口 浩 成 津山工業高等専門学校 電子制御工学科 准教授	
◆ MEMS 可変共振子アレイによるテラヘルツ光スキャナ (2031008)	65
A Terahertz Scanner based on MEMS Tunable Resonator Array	
年 吉 洋 東京大学 先端科学技術研究センター 教授	
◆ 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 (2031009)	69
A lung function test system based on acoustic measurement of respiratory sectional area	
中 妻 啓 熊本大学大学院自然科学研究科 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 (2031010)	73
Lightweight and flexible actuator to wear actively for appendicular skeleton of humans	
西 岡 靖 貴 滋賀県立大学 助教	
◆ 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 (2031011)	77
Development of auditory cortex microimplants to restore auditory neural information processing	
西 川 淳 北海道大学 大学院情報科学研究科 准教授	
◆ 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 (2031012)	81
Tool-Body Assimilation by Human Robot Imitation Based on Motionese	
西 出 俊 京都大学 特定助教	
◆ 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 (2031013)	85
Dexterous robot hand control using neural signal recorded from the visual cortex	
林 隆 介 産業技術総合研究所 主任研究員	
◆ 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 (2031014)	90
Sarcopenia diagnosed by bioelectrical impedance analysis and the association with metabolic syndrome	
飛 田 哲 朗 名古屋大学医学部附属病院 整形外科 医員	

◆ 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 (2031015)	94
Control System Design for Wearable Robot Suit Working in Phase with Human Motion Without Biological Signal Measurement	
藤 井 文 武 山口大学大学院理工学研究科 准教授	
◆ 血管内超音波神経観察のための二自由度アクチュエータの開発 (2031017)	99
Two Degrees of Freedom Actuator for Nerve Observation using Intravascular Ultrasounds	
真 下 智 昭 豊橋技術科学大学 エレクトロニクス先端融合研究所 テニユアトラック助教	
◆ 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 (2031018)	103
Personal health records including self-measured daily home blood pressure implement the alternative medical communication	
谷田部 淳 一 福島県立医科大学慢性腎臓病 (CKD) 病態治療学講座 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 (2031020)	107
Development of Active Plasmon and Wood's Anomaly Sensor	
山 口 堅 三 香川大学 助教	
◆ 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 (2031021)	111
High-speed hi-accuracy 4-dimensional acquisition for performance bodywear design	
山 崎 俊太郎 (独)産業技術総合研究所 主任研究員	

片麻痺患者のための健側歩容を活用した装着型歩行支援システム

Walking support for hemiplegic patients wearing Robot Suit HAL using unaffected side's motion data

2011901



研究代表者	筑波大学 サイバニクス研究センター	助 教	河 本 浩 明
共同研究者	筑波大学附属病院 リハビリテーション部	教 授	江 口 清

[研究の目的]

脳卒中や脳梗塞など脳血管障害によって片側に麻痺を有する患者の歩行は、顕著な非対称な歩容となる。これは、中枢神経障害により、一般に、筋力が低下すると共に、下肢では伸筋が優位となり、膝関節の屈曲、足関節の背屈が起こりにくくなることが原因である。

このため、歩行中患側の遊脚期では、下肢の屈曲が困難なことや、つま先が地面に当たらないようにするため、脚を外側に回しながら振り出だす（分回し歩行）現象、健側の脚を伸ばす現象（伸び上がり歩行）が起こる。一方、立脚期では、膝の力が突然抜ける現象（膝折れ）を防止するため、着床時に体幹を前屈させて、膝を過伸展させる歩行となる。

このような片麻痺患者の歩行補助として装具が一般に用いられている。装具の機能は、装具関節部の粘弾性や固定を利用することによって、遊脚期での足関節の底屈位の防止、立脚期の各関節の支持性確保である。このため、健常者の遊脚期における膝関節の屈曲-伸展といった動作に対する補助を行うことはできず、装具による歩容の対称性の改善は難しい。

一方、我々は、装着型ロボットによって装着者の運動機能を補助、強化するロボットスーツ HAL (Hybrid Assistive Limb) の研究開発を

行っている。下肢支援用 HAL は、外骨格構造をとり、股関節と膝関節はアクティブジョイントとなっている。HAL には様々なセンサが取り付けられており、装着者の身体情報を抽出することも可能である。現在まで、神経筋難病の方や重度対麻痺患者に対して疾患や症状に応じた下肢の動作支援方法が提案され、その有効性が検証されている。

片麻痺患者の場合、麻痺側の歩容が非麻痺側の歩容に近づくように、HAL が動作支援することが理想である。その実現方法として、HAL が非麻痺側の運動パターンを抽出し、麻痺側では抽出した運動パターンになるように HAL が制御する方法が考えられる。この方法では、HAL 装着者が非麻痺側で自発的に生成したパターンを基に麻痺側の歩容パターンをつくることで、対称な歩容が得られることが期待される。

本研究では、片麻痺疾患を有する方を対象として、非麻痺側の運動情報を用いた麻痺側の動作支援手法を提案する。また、片麻痺患者による実証試験において、歩容の対称性を検証し、本手法の有効性を示す。

[研究内容の成果]

1. ロボットスーツ HAL

本研究では、ロボットスーツ HAL 福祉用を

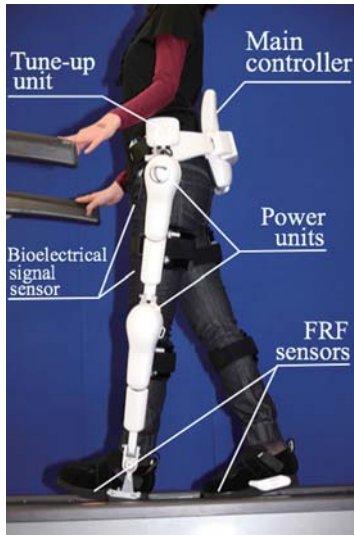


Fig. 1 Robot Suit HAL for Well-being

ベースにした両下肢支援用モデルを用いた。Fig. 1 に HAL の外観を示す。下肢の運動補助に関わる駆動関節として、膝関節と股関節に、パワーユニットが配置され、矢状面方向にアシストを行う。HAL の背面部には、パワーユニットを制御する小型コンピュータ、及びバッテリーが搭載されている。その他、HAL のセンシング機能として、角度センサ、姿勢センサ、及び床反力センサ等が装備されている。

2. 制御手法

これまでに我々が開発してきた Phase Sequence 手法を利用し、片麻痺患者の歩容を支援する制御手法を提案する。まず、人間の複雑な一連の運動は基本的な運動単位から構成されているものと捉え、運動情報や生理情報を用いた運動解析によって一連の運動を基本運動単位 (Phase) に分解する。それらを HAL に組み込み、再合成することによって、人間の動作特性を反映した運動を生成する。歩行動作の場合、Fig. 2 に示すように 4 つの Phase に分解する。本研究では、麻痺側を右側とし、Phase 1 の左脚 (非麻痺側) 遊脚で抽出した運動情報を基に、Phase 3 で右脚遊脚の運動支援を実施する。

Fig. 3 に当該手法の HAL の制御系を示す。Phase 1 になった際、装着者自ら行われた左脚

	phase 1	phase 2	phase 3	phase 4
Walking motion				
Left leg	swing	support	support	support
Right leg	support	support	swing	support

Fig. 2 Phase division in walking motion (The left leg is colored with gray)

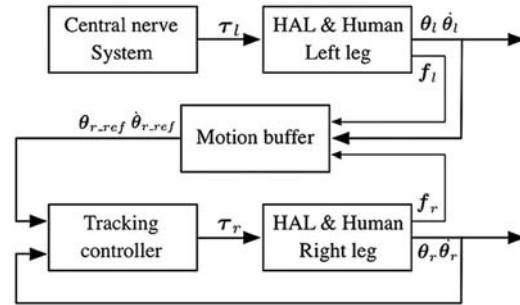


Fig. 3 Block diagram for HAL control system

遊脚に対して、左股関節、膝関節の角度 θ_l 、角速度 $\dot{\theta}_l$ を抽出し Motion buffer に蓄える。この運動パターンは、右股関節、膝関節の目標角度 $\theta_{r,ref}$ 、目標角速度 $\dot{\theta}_{r,ref}$ となる。Phase 3 に遷移した直後、目標角度、目標角速度、及び右股関節、膝関節 $\theta_r, \dot{\theta}_r$ を基に Tracking controller で PD 制御により右股関節、膝関節のアシストトルク τ_r を算出する。なお、各 Phase の遷移判定 (Motion buffer による左脚関節角度、角速度の抽出、及び目標角度、角速度の出力タイミング判定) は左右の床反力 f_l, f_r を基に行われる。

3. 臨床試験

3.1 性能評価試験

開発した本手法の基本性能を確認するために、健常者を装着者として基礎実験を行った。装着者は、左脚を非麻痺側と想定し、左脚の歩幅が 65 cm と 40 cm となるように左脚を装着者自身で動かし、右脚は麻痺側として、常に脱力した状態にし、10 m 間の歩行を行った。

Fig. 4 に歩幅が 65 cm と 40 cm の 1 サイクル

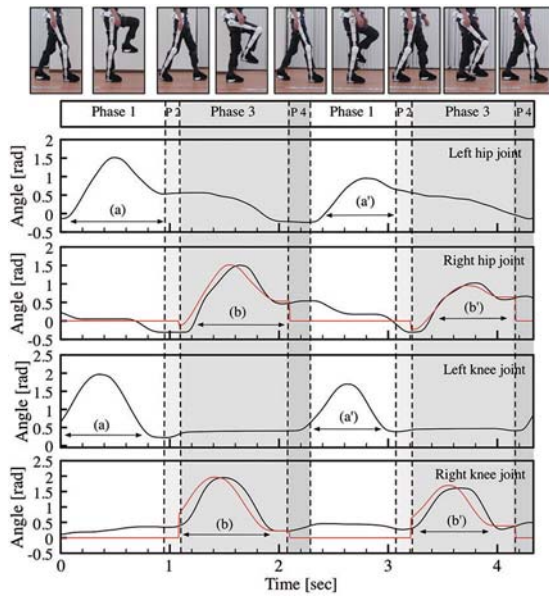


Fig. 4 Walking support of right side by HAL for able-body person

分の股関節、膝関節の角度を示す。Phase 1 の異なる歩幅に応じた股関節、及び膝関節の角度軌道 ((a), (a')) が、直後の Phase 3 で目標軌道として生成され、それに応じて右脚の関節軌道が出力されている ((b), (b')) ことが確認された。これにより、麻痺側に対して、非麻痺側の異なる歩行動作に応じた運動パターンを実現させることができた。

3.2 パイロット試験

当該試験では、複数人の被験者による本手法の有用性を評価する前に、試験プロトコルの妥当性、障害を有する方に対する本手法の実行可能性を確かめる予備試験として、右膝関節の屈曲動作が困難であり、分回し歩行を呈する慢性期脳卒中片麻痺患者 (64 歳男性) を対象に臨床試験を実施した。当該試験のプロトコルは筑波大学システム情報系倫理審査委員より承認を得て、また、当該試験は被験者に研究内容を十分説明し、承諾書を得てから行われた。

当該試験では、まず、HAL を装着していない状態で対象者の自然な早さによる歩行を行ってもらい、モーションキャプチャシステムを用いて、歩容の左右対称性を計測した。Fig. 5 に 2 サイクル分の左右股関節、膝関節の角度を示す。

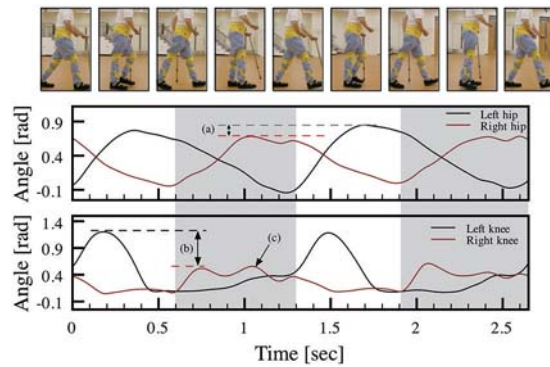


Fig. 5 Hip and knee joint angles of both legs for two gait cycles without HAL. The swing phase of right (affected) side is colored with gray.



Fig. 6 A hemiplegic patient walking with HAL during the experiment.

左右の遊脚期の歩容を比べると股関節、及び膝関節の最大屈曲角度に差が有り ((a) 及び (b)), また、Fig. 5(c) より膝関節の遊脚軌道はスムーズに生成されていないことが確認できる。このことから、被験者の通常歩容は、非対称な動作であることが分かる。

次いで、HAL による片麻痺動作支援として、週 1 回約 60 分を 4 週実施した。Fig. 6 に HAL による歩行支援の様子を示す。実証試験前半 2 週は主に HAL による歩行支援に適した各 Phase の切り替えタイミングやアシスト量に関するパラメータ調整を行いながら HAL の動作を体感してもらい、後半 2 週はパラメータを固定した支援動作で歩行を続け、HAL の動作と自身の動作が一体的に動く感覚を身に付けても

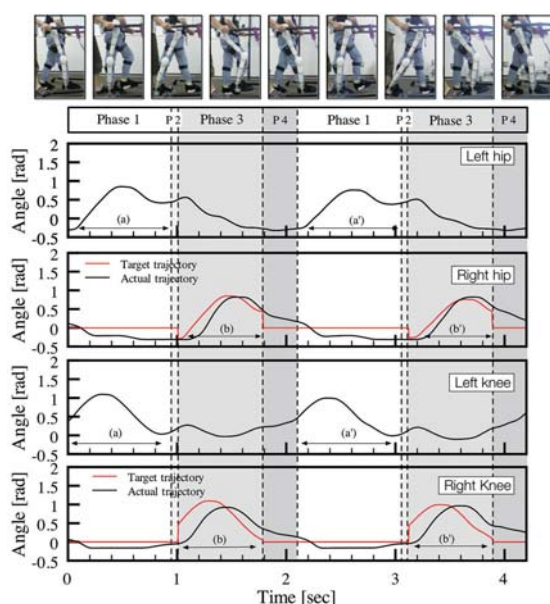


Fig. 7 Walking support of right side by HAL for a hemiplegic patient

らった。

Fig. 7 に HAL による動作支援中の歩行 2 サイクル分の左右の股関節、膝関節の角度を示す。Phase 1 の左側の股関節、及び膝関節の角度軌道 ((a), (a')) が、直後の Phase 3 で目標軌道として生成され、それに応じて右脚に左右対称な関節軌道 ((b), (b')) が生成されていることがわかる。これにより、片麻痺患者に対して、本手法、及び本試験プロトコルに対して、実行可能性を確かめることができた。

3.3 有用性評価試験

本手法の有用性を確認するため、4 人の片麻痺患者に本手法を適用し、歩容対称性の改善を調べた。Table 1 に当該試験に参加した被験者の基本情報を示す。被験者は脳卒中後 6 ヶ月以上経過した慢性期の右片麻痺患者であり、下肢

Table 1 Patient characteristics

Case	Sex	Age	Time since stroke months	Br. stage	Assistive device	Orthosis
1	M	64	223	III	T-cane	AFO
2	M	62	82	V	NA	NA
3	F	51	16	IV	T-cane	NA
4	F	68	115	V	T-cane	AFO

M male; F female; Br. Brunnstrom; AFO ankle foot orthosis; NA not applicable;

に中程度の麻痺 (Brunnstrom Stage III) を有する

被

験者は 1 名、軽度の麻痺 (Brunnstrom Stage IV, V) 被験者は 3 名であった。

当該試験では、歩容対称性の評価項目として、(A) 遊脚期における膝関節の可動域、(B) 支持脚期時間、(C) 遊脚期における地面から踵までの最大距離に着目した。各項目は、モーションキャプチャシステムを用いて算出され、対称性は、非麻痺側 (左側) の 10 歩分の平均値に対する麻痺側 (右側) 10 歩分の平均値を割合

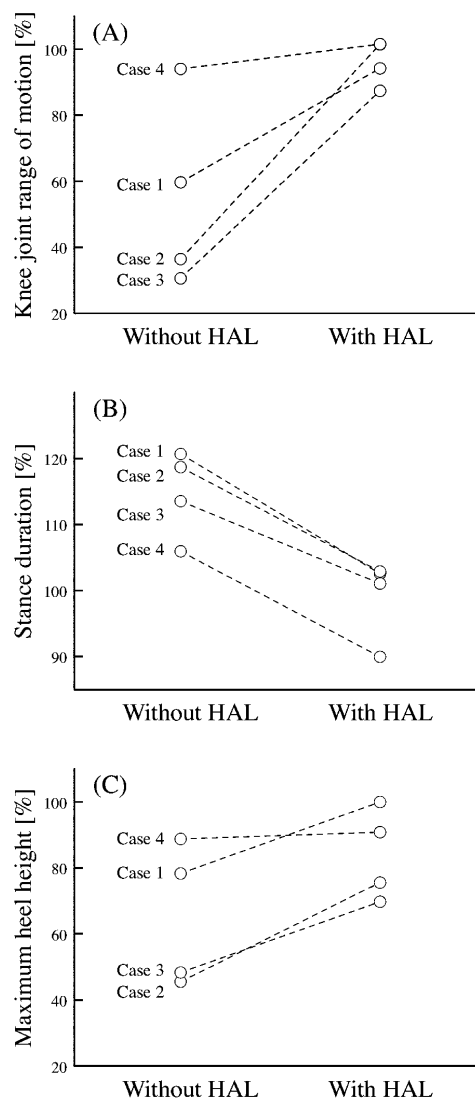


Fig. 8 Symmetrical ratio in the angle range for each knee joint in swing phase (a), support phase duration (b), maximum heel height in swing phase (c) with and without wearing HAL

(%) で評価している。左右完全な対称歩行であれば各項目は 100% の値を示す。Fig. 8 に HAL 未装着時と装着時の対称性の結果を示す。

遊脚期における膝関節の可動域 (A) は、全ての被験者において HAL の動作支援により対称性が改善していることがわかる。一方、支持脚期時間 (B) は、Case 1-3 の被験者は、対称性が改善し、HAL を装着していない時に比べ、左右均等な支持時間で歩行が行われている。逆に、Case 4 では、HAL 装着前は、麻痺側の支持時間が非麻痺側に比べ長かったのが、HAL による支援によって非麻痺側の支持時間が長くなっており、対称性が低下した歩行になっている。また、遊脚期における地面から踵までの最大距離 (C) は、Case 1-3 の被験者は対称性が改善している。Case 4 は HAL 装着前と HAL 装着中には、ほぼ変化がなく、比較的対称性を保っていることが分かる。以上の結果より、左右対称な歩容がより困難な被験者 (Case 1-3) に対しては、歩容対称性が大きく改善され、本手法の有用性が確認された。

[今後の研究の方向、課題]

本研究では、片麻痺患者の非麻痺側の歩容を活用して麻痺側の動作を生成する歩行支援方法を提案した。臨床実験では、実際の対象者となる慢性期片麻痺患者に適用し、当該提案手法の

動作性能を確認するとともに、HAL の動作支援によって対称な歩容が実現されることを確認した。

今後の技術的課題として、より適応的に非麻痺側の歩容を麻痺側で生成するため、軌道追従特性を自動で調整する手法を組み込むとともに、装着者の随意特性を反映させた制御系を開発していく。また、臨床研究課題として、発症時期や重症度の異なる患者に適用し、臨床試験の知見を蓄積するとともに、麻痺肢の機能回復を視野に入れた手法、運用方法を検討していく。

[成果の発表、論文等]

- [1] 河本浩明, 門根秀樹, 桜井 尊, 有安諒平, 上野有希子, 江口 清, 山海嘉之, 片麻痺を有する人のための非麻痺側の歩容を活用したロボットスーツ HAL の歩行支援と臨床応用, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014
- [2] 河本浩明, 山脇香奈子, 桜井 尊, 山海嘉之, 片麻痺疾患のための健側歩容を活用したロボットスーツ HAL の歩行支援, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012
- [3] Hiroaki Kawamoto, Hideki Kandone, Takeru Sakurai, Ryohei Ariyasu, Yukiko Ueno, Kiyoshi Eguchi, and Yoshiyuki Sankai, Development of an Assist Controller with Robot Suit HAL for Hemiplegic Patients Using Motion Data on the Unaffected Side, Proceedings of 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, August 26-30, 2014, Chicago, USA

傍半規管膨大部刺激型の人工前庭器開発に関する基礎的研究

Basic Research for developing a vestibular implant stimulating the ampulla of the semicircular canals

2021004



研究代表者

東京山手メディカルセンター
耳鼻咽喉科

部長

牛尾 宗貴

東京大学医学部耳鼻咽喉科学教室 非常勤講師

1. 背景

平衡覚は、主に末梢前庭覚、視覚、深部知覚を大脳、脳幹網様体、小脳が統合することによりコントロールされている。中でも末梢前庭器が重要な役割を果たす前庭動眼反射は、頭部の急速な運動や高周波数の運動に対しても非常に精密（利得ほぼ1.0）かつ迅速（潜時は約7.9ms）（Grossman GE et al. 1988, 1989; Collewyn H et al. 2000）に応答し、頭部や体幹の制御に寄与している。前庭神経炎や迷路破壊術などにより一側末梢前庭機能が高度低下あるいは廃絶しても、対側末梢前庭器と小脳による代償が達成されると、前庭動眼反射は多くの条件において保たれる。一方、神経線維腫症2型（NF2）や同疾患術後の症例、薬剤性両側前庭機能障害症例、進行した両側メニエール病症例等においては、両側前庭機能が高度低下あるいは廃絶していることがあり、動揺視や暗所での平衡障害が問題となる。両側前庭障害症例に対しては従来の前庭リハビリテーションは効果が不十分であることが知られており、現時点では根本的な治療法は存在しない。

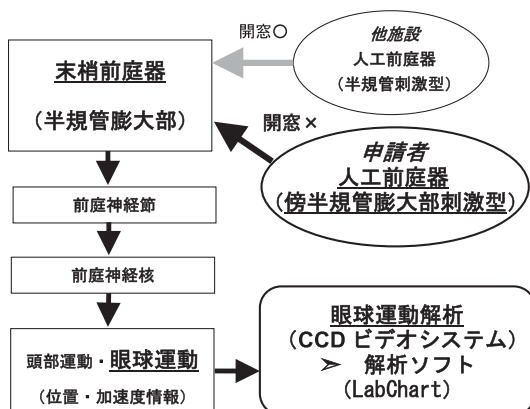
近年、両側前庭機能障害症例の平衡障害に対する治療として人工前庭器開発に関する研究が一部施設で行われているが、いずれも実用化はまだ遠い。その最大の原因は、現在研究されている人工前庭器は単極性の刺激電極先端を半規

管膨大部に留置する方式を採用しており、各半規管を十分選択的に刺激できていないことにある。各半規管の選択的刺激の歴史はCohenと鈴木ら（Cohen B et al. 1963; Suzuki JI et al. 1964, 1969）によって拓かれたが、眼球運動を詳細に記録できる現在では、各半規管を選択的に電気刺激することは容易でないことが判明している。人工内耳（蝸牛）の場合、隣接してらせん神経節が並んでいる蝸牛に電極を挿入するため、選択的電気刺激は比較的容易である。一方、各半規管の膨大部および卵形嚢は非常に近接した位置にあり、かつ刺激の対象としたい前庭神経節は離れた位置に存在する。このため、そもそも各半規管に刺激電極を挿入する方法には選択的刺激を困難にする要素が潜在している。一方、本研究は多チャンネル型の刺激電極を前庭神経節に直接留置するという新たなアプローチにより、十分選択的な電気刺激を実現しようというものである。刺激電極を前庭神経節に留置する場合、上下前庭神経節内において、各半規管、耳石器からの遠心性線維が接続する神経節細胞の局在が非常に重要である。この局在については本研究で用いるモルモットなど様々な動物で既に検討されており、各受容器からの遠心性線維が接続する神経節細胞は、一部を除いて比較的分離して局在することが報告されている（Gacek RR 1969; Sando I 1972; Lee WS et al. 1992; Naito Y et al. 1995）。

2. 目 的

両側末梢前庭機能が高度低下あるいは廃絶している症例においては、特に頭部を急速に動かした際や歩行時の動揺視、暗所での平衡障害等が問題となるが、現在、根本的な治療法は存在しない。近年、両側前庭機能障害に対する新しい取り組みとして半規管を刺激する人工前庭器開発に関する研究が一部施設で行われているが、まだ問題点も多く実用化には遠い。本研究の目的は、多チャンネル型の刺激電極を前庭神経節に留置するという新たなアプローチにより、現在の人工前庭器開発における問題点を解決し、実用化に向けた研究を加速することである。

研究はモルモットを対象とし、前頭側頭開頭変法により多チャンネル型電極を一側前庭神経節に留置して行う。電極による刺激時の眼球運動を CCD カメラで記録して解析し、電極の適切な留置位置および刺激条件を決定する。また、オリジナルの電極を作成してより精密な刺激を実現し、さらに両側迷路破壊術後に長期間経過したモルモットに対する電気刺激時の眼球運動の解析、前庭神経節と前庭神経核の形態学的評価も行う。最終的には加速度計からの信号を前庭神経節に入力する。

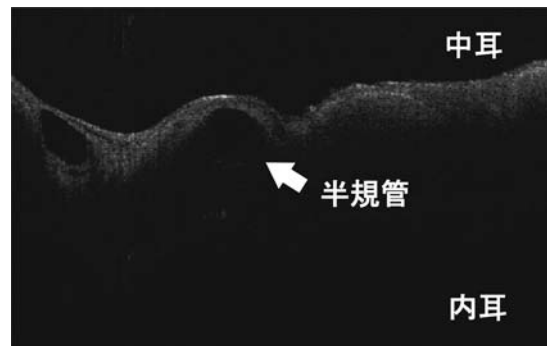
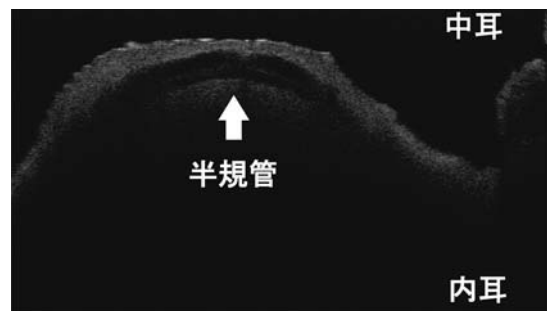


3. 研究計画・方法

まず、赤外線 CCD 高速ビデオシステムを用

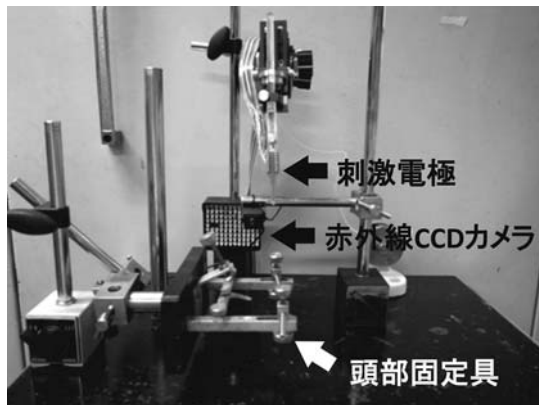
いてモルモットの眼球運動を記録するシステムを構築する。次に、モルモットに両側迷路破壊術を行い、術後 1, 3, 6ヶ月後より電気刺激を開始する 3 群のモルモットを作成する。その後、多チャンネル型刺激電極を留置し、電極の適切な留置位置、チャンネル数、大きさを決定する。前庭神経節周辺は非常に小さなスペースに重要な器官が密集しているため、精確に電極を留置するために OCT (optic coherence tomography) を用いて内部を観察しながら行う。同時にオリジナルの刺激電極と三次元加速度計の製作を開始する。

次に、オリジナル刺激電極を用いて例数を重ねる。また、研究の初期段階で作成し、両側迷路破壊術後に長期間経過したモルモットを用い、電気刺激による眼球運動を評価する。定期的に電気刺激を行ったモルモットと刺激を行わずに長期間経過したモルモットのの前庭神経節を形態学的にも評価した後、第 1 段階の研究をまとめて報告する。さらに、三次元加速度計を用いて人工前庭器からの信号を前庭神経節に入力する試みを行う。



確な眼球運動を記録できるシステムの構築

現在稼働している赤外線 CCD カメラと刺激電極からなるシステムに高速ビデオを加えた高速眼球運動解析システムを構築する。また、モルモットの頭部に固定用のポールを設置し、正常モルモットの眼球運動を実際に記録する。



前庭神経節に刺入する。1 で構築したビデオシステムを用いて電気刺激時の眼球運動を解析し、本研究用にセットアップしたマルチチャンネル刺激装置を用いて末梢前庭の各部位（半規管、耳石器）を個別刺激するのに使用する電極の選定と至適刺激条件を決定して個別刺激の解像度を高める。

前庭神経節刺激用オリジナル電極の開発

申請者はモルモットの前庭神経節を包み込む形状の電極をデザインしており、これを作成して実用化する。

三次元加速度計の製作

半規管同様 互いに約 90 度の位置関係となるよう加速度計をセットした三次元加速度計を製作する。

両側末梢前庭機能廃絶モデル動物の作成

モルモットに両側迷路破壊術を行う。3 で用いるモルモットとして①手術 1 ヶ月後より定期的に電気刺激を行う群、②手術 3 ヶ月後より定期的に電気刺激を行う群、③手術 6 ヶ月後後のみ電気刺激を行う群、それぞれ 5 匹ずつ作成する。

両側迷路破壊術後に長期間経過したモルモットの眼球運動の評価

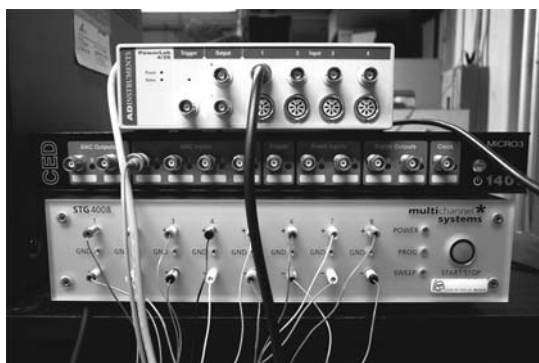
両側末梢前庭機能廃絶モデル②、③を用い、電気刺激による眼球運動を記録する。前庭神経節の細胞数が減少していれば、電気刺激による眼球運動の利得が低下している、あるいは眼球運動自体を惹起できないことが予想される。

多チャンネル型刺激電極を用いた適切な刺激条件の決定

モルモットを申請者が考案した前頭側頭開頭変法で開頭し、多チャンネル型刺激電極を上下

モルモットの前庭神経節ならびに前庭神経細胞の形態学的検討

両側迷路破壊術 1 ヶ月後より定期的に電気刺激を行っていた群と手術 6 ヶ月後にのみ電気刺激を行った群を手術 7 ヶ月後に還流固定し、それぞれの前庭神経節ならびに前庭神経核を摘出して神経節細胞の数と形態を比較する。受容器（半規管および耳石器）からの信号が長期間消失した場合には前庭神経節の細胞数が減少することが予想されるが、定期的な電気刺激を行った場合には細胞数の減少をある程度防止できることが期待される。



三次元加速度計からの信号の前庭神経節への入力

三次元加速度計からの信号をモルモットに埋め込んだ電極を用いて前庭神経節に入力する。これによりモルモットに眼球運動が生じるよう設定することが、本研究期間の最終目標である。

4. 研究成果と今後の課題

電気刺激と眼球運動解析に関するシステムの構築ならびにモデル動物作成に関する準備は順調にすすんでいる。一方、当初想定していた各半規管ならびに耳石器に対する個別刺激については大幅に遅れている。

前庭電気刺激と正確な眼球運動を記録できるシステムの構築

すでに稼働している赤外線 CCD カメラと刺激電極からなるシステムに高速ビデオを加えた高速眼球運動解析システムを構築した。モルモットの前庭器に電気刺激を行いながら眼球運動を記録することができる。

両側末梢前庭機能廃絶モデル動物の作成と電極刺入

モルモットに両側迷路破壊術を行う。3 で用いるモルモットとしてのモデル動物作成は安定して可能となっており、多チャンネル型刺激電

極を前庭神経節に刺入することも可能となっている。

多チャンネル型刺激電極を用いた前庭器の電気刺激

モルモットを申請者が考案した前頭側頭開頭変法で開頭し、多チャンネル型刺激電極を上下前庭神経節に刺入することが可能となっている。構築したビデオシステムを用いて電気刺激時の眼球運動を解析し、本研究用にセットアップしたマルチチャンネル刺激装置を用いて末梢前庭の各部位（半規管、耳石器）の個別刺激を試みている。現時点では、電気刺激により眼球運動を惹起することは可能となっているが、各半規管や耳石器を正確に個別刺激することは出来ていない。電極の選定に問題がある可能性・至適刺激条件が詰められていない可能性などが考えられるが、方法論に問題がある恐れもある。

今後の展開

今後も前庭神経節刺激型人工前庭器の開発はすすめる予定であるが、同時に前庭電気刺激による前庭神経節細胞の保存も試みる。これは、現在までに構築した実験システムで遂行可能と思われる課題であり、もうひとつのテーマである前庭の老化と絡めて推進することが可能と思われる研究内容である。

振る舞いの多様性に基づいた適応的運動機能を 発現するロボットの開発

Development of life-like robots that generate supple, versatile, and adaptive behaviors

2021005



研究代表者

広島大学大学院 理学研究科

梅 舘 拓 也

共同研究者

広島大学大学院 理学研究科

風 間 俊 哉

【研究の目的】

本研究の目的は、プログラマーが前もって設計しておく必要があるロボットの振る舞いを、ロボットの形態や粘弾性などの力学的特性を活用することで、ロボット自身に多様な振る舞いを自発的に生成させ、環境やタスクに応じた振る舞いを自律的に獲得させることにある。申請者らは、汎用機であるロボットがわれわれの日常生活に浸透しない最大の原因は、振る舞いの設計の難解さにあると考える。一方、生物は自身の置かれた環境に応じて質的に異なるさまざまな振る舞いを発現し、自発的にそれらを切り替えることで優れた適応的運動機能を発現している。このような、多様性に基づいた適応的運動機能を自ら生み出す人工知能の開発が本研究の目的である。

上記の目的を達成するためには、生物の「振る舞いの多様性を自ら獲得し、状況によってそれらを使い分けることが出来る根源的な仕組み」を理解する必要がある、と申請者は考えた。これまで申請者は、その根源的な仕組みを理解するために、最も原初的な生物である真正粘菌変形体に着目してきた。真正粘菌変形体は振動により移動する巨大アメーバ生物であり、神経や脳などの情報処理に特化した器官を持たない単細胞生物であるが、驚くべき多様かつ適応的な振る舞いを生成する。これまでに申請者らは、

真正粘菌変形体のモデルをロボットで作ることで、多様な振る舞いを自発的に生成し、さらにはその多様な振る舞い間の遷移現象まで再現することに成功しつつあった。そこで本研究では、どのようなときに多様な振る舞いを発現し、そのようなダイナミクスがその遷移現象を収束させるのかを体系的に理解することを第一義的な目標設定とした。さらに、ここで得られた知見を別の形態をもつロボットにも応用する。ここで得られた知見にもとづき、さまざまな形態のロボットにおいて、探索行動と知識活用行動（走性、逃避など）を自律的に切り替える、「現実世界に接地した知能」を持つロボットの開発が可能になると考えられる。

【研究の内容・成果】

1. 粘菌振動子をモチーフにした振動子ロボット

申請者らは生物の「振る舞いの多様性を自ら獲得し、状況によってそれらを使い分けることが出来る根源的な仕組み」を理解するために、最低限の設定から基本理論を探るという、いわゆるミニマリストアプローチを採用し、きわめて原初的な生物である真正粘菌変形体に着目してきた（図1の左上）。真正粘菌変形体は何ら分化した（脳や神経系などの）器官を持たない多核単細胞生物であるが、多様な時空間振動パターンを形成する[1]。興味深いことに、

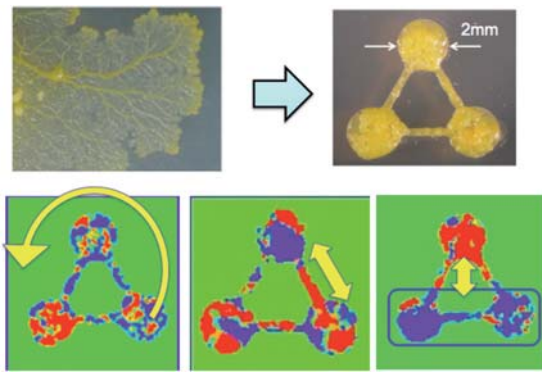


図1 粘菌が多様な振動パターンを生成する様子。粘菌により作られた振動子（上図）と、その振動子の厚み計測の結果（下図）。（早稲田大高松敦子博士のウェブページより抜粋）

これら複数の振動モードのうち一つのモードにとどまることなく、複数の振動モード間を自発的に遷移することが知られている（図1下参照）。真正粘菌変形体はこのようなメカニズムを活用することで、適応的な振る舞いを実現しているのではないかと考えられる。したがって、真正粘菌変形体には、多芸多才な運動知の原型が内在されていると考えることができ、このような知の形態を議論する上で得難いシンプルベストなモデル生物であるといえる。

申請者らは、このような多芸多才な運動機能発現の鍵となるのが、ロボットの身体部位間の力学的な相互作用（morphological computation [2]）であると考え、このような自律分散システムを工学的に実現し検証することで、真正粘菌変形体の多芸多才な振る舞いの発現機序の解明を目指してきた（研究業績1, 2)）。具体的には、粘菌振動子をモチーフにした流体駆動型モジュラーロボットのシミュレーションモデル（図2(b)）とそれをもとにしたロボット実機（図2(a)）を開発してきた。シミュレーション並びに実機実験の結果、柔らかいアクチュエータにかかる張力が少なくなるように自身の運動リズムを調整するというきわめて単純な制御則が実装されているだけでもかかわらず、身体の力学的な相互作用により「多様な時空間振動パターン」と「それらの間での遷移」が確認されている（図2(c), 研究業績1)参照）。さらに実

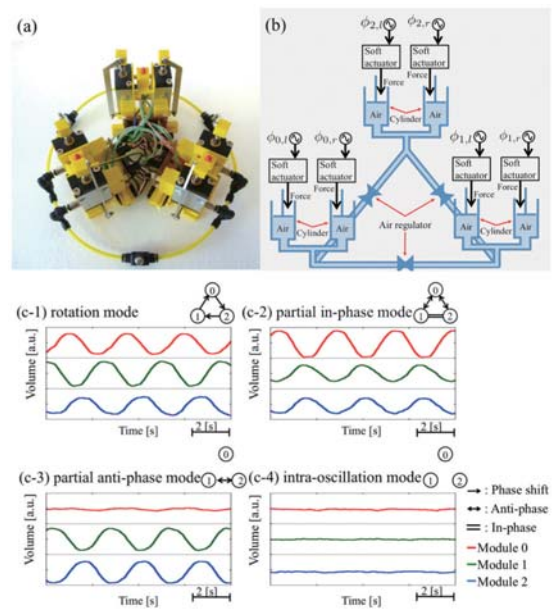


図2 (a) 粘菌振動子をモチーフにした振動子ロボット実機, (b) 粘菌振動子ロボットの模式図, (c) 粘菌振動子ロボット実機が多様な振動パターンを生成する様子

機ロボットにおいて遷移の頻度も長時間にわたって調べた。実験結果により、このシステムが生み出す多様な振る舞いは、複数のカオス的なアトラクターが共存することで生成されていることが示唆されている（研究業績2)）。

2. 探索と走性を自律的に切り替える粘菌振動子モジュラーロボット

本研究では、このモデルで得られた多様な振る舞いの発現メカニズムを、ロボットの振る舞いの自律的な切り替えに応用するためにシミュレーションモデルとロボット実機を構築した。図3のようにシリンダとアクチュエータ、接地摩擦制御ユニットから構成される機械要素を1モジュールと定義する（図3(a)参照）。またこれら複数のモジュールを中央のユニットから放射状に配置し、シリンダどうしをチューブで結ぶことでロボットを構成している。モジュールには位相振動子を実装し、当該位相振動子の位相に基づいてアクチュエータを制御することで自律分散的にロコモーションを生成する。本研究では柔軟性を有したアクチュエータによりシリンダ内の空気（原形質）をモジュール間で吸

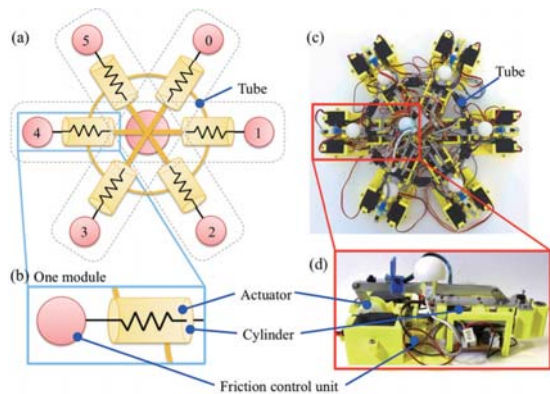


図3 (a) 粘菌子をモチーフにした粘菌振動子型モジュラーロボットの概要図, (b) 粘菌振動子型モジュラーロボットの実機

入・排出することで、原形質流動が生起されるようにモジュールを設計した。この粘菌振動子型ロボットに、移動機能（電磁石による接地摩擦制御機構）と誘引刺激の有無による弾性率変化を実装することで、明示的な誘引刺激がないときには多様な振動モードを活用して環境探索を行い、誘引刺激がある時には走性を示すという、多様な振る舞いを状況依存的に自己組織化することに成功した（報告書提出時に論文投稿中）。本ロボットは、力学的相互作用を活用した局所フィードバックを自律分散システムに実装することで、現実世界の物理法則に沿った現実的な振る舞いの中から、多彩な振る舞いを生成可能であることを示すよいモデルケースである、と申請者は考える。

3. 粘菌振動子モデルを用いたイモムシ型ソフトロボットの自律分散制御

さらに、このロボットで得られた知見を別の形態のロボットでも実現するために、イモムシ型ソフトロボットも作成している（図4, 研究業績3), 4), 動画: <https://www.youtube.com/watch?v=0pHOaBnj1po>）。このイモムシ型ソフトロボットには、コイル状の形状記憶合金を柔らかい身体に組み込み、そのリズムミクな収縮運動を制御するために粘菌振動子モデルを採用している。前述の制御則同様、やわらかいアクチュエータにかかる張力を計測し、その張力が

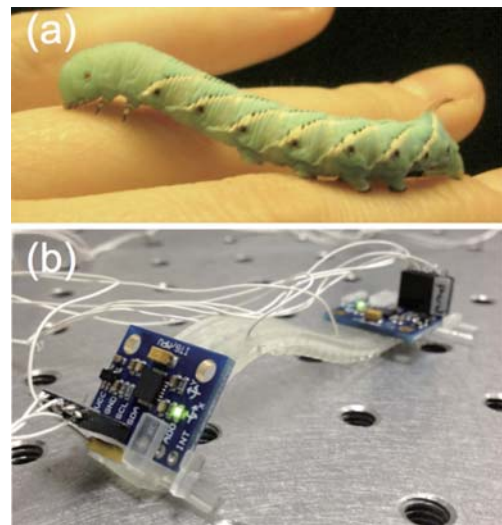


図4 (a) 一次元ひも状のシンプルな形態をもつイモムシ (*Manduca sexta*)。ソフトロボットを開発する上でのモデル生物であると考えられる。(b) 粘菌子をモチーフにした粘菌振動子を組み込んだイモムシ型ソフトロボット

減少するように局所センサフィードバックを設計した。実験結果から、振動子同士が柔らかい素材の連続的な大変形や粘弾性を介して、互いに収縮リズムを調整することで（適切な位相差を生成し）ロコモーションが生成可能なことが確認できた。この実験により、ソフトロボットを制御するための粘菌振動子の有用性が確認できた。

[今後の研究の方向・課題]

この制御則のさらに別の形態への応用先として、ヒラムシロボット（研究業績5), 図5参照）の作成にもとりかかっている。現在は与えられた位相差に対して、どのような動きを生成できるかを検証中であるが、次の段階として、粘菌振動子モデルをヒラムシ型ソフトロボットに実装した時にどのような動きが自律的に生成されるかを実機並びにシミュレーションを用いて実験し、考察したいと考えている。

さらにこの制御則の有用なものとするために、この振動子が生み出す多様な振動パターンと「さまざまな機能」をいかに結びつけてシステムをデザインするか、という体系的な設計論を

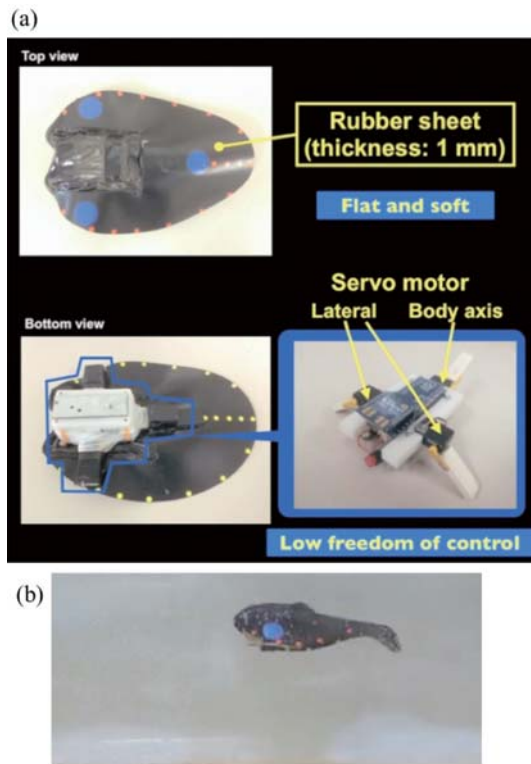


図5 (a) 風間氏と共に作成したヒラムシ型水中遊泳ロボット, (b) そのロボットが水中を遊泳する様子

構築する必要がある。具体的には、数値実験と実機実験にて、力学的な刺激（ロコモーションによる摩擦、引張・圧縮など）や各モジュール剛性の変化と、発現する多様な振る舞いの関係を考察し、その振る舞いをもとに機能を設計する。さらに、図3のロボットのような剛性変化以外にもどのようなダイナミクスがその遷移現象を収束させるのかを体系的に理解する必要がある。加えて、ここで得られた設計論を、別の形態のロボットに応用することにより、我々の日常生活で役立つ柔軟で多様な振る舞いを自ら獲得し、状況によってそれらを使い分けるロ

ボットの開発を目指す。

参考文献

- [1] A. Takamatsu, R. Tanaka, H. Yamada, T. Nakagaki, T. Fujii, and I. Endo, "Spatiotemporal Symmetry in Rings of Coupled Biological Oscillators of Physarum Plasmodial Slime Mold", Phys. Rev. Lett., Vol. 87, pp. 078102/1-4, 2001.
- [2] C. Paul, "Morphological Computation, Robotics and Autonomous Systems, Special Issue on Morphology", Control and Passive Dynamics, August 2006, 54(8) : 619-630, 2006.

[成果の発表・論文等]

- 1) T. Umedachi, R. Idei, K. Ito, and A. Ishiguro, "A Fluid-Filled Soft Robot That Exhibits Spontaneous Switching Among Versatile Spatiotemporal Oscillatory Patterns Inspired by the True Slime Mold", Artificial Life 19 : 67-78, 2013.
- 2) T. Umedachi, R. Idei, K. Ito, A. Ishiguro, "True-slime-mould-inspired hydrostatically coupled oscillator system exhibiting versatile behaviours", Bioinspir. Biomim. 8 035001, doi : 10.1088/1748-3182/8/3/035001, 2013.
- 3) T. Umedachi, B. Trimmer, "Design of a 3D-Printed Soft Robot with Posture and Steering Control", 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014), Hong Kong, China, May. 31- June 7, 2014 (in print).
- 4) 梅館拓也, Barry A. Trimmer, 「連続性・大変形性を活用したイモムシ型ソフトロボットの自律分散制御」, 第26回自律分散システムシンポジウム予稿集, 2A2-3, 2014年1月23日-24日
- 5) 風間俊哉, 梅館拓也, 石黒章夫, 小林 亮, 「大変形シート構造物遊泳推進における身体・流体間相互作用機構理解に向けたソフトロボティクスアプローチ」第31回日本ロボット学会学術講演会, 3K3-03, Tokyo, Japan, Sep. 6, 2013.

人間支援ロボットのための座標変換を用いた タスクの抽象化技術の開発

Abstraction of Tasks by Using Coordinate Transform for Human Supporting Robots

2021013



研究代表者

埼玉大学

助 教

境 野

翔

〔研究の目的〕

近年の少子高齢化社会に伴い、ロボットによる人間支援技術の必要性が高まってきており、医療や介護等の分野においてすでに実用化が始まりつつあり、その将来性が期待されている。しかし、人間とロボット間のインタラクションには未解明な領域が多く存在し、人間支援ロボットの実現を困難にしている。本研究では、触覚通信に代表される実世界ハプティクス技術を基盤にタスクや人間のモーションを座標変換として記述することにより、人間とロボットのインタラクションを定量的に呈示、解析する。そして、それをロボット制御へとフィードバックすることにより、ロボットと人間の親和性の高い高度な人間支援ロボット技術を開発する。

本研究課題では、人間支援ロボットの一例として、触覚フィードバックを有するインテリジェントな作業ロボットの実現を目指す。現在、東日本大震災の被災地では、瓦礫の撤去等のために多くの建設機械が用いられているが、被災地の環境は瓦礫やヘドロが混在したあまりに視認が困難な環境であるため、常に操作対象物の崩落の危険性がある。このような状況の中、建設機械と環境間の反力を操作者へフィードバックできれば、あたかも環境を直接手で操作しているかのように扱えるため、巧みな操作が可能になり、作業効率を大幅に改善できると考えられる。しかし、触覚フィードバックの実現のためには、人間-ロボット-環境三者のインタラクションを解析して制御することが必須である。

本研究課題では、建設機械を簡略化したモデルとして一軸の油圧アクチュエータ、操作用ロボットとして一軸の電気アクチュエータを使用した。これら特性の異なるアクチュエータ間での、触覚フィードバック時の動特性を、座標変換を用いてタスクを抽象化することにより解析し、実験によって触覚フィードバックが実現可能であることを確かめる。

〔研究の内容、成果〕

本研究で用いた電気アクチュエータと試作した油圧アクチュエータを図1に示す。電気アクチュエータがマスタロボットと呼ばれる操作用ロボットであり、油圧アクチュエータが操作されるスレーブロボットである。図1-(a), (b)は各アクチュエータの外観であり、そのモデルを図1-(c), (d)に示す。ここで、 x, f, m はそれぞれ位置、力、質量を表し、添字1, 2はマスタロボットとスレーブロボットを表すとする。マスタロボットは、電流指令値による力(加速度)制御が可能であり、油圧アクチュエータは流量比例弁を用いたため、電流指令値による流量(速度)制御が可能である。油圧式アクチュエータのストロークは10.0 cmであり、アクチュエータの位置をポテンシオメータによって測定した。図1-(e)にスレーブロボット側で用

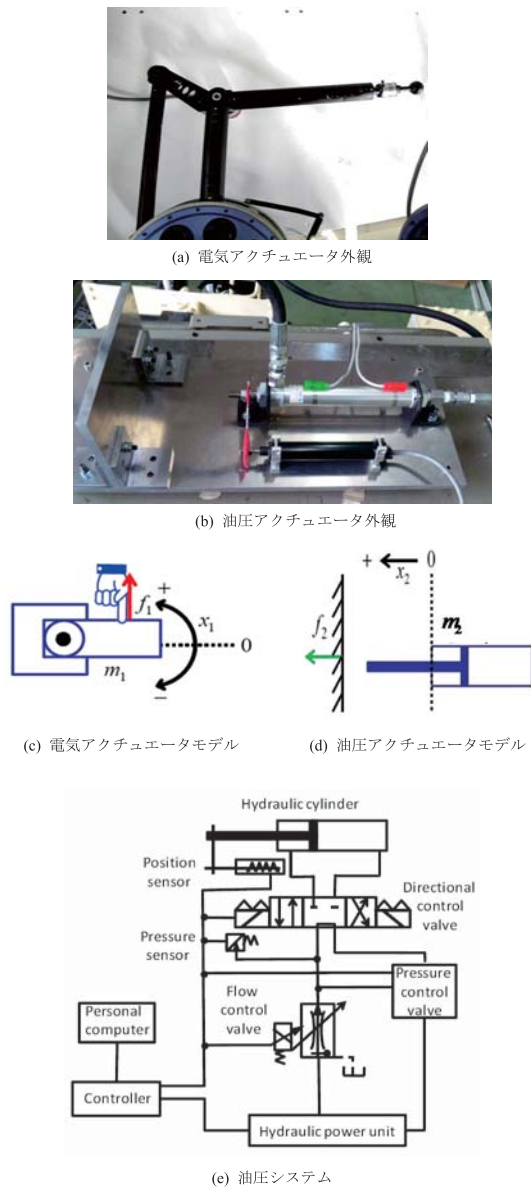


図1 電気アクチュエータと油圧アクチュエータ

いる油圧システムを示した。スレーブロボット側の実験装置は油圧シリンダ、制御弁、油圧ユニットからなる油圧回路部と、位置センサ、圧力センサ、リミットスイッチからなるセンサ部、A/D ボード、D/A ボードからなるコントローラから構成される。制御弁にはPCからの指令電流により、油の流量を制御できる流量比例制御弁とPCからの指令により油の流れる方向を制御できる方向切換弁を用いた。また、本実験装置には圧力を制御できる圧力制御弁が取り付けられているが、リリーフ弁としてのみ使用し

た。油圧ユニットは主に油圧ポンプとポンプを駆動するための電動機から構成される。最大5.0 MPa, 5.0 l/min を供給する能力がある。

建設機械をスレーブロボットとして遠隔操作する場合、マスタロボットの位置によってスレーブロボットの速度を制御する。また、同時にスレーブロボットの環境反力をマスタロボットへフィードバックするため、マスタロボットとスレーブロボットの力の間で作用と反作用の法則が成立しなければならない。よって触覚フィードバックの制御タスクは次の二つの式で与えられる。

$$x_1 - \alpha \dot{x}_2 = 0 \quad (1)$$

$$f_2 + \beta f_1 = 0 \quad (2)$$

ここで α と β はスケーリングゲインであり、スレーブロボットの動作を増大させるためのパラメータである。このような二つの制御タスクがあるため、触覚フィードバックでは位置制御と力制御を同時に達成しなければならない。申請者らのこれまでの研究によって、この二つの制御タスクは適切な座標変換を用いて抽象化することで位置と力のハイブリッド制御の問題と等価になることをあきらかにしており、各制御系を非干渉化できれば高精度な触覚フィードバックを実現できることもあきらかにしている。しかし、位置と力のハイブリッド制御の実現のためには、マスタロボットとスレーブロボット共に加速度制御を実現しなければならず、速度制御しか実現できないアクチュエータを用いると制御入力飽和してしまい、触覚フィードバックは非常に困難であった。

そこで、本研究では二つの制御タスクをハミルトン系で記述することで新しい触覚フィードバック制御則を導出した。ハミルトン系では、位置と運動量が数学的に等価な物理量となるため、ラグランジュ方程式を用いたハイブリッド制御の動力学とは異なった形式で動力学を抽象

化して記述できる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 - \alpha \dot{x}_2 \\ m_1 \dot{x}_1 + \beta m_2 \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ 0 \end{bmatrix} + T \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\alpha}{m_2} \\ 1 & \beta \end{bmatrix}$$

(3)式第一行が位置制御タスク，第二行が力制御タスクの動力学を表す。行列 T がタスクを抽象化する座標変換行列である。(1)式のように，次元の異なる物理量(位置と速度)を含む式を新しい物理量として定義した場合，行列 T に零要素が存在する。このことにより，スレーブロボットに力制御を実装せずとも，位置制御と力制御が非干渉化された触覚フィードバック制御が実現できるようになり，その制御入力は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{m_2 \beta}{\alpha} (K_p (x_1 - \alpha \dot{x}_2) + \dot{x}_1) \\ -K_f (f_1 + \beta f_2) \\ \frac{m_2}{\alpha} (K_p (x_1 - \alpha \dot{x}_2) + \dot{x}_1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

u_1, u_2, K_p, K_f はそれぞれマスタロボットとスレーブロボットの入力，位置制御ゲインと力制御ゲインである。よって，提案する制御系では(1)式の制御タスクをマスタロボットとスレーブロボットの協調作業で実現し，(2)式の制御タスクをマスタロボットのみで実現する。

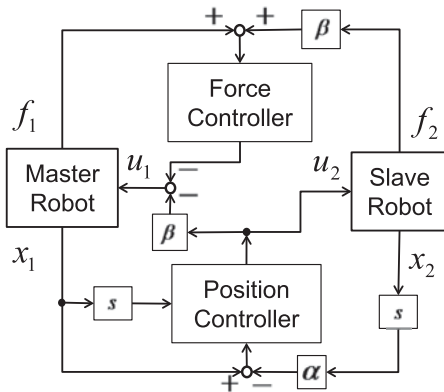
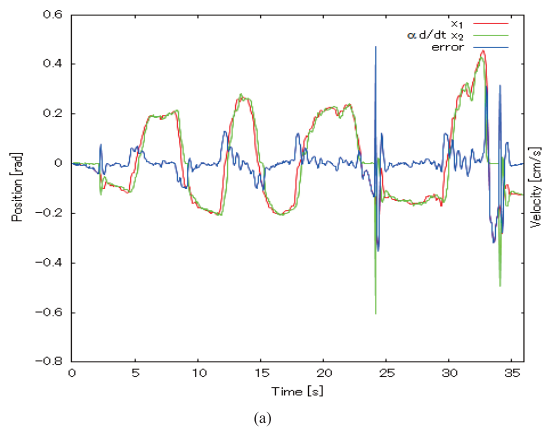


図2 提案する触覚フィードバック制御系

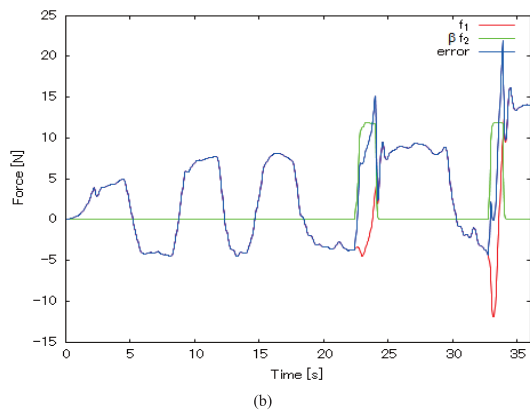
スレーブロボットは位置制御を実現すればよいだけなので，速度制御系である流量比例弁を用いた油圧アクチュエータであっても触覚フィードバックを達成できる。図2に提案制御系のブロック線図を示す。Position ControllerとForce Controllerは比例制御器であるため，非常に簡単な構成で触覚フィードバックを実現できる。また，ブロック線図より力制御系のパスがスレーブロボットへと通っておらず，スレーブロボットに力制御が必要でないことが確認できる。

このように，電気アクチュエータと油圧アクチュエータに代表される制御性能の異なるアクチュエータを用いた人間支援ロボットの構成法として，次元の異なる物理量を比較するタスクを実装することと，ハミルトン系を用いてタスクを抽象化して記述することが有効であるとあきらかになった。これまでも，油圧アクチュエータを用いた触覚フィードバックを目指した研究例は数多く報告されているが，位置制御と力制御のタスクを非干渉化した制御系を構成したのは本研究が世界初であり，革新的な成果を得ることができた。

提案手法の有効性を，従来手法の一つである位置対称形と比較した。位置対称形は力制御がない触覚フィードバックであるため高精度な位置制御を実現できるが，過大な操作力が必要になる。スレーブロボット側のPCとコントローラ間はRS-232Cにより接続し，シリアル通信により情報の送受信を行った。また，マスタロボット側とスレーブロボット側を制御するPCはクロスLANケーブルによって直接接続し，通信方式はUDPを用いた。スレーブ側には接触させる環境を設置し，マスタ側を人が操作することでスレーブ側を環境と接触させた。 α と β はそれぞれ，0.1と0.01とし，マスタロボットの位置の10倍の速度がスレーブロボットの指令値となり同時に，マスタロボットの力が100倍の大きさに増強されてスレーブロボットの環境操作力となるようにした。マスタロボ

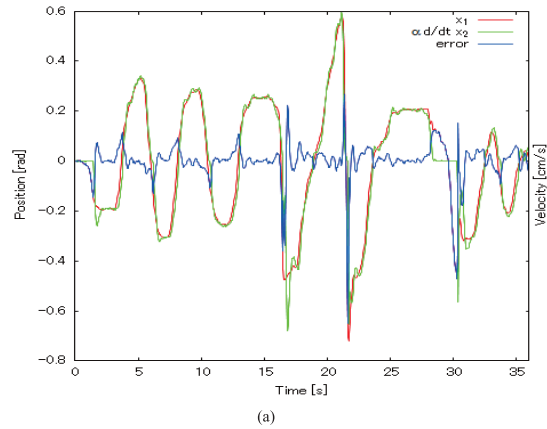


(a)

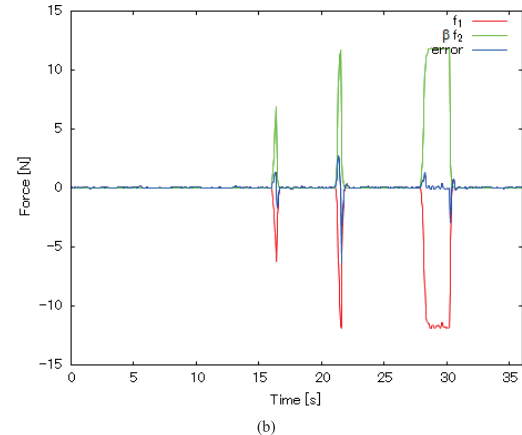


(b)

図3 実験結果（位置対称形）



(a)



(b)

図4 実験結果（提案手法）

トの位置応答は光学エンコーダを用いて測定し、力応答は反力推定オブザーバを用いて推定した。スレーブロボットの力応答は油圧シリンダの入力ポートと出力ポートに設置した圧力センサの差圧より測定した。

図3に位置対称形の実験結果を、図4に提案手法の実験結果を示す。(a), (b)はそれぞれ位置応答と力応答である。赤線がマスタロボットの応答、緑線がスレーブロボットの応答、青線が誤差である。図3-(a), 図4-(a)より従来手法、提案手法ともに良好な位置応答を得られたことを確認した。図3-(b)より、従来手法は力制御を実装していないため0s-22sの、スレーブロボットが環境と接していないフリーモーション時においてもマスタロボットに大きな力が発生した。よって、理論通り過大な操作力が必要になった。一方図4-(b)より、提案手法ではマスタロボットとスレーブロボットの力

応答が上下対称になり作用と反作用の法則を実現できた。また、フリーモーション時には力をほとんど与えなくてもロボットを操作できたことを確認した。いずれの結果においても、環境との接触時に大きな誤差が生じているが、これは方向切替弁の切り替え時間が100ms以上かかってしまったことに起因する。方向切替弁の改良は今後の課題としたい。

[今後の研究の方向、課題]

実験結果より、方向切替弁の応答速度が環境接触時の制御性能を大きく劣化させてしまうことがあきらかになった。よって、まずは方向切替弁の応答速度を流量比例弁と同程度に改善する。次に、多自由度ロボットにおける触覚フィードバック技術を確立することを目指す。現在既に、二自由度の油圧駆動ロボットを製作

し、基礎実験を開始している。ロボットを多自由度化すると、位置制御と力制御の干渉だけではなく各制御入力の干渉も増大するが、提案済みのタスク抽象化手法を用いれば非干渉化できることも確認済みである。今後は三次元動作可能なロボットを製作し、現実の災害救助に十分な操作性を確保すると同時に、姿勢制御や零空間制御など多自由度ロボット特有の制御手法に焦点を当てて研究開発を進める。

[成果の発表，論文等]

- (1) 高橋大樹，境野 翔，辻 俊明，金子裕良：電気－油圧アクチュエータを用いた速度指令方式によるバイラテラル制御，電気学会産業応用部門誌，Vol. 133, No. 11, pp. 1065-1072, 2013
- (2) D. Takahashi, T. Furuya, S. Sakaino, T. Tsuji, Y.

Kaneko: Experimental Evaluation of Bilateral Control of Velocity Control System Using Electric and Hydraulic Actuators, in Proceedings of the 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013.

- (3) 古谷峻千，高橋大樹，境野 翔，辻 俊明：電気－油圧駆動ロボットアーム間のバイラテラル制御におけるスケーリングゲインを用いた重量物操作, 1K1-04, 2013
- (4) 高橋大樹，境野 翔，辻 俊明：ひずみゲージを用いた電気－油圧アクチュエータ間のバイラテラル制御の実験による実証，平成 24 年電気学会産業応用部門大会講演論文集，No. 2-14, pp. 89-94, 2012
- (5) 古谷峻千，高橋大樹，境野 翔，辻 俊明：多自由度ロボットアームを用いた電気－油圧アクチュエータ間のバイラテラル制御，電気学会産業計測制御研究会，No. IIC-13, vol. 33-48, pp. 73-78, 2013
- (6) 高橋大樹，境野 翔，辻 俊明：電気－油圧アクチュエータ間のバイラテラル制御，電気学会産業計測制御研究会，No. IIC-12-034, 2012

「硬くて柔らかい」人の運動特性を模したモータサーボ制御

‘Rigid, but flexible’ motor servo control mimicking human motion properties

2021015



研究代表者

大阪大学大学院 工学研究科

准教授

杉原 知道

〔研究の目的〕

人の傍で活動するロボットに求められる、環境や人との接触時における柔軟な応答と、人が恐怖を感じない滑らかな動作を示し、かつ作業遂行に十分な剛性と位置決め精度を与えるモータ制御技術の開発が本研究の目的である。

従来の産業用ロボットのほとんどは、人と隔絶され不確定要素が混入しない環境で、溶接や塗装など精密位置決め作業に用いられていた。このようなロボットに柔軟性や動きの滑らかさは必要ない。しかし今後、人と活動場所を共有し、時に協働するロボットが望まれたとき、柔軟かさや滑らかさは不可欠であり、同時に位置決め精度、剛性も依然必要である。

明らかに相反する二つの性質を両立する制御器の設計方法は自明ではないが、我々人はこれらを巧みに両立している。その鍵は、関節摩擦の小ささ、予測を用いた応答性向上の二点と考えた。これに基づいて本研究では、標準的な産業用ロボットで用いられ電磁モータと高減速比減速器で構成した関節に対し、インナーループにおいては負荷トルク情報とフィードフォワード・フィードバック制御を併用した摩擦補償を行い、アウターループにおいては2自由度制御により剛性と応答性を独立に調整することで、上述の特性を有した制御の実現を試みる。

〔研究の内容、成果〕

1. 実験機の構成

図1に、本研究で用いた実験装置を示す。コアレス DC モータ (maxon REmax-29) と、タイミングベルト・プーリ、ハーモニックドライブ減速器 (SHG-14-80-2UH) により減速比 1:120 としている。関節角度はインクリメンタルエンコーダによって取得し、これを差分して回転速度、回転加速度を近似的に得る。減速器出力軸には、スリット入り円盤を挟んでアルミニウム合金製のビームを取り付けている。スリット部にはフォトインタラプタ (ローム RPI-243) を取り付け、ビームの歪みを受光量変化として計測しトルクセンサとして用いる。制御は H8 マイコン上で行う。

モータの回路方程式および運動方程式がカップリングした支配方程式は、次のようになる。

$$J\ddot{\theta} = Ke - K_E \dot{\theta} - \tau_f(\theta) + \tau_L \quad (1)$$

ただし、 J は負荷慣性、右辺第1項は入力電圧、



図1 実験用関節制御システム

第2項は逆起電力による粘性摩擦、第3項は機械摩擦、第4項は外界からの負荷トルク（外トルク）を意味する。

2. 減速器内部摩擦補償制御

式(1)において、第2項と第3項を併せた関節の摩擦特性を関節速度の関数として同定することで、これを補償する信号をフィードフォワードに推定できる。実験機において同定した摩擦特性を図2に示す。これによって大部分の摩擦は補償可能だが、第3項には関節速度のみからは推定できない静止摩擦が含まれる。フィードフォワード摩擦補償を施した下で外トルクを計測し、関節加速度に基づいて負荷慣性を推定すれば、それらの差として残留静止摩擦を推定しフィードバック補償することが可能である。ただし雑音の影響を除去するため、ローパスフィルタを施す必要がある。これは外乱オブザーバ[1]の応用である。残留静止摩擦は小さいので、トルクセンサに要求される精度や応答特性はそれほど高くなく、安価なフォトインタラプタを利用できる[2]。図3に、実測した

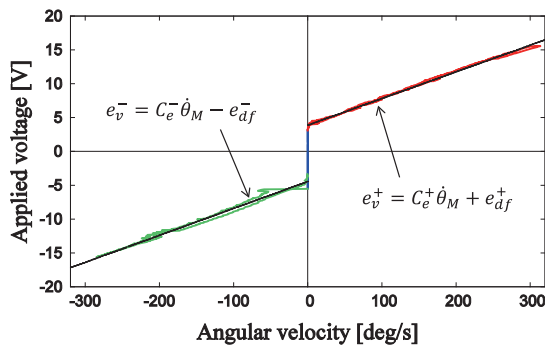


図2 同定された摩擦特性（関節速度－デューティ比）

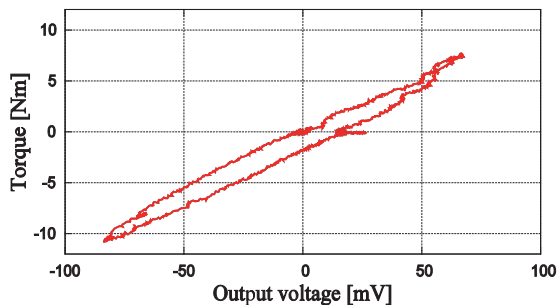


図3 トルクセンサ特性（出力電圧－印加トルク）

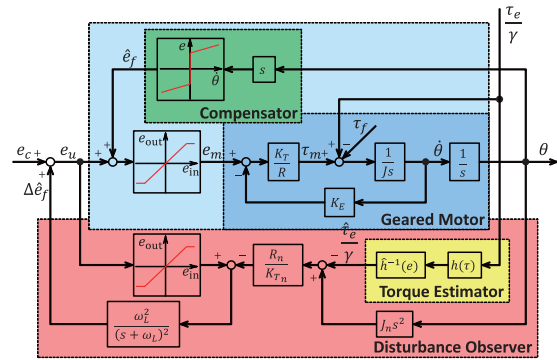


図4 摩擦補償制御系ブロック線図

フォトインタラプタ出力電圧と負荷トルクとの関係を示す。ヒステリシスが存在するが、おおむね線形関数によって近似できる。

以上を組み合わせで設計した摩擦補償制御系のブロック線図を、図4に示す。

3. 2自由度制御による応答性改善

摩擦補償によって、高減速比減速器を用いながらも外力に対し柔らかく応答させることが可能になった。一方、摩擦によって得られる位置決め精度を犠牲にした側面もある。サーボゲインを高くすることでこれを補うと、再び柔らかさを失ってしまう。そこで、サーボゲインはあまり高くせず、柔らかさを維持したまま、予測器によって目標値応答性を向上する2自由度制御系をアウターループとして設計した。制御系全体のブロック線図を図5に示す。なお、PID補償器内の積分補償器には、我々が先に開発した自動リセット機能付き積分補償器[3]を採用し、積分補償項の飽和によるwindup現象を原理的に防いでいる。

4. 実験・評価

提案した制御方法を評価するため、次の4つの条件について比較した。

- 摩擦補償なし
- フィードフォワード摩擦補償のみ
- フィードバック摩擦補償のみ
- フィードフォワード・フィードバック摩擦補償併用

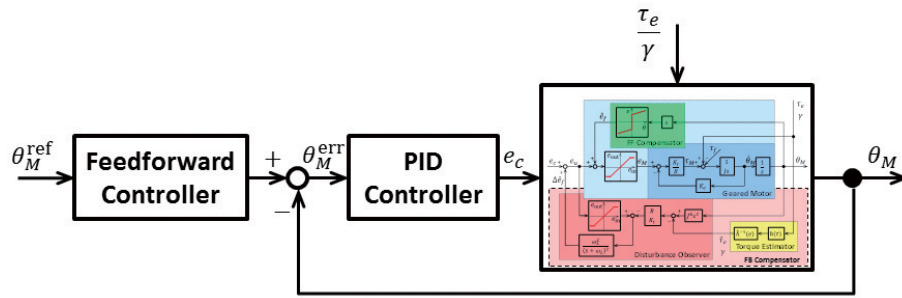


図5 2自由度サーボ制御系ブロック線図

各試行において、目標出力角度を 10.0° にステップ状に与えた後、外トルクをゆるやかに印加および急激に印加したときの挙動を調べた。計測されたトルク値および出力角度のグラフを図6に示す。(a)摩擦補償なしでは、目標値にも外トルクにもほとんど応答できていない。(b)フィードフォワード摩擦補償のみ用いた場合は、ある程度応答が改善されている。2自由度制御によりサーボゲインが小さいにもかかわらず目標値応答が良い。しかし収束性は悪く、長周期振動が起こっている。残留静止摩擦によりモータが停止すると、フィードバック制御器に含まれる積分補償項が累積され、あるところで静止摩擦に打ち勝つ偏差補償トルクが働く。目標値に近づくと補償トルクは低減し、再度静止摩擦により停止する。この繰り返しにより振動が生じると考えられる。(c)フィードバック摩擦補償のみの場合は、目標値応答、外乱応答

ともに改善されているが、(b)の結果に見られた振動よりも短い周期で振動が現れている。これは、外乱オブザーバ安定化のためのローパスフィルタが外乱の高周波信号への応答を防げていると考えられる。(d)提案方法であるフィードフォワード・フィードバック補償併用制御では、(c)で見られた振動は低減され、4条件中最も良好な結果を示した。しかし振動を完全に除去できてはいない。

上記の通り、外乱オブザーバ安定化のためのローパスフィルタで除去された周波数領域に振動源がある。原因として、タイミングベルトの振動、トルクセンサ雑音等が考えられる。対策は、低弾性タイミングベルトの使用、トルクセンサ推定精度の向上、制御周期の高速化が挙げられる。タイミングベルトの弾性変形を考慮した2慣性系としてモデルを立て直し、ベルト弾性を実機の10分の1に設定した条件でシミュ

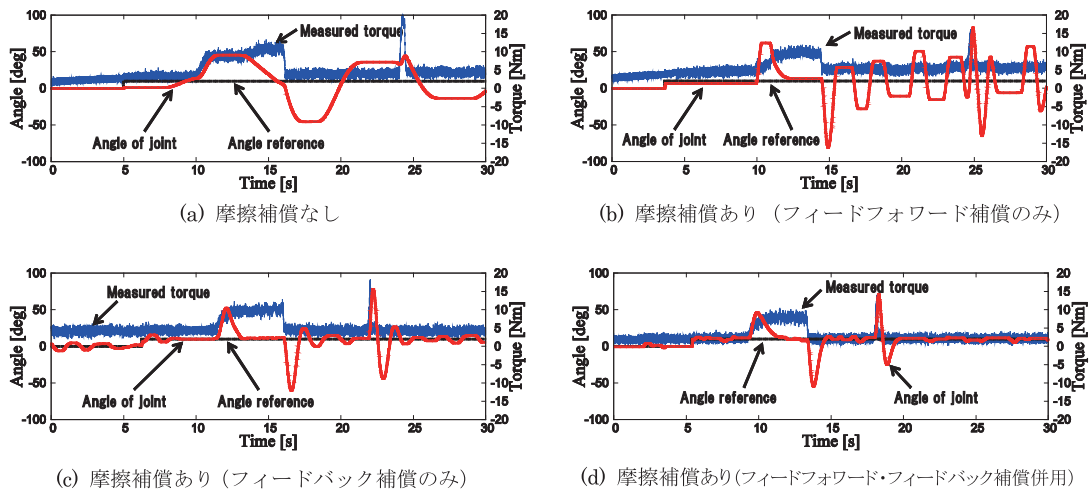


図6 摩擦補償制御の実験結果

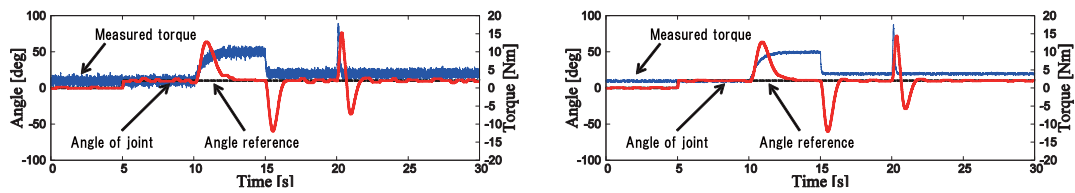


図7 目標値近傍での微振動除去，収束性向上を図ったシミュレーション結果，左：実験条件での応答，右：制御周期を4倍にし，トルク推定におけるヒステリシス等を補償した場合の応答

レーションを行ったところ，結果は変わらなかった。つまりタイミングベルト振動の影響は無視して良い。一方，制御周期を4倍にして外乱オブザーバのローパスフィルタカットオフ周波数をより大きくとること，およびヒステリシスやドリフト等の影響を補償しトルク推定精度を向上することの二点により，振動が抑制でき収束性が大きく向上することも分かった。現条件によるシミュレーション，および条件改善した際のシミュレーションの結果を図7に示す。

5. 結 論

回転型電磁モータと高減速比減速器の組み合わせにおいて，関節摩擦補償と，予測を用いた応答性向上により，柔軟かつ高精度な関節制御を実現した。フィードフォワード・フィードバック補償を併用することで，安価なトルクセンサであっても利用可能な方法を示した。また，サーボゲインを低くし柔らかさを生かしたまま，2自由度制御により目標値応答を向上した。収束性に問題が残るが，シミュレーションを用いて原因を特定し，対策を講じた。

[今後の研究の方向，課題]

短期的には，講じた対策を早急に実装する。トルク推定精度向上のためには，センサや起歪

体の動特性同定と補償が必要である。これを容易にするセンサ取付け部，歪検出部の形状設計等も課題として着手している。

開発した関節制御系を構成単位として様々な人親和ロボットを設計できる。本技術を利用した多軸型ロボットアームや脚ロボットの設計をすでに進めている。

[参考文献]

- [1] 大西公平，外乱オブザーバによるロバスト・モーションコントロール，日本ロボット学会誌，Vol. 11, No. 4, pp. 486-493, 1993.
- [2] D. Tsetserukou et al., Optical Torque Sensors for Implementation of Local Impedance Control of the Arm of Humanoid Robot, In Proc. of 2006 IEEE Intl. Conf. on Robot. and Autom. 2006, pp. 1674-1679.
- [3] 杉原知道，目標値整形による簡単かつ安全な積分補償を導入したモータ制御日本ロボット学会誌，Vol. 27, No. 8, pp. 910-916, 2009.

[成果の発表，論文等]

- [1] 石川省吾，西尾政紀，杉原知道，フィードフォワード摩擦補償と外トルク計測を併用した安価なバックドライバブルモータ制御，第19回ロボティクスシンポジウム予稿集，pp. 171-176, 2014.
- [2] 西尾政紀，杉原知道，光学センサの動特性補償による安価な関節トルク計測，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014（発表予定），1P2-J04, 2014.

眼電位操作デバイスのための基礎技術

A basic study of EOG control device

2021021



研究代表者

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ユアトラック
准教授

南 哲 人

[研究の目的]

体の一部が自由に制御できない人にとっては、我々が何気なく行っている日常的な行動でさえ、困難な状況が多く存在する。患者が満足に行動するためには、補助器具のサポートが必要であり、誰もが簡単に扱えるシステムの開発が望まれている。しかしながら、従来の補助器具は、患者が自由に使いこなすためには、長期の訓練を必要とする場合が多く、また、患者の意志どおりに行動することが困難な場合がある。そこで我々は、重度の運動性障害をもつ患者の行動をサポートする新しいインターフェースの作成を目的とする。そして、インターフェースの入力として、眼球運動機能に着目し、眼球運動から直感的に機械を制御するシステムの構築を目指した。さらに、眼電位や視線計測では得られない情報を利用するインターフェースの検討として、定常状態視覚誘発電位(SSVEP)による複数移動対象の追跡の実験も行った。

我々が、外界の情報を、視覚系を通じて受け取る場合、視線運動が必然的に生じる。視線運動というのは、日常的に行っている自然な行動である。視線運動を行う際、眼球を動かすために、これにより電位が生じる。この電位は眼電位と称され、眼電位は目の周りの皮膚上に配置した電極にて観測される。この眼電位を入力とし、視線運動から直感的に機械を制御するシステムのインターフェース構築を行った。視線運

動を用いたインターフェース構築のために視線運動時の眼電位計測を行う実験を行い、被験者の眼球運動時に生じた眼電位を用いて、各運動条件時の眼球運動の判別精度を調べた。

さらに、眼電位や最近安価になって利用されつつある高速カメラによる視線検出以外に、注目される技術としては、定常状態視覚誘発電位(SSVEP)がある。SSVEPは、ヒトが特定周波数で点滅する視覚刺激を注視する、もしくは注意を向けるだけで、脳波における特定周波数成分の振幅が増大するという現象である。SSVEPは、BMIで用いられる他の一過性の脳波成分(たとえばP300)などと比較すると、眼球運動、体の動きなどのノイズに対して耐性があることが知られており、安定的に観測できる。

これら、眼電位と定常状態視覚誘発電位を使ったデバイスの開発のための、基礎研究とデバイスのプロトタイプを提示するのが本研究の目的である。

[研究の内容、成果]

1. 眼電位操作の基礎技術

眼球運動時に生じる眼電位を計測する実験手続きとして、図1にあるように電極を目の周りに配置し、図2に示すような実験パラダイムにて視線運動を教示する。視線移動条件は、画面中央を含む9方向とし、それに加え、左右のウ

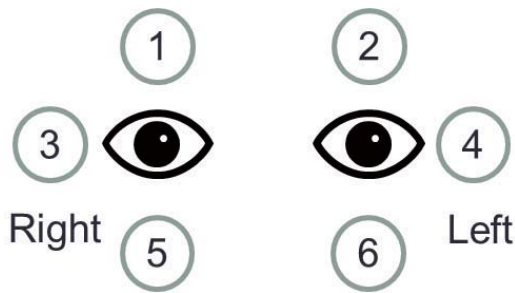


図1 電極配置

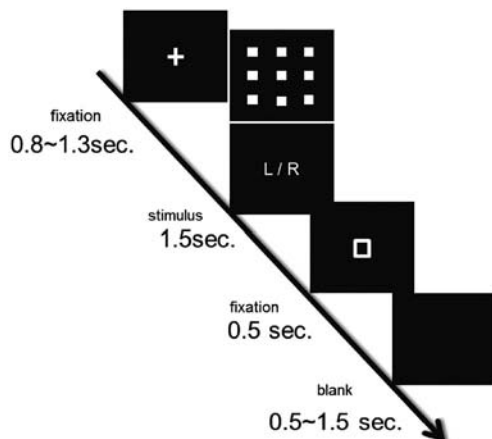


図2 実験パラダイム

インク 2 条件も教示し、計測する。実験条件にウイंकを加えたのは、ユーザをサポートするインターフェースが一方的に視線運動を追従し、判別するだけでなく、判別をユーザにフィードバックし、ユーザ自身が決定を行える機能を持たせることを可能にするためである。これら

11 条件は、条件毎に 30 試行ずつ行い、それらはランダムな順序で提示された。固視点が提示される画面中心から、呈示されたマーカの位置へ視線移動を行う、あるいは、呈示された側の目のウイंकを行うことを繰り返した。なお、実験の途中に、必要に応じ、休憩のための 3 分程度のインターバルを 1 度設けた。参加者は 6 名で、いずれの被験者も眼鏡等で補正された正常な視覚能力であることを確認した。各被験者は計測を行う前に、各条件 3 試行程度の練習を行い、十分に実験の目的と、視線運動の方法を理解してもらった。

実験によって得られた眼電位計測データより、図 3, 4 に示す、課題遂行中の視線運動時の眼電位の時間推移が得られた。図 3, 4 に示す結果は、視線運動前の画面中央固視時の平均電位を基準とし、被験者全体で平均した、各条件時の、各電極位置における変化をプロットしたものである。これによって、電極の配置位置と、視線運動方向によって、眼電位の時間変化が確認できた。目尻側に配置された電極から観測される眼電位は、眼球運動の水平方向を、目の下部に配置した電極から観測される眼電位は、垂直方向への移動を反映して眼電位が生じていることが結果からわかる。また、目の上部に配置した電極は、まばたきやウイंकのようなまぶたの開閉に応じた眼電位が生じやすいことがわ

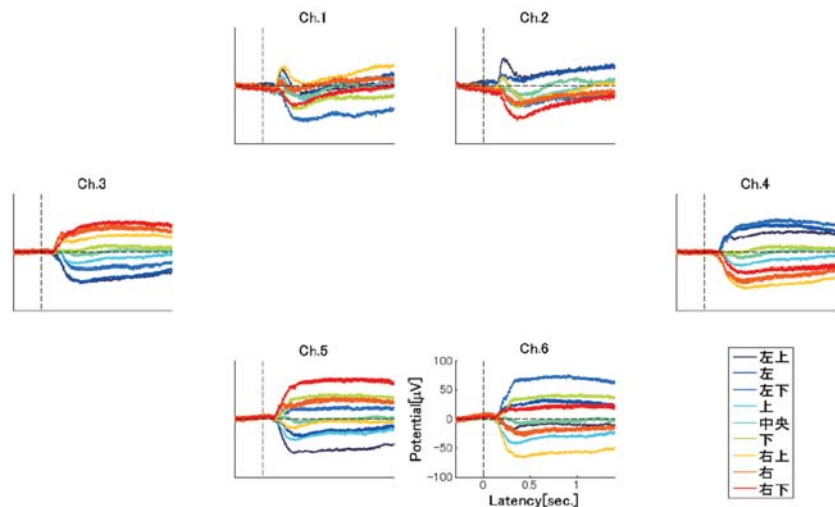


図3 視線移動時の各電極の眼電位

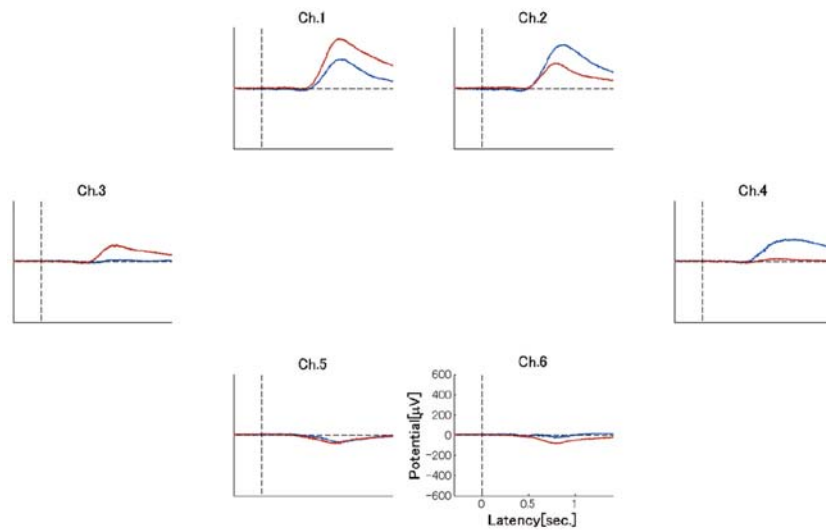


図4 ウィンク時の各電極の眼電位

かる。特に、視線運動を教示した後、0.5秒付近から1.0秒までの眼電位変化が各視線運動方向とウィンクの条件でそれぞれ差が生じていることも確認できる。そこで、刺激呈示後0.5秒から1.0秒までの0.5秒の時間窓の眼電位を平均した、被験者毎に全電極の電位データを利用し、k近傍法(k=10)による判別分析を用いたLOOCV(Leave-One-Out Cross Validation)を行うことで、視線運動の判別精度を求めた。視線運動方向9方向及び左右ウィンクの11条件を判別した結果を表1に示す。判別結果は条件数11のチャンスレベルである、0.09を大きく上回る精度で判別できた。また、視線運動方向では眼電位変動が生じにくい目の上部に配置した2電極を除いた、視線運動方向に応じた顕著に電位が生じると推察される両目の目尻側と目の下部に配置した4電極のみ用いて同様に判別精度を求めたところ、精度が向上した。これにより、視線運動方向の判別には4電極のみで十分であることがわかる。

なお、条件を緩め、上下左右4方向の運動方

向のみを判別する場合、4電極のみの電位を用いて行った判別の精度は8割から9割強となり、非常に高いものとなった。

以上の結果をまとめると、視線運動方向を計測した眼電位からチャンスレベルを大きく上回る精度で判別することができた。なおかつ、少ない試行数の教師データで、高精度で判別できたことから、被験者毎にキャリブレーションすることは、カメラデバイスを用いる眼球運動計測装置を用いたインターフェースより容易であり、試行数を増やすことで、より安定し、判別が高精度で行えることが期待できる。

2. SSVEPによる複数物体追跡

11名(平均年齢23歳)が被験者として実験に参加した。本研究は、静かな環境のシールドルームで行われ、VSG2/5(Cambridge Research System製)によって刺激を制御し、19インチのCRTモニター(800×600 pixels; refresh rate: 120 Hz)を用いて刺激を呈示した。実験パラダイムを図5に示す。刺激は四角(Square)、ひし形(Diamond)、丸(Circle)の3つの形を使用した。四角が12 Hz、ひし形が13.33 Hz、丸が15 Hzの周波数で明滅し、それぞれが時計回りに回転する。被験者は四角単体、ひし形単体、丸単体の単体注視条件と、四角と

表1 判別精度

	被害者1	被害者2	被害者3	被害者4	被害者5	被害者6
11条件 6ch	0.6576	0.6909	0.7515	0.7970	0.5909	0.4939
11条件 4ch	0.6909	0.7545	0.7970	0.8364	0.6364	0.5576
上下左右 4条件 4ch	0.8833	0.9167	0.9417	0.9333	0.8917	0.7917

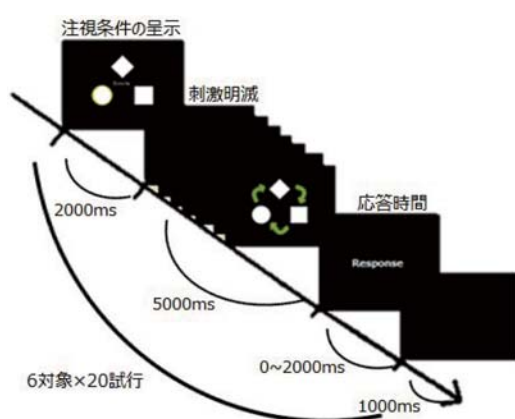


図5 実験パラダイム

ひし形、四角と丸、ひし形と丸の複数注視条件、計6つの注視条件のいずれかを注視してもらう。注視条件を図4に示す。これらの注視条件を各20トライアルずつ行うため計120トライアル行った。全トライアルを4つのセッションに分け、ランダムな順番で各注視条件のトライアルを行った。刺激は、ディスプレイ上の中央に視野角 $7.32^\circ \times 7.32^\circ$ 、被験者から60 cm離れた黒の背景上に呈示された。各セッションの始まりに画面中央に固視点 ($0.3^\circ \times 0.3^\circ$) が5000 ms呈示され、その後に画面中央に固視点が表示され、四角、ひし形、丸が5000 ms明滅し、それぞれが時計回りに回転する。各トライアルは、タスク呈示が2000 ms、刺激呈示が5000 ms、応答時間が0~2000 ms、刺激間時間間隔 (ISI: Inter Stimulus Interval) が1000 msの順に呈示された。刺激の大きさはそれぞれ100ピクセルで、画面中心から100ピクセルの距離で描画されている。また、各セッションの初めに、実験タスクとは別にコントロールタスクとして、移動物体に注視していない場合の脳波を取得するために、回転物体呈示中に画面中央を5000 ms注視するように教示した。

また、被験者が指示された条件を注視していたかを確認するため、注視条件の刺激の色が変わった回数をカウントするタスクを与えた。複数注視条件の場合は注視していた刺激の色の変わった回数の合計数をカウントさせた。脳波計

測には64チャンネルのActive Two (Biosemi製)を用いた。計測された脳波データに対して、1~90 Hzのバンドパスフィルタをかけ、注視条件ごとにデータを分類し、脳波データに含まれるアーチファクトを除去した後、コントロール条件の脳波との差を求めた。手順としては、後頭電極 (PO7, PO3, POz, PO4, PO8, O1, Oz, O2, Iz) のSSVEPパワースペクトルを求め、コントロールタスクで計測した脳波を周波数変換し、加算平均したものとSSVEPパワースペクトルの差を求めた。この時、SSVEP振幅の大きさは被験者、試行毎に異なると考え、被験者毎、また試行ごとに11.8~15.2 Hz間のパワーの最大値で全周波数帯のパワーを割って正規化した。また、CCAによりSSVEPから試行ごとに相関係数を導出後、大小関係によって注視条件を判別し、判別率を導出した。色カウントタスクが不正解だった試行は解析から除外した。

図6に複数注視条件の被験者平均のSSVEPのパワーを示す。各注視条件に対応した周波数帯で高い振幅が見られ、各周波数帯で注視した2条件は有意にパワーが大きいことを確認した ($p < 0.05$)。また、CCAによる判別率は、12および13.33 Hzを注視していた条件で60%、12および15 Hzが52%、13.33および15 Hzが50%であり、チャンスレベル (33.3%) より有意に高いことを確認した。これらの結果から、SSVEPにより3つの移動対象の中から2つの

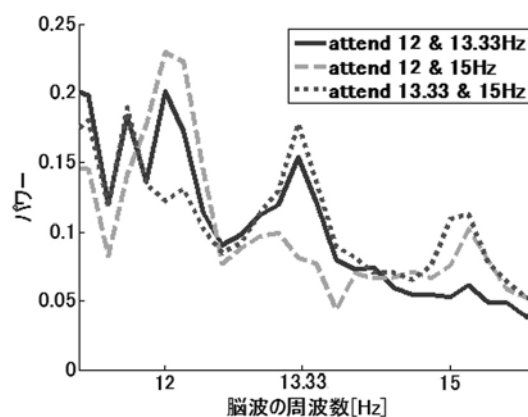


図6 複数注視条件のSSVEPパワー

対象についても追跡可能である可能性が示唆された。

複数注視条件における被験者毎の判別率を導出し、平均した結果は次のようになった。12 および 13.33 Hz を注視していた条件で 59.74%, 12 および 15 Hz が 52.07%, 13.33 および 15 Hz が 49.62% であり、単体注視条件ほど高い判別率とはならなかった。しかし、12 および 13.33 Hz を注視していた条件はチャンスレベルと比べ、有意な差があり ($p < 0.001$)、また 12 および 15 Hz を注視していた条件もチャンスレベルと比べ、有意な差があった ($p < 0.05$)。最後に 13.33 および 15 Hz を注視していた条件もチャンスレベルと比べ、有意な差があった ($p < 0.01$)。この結果から、SSVEP により複数の移動対象の中から 2 つの対象の注視状態を抽出できたと考える。

[今後の研究の方向、課題]

本研究によって、眼電位を用いて視線運動方向が高精度で判別できた。また、本来の視線運

動によって生じた電位と突発的なノイズをより正確に区別することが、リアルタイムで判別する際重要になるため、より適切な信号処理を行うことが課題として挙げられる。

今後は、眼電位と SSVEP との組み合わせによって、より精度を高めるとともに、視線位置だけでは特定できない被験者の注視している対象を推定していきたい。実際に視線を移動することなく注意を向けるだけで SSVEP の振幅が変調するので、新しい入力デバイスとして同様に着目されている高速カメラを使った眼球運動計測による視線入力デバイスではとらえきれない現象を SSVEP は捉えることができると考えられる。そのために、視線入力と SSVEP によるハイブリッド入力デバイスなどの展開も期待できる。

[成果の発表、論文等]

新海崇紘, 南 哲人, 中内茂樹, 定常状態視覚誘発電位による複数移動対象の追跡, 第 37 回日本神経科学大会 (Neuroscience2014) (発表予定)

ロボットアバターを制御する脳波コミュニケーション技術の開発

Development of an EEG-Based communication system to control a robot avatar

2021Q01



研究代表者

(独)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
ニューロテクノロジー研究グループ

研究グループ長

長谷川 良 平

[研究の目的]

近年、脳と機械を直結するBMI（ブレイン・マシン インターフェース）、特に脳波による意思伝達技術が注目されている。研究代表者は、モデル動物を対象とした意思決定の脳内機構に関する基礎的研究（Hasegawa et al. Science 2000; Hasegawa et al. Neuron 2004 等）の成果に基づき、脳内意思を解読する手法など応用研究（Hasegawa et al. Neural Networks 2006, 2009 等）を進めてきた。そして、2010年3月、それらの研究成果をもとに、脳波解読によって選ばれたメッセージをCGキャラクターのアバターに表出させる意思伝達装置「ニューロコミュニケーション」試作機第1号の開発に成功した（図1）。この装置は、進行性神経難病や脳卒中の後遺症によって話したり、書いたりすることが困難な重度運動機能障がい者のコミュニ

ケーションを支援する装置として実用化開発が続けられている（長谷川 電通会誌 2012）。一方、これまでのニューロコミュニケーターの開発では、小型無線脳波計の開発や脳波解読技術の性能向上などが主要テーマであり、ユーザビリティに対する配慮が少なかった。そこで本研究では「人が快適に使える脳波コミュニケーション技術」の開発を目的として「ユーザーに身体的・精神的負担の少ないような脳波計測装置」と「楽しくかつ臨場感のあるコミュニケーション場面を演出するアバターロボット」という2つの要素技術の開発に取り組んだ。

[研究の内容、成果]

本研究では、以下の2つのサブテーマに関して研究開発を行った。

サブテーマ①：「カチューシャ型ヘッドギアの開発」……一般に、頭皮上脳波を安定して計測するためには複数の電極群を、目標とする頭部位置に密着させる必要がある（本研究では8個の電極を頭頂部に配置）。そのために、ニューロコミュニケーターではヘッドギアの左右に取り付けた固めのゴムひもをあごで固定する方式によって、電極と頭皮との密着度を高めてきた。しかし、そのような状況で長時間装置を使用し続けると、頭部やあごや首への圧迫感によって、快適性が損なわれるという問題があった。そこで、あごひもを使わなくてもヘッドギアを頭部

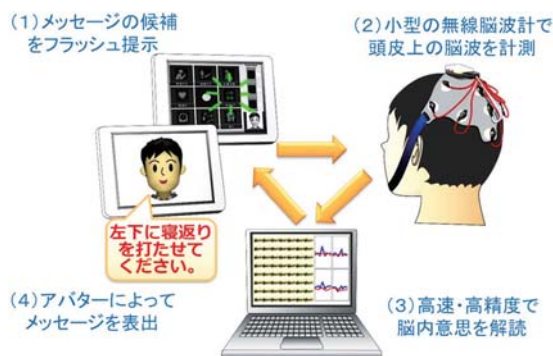


図1 脳波による意思伝達装置「ニューロコミュニケーター」

に固定させるアイデアとして、頬で挟むカチューシャのような構造のヘッドギアの開発を行った。具体的には、3D-CAD 及び 3D-CG ソフトウェアによって頭部形状にフィットするカチューシャ型のヘッドギアをデザインし、3D プリンターを用いて当該ヘッドギア（ABS 樹脂製）を作成した。次に、作成したヘッドギアを実際に数人がかぶってみて、形状が適切でないために装着時の違和感が感じられる構造を検出し、CG データで修正を行った。また、ケーブル等が剥き出しにならないようなカバーも追加し、最終的な試作品を切削加工（外注）によって作成した（図2）。このヘッドギアを用いて脳波計測を試みたところ、これまでのシス

テム同様、高品質の脳波計測を行えることが確かめられた。また、予備調査にて数名の被験者に対してかぶり心地の感想を求めたところ、従来型のあごひも方式に比べてカチューシャ式の方が、より快適に脳波計測が得られるとの回答を得た。

サブテーマ②：「アバターロボット制御システムの開発」……研究開発用として定評のある市販の多関節ヒト型ロボット（近藤科学製 KHR-3HV、専用制御パソコンとともに購入）に対し、まずは USB カメラの搭載や外観の改造を行った。次にロボット内蔵の基盤を介した無線 LAN によるロボット操作とカメラ画像の取得

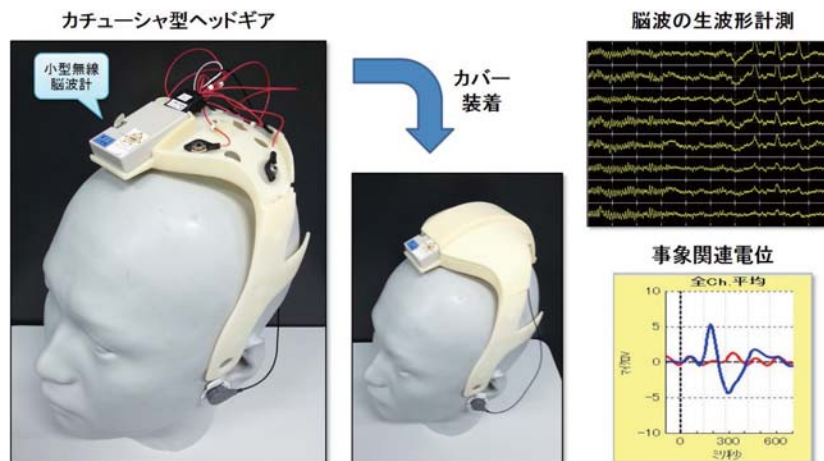


図2 新規に開発したカチューシャ型ヘッドギアによる脳波計測

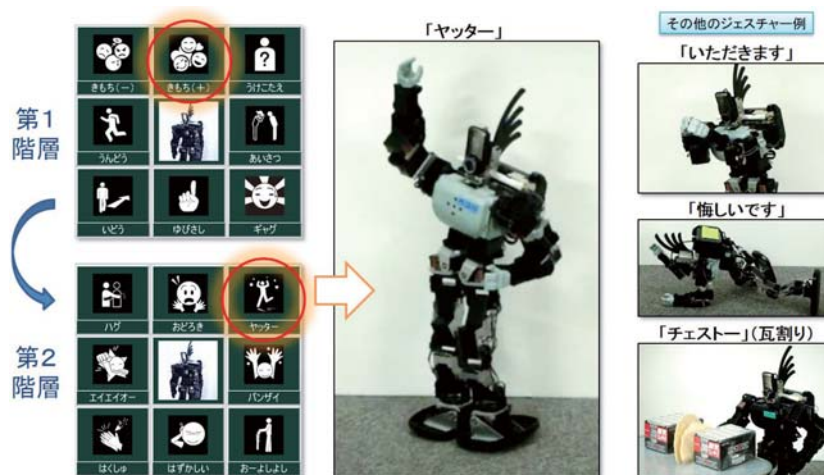


図3 ジェスチャーデータベースを用いたアバターロボット制御

が可能なインターフェースを開発した。さらにロボット動作（ジェスチャー）のレパートリーを64種類選別し、それらの動作を基盤上マイコンへ登録した。一方、実験制御プログラムにおいても選別された動作レパートリーのイラストを2階層のデータベース（ $8 \times 8 = 64$ ）として登録した（図3）。このデータベースをニューロコミュニケーターのメインのシステムに組み込むことによって、脳波によるアバターロボットの遠隔制御を可能とした（ただし現状ではロボットの仕様上の制約から一度に選択できるジェスチャー数が32種類に限定されている）。

〔今後の研究の方向、課題〕

本研究期間において、「快適な脳波計測が可能なカチューシャ型ヘッドギア」と「効率よく多数のジェスチャーを表出することができるアバターロボット制御システム」という2つの革新的技術の試作開発に成功することができた。本研究の成果は、重度運動機能障がい者の「生活の質」向上や、未だ謎の多い高次脳機能の解明、さらには新しいロボット活用法の開拓にもつながると考えられる。今後の研究開発の方向性としては、（試作開発に多くの時間を使ってしまった）カチューシャ型ヘッドギアの性能（脳波解読精度等）及びユーザービリティ（快適度に関するアンケート）に関して、多数の被験者を対象とした実証実験を実施することである。また、アバターロボットに関しては、現在、全64動作を同時登録できる別のロボット（KHR-3HVと異なり、手首の関節も動かせるデアゴスティーニ・ジャパン製ロボゼロ）に同様の技術を移植中であり、新型のアバターロボットを用いてジェスチャー生成の効率の良さを他の操作法と比較したり、メッセージ伝達の臨場感の程度をCGアバターと比較したりする実験を実施したいと考えている。

以上、本研究では「脳波解読」と「ロボット制御」という2分野における最先端技術の融合

に挑戦し、様々な成果と新しい課題を得ることができた。

〔成果の発表、論文等〕

●査読論文

- ・南哲人, 井上康之, 長谷川良平:「ニューロコミュニケーターにおける性能向上の試み～感性を考慮したブレインマシンインターフェースの開発～」日本感性工学会論文誌, vol. 11 (4): p 509～518, 2012年
- ・中山優季, 松田千春, 小倉朗子, 原口道子, 望月葉子, 中村美子, 長谷川良平:「重度運動障がい者における脳波計測による意思伝達装置「ニューロコミュニケーター」を用いた意思伝達の有用性と看護支援に関する研究」日本難病看護学会誌, vol. 17 (3) p 187～204, 2013年

●査読付き学会発表

- ・中村美子, 長谷川良平:「脳波インターフェース技術を用いた認知機能評価システムの開発」SATテクノロジー・ショーケース 2014 (2014/01/24, つくば)
- ・中村美子, 長谷川良平:「ニューロコミュニケーター 2.0—カスタムメイドのヘッドギアを用いた実用的 BMI システム」第36回日本神経科学大会 (2013/06/20, 京都)
- ・長谷川良平, 工藤泰彦:「脳波による意思伝達装置「ニューロコミュニケーター」の実用化開発」SATテクノロジー・ショーケース 2013 (2013/01/22, つくば)→「ベスト産業実用化賞」受賞

●招待講演

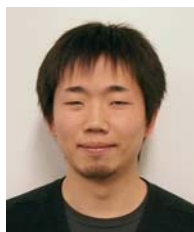
- ・長谷川良平:「脳波コミュニケーション技術の開発における脳科学と心理学の融合」日本基礎心理学会第32回大会 (2013/12/08, 金沢)
- ・長谷川良平:「事象関連電位のパターン識別による脳内意思解読手法の開発と意思伝達支援への応用」統計数理研究所研究会 (2013/12/06, 立川)
- ・長谷川良平:「脳波でひろがる心の世界、脳波でつながる心と社会」日経エデュケーションチャレンジ 2013 in つくば (2013/08/20, つくば)
- ・長谷川良平:「新市場を切り拓く脳波イノベーション技術の基礎と応用」日本技術情報センター主催セミナー (2013/07/24, 東京)
- ・長谷川良平:「ALS患者におけるコミュニケーション戦略: BMIの現状と展望」第54回日本神経学会学術大会 (2013/06/01, 東京)
- ・長谷川良平:「ニューロコミュニケーターにおけるブレイン・マシン・インターフェース技術の概要・開発動向と適用例及び今後の展開」日本技術情報センター主催セミナー「非侵襲型ブレイン・マシン・インターフェース技術の概要・開発動向と適用例」

- (2013/05/29, 東京)
- ・ 長谷川良平：「脳情報の解読と活用のためのモバイル BMI 装置の開発」第 12 回産総研・産技連 LS-BT 合同研究発表会シンポジウム：「Neuro-Aided Design：脳活動計測が支援するプロダクト & サービスデザイン」(2013/2/5, つくば)
 - ・ 長谷川良平：「脳波による意思伝達装置の開発とその臨床/産業応用」平成 24 年度産総研関西センター本格研究ワークショップ (2012/12/18, 大阪)
 - ・ 長谷川良平：「脳波 BMI 技術を用いた意思伝達装置の開発」平成 24 年度日本生体医工学会北陸支部大会 (2012/12/01, 福井)
 - ・ 長谷川良平：「教育講演：脳波 BMI 技術の臨床応用～意思伝達支援から認知機能評価まで～」第 42 回日本臨床神経生理学会学術大会 (2012/11/09, 東京)
 - ・ 長谷川良平：「脳波コミュニケーション時代の到来～意思伝達支援からマーケティングまで～」日経エレクトロニクスセミナー (2012/11/07, 東京)
- 総説
- ・ 長谷川良平：「ALS 患者におけるコミュニケーション戦略：BMI の現状と展望」臨床神経学, 53(11)：1402-1404, 2013
 - ・ 長谷川良平：「脳波 BMI によるアバター制御システムの開発」研究開発リーダー (技術情報協会) 10 (2)：10-13, 2013
 - ・ 中村美子, 長谷川良平：「脳波計測による意思伝達装置「ニューロコミュニケーター」の開発」東京都作業療法士会ニュース 2013 年 5 月号 (東京都作業療法士会)
 - ・ 長谷川良平：「ブレイン-マシン インターフェース技術による意思伝達支援技術の開発」ファルマシア (日本薬学会誌), 48(12)：1153-1157, 2012
 - ・ 長谷川良平：「生活支援に向けたブレイン-マシン インターフェース (BMI) 技術の開発」整形・災害外科, 55(11)：1441-1446, 2012
 - ・ 長谷川良平：「脳波 BMI 技術を用いた実用的意思伝達システム」電子情報通信学会誌, 95 (9)：834-839, 2012
- 著書
- ・ 共著書 (長谷川良平ほか)：『福祉技術ハンドブックー健康な暮らしを支えるためにー』(朝倉書店) 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編 (2013/10/20)
 - ・ 共著書 (長谷川良平ほか)：『UX 設計技術パイプ
- ル 画像認識や音声認識, BMI, ゲーミフィケーションまで』(日経 BP 社) 日経エレクトロニクス編 (2013/03/29)
- 知財出願
- ・ 意 願 2012-008367 (⇒登 録 1456882@H24/11/02) 「脳波測定用電極」
 - ・ 特許出願：特願 2014-010509 「認知機能評価装置, 方法, システム及びプログラム」
- 各種メディア報道
- 〈テレビ放送〉
- ・ 2014 年 5 月 25 日放送 TBS (夢の扉+) 「ニューロコミュニケーターの開発について」
 - ・ 2013 年 2 月 28 日放送 TBS (アカデミーナイト)
 - ・ 2012 年 4 月 19 日放送 BS ジャパン (「地球★アステク」の約 30 分間の特集)
- 〈新聞〉
- ・ 2013 年 12 月 13 日掲載 日経産業新聞 (先端技術「テクノトレンド」)
 - ・ 2013 年 1 月 2 日掲載 日本経済新聞 (デジタル版「近未来ワールド 2013」)
 - ・ 2013 年 1 月 1 日掲載 産経新聞 (別冊特集「脳ロボット医療福祉に革命」)
 - ・ 2013 年 1 月 1 日掲載 読売新聞 (茨城県版「未来ナビ」)
 - ・ 2012 年 4 月 16 日掲載 朝日新聞 (夕刊「商業化する脳」シリーズ)
- 〈雑誌〉
- ・ 2014 年 6 月 13 日発刊 ロボコンマガジン 2014 年 7 月号 (BMI で大きく変わるロボットの世界)
 - ・ 2013 年 10 月 25 日発刊 日経サイエンス 2013 年 12 月号 (Front Runner 挑む)
 - ・ 2012 年 11 月 24 日発刊 Big tomorrow (できたらすごい夢の技術)
 - ・ 2012 年 9 月 4 日発刊 朝日ジュニアシリーズ週刊マンガ世界の偉人『本田宗一郎』(これぞ日本の技術力)
 - ・ 2012 年 8 月 6 日発刊 R25 特別号 (Challeng11)
- イベント出典
- ・ 「イノベーションキャンパス in つくば 2014：未来貢献プロジェクト」(2014 年 8 月 11～13 日開催) の第 1 部 選択講義 F コース 2 限目「科学でテレパシーを実現!? ～脳波で気持ちを伝える装置の開発～」及び, 第 2 部 課題解決型サイエンスツアー (研究機関の訪問) を担当。
- <http://www.yomiuri.co.jp/project/mirai/education/>

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

Heart beat extraction algorithm for wearable biosignal monitoring systems

2031003



研究代表者

神戸大学自然科学系先端融合研究環
重点研究部

助 教

和 泉 慎太郎

[研究の目的]

近年、世界的な社会の高齢化に伴い、モバイル機器やウェアラブル機器を利用したヘルスケアが注目されている。家庭での日常的な生体情報の計測によって、その情報を活用した生活習慣の改善や病気の予防が可能となり、クオリティ・オブ・ライフの維持・向上が期待される。本研究では、特に心拍・心電を計測するためのウェアラブルな貼り付け型生体センサの実現を目的としている。

本研究の意義は、生体センサの実用化に向けた低消費電力化・小型化・軽量化・低コスト化によるユーザビリティの向上である。生体センサが広く普及すれば、家庭環境における数多くの実測データが得られ、これを活用した新たな知見の発見も期待できる。

そこで本研究では、貼り付け型センサを小型化・軽量化・低コスト化するための、低消費電力かつロバストな心拍抽出アルゴリズムの開発を目標とした。

[研究の内容, 成果]

1. 従来技術の課題

バッテリーはセンサ全体の重量に対して支配的であり、消費電力削減によるバッテリー容量の削減が必要である。また、小型化のためには生体に貼り付ける電極の大きさや電極間距離が課題

となる。ユーザビリティを向上させるためには乾燥電極の使用も考慮しなければならない。しかし、消費電力や電極の性能は、計測される信号の SNR (信号対雑音比) とトレードオフの関係にある。

従来は SNR の劣化に対処するために、センサフロントエンドのアナログ回路の性能を向上させることが一般的であった。しかしアナログ回路はシステム全体の消費電力に対して支配的であり、消費電力が限られている状況下で性能を向上させることは困難である。そこで本研究では AD 変換後に自己相関法を応用したデジタル信号処理によって SNR の低い信号から心拍の抽出を行う手法を提案した。

心拍抽出の高精度化を目的としたアルゴリズムは多数提案されているが、その殆どは何らかのしきい値を設定して心電波形における R 波や QRS 群を検出するものである。この方法の弱点は SNR が低い状況下で筋電混入や電極起因のノイズによる誤判定が増加する点にある(図 1)。また、ドップラー効果等を利用した非侵襲式の心拍計測装置向けに自己相関法を用いる手法が提案されているが、そこでは数十秒間の波形を用いて平均心拍を求めることが目的であり、精度と計算量に課題がある。また、ベースライン変動や同相雑音の削減を目的とした回路技術も提案されているが、消費電力が課題となっている。

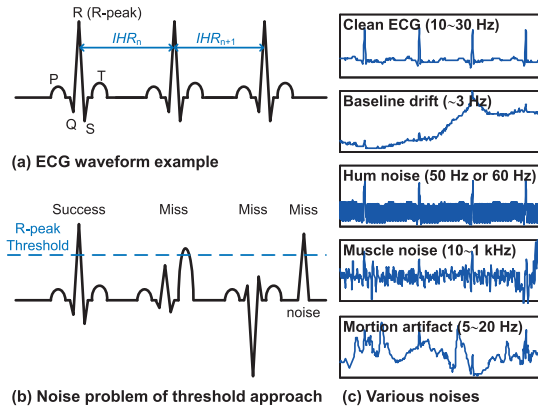


図1 心電図とノイズ

2. 提案手法

提案手法はフィルタ処理, 自己相関によるQRS群の抽出, 抽出されたQRS群を用いたテンプレートマッチングという3つの処理で構成されている(図2)。提案手法の新規性は, SNRの低い心電図から自動的かつロバストにテンプレートを生成する点にある。

まず, 従来のしきい値手法で用いられている離散ウェーブレット変換(DWT: Discrete Wavelet Transform)や連続ウェーブレット変換(CWT: Continuous Wavelet Transform)といったデジタルフィルタを用いて帯域外のノイズを除去する。前述したとおり, 筋電混入等の心電図と同じ周波数帯域に含まれるノイズを除去することが難しい。

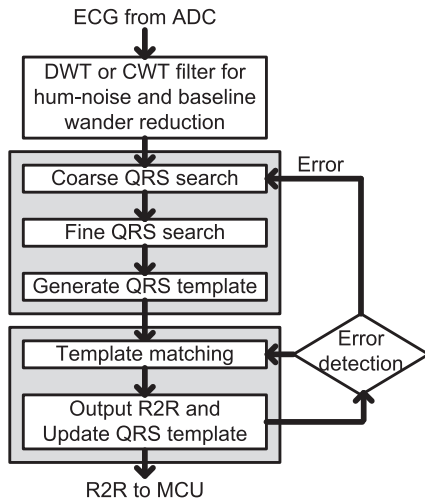


図2 提案手法の処理概要

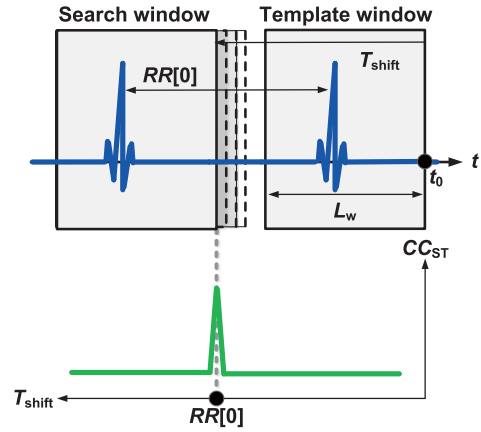


図3 自己相関法による心拍間隔の抽出(第一段階)

次に, フィルタ出力に対して自己相関を計算し, QRS群を抽出する。図3に示したように, ある評価時刻 t_n において, その直前の心拍間隔は式(1-4)のようにテンプレートウィンドウとサーチウィンドウの自己相関係数 CC_{STn} を最大にするウィンドウシフト幅 T_{shift} から計算される。

$$CC_{STn}[T_{shift}] = w_1 \cdot \sum_{i=0}^{L_w-1} Q_w[t_n - i] \cdot Q_w[(t_n - T_{shift}) - i] \quad (1)$$

$$RR[n] = \arg_{0.25 \times F_s \leq T_{shift} \leq 1.5 \times F_s} \max \{CC_{STn}[T_{shift}]\} \quad (2)$$

$$L_w = 1.5 \times F_s \quad (3)$$

$$w_1 = \begin{cases} 1 & (T_{shift} \leq 0.546 \times F_s) \\ 0.75 & (0.546 \times F_s < T_{shift} \leq 0.983 \times F_s) \\ 0.5 & (0.983 \times F_s < T_{shift}) \end{cases} \quad (4)$$

ここで, Q_w はフィルタ出力, F_s はサンプリングレートである。 L_w はテンプレートウィンドウとサーチウィンドウの長さであり, 1.5秒に設定した。 w_1 は直近のQRS群を強調するための重み係数である。

しかし, 上記の計算では心拍間隔を求めることはできるが, 1.5秒分のウィンドウ内のどの部分にQRS群が含まれているかを判定することが出来ない。そこで図4に示すように, より

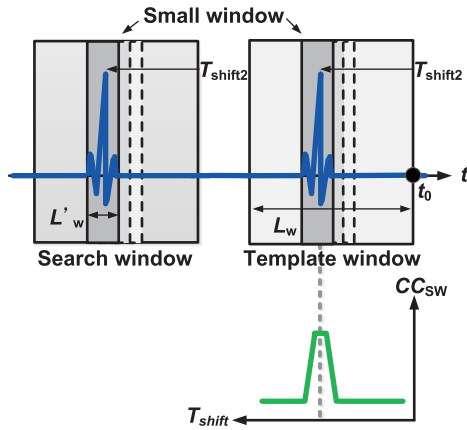


図4 自己相関法によるQRS群の抽出（第二段階）

小さなウィンドウを用いた第二段階の自己相関によりQRS群を特定する。第一段階の心拍間隔の計算が成功していれば、テンプレートウィンドウと T_{shift} 離れたサーチウィンドウには、どちらもウィンドウ端から同じ長さだけ離れた位置にQRS群を含んでいることになる。従って、ウィンドウ端から小さなウィンドウを同じ長さだけシフトさせながら相関係数が最大になるシフト幅を求めれば、QRS群の位置が特定される。このときウィンドウサイズはQRS群の長さを考え100 msに設定した。

最後に、第二段階の自己相関で抽出されたQRS群を用いたテンプレートマッチングを行う（図5）。テンプレートマッチングの計算は第二段階とほぼ同様の計算であり、ハードウェア実装では演算回路とシーケンサを共通化することで電力が削減される。また、QRS群を発見する毎にテンプレートを更新することで、よりノイズ耐性を向上させることができる。

テンプレートマッチングでは走査範囲内（前回のQRS群から心拍間隔 $\times 1.5$ 倍の時刻まで）の相関係数の最大値からQRS群を特定するが、このときノイズの影響でQRS群を見落とす等のエラーが発生した場合、相関係数の最大値が急激に減少する。そこで、走査範囲内の相関係数の最大値が、一つ前のQRS群を求めた時の最大値の2分の1より小さければエラーとして判定する。エラーが発生した場合は第一段階の

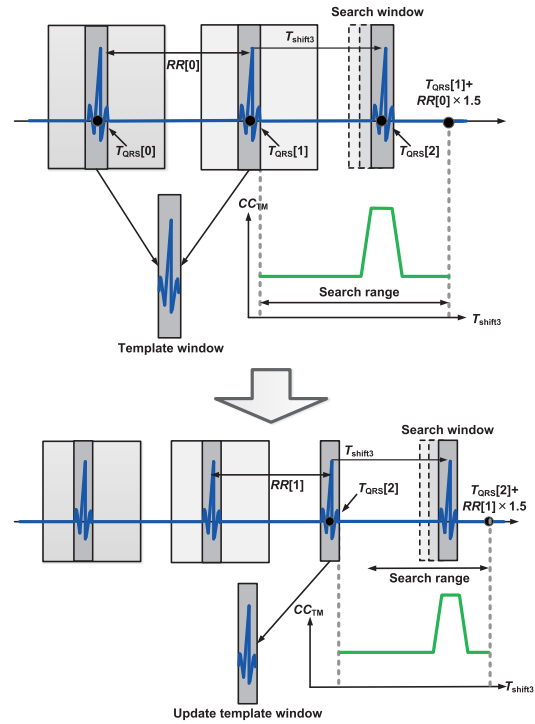


図5 テンプレートマッチング

自己相関計算に戻ってテンプレートの生成からやり直し、自律的に復帰する。

3. 性能評価

MATLABを用いて提案手法を実装し、公開心電図データベースMIT-BIHによってノイズ耐性の評価を行った。レコード#100の心電図波形に対するQRS群抽出の感度（Sensitivity； Se ）と精度（Positive predictively； $+P$ ）及びエラー率（Error rate； ER ）を図6から図8に示す。フィルタとしてDWTとCWTを実装し、QRS群の検出に従来のしきい値判定を用いた場合（図中のDWTとCWT）、及び提案手法を用いた場合（図中のDWT/w prop.とCWT/w prop.）の4手法を比較した。 Se と $+P$ 及び

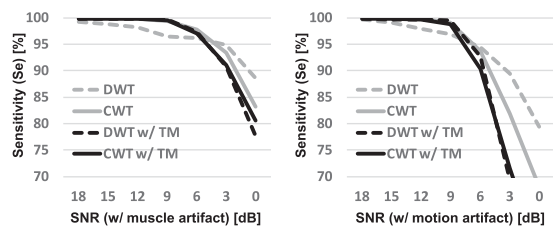


図6 ノイズストレステスト（Sensitivity）

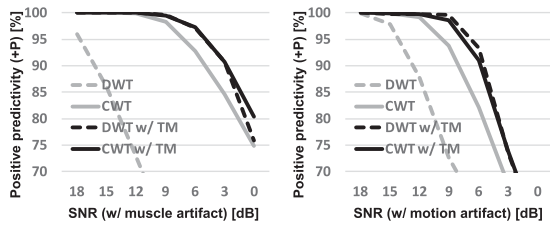


図7 ノイズストレステスト (Positive predictivity)

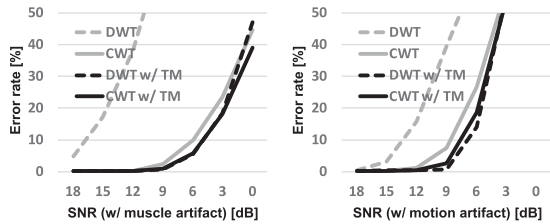


図8 ノイズストレステスト (Error rate [%])

ER の定義はそれぞれ, $Se = TP / (TP + FN)$, $+P = TP / (TP + FP)$, $ER = (FP + FN) / (TP + FN)$ である。ここで TP (true positive) は正しく検出された QRS 群の数, FN (false negative) は検出できなかった QRS 群の数, FP (false positive) は QRS 群ではないものを誤検出した数である。

シミュレーション結果から, Se には手法間の差が少ないのに対し, $+P$ では提案手法を組み合わせたものがどちらも高いノイズ耐性を示している。これは SNR が低い領域で提案手法によって誤検出が削減されたことを示しており, ER の結果もそれを示している。しきい値判定を用いた場合は DWT の精度が悪化するのに対して, 提案手法を組み合わせた場合は DWT と CWT の間に差があまり見られないのは興味深い結果である。CWT は DWT と比較して計算量が多いため, ノイズ耐性が同じであれば低消費電力化のために DWT を採用することができる。

最後に, 提案手法と DWT を組み合わせた処理をハードウェア記述言語 Verilog RTL を用いてデジタル回路として実装し, 130 nm プロセスで試作した LSI によって消費電力を評価した。電源電圧 1.2 V, サンプルングレート 128 Hz, 8 bit 精度の条件下で, 消費電力は論

理回路とメモリが $0.7 \mu A$, AD 変換器が $0.23 \mu A$, 増幅器等アナログ回路が $3.3 \mu A$ であり, 全体で $5 \mu A$ 以下の消費電流を達成した。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究により, 日常生活における長時間の心拍抽出を $5 \mu A$ 以下の消費電流で実現する見通しを得た。しかし, ウェアラブルセンサの電源を例えば振動発電のような環境発電でまかなうことを想定した場合, 全体で $1 \mu A$ 以下の平均消費電流を目指す必要がある。

今後さらなる低消費電力化を進めていくためには, より緊密なデジタル処理とアナログ回路の協調設計が必要である。現状のアナログ回路の中で最も電力を消費しているのは増幅器とバイアス回路であるが, 既に動作下限まで電流を絞った設計を行っているため, 回路単体での低消費電力化は限界がある。そこで, 提案手法による QRS 群抽出がリアルタイムに処理できる特徴を利用し, QRS 群の含まれていない期間を予測して消費電流をアダプティブに変更できる回路の設計を進めている。また, デジタル信号処理回路部分についても低電圧化やさらなるアルゴリズム改良により現在の 3 分の 1 を目標に低消費電力化を進める予定である。

[成果の発表, 論文等]

- [1] S. Izumi, K. Yamashita, M. Nakano, T. Konishi, H. Kawaguchi, H. Kimura, et al., "A $14 \mu A$ ECG Processor with Robust Heart Rate Monitor for a Wearable Healthcare System," Proceedings of IEEE European Solid-State Circuits Research Conference (ESSCIRC), pp. 145–148, Sep. 2013.
- [2] S. Izumi, M. Nakano, K. Yamashita, T. Fujii, H. Kawaguchi, and M. Yoshimoto, "Low-power Hardware Implementation of Noise Tolerant Heart Rate Extractor for a Wearable Monitoring System," Proceedings of IEEE International Conference on BioInformatics and BioEngineering (BIBE), Nov. 2013.
- [3] Y. Nakai, S. Izumi, M. Nakano, K. Yamashita, T.

Fujii, H. Kawaguchi, and M. Yoshimoto, "Noise Tolerant Instantaneous Heart Rate and R-peak Detection Using Short-term Autocorrelation for Wearable Healthcare Systems," Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Aug. 2014. (投稿中)

[4] S. Izumi, K. Yamashita, M. Nakano, et al., " μ A Normally-Off ECG-SoC with Noise Tolerant Heart Rate Extractor for Wearable Healthcare Systems," IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS), Oct. 2014. (投稿中)

定在波レーダを利用した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

Non-contact measurement of body pose and respiration for baby with radar sensor

2031004



研究代表者 (助成金受領者)	奈良女子大学	特任准教授	梅 田 智 広
共同研究者	奈良女子大学	学 生	高 木 里 穂
共同研究者	奈良女子大学	教 授	城 和 貴
共同研究者	(株)CQ-S ネット		斎 藤 光 正

[研究の目的]

妊婦の出産年齢の高齢化に伴い早産を含めた合併症が増加している。特に未熟児の増加により脳や呼吸器系に後遺症が残る死亡するケースもしばしば起こる。このため病院側では保育器内の新生児の心電を常時測定し異常を発見し対処しているが、新生児の異常を予知するには心電だけでは十分でなく呼吸も重要である。しかし、皮膚の弱い新生児の呼吸状態を非接触で常時測定できる装置はまだ世界に無く、病院側から開発が期待されている。そこで、我々は新しい新生児に優しい非接触方式による呼吸変化の測定方式を開発し、更に機械化、装置化することにより、ナースステーションでの監視効果の劇的な向上とともに、ナースの監視負担の大幅な軽減を目指し、レーダに着目した。本報告では 24 GHz 帯の定在波レーダを用いて検討した見守りシステムおよび呼吸数計測について、その特性を報告する。

[研究の内容、成果]

1. 方 法

1.1 見守りシステムの構築

著者らが検討してきた 24 GHz 定在波レーダ

(株)CQ-S ネット, JAPAN) の照射条件を参考に条件を最適化 (中心周波数 24.15 GHz, 占有帯域幅 200 MHz, 掃引サンプル時間 1 μ s) し、新生児を対象に呼吸計測試験を行い、見守りシステムの有効性およびその特性について評価した。計測はレーダを i) 天井貼付および ii) 保育器横貼付の 2 タイプに分け、保育器内での乳児有無を条件に実施した。得られたデータは DFT 解析にて評価を行った。表 1 に計測条件、図 1 に計測時 i) および ii) の様子を示す。

なお、被験者は新生児であるため、被験者の両親を代諾者として申請書に記載された担当者が倫理委員会で承認された説明文書を提示し説明を行った上で計測を実施した。

1.2 呼吸状態および体勢変化の計測

乳児に加え、精度確認のため人 (成人) の呼吸状態の計測試験を行った。また、入室、ベッ

表 1 計測条件

	上から	横から
乳児有	実験 1-1	実験 2-1
	実験 1-2	実験 2-2
	実験 1-3	実験 2-3
	実験 1-4	実験 2-4
乳児無 (保育器のみ)	実験 3-1	実験 4-1
	実験 3-2	実験 4-2
	実験 3-3	
乳児無 (保育器なし)	実験 5-1	



i) 天井貼付



ii) 保育器横貼付

図1 計測方法

ト座位（腰掛）、着床、離床など状態毎の計測試験を行い、見守りシステムの有効性およびその特性について評価した。

2. 結果と考察

今回活用したレーダは中心周波数 24.15 GHz において ± 3.1 mm の範囲で被測定物の相対的な微小変位を測定できるものであるが、 ± 3.1 mm 以上の変位に対しては位相の不確定が存在し 1 対 1 対応は困難となる。そのため、大きな動きを伴う際には注意を要する。また、精度向上には微振動によるノイズ除去も必要となる。図2に乳児無、保育器のみの条件にて計測したデータの解析結果の1例を示す。これより、保育器のみでも微弱な低周波ノイズが入ることが分かった。他データにおいてもノイズの大きさに差があるものの同様な傾向を示した。これは今回の保育器は移動式のものでタイヤが付いていたため、周囲の機器、人の動きによる僅かな

実験3-2

レーダ（乳児無、保育器のみ）にて計測

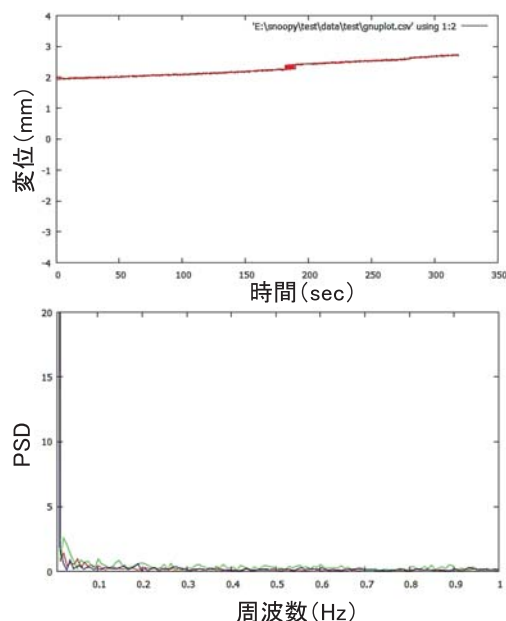


図2 乳児無、保育器のみの条件にて計測したデータの解析結果

動きにも反応し振動として計測されてしまったためと考えられた。

そこで、乳児に対し i) レーダ（天井貼付）および ii) レーダ（保育器横貼付）の条件にて計測したデータから振動による影響を除くため、安静かつノイズの少なかった時間帯を抽出し呼吸評価を行った。図3にその結果の1例を示す。これより、i) および ii) のいずれの条件においても 0.5 Hz~0.8 Hz 付近に高いスペクトルが認められた。静かに寝ている子供の呼吸による胸の動きは、幼児の場合には振幅が約 2 mm、周波数 0.3 Hz~0.8 Hz 程度であることから、ノイズが少ない条件においては乳児における呼吸トレンド評価は可能であることが分かった。また、i) と ii) においては、i) 天井貼付の方がより安定したトレンドを示し、かつ再現性においても優れることが分かった。これより、計測はより大きな反射面が得られる上部からの計測が好ましいと考えられた。

本レーダは測定対象物以外の反射物が混在する環境下においては、不要な距離スペクトルに

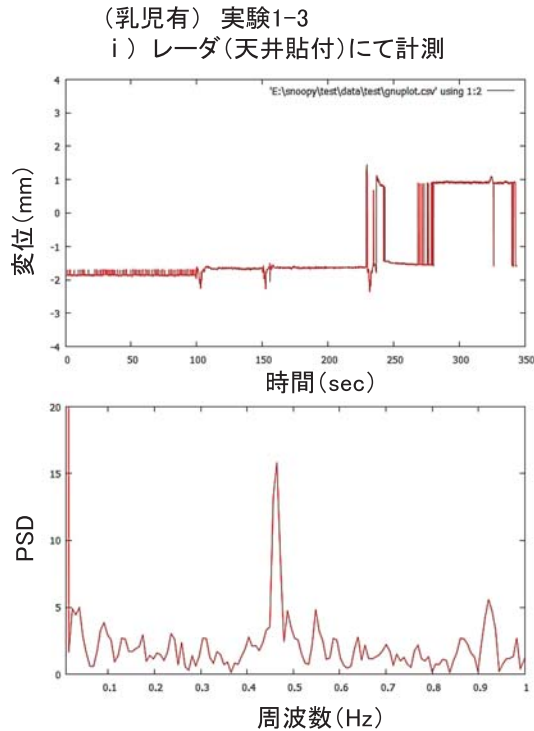


図 3a 乳児有, 保育器の条件にて計測したデータの解析結果

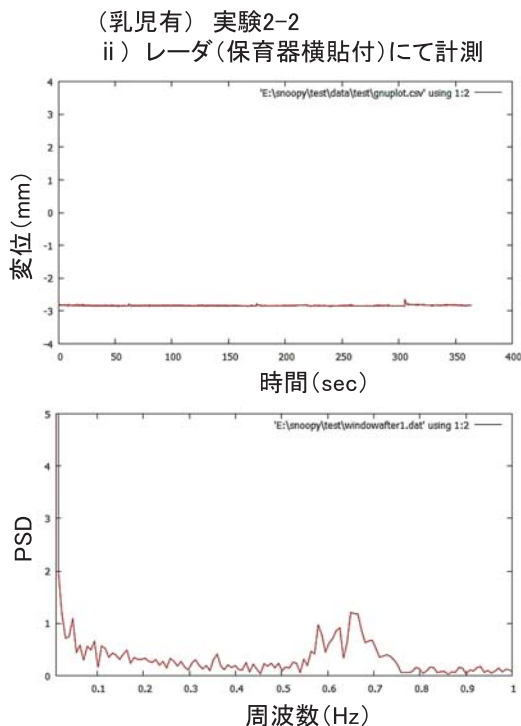


図 3b 乳児有, 保育器の条件にて計測したデータの解析結果

測定対象物のスペクトルが埋もれてしまい識別困難となる。特に、目的としている測定対象物

からの反射係数がそれ以外の反射物の反射係数に比し、小さい場合に解析精度が悪くなる。そこで、ノイズ除去および解析精度向上を目指し、対象外の距離スペクトルの除去を行う差分検出法について検討した。同データを用いて評価した結果、差分検出を行うことで反射係数が小さい場合でも測定対象物の動きが抽出できることが分かった。今後はこれら知見を評価方法に活用していく。

表2にレーダを活用した呼吸停止および体勢計測における計測誤差把握のために実施した成人を対象とした行動別誤作動率の結果を示す。呼吸および体勢変化評価試験はベットにて計13人に対し2回行った。その結果、1回目の誤作動率の結果をもとに判定条件の変更を行った2回目は誤作動率が大幅に改善され、ベット上での体勢変化および呼吸停止の判定計測においては高い計測精度が得られた。

以上の結果より、常時計測における測定精度には未だ課題は残すもの、レーダを活用した本システムの有効性は示唆された。今後、ベット上での睡眠において寝返りなど細かい動きに対しては精度の担保が課題となるが、起こり得る動きの様々な体動パターンを学習することで寝返り含め体勢変化の判断は可能になると考えられる。呼吸状態の計測においては、上記差分検出法に加え、目的対象物からのより強い反射を得るためにレーダの指向性制御が有効であると考えられた。これらを行うことで、近距離の呼吸状態の把握においても、おおよその呼吸状態、呼吸数の算出が可能になると考えられた。

3. 人体への影響について

電波の生物への影響については、これまで50年以上にわたり世界各国で研究が行われ、電波の人体への影響には「刺激作用」と「熱作用」があることが知られている。「刺激作用」とは主に約100 Hz以下の低い周波数で起こる作用のことであり、低周波数の強い電波が体に当たった場合、体に発生した誘導電流によって神

表2 レーダ計測による行動別誤作動率

性別		男	男	女	女	女	男	男	男	男	男	男	男	男		誤動作率2 回目	誤作動率 の改善結果
年齢(年代)		40	20	50	20	50	40	40	50	40	40	20	30	40			
判別項目																	
入室		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		0%	○
着床(ベッド)		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		0%	
呼吸計測(ベッド) (仰臥位(ぎょうがい) 仰向け)		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		0%	
呼吸停止(ベッド) (仰臥位(ぎょうがい) 仰向け)		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		0%	○
呼吸計測(ベッド) (背臥位(はいがい) うつ伏せ)		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		0%	
呼吸停止(ベッド) (背臥位(はいがい) うつ伏せ)		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		0%	
呼吸停止(ベッド) (横向き)		○	○	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○		15%	○
起き上がり(ベッド) 座った状態		○	○	○	×	寝る	○	○	○	○	○	○	○	○		8%	○
腰掛 端座位(たんざい)		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		0%	
床に寝る(転倒検出)		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		0%	
呼吸計測(床) (仰臥位(ぎょうがい) 仰向け)		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		0%	
呼吸停止(床) (仰臥位(ぎょうがい) 仰向け)		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		0%	○
呼吸計測(床) (背臥位(はいがい) うつ伏せ)		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		0%	○
呼吸停止(床) (背臥位(はいがい) うつ伏せ)		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		0%	○
立ち上がり		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		0%	○
離床		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		0%	○
離床 時間経過		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		0%	

経などが刺激されると報告されている。一方、「熱作用」とは約 100 kHz 以上の周波数の電波が生物に及ぼす作用のことであり、強い電波が生物に当たるとそのエネルギーの一部が生物に吸収されて温度上昇を起こすことで影響が出ると言われている。今回使用した 24 GHz 帯 FM-CW レーダの電界強度 E [V/m] および放射電力密度 P [mW/cm²] は送信点から 2.5 [m] 離れたと仮定した場合、 $E=0.65$ [V/m]、 $P=1.12 \times 10^{-4}$ [mW/cm²] となり電波防護指針で定められている基準（許容電界強度：61.4 [V/m] 以下，許容放射電力密度 1 [mW/cm²] 以下）を満たすものであり、基準値を大きく下回る。これより、人体への影響はないと判断している。

[今後の研究の方向，課題]

呼吸数は心拍数や収縮期血圧と同様の正確さで体の状態を把握する上で役立つ。また、健康上の不安定さを示す一番初めのサインでもある。有害事象の可能性検知などにおいて、目視ではなく、常時から客観的データとして呼吸トレンドを記録することは多くのバイタルサインの中でも身体特長を反映する信頼性の高い指標として活用できる可能性が高い。精度向上が課題として残るが本システムの構築により、例えば乳幼児突然死対策や急性期を脱した介護施設や自宅などで生活する在宅高齢者を対象とした見守りなど大いに役立つと期待される。

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

Development of a mobile device producing the real touch sensation between remote people

2031006



研究代表者

大阪大学大学院工学研究科

特任助教

田 中 一 晶

〔研究の目的〕

携帯電話の普及により、いつでもどこでも離れた場所にいる人と対話できるようになった。しかし、音声のみで行う対話は存在感（対面で会話している感覚）が希薄であることが知られており、携帯電話では相手の存在を身近に感じられないという問題がある。本研究では、対面環境で相手と触れ合うことで得られる様々な触感を伝達・再現する方法を用いて音声対話の改善を試みる。相手と触れ合っている感覚を携帯電話で擬似的に再現することで、相手の存在を身近に感じながら対話できる可能性がある。本研究の目的は、リアルな接触感覚が生じる要因を明らかにし、対話相手の存在感を強化する携帯型の遠隔接触デバイスを開発することである。

遠隔会議において対話相手の存在感を強化する方法は多くの研究で提案されてきた。大きなディスプレイで相手の映像を等身大で提示する方法や、対話相手とのアイコンタクトが成立するようにカメラとディスプレイを配置する方法など、視覚効果を利用するものが一般的である。しかし、携帯端末のような小さな画面に対話相手の映像を縮小表示することは、その存在感を低下させることが知られており、携帯環境での視覚効果の利用には限界があると考えられる。本研究では、遠隔地にいる対話相手との擬似的な接触を携帯端末で再現する方法を用いる。既存研究では、遠隔地間での身体接触を再現する

様々な遠隔接触デバイスが提案されてきたが、携帯環境での使用を目的としたものは少ない。また、それらのデバイスの有効性は、ユーザの感情や肯定・否定といった単純な情報を伝達する用途で示されており、接触感覚のリアリティや存在感伝達への効果はほとんど検証されていない。本研究は、対話相手との接触感覚を生み出す要因を心理実験によって明らかにする。

既存研究で提案された遠隔接触デバイスは、体温の伝達によってハグを再現するものや、握力の伝達によって握手を再現するものなど、そのほとんどが単一のモダリティで接触感覚の再現を試みており、リアルな接触感覚を生み出すに至っていない。また、社会心理学の分野では人と人との接触の効果として相手への親近感が増すことが知られているが、デバイスを介した擬似的な接触において親近感が増すという報告はなかった。これに対し、我々は、様々な触感が再現できるロボットハンドを介した擬似的な握手によって存在感と親近感の強化に成功した。この結果から、複数のモダリティの組み合わせによって生み出されたリアルな接触感覚が存在感を伝達すると仮定し、本研究では、接触感覚を強化するモダリティを明らかにする。また、モダリティの組み合わせだけでなく、デバイスの形状が人の身体に類似している必要があるのかについても検証する。モダリティの組み合わせやデバイスの形状等、接触感覚を生み出す要因を実験的に解明し、実験的根拠に基づいて、

接触感覚を再現する携帯型デバイスの効果的なデザインを提案する。

[研究の内容, 成果]

1. 携帯型遠隔接触デバイスのデザイン

我々は、等身大で表示した対話相手の映像を見ながら、人の手のような握力・温度・柔らかさを持つリアルな触感のロボットハンドで擬似的に握手を行うと、単に相手の映像を見ながら対話するよりも、存在感や親近感が増すことを明らかにした。本研究で開発する遠隔接触デバイスは、このロボットハンドを携帯デバイスに応用するものである（図1）[4]。そのデザインに関して検討すべき事柄を以下に示す。次節の実験では、接触感覚のリアリティにおけるこれらの効果を検証した。

i) 遠隔接触の双方向性

遠隔接触では、片方のユーザのみ遠隔接触デバイスを使用している片方向の状況と双方のユーザが使用している双方向の状況が想定される。人と人との接触では、自分が相手の身体に触れているという感覚だけでなく、自分の身体が相手に触れられているという感覚もあるため、遠隔接触の双方向性は接触感覚のリアリティを強化する可能性がある。

ii) ユーザの身体動作とデバイスの同期の提示

遠隔接触デバイスはユーザの身体動作を再現するが、その身体動作とデバイスの動きを同時に確認する手段が無ければ実際に同期している



図1 携帯型遠隔接触デバイスのデザイン例

か知ることはできない。その手段として、映像でユーザの身体動作を提示する方法が考えられる。デバイスは相手の身体の代替であるため、その動きと相手の身体動作との同期の提示は接触感覚を強化する可能性がある。

iii) マルチモーダル化

図2(a)のように、等身大の映像を使用する場合には、相手が手を出した位置にロボットハンドを設置することが可能である。接触デバイスに映像を組み合わせることは相手と接触している感覚を向上させたと思われる。しかし、携帯デバイスでは相手の映像を縮小表示しなければならないため、映像と接触デバイスが繋がって見えるようなデザインにすることは困難である。また、第1節で述べたように、相手の映像の縮小表示は存在感伝達に悪影響であることが知られている。携帯可能な小型のディスプレイにおいても相手の姿の提示が接触感覚のリアリティを強化するのか明らかにする必要がある。

iv) 接触デバイスの身体性

先行研究で開発された接触デバイスのほとんどは人の身体を模したものではない。これに対



図2 遠隔握手のインタフェース

し、存在感の強化に成功した我々の握手用ロボットハンドは、人の手を模したものである。したがって、接触デバイスが人間の身体部位を模した身体性を持つことはリアルな接触感覚を生み出す上で寄与していた可能性がある。

まず、実験1では、握手用ロボットハンドとの組み合わせで有効性が示されている等身大映像を用いて i) 双方向性と ii) 同期の提示による接触感覚への効果を検証した[1][2]。次に、実験2では、携帯環境を想定し、小型ディスプレイに表示した縮小表示映像を用いて iii) マルチモーダル化と iv) 身体性の効果を検証した[3]。

2. 実験1

握手用ロボットハンドと等身大映像を組み合わせる上で、i) 双方向性と ii) 同期の提示の観点から図2に示す6つのインタフェースのデザインが考えられる。

(a)では、相手の映像の腕の部分にロボットハンドを設置し、相手がディスプレイの下から腕を出しているように見せている。このインタフェースでは、ユーザは相手の手が見えないため、握手の動作とロボットハンドとの同期は確認できない。これに対し、(b)は相手が映像上に手を出しているため、握手の動作がロボットハンドと同期している様子が確認できる。

(c)と(d)のインタフェースは、(a)と(b)と反対であり、ユーザは相手側にあるロボットハンドを遠隔操作することができる。しかし、ユーザ側の空間にはロボットハンドが無く、空中で握手の動作を行うため、接触感覚のリアリティは低いことが予想される。

(e)と(f)は、(a)(b)に(c)(d)のインタフェースを組み合わせたものであり、ユーザ側と相手側の両方にロボットハンドがある。(e)は、映像による同期の提示が無い場合見た目は(a)と変わらないが、相手も自分の手の代替であるロボットハンドを握っているという推測によって接触感覚のリアリティが向上することが予想される。さらに、(f)では同期が提示されるため、

双方向性がより有効に働く可能性がある。

(a)～(f)のインタフェースを実験条件として被験者実験で比較した。接触感覚のリアリティは「実際に説明者と握手をした感じがした」という質問に7段階のリッカート尺度で回答するアンケートで計測し、統計的に分析した。

予備実験では、ロボットハンドとの接触も遠隔操作も行われない(c)の評価が明らかに劣っていたため、本実験では削除した。まず、(c)を除く片方向の条件を比較した結果、(a)が最も高い評価を得た。(b)では、同期の提示によって接触感覚のリアリティが強化されることを期待していたが、相手の手とその代替であるロボットハンドが重複して視界に入るため、握手の状況として不自然であることがマイナスに働いた。また(d)では、ロボットハンドとの接触が無いマイナス効果が遠隔操作によるプラス効果を上回ったため、最も低い評価となった。

次に、片方向の中で最も有効であった(a)と双方向の条件である(e)と(f)を比較した。その結果、(e)と(f)は(a)よりも高い評価を得た。しかし、その差が統計的に有意であったのは(e)のみであった。(f)は(b)と同様に、相手の手とロボットハンドが重複して視界に入ることによるマイナス効果が働いたと考えられる。

以上の結果から、接触感覚のリアリティを強化する上で、i) 双方向性は有効に働くが、ii) 同期の提示は有効ではないことが分かった。しかし、ii)については、相手の手とロボットハンドを重複して提示することが悪影響であり、これを解決することができれば、同期の提示自体は有効に働くかもしれない。

3. 実験2

実験1では、対話相手の等身大映像と接触デバイスの組み合わせにおいて効果的なインタフェースを検討した。この実験では、iii) マルチモーダル化：携帯環境を想定し、小型のディスプレイに表示した対話相手の縮小表示映像と接触デバイスを組み合わせることが有効に働く

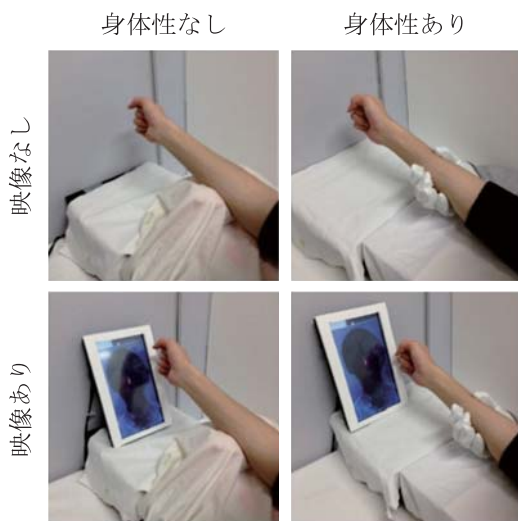


図3 遠隔マッサージのインタフェース

かを検討する。さらに、iv) 身体性：接触デバイスが人の身体を模した形状をしていることによる接触感覚のリアリティへの影響についても検討する。これら2つを要因とした実験条件を図3に示す。この実験では、接触感覚を被験者に意識させるために、握手よりも接触時間が長いマッサージを採用し、ロボットハンドと既存のマッサージ器を比較した。マッサージ器は離れた場所から操作できるように改造した。

接触感覚のリアリティは「あたかも人にマッサージをされた感じがした」という質問に7段階のリッカート尺度で回答するアンケートを用いて計測し、統計的に分析した。

実験の結果、相手の映像がある条件は、映像が無い条件よりも評価が高く、身体性のあるロボットハンドを用いた条件は、マッサージ器を用いた条件よりも評価が高いことが統計的に示された。したがって、iii) 縮小表示映像による遠隔接触のマルチモーダル化と、iv) 接触デバイスの身体性は接触感覚のリアリティを強化することが分かった。

[今後の研究の方向、課題]

本研究では、リアルな接触感覚を生み出す携帯型の遠隔接触デバイスのデザインを実験的に

検討した。その結果、接触感覚を再現するデバイスには、人間の身体部位を模した身体性のある形状であり、縮小表示であっても対話相手の映像を提示できるデザインが効果的であることが分かった。また、そのようなデバイスを遠隔地間のユーザが共に使用し、双方向の遠隔接触を行うことが接触感覚のリアリティを向上させることも分かった。これらの結果から、本研究で想定した携帯型遠隔接触デバイスのデザイン(図1)は、対話相手の映像を表示できるディスプレイを備えており、人の手を模した形状のデバイスを介して互いに手を握り合いながら会話できるため、リアルな接触感覚を生み出す上で合理的であると思われる。今後は、この実験結果に基づいた携帯デバイスを実際に製作し、従来の携帯デバイスに対する優位性を検証する予定である。

一方、有効性が示されなかった同期の提示や、携帯デバイスでは困難と思われる映像と接触デバイスが繋がって見えるデザインについては、接触感覚を強化する上で不要であると結論付けることはできない。映像と接触デバイスで身体動作を重複して示すことなく同期を提示する方法や、携帯環境において対話相手と接触デバイスの繋がりを表現する方法を検討し、その有効性を検証することが今後の課題である。

[成果の発表、論文等]

- [1] Hideyuki Nakanishi, Kazuaki Tanaka and Yuya Wada, Remote Handshaking: Touch Enhances Video-Mediated Social Telepresence, International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI2014), 2014.
- [2] 和田侑也, 田中一品, 中西英之, ビデオ会議に身体接触を付加した遠隔握手によるソーシャルテレプレゼンスの強化, インタラクション 2014, 2014.
- [3] 山口隆浩, 田中一品, 中西英之, デバイスの身体性と操作者の存在感が接触感覚のリアリティに与える影響, 第28回人工知能学会全国大会, 3E3-3 in, 2014.
- [4] 田中一品, 中西英之, リアルな接触感覚を生み出す携帯型遠隔握手デバイスの開発, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告 第2回テレイグジスタンス研究会, Vol. 18, No. TX01-6, pp. 15-16, 2013.

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

Ankle rehabilitation device with the function of muscle relaxation and ROM exercise

2031007



研究代表者

津山工業高等専門学校
電子制御工学科

准教授

谷口 浩 成

〔研究の目的〕

日本の脳卒中患者数は約 134 万人（平成 17 年 10 月現在）であり、今後、高齢者数が増えるほど脳卒中の患者数も増えると予想されている。脳卒中の発症後、多くの場合は片麻痺や痙縮（手足の筋肉のつっぱり）などの運動機能障害を起こす。このような状態が長く続くと、関節の拘縮（筋肉が固まり関節の運動が制限される現象）が始まる。拘縮が重症化すると、正常な状態に戻すことは非常に困難となるため、拘縮を予防するリハビリ運動が重要となる。

通常、拘縮を予防するためには作業療法士や理学療法士によるリハビリ運動が施術される。このリハビリ運動は、緊張している筋肉やむくみが生じている部位をほぐしリラックスさせてから、屈曲（関節をまげる）、伸展（関節を反らす）、牽引（関節を引っ張る）、内外転（回す）、捻るといった複数の関節可動域訓練を行う。しかし、各療法士が患者に施術できる時間は限られており、患者は十分なリハビリを受けられないことがある。また、今後の患者数増加に伴い、介助者の介護負担増も懸念されている。

そこで本研究の目的は、軽量かつ柔軟なアクチュエータを駆動源とすることで、作業および理学療法士が施術するリハビリ運動を再現できるリハビリシステムを開発することである。すなわち、筋肉のリラクゼーションと、複数の関節可動域訓練を 1 つのシステムで実現するリハ

ビリシステムを開発する。

〔研究の内容、成果〕

本研究では、空気圧ソフトアクチュエータおよび形状記憶合金（SMA）アクチュエータを用いた足首を対象としたリハビリシステムを試作し、動作実験を行った。

1. 理学療法士によるリハビリテーション

足首関節におけるリハビリテーションは、理学療法士によって施術される。一般に理学療法士が足首のリハビリテーションを行う際には、患者はベッドの上で仰向けになり、楽な姿勢を取り、関節可動域訓練の前段階としてリラク



図1 理学療法士が行う関節可動域訓練

ゼーションを行う。リラクゼーションとは、足首のむくみや筋肉の緊張を取り除くことで、関節可動域訓練の効果の増大を図る動作である。具体的には、足首の位置を心臓より高くし、足をもみほぐすことなどを行う。

次に、理学療法士が行う関節可動域訓練を図1に示す。どの動作も掌で足を包むように行っており、踵や足部をしっかりと固定し適切な動作が行えるようにしている。

2. SMA アクチュエータを用いたリハビリシステム

装置の大きさは、AIST 人体寸法データベース^[1]より、人体寸法の平均値に基づいて決定した。6種類の関節可動域訓練は、装置に取り付けられたワイヤをSMA アクチュエータにより牽引することで実現した。また、ワイヤを各関節運動の軸を通すことで、そのワイヤが関係しない動作をしているときにたわみ難い構造にした。実際に人体に触れる部分にはクッション材を利用できるようにした。

次に、背屈動作を例に動作原理を説明する。初期状態ではワイヤが図2(a)のように配置されている。ワイヤ端部に取り付けられているSMA アクチュエータの駆動により、固定部が引っ張られ図2(b)のようにリハビリ動作を行う。

SMA アクチュエータを取り付けた装置の外観を図3に示す。SMA アクチュエータは、動作ごとに使用するため、合計6ユニットを配置

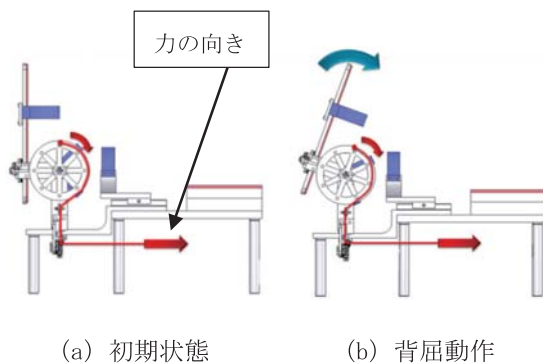


図2 背屈動作の動作原理

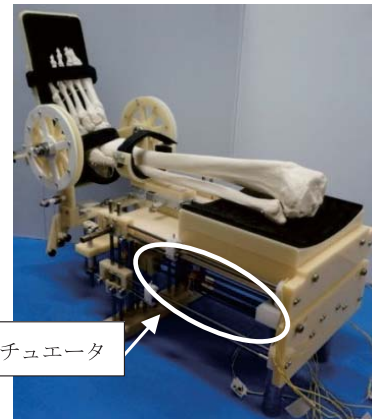


図3 試作機

表1 関節可動域の測定結果

関節可動域訓練	到達角度 [deg]	目標角度 [deg]
底屈	20.1	33
背屈	33.7	51
内がえし	19.6	30
外がえし	14.3	20
内転	21.9	20
外転	9.6	10

した。

被験者を20歳男性の健常者とし、底屈、背屈、内がえし、外がえし、内転および外転動作の駆動実験を行った。この時、SMA アクチュエータには、1Aの電流を約30秒間印加した。それぞれの到達角度および関節可動域表^[2]を参考にした目標角度を表1に示す。

底屈、背屈、内がえし、外がえし動作が目標値に達しなかった理由として、動作中に装置のフレームがゆがんでしまい、力の伝達がうまくできなかった問題が考えられる。目標角度を満たすためには、材質、形状の見直しが必要であると考えている。

3. 空気圧ソフトアクチュエータを用いたリハビリシステム

空気圧ソフトアクチュエータは、空気の印加圧力を制御することにより、発生力と変位を調整でき、構造体自体が柔軟で、生体適応性や安全性が高い。本研究では、6動作の関節可動域訓練を実現するために、大きさの違う2種類の

空気圧ソフトアクチュエータを製作した。本アクチュエータは、外部カバーと内袋から構成される。外部カバーは木綿の帆布を用い、内袋はアルミラミネートフィルムを張り合わせて製作した。これらの空気圧ソフトアクチュエータをアクリルで製作した筐体内部に配置し、筋肉のリラクゼーション運動と関節可動域訓練の動作検証用装置を試作した。図4に試作機の構造を示す。筋肉のリラクゼーションは、対向するアクチュエータで足を挟むことによって実現した。また、関節可動域訓練は、各動作に必要なアクチュエータが膨張し、直接足を押すことで行った。

また、足首を固定するための空気圧ソフトアクチュエータを、図5のように取り付けた。本アクチュエータは底面に1箇所、側面に2箇所の計3箇所取り付けられており、関節可動域訓練時に足が動き、関節可動域訓練用の空気圧ソフトアクチュエータの作用点がずれるのを防ぐ。また、足首固定用アクチュエータに空気圧を印加

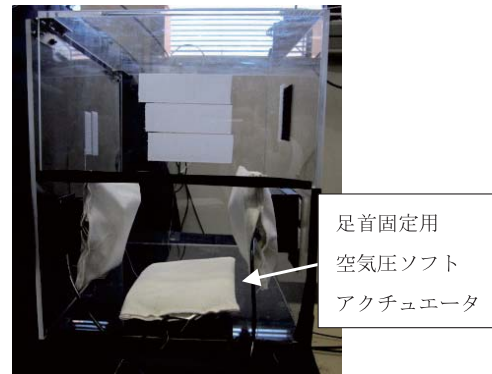


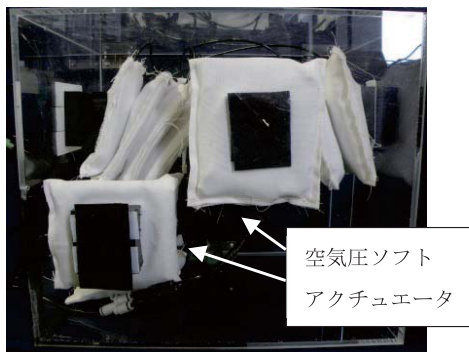
図5 足首固定用空気圧ソフトアクチュエータ

する事によって、装置の底面より踵の位置が約30 mm上昇する。そのため、関節可動域訓練を行いやすくなる。

次に、関節可動域訓練の動作試験について説明する。実験は、健常者を被験者として行った。エアコンプレッサから50 kPaの印加圧力で加圧した場合において、各関節の可動角を求めた。関節角度の測定は、ビデオカメラにより画像を撮影し、運動解析ソフトウェアを用いて動作を解析した。

実験から得られた結果を表2に示す。表2より、どの訓練動作も目標角度をほぼ達成していることがわかる。これより、空気圧ソフトアクチュエータを用いることによって、足首関節の関節可動域訓練が可能であると考えられる。図6に背屈動作、図7に外転動作の実験の様子を示す。初期状態を破線、訓練動作時を実線で表している。

本年度は、異なる2種類のアクチュエータを用いて足首関節用のリハビリシステムをそれぞれ試作し、関節可動域訓練を検証した。その結果、SMAアクチュエータを用いる場合より、



(a) 側面



(b) 上面

図4 試作機の構造

表2 関節可動域の測定結果

関節可動域訓練	到達角度 [deg]	目標角度 [deg]
底屈	59	45
背屈	24	20
内外がえし	23	20
内外転	28	30

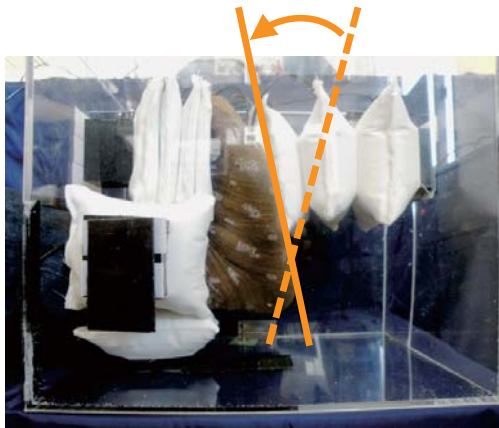


図6 背屈動作



図7 外転動作

空気圧ソフトアクチュエータを用いたほうがよいことが明らかになった。

[今後の研究の方向，課題]

研究目的でも述べたとおり，本リハビリシステムの特徴は，筋肉のリラクゼーションと関節

可動域訓練のどちらも1つの装置で実現できる点にある。本年度は主に，関節可動域訓練の実現に注力した。筋肉のリラクゼーション機能は，空気圧ソフトアクチュエータを用いることで実現できることを見出しているが，その効果の検証ができていない。従って，リラクゼーション機能の効果を検証することが必要である。

また，被験者を増やし，足の形状や大きさが異なる場合でも必要な運動が提供できることを実証する。また，各運動の精度を向上させると共に，膝関節の固定方法を含めたりハビリ装置を開発する。そして，理学療法士の協力のもと，リハビリ効果の検証を行う。

[参考文献]

- [1] AIST 人体寸法データベース 1991-92 :
<https://www.dh.aist.go.jp/database/91-92/>
- [2] 石川 齊，古川 宏：図解作業療法技術ガイド，第2版，文光堂，pp. 53, 2003

[成果の発表，論文等]

1. 竹花大貴，谷口浩成，筒井法子，脇元修一，諸星宣宏：SMA アクチュエータを用いた足首関節用拘縮予防装置の開発，日本機械学会中国四国学生会第44回学生員卒業研究発表講演会，706, 2014. 03.
2. 筒井法子，諸星宣宏，谷口浩成，脇元修一：理学療法士の施術を指向した足首関節の拘縮予防に向けた医療機器の検討，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集，3P2-A01, 2014. 05.
3. 筒井法子，谷口浩成，脇元修一：空気圧アクチュエータを用いて3自由度の動作を実現する足首関節用リハビリ装置の開発，日本機械学会年次大会 2014, 2014. 09 発表予定

MEMS 可変共振子アレイによるテラヘルツ光スキャナ

A Terahertz Scanner based on MEMS Tunable Resonator Array

2031008



研究代表者

東京大学
先端科学技術研究センター

教授 年 吉 洋

[研究の目的]

非破壊検査の新たな手法として、テラヘルツ光を用いた検査機器の開発が進められている。ただし、テラヘルツ光のポテンシャルは単に金属異物の検出にはとどまらない。この波長帯では物質の分子構造によって吸収スペクトルが敏感に変化するため、特定波長の透過率から材料・組成の推測が可能である。従来の研究ではテラヘルツ光の光源と検出器に開発の重点が置かれてきたが、本研究は小型・高機能なテラヘルツ光学系の実現を目指して、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術による可変透過光フィルタの設計、製作、評価を実施する。

[研究の内容, 成果]

自然界の誘電体はテラヘルツ光 (0.1 THz~10 THz) に対して透明なものが多く、薄いレンズを作るための屈折率材料として有効に機能するものが少ない。このため、従来のテラヘルツ光学系は図1に示すような反射光学系として構築されることが多かった。これをコンパクトな光学系に変換するため、本研究ではパターン可変型のフレネルレンズのような透過光学系を、MEMS 技術を用いて構築する。また、そのための基本デバイスとして、図2に示すような Split Ring Resonator (SRR) 型の共振子アレイを用いる。

この共振子では微小な金属環の一部に切れ込みが入っており、金属配線部分のインダクタ成分 L と切れ込み部分の容量成分 C によって LC

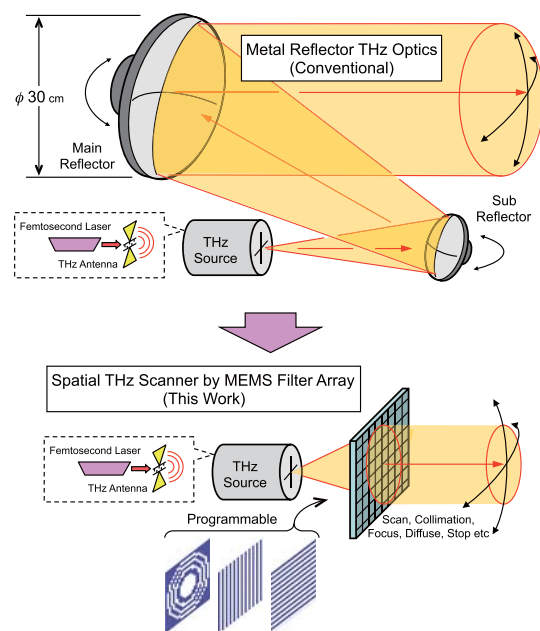


図1 テラヘルツ光学系の概念図

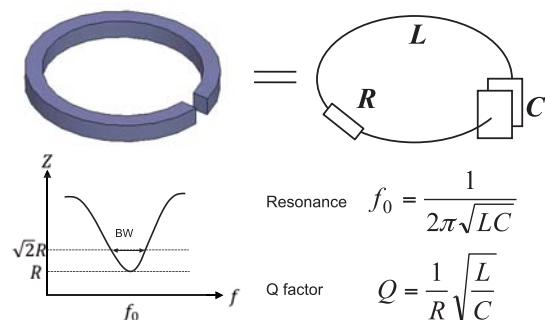


図2 SRR の原理

共振子を構成し、透過しようとする電磁波を反射して遮断することが知られている。

本研究では図3に示すように、SRRのC成分をMEMS静電アクチュエータによってON/OFF制御して、透過スペクトルを可変にする手法を考案した。本研究で取り扱うMEMS-SRRは、厚さ $300\mu\text{m}$ 程度の石英基板上に金属薄膜（金、クロム）によって四角形状のSRR構造を形成し、中央のスプリット部分の上にブリッジ状の可動電極を配置することで容量を可変にしたものである。電磁界解析ソフトHFSSを用いた解析により、一辺 $100\mu\text{m}$ のSRR構造の共振周波数は数百GHzの範囲に設計可能であることが分かった。なお、本研究では通常のフォトリソグラフィを使用して金属パターンを形成することから、線幅 $6\mu\text{m}$ 、最小ギャップ $8\mu\text{m}$ を設計寸法としてSRRを構成した。また、可変ピクセル型のテラヘルツ光フィルタを構成する基本構造として、 5×5 個のMEMS-SRRをアレイ状に配置した構造を

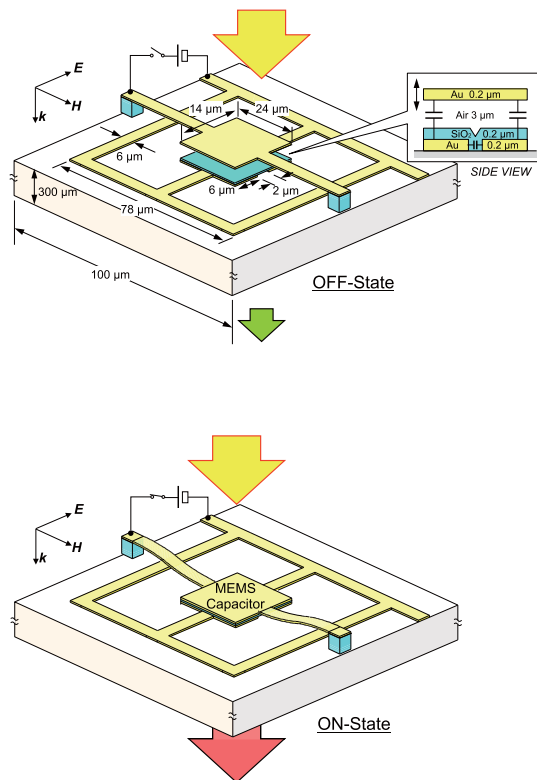


図3 MEMS型SRR構造

テラヘルツ光用の1画素として使用することを検討した。

電磁界解析によってSRR内部の1次モードの表面電流分布を計算した結果を図4に示す。これにより、SRR中央の容量Cを境界にして、左右対称の電流分布が形成されていることが分かる。また、SRR上部の左右にある金属パターンには電流が流れておらず、この部分はテラヘルツ共振に寄与していない。このことから、SRRのパターンを一行に横に接続しても共振状態は劣化せず、むしろ、MEMS構造を静電駆動するための電気配線として利用可能であることが分かった。そこで本研究では、SRRのパターンを下部電極として、図5に示すようなMEMS可変静電容量の一斉駆動方式を考案した。

以上のようなアレイ型のSRR構造を想定して周期境界条件を課して電磁界解析を行った結果、図6に示すようなテラヘルツ光の透過スペクトルの変化が得られた。解析ではMEMS可変容量の効果を組み込むために、モデル中の上下電極間の絶縁層（シリコン酸化膜）の厚みを数段階に分けて計算している。この結果、

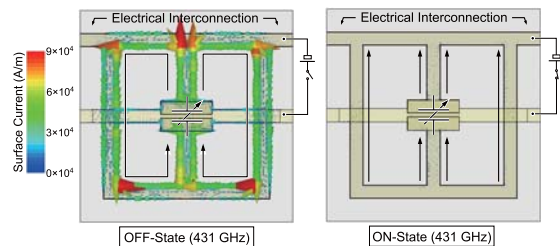


図4 SRR内部の共振時の電流分布

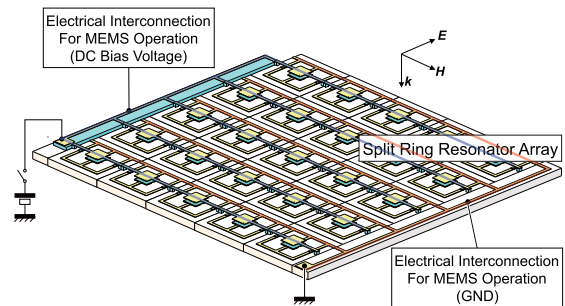


図5 SRRアレイの静電駆動方法

MEMS 電極の沈み込み量の増大にともなって絶縁層が薄くなり、静電容量が増大することから、テラヘルツ光の共振周波数が低周波数側にシフトする様子が確認できた。なお、透過率に見られる緩やかなうねりは、使用した基板内でのテラヘルツ光の干渉に起因する透過率の変化である。

金属系材料を用いた表面マイクロマシニングによって MEMS 型 SRR を製作する手法を図 7 に示す。まず、パイレックス基板の上に SRR の下部電極を Cr/Au/Cr のスパッタ積層膜で形成した後に、全体をシリコン酸化膜で被覆する。

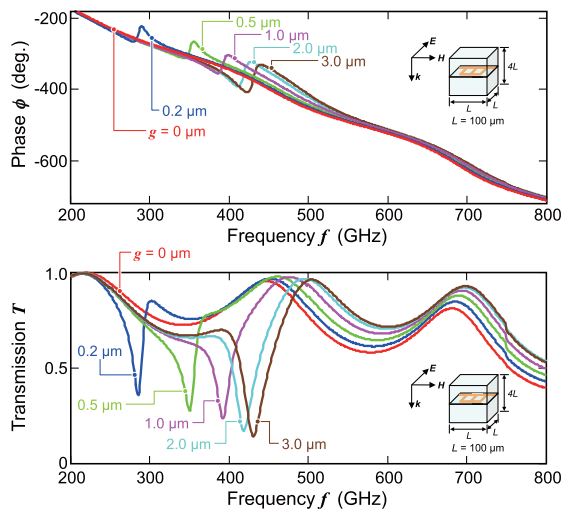


図 6 透過スペクトルの解析結果

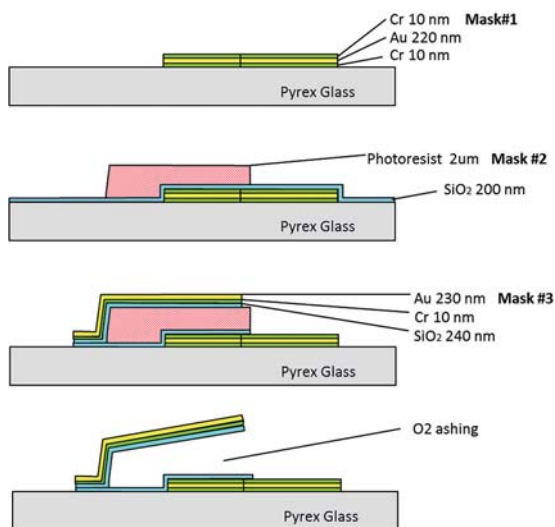


図 7 MEMS-SRR 製作方法

次に、犠牲層となるフォトリソストを形成して、MEMS 可変容量の上部電極となるシリコン酸化膜/Cr/Au を積層し、フォトリソグラフィでパタニングする。最後に、酸素アッシングによってフォトリソストを除去することで、可動構造体をリリースする。

この方式で製作した MEMS 型 SRR 構造を図 8 に示す。ここでは 40 mm 角の石英基板上に 8 種類の SRR パターンを集積している。アレイサイズ 6 mm 角内に、約 3600 個の SRR を配置した。なお、測定に用いたテラヘルツ光のビーム幅は約 5 mm である。

図 9 に MEMS-SRR の静電駆動特性を示す。典型的な例では、直流電圧 10V によって静電プルイン動作が確認され、ギャップの初期値 3 μm に等しい上下動が観察された。また、MEMS-SRR の機械的な共振周波数は 10 kHz から 50 kHz の間で設計可能である。

製作した MEMS-SRR を静電駆動しながらテラヘルツ光の透過率を測定した結果を図 10 に示す。当初予想通り、MEMS-SRR の ON 動作によって容量が増大し、共振周波数が 690

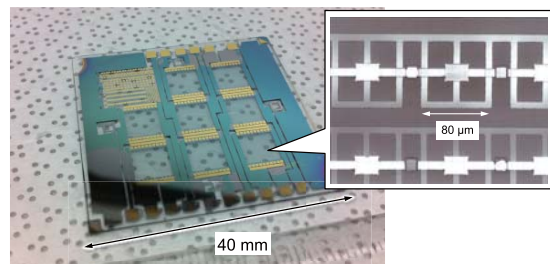


図 8 MEMS-SRR の製作結果

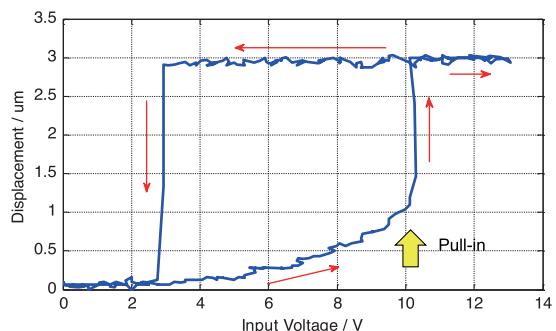


図 9 MEMS-SRR の静電駆動特性

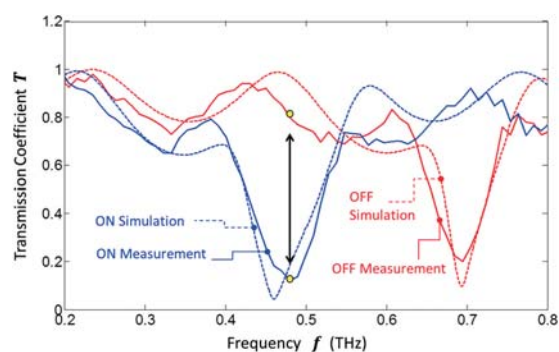


図10 MEMS-SRR のテラヘルツ透過特性

GHz から 450 GHz 付近に低下している様子が確認できた。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究により MEMS-SRR の静電駆動によってテラヘルツ光の制御が可能であることが明らかになった。今後は MEMS-SRR アレイを大規模化して、グレーティングや、図 11 に示すようなフレネル・ゾンプレートのパターンを可変にする実験を実施する。また本研究の成果に基づき、将来的には食品工場の品質検査や残留農薬検出、医薬品の純度測定や投薬効果の定量的評価などへの幅広い応用先への展開を目指す。

[成果の発表]

- (1) 韓 正利, 河野健太, Tapio Makela, Tomi Haatainen, 平川一彦, 藤田博之, 年吉 洋:「静電駆動型 Split-Ring 共振子アレイの THz フィルタ応用」第 30 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2013 年 11 月 5 日～7 日, 仙台国際センター, 7PM1-B-2.
- (2) Zhengli Han, Kenta Kohno, Tomi Haatainen, Tapio Makela, Hiroyuki Fujita, Kazuhiko Hirakawa, and Hiroshi Toshiyoshi: “ELECTROSTATIC MEMS TUNABLE SPLIT-RING RESONATORS FOR THZ FILTER APPLICATIONS,” in Proc. IEEE Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN 2013), Kanazawa, Japan, Aug. 18-22, 2013, pp. 165-166.
- (3) Zhengli Han, Kenta Kohno, Tapio Makela, Tomi Haatainen, Hiroyuki Fujita, Kazuhiko Hirakawa, and Hiroshi Toshiyoshi: “A Tunable THz Filter based on Electrostatic MEMS Split Ring Resonator Array,” in Proc. 7th Asia-Pacific Conference on Transducers and Micro/Nano Technologies (APCOT 2014), June 29-July 2, 2014, EXCO, Daegu, Korea.
- (4) 韓 正利, 河野健太, Makela Tapio, Haatainen Tomi, 平川一彦, 藤田博之, 年吉 洋:「静電駆動カンチレバーによる MEMS スプリットリング共振子アレイのテラヘルツ可変フィルタ応用」, 平成 26 年度電気学会 E 部門総合研究会, 2014 年 5 月 27 日～28 日, 東京大学生産技術研究所

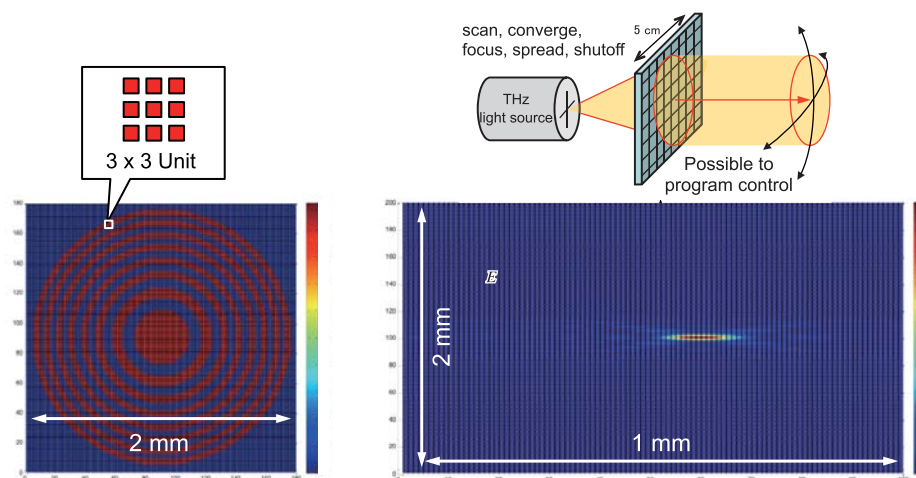


図11 MEMS-SRR による可変レンズ解析

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

A lung function test system based on acoustic measurement of respiratory sectional area

2031009



研究代表者	熊本大学大学院自然科学研究科	助 教	中 妻 啓
共同研究者	熊本大学大学院自然科学研究科	教 授	鳥 越 一 平

[研究の目的]

肺機能検査は慢性閉塞性肺疾患（COPD）をはじめとする呼吸器疾患の診断のため行われるものである。現在用いられている手法の一つであるスパイロメトリーは努力呼吸を必要とするため、被験者の負担が大きい。被験者が安静状態で肺機能を知る検査手法としては強制オシレーション法（Forced Oscillation Technique, FOT）がある。これは音響信号を口唇から被験者呼吸器系内に印加し、測定した反射信号から口唇位置における音響インピーダンスを推定する手法である。臨床的に重要とされる指標は声門以深の末梢側肺気道のインピーダンスであるが、FOT で得られる情報は声門から口唇までの上部気道の影響を受ける。上部気道、特に口腔内は舌部など随意運動する部位が多く測定に影響を与えうる。

本研究では上部気道の影響を除去し、末梢側インピーダンスを直接的に推定する検査手法の確立を目指している。被験者への負担が少なく、より正確かつ広範な肺機能情報が得られるシステムを完成させることが目標である。

[研究の内容, 成果]

まず、上部気道の影響を排除した末梢側イン

ピーダンス取得を行う本研究の内容についてその概要を述べる。

本研究で用いる測定システムの構成を図1に示す。被験者が測定装置末端のマウスピースを口にくわえた状態で、スピーカーで発生させた音波を被験者肺気道内部に入射する。入射波および肺気道による反射波を2つのマイクロフォンにより取得・分離する。ここで本研究では肺気道を一連の音響管であり、所望の声門以深音響インピーダンス Z_p で終端されているものとする。また、この音響管を図2のように短区間の断面積一定の管が接続した短管接続モデルとし仮定する。このとき、各短管の接続面における進行波・逆進行波の音圧および粒子速度は連続であることから以下の式が成り立つ。ここで、 $p_i^+(t, x_i)$, $p_i^-(t, x_i)$ は時刻 t および短管 i に設定される（図3参照）位置 x_i における進行

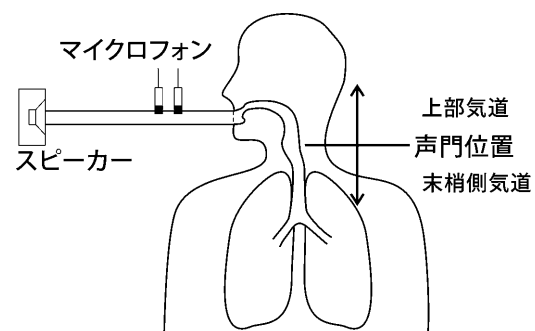


図1 測定装置構成

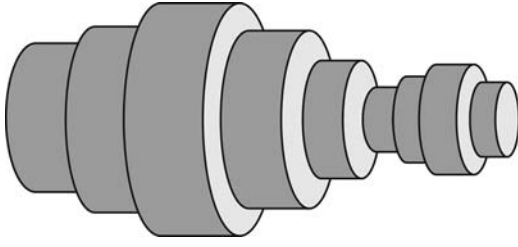


図2 上部気道の短管接続モデルの模式図

波・逆進行波の音圧, S_i は短管 i の断面積, ρ_0, c はそれぞれ媒質の密度及び音速である。また l は各短管の長さである。

$$p_i^+\left(t, \frac{l}{2}\right) + p_i^-\left(t, \frac{l}{2}\right) = p_{i+1}^+\left(t, -\frac{l}{2}\right) + p_{i+1}^-\left(t, -\frac{l}{2}\right)$$

$$\begin{aligned} & \frac{S_i}{\rho_0 c} \left(p_i^+\left(t, \frac{l}{2}\right) - p_i^-\left(t, \frac{l}{2}\right) \right) \\ &= \frac{S_{i+1}}{\rho_0 c} \left(p_{i+1}^+\left(t, -\frac{l}{2}\right) - p_{i+1}^-\left(t, -\frac{l}{2}\right) \right) \end{aligned}$$

なお上式および以下の議論では音響管内の減衰は考えない。ここで $\tau = \frac{l}{c}$ とすると上記2式を整理して

$$p_{i+1}^+(t, 0) = \frac{1}{1-r_i} p_i^+(t-\tau, 0) - \frac{r_i}{1-r_i} p_i^-(t-\tau, 0)$$

$$p_{i+1}^-(t, 0) = \frac{1}{1-r_i} p_i^+(t, 0) + \frac{1}{1+r_i} p_i^-(t+\tau, 0)$$

が得られる。ここで

$$r_i = \frac{S_i - S_{i+1}}{S_i + S_{i+1}}$$

であり、短管 i 内の進行波および後退波の音圧より短管 $i+1$ 内の進行波および後退波の音圧を計算する漸化式となっている。なお r_i は短管 i と $i+1$ の境界における進行波音圧の反射率であり、ここから進行波音圧の透過率は $1+r_i$ 、後退波音圧の反射率、透過率は $-r_i, 1-r_i$ である。今、2つのマイクロフォンによる取得信

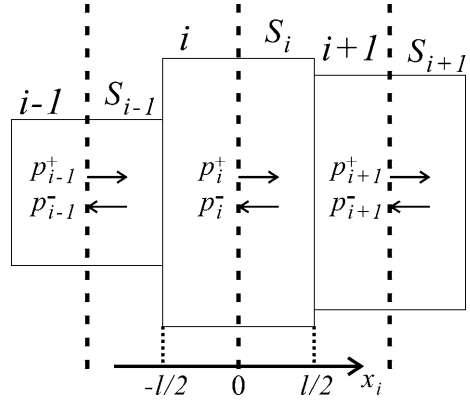


図3 短管内の進行波・逆進行波の音圧および断面積

号を分離して得られる測定装置音響管内の進行波・逆進行波音圧と初期断面積から、口唇位置における反射率を求めることができる。ここから口唇位置の短管 ($i=0$) の断面積がわかるため、上記の漸化式を利用して各短管内の音圧・断面積が逐次的に計算される。最終的に声門位置での音圧・断面積を知ること、声門位置の音響インピーダンスを推定することができる。以上の手法で上部気道の形状変化による音響伝搬の影響を取り除き末梢側インピーダンスを取得する。

本年度は図1を実現する実験装置試作機の製作と基礎的データの取得を行った。図4に試作装置1を示す。これは2つのマイクロフォン間隔が80 mmである。この装置の先端にアルミ・アクリル等の管を取り付け、断面積推定・音響インピーダンス推定の基礎実験を行った。図5に実験の際にスピーカーへの出力信号として使用したパルス波形を示す。従来のFOTでは単一周波数による情報取得が一般的であったが、本研究では広帯域のパルスを用いることで



図4 試作装置1

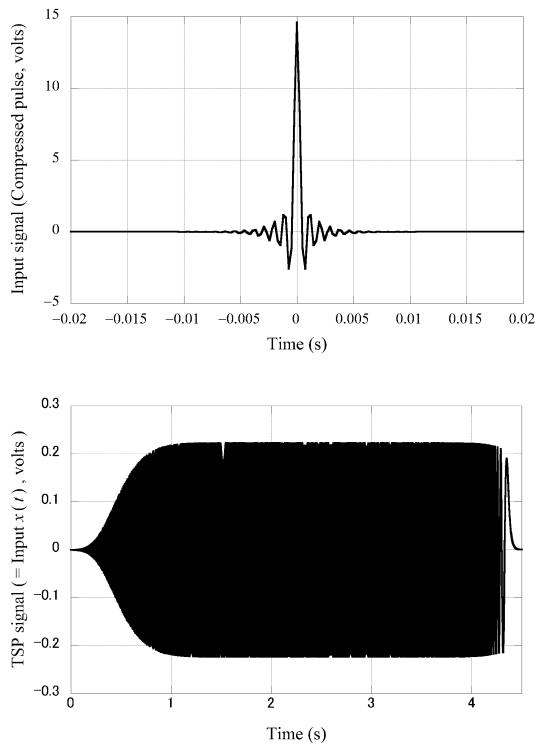


図5 実験に使用したパルス波形の一例。上が圧縮波形，下がスピーカーに入力する時間伸長波形である

肺機能の周波数依存性についても測定対象としている。本実験ではSN比の向上を目的としてパルス波形を時間領域で伸長したものを入力信号に用いている。

まず音響管の断面積推定の実験として、図4の装置先端に長さが1 m、断面積が3.14 cm²、10.18 cm²、15.21 cm²である3種類のアルミ製音響管を2本接続したものを取り付け、計6組の組み合わせについてデータ取得を行った。結果を表1に示す。なお、ここに示す結果はそれぞれ100回の測定を行ったものを平均した値である。表からわかるとおり、第1段目に比べ第2段目

表1 2段の音響管を用いた断面積推定結果

true (cm ²)		estimated (cm ²)	
1st stage	2nd stage	1st stage	2nd stage
3.14	10.18	3.08	11.02
3.14	15.21	3.06	15.90
10.18	3.14	10.48	3.28
10.18	15.21	10.53	15.95
15.21	3.14	15.36	3.39
15.21	10.18	15.67	10.98

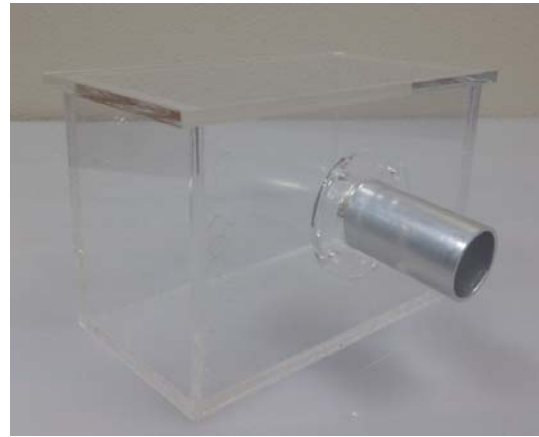


図6 音響インピーダンス測定実験に用いた共鳴容器

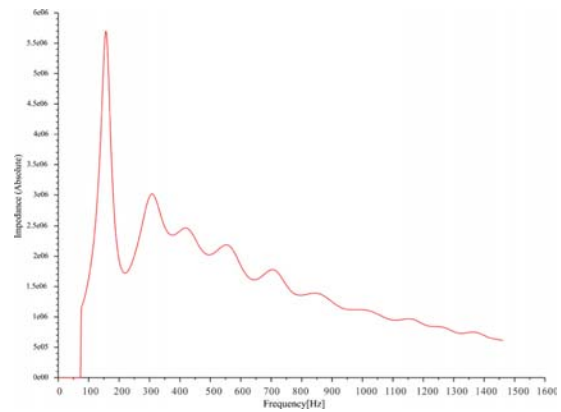


図7 測定された終端音響インピーダンス（アドミッタンス）

の断面積推定精度がやや劣るものの、おおむね良好に断面積を推定できた。

次に音響管終端の音響インピーダンス推定実験を行った。図4の測定装置に長さ1 mのアルミ音響管を接続し、さらにその末端を図6に示す共鳴容器で終端した。この共鳴容器はヘルムホルツ共鳴器の原理に基づき共振周波数がおおよそ160 Hzとなるよう設計されている。このときに得られた終端インピーダンス推定結果を図7に示す。グラフはアドミッタンスの絶対値を示しており、設計値である160 Hz近傍にピークが見られる。また共振点より広域のリップルは定在波に対応していると考えられる。

[今後の研究の方向，課題]

前節の内容から，本研究の今年度の成果をまとめると以下の通りとなる。

- (1) 本研究の手法の検証を行う実験装置の試作を行った
- (2) 試作装置を用いて断面積推定実験を行った
- (3) 試作装置を用いて終端インピーダンス推定実験を行った
- (4) 上記2項について有望な見通しを得た

また，断面積推定・終端インピーダンス推定の実験を遂行する前段階として，音源（スピーカー）と2本のマイクロフォンの特性を補正するアルゴリズムを考案している。これにより測定装置を図4のように組み立てた状態で補正が可能であり，気温・湿度など音響測定装置に影響を与える環境要因の影響を測定実施場所にて補正することができる。これは臨床検査装置としての応用を目指す上で重要な進展であった。

試作装置1を用い基礎的な手法の検証はできたものの，現在の装置では帯域を十分に広げることができず細かい区間の断面積推定ができない。そこで，低周波領域・高周波領域について十分広い帯域を確保するため3つのマイクロ



図8 試作装置2

フォンを用い帯域に応じて使用するマイクロフォンを切り替えることが可能な試作装置2を製作中である。図8にその一部を示すが，現在この装置を用いてより短い区間の断面積推定および音響管壁面による減衰の影響についての検証を継続中である。この検証を終えたのち，被験者を用いた肺気道インピーダンスの取得実験を計画している。

[成果の発表，論文等]

本研究の成果は平成25年度中に以下の学会にて発表を行った。

中妻 啓，山崎拓也，大嶋康敬，鳥越一平，“臨床肺機能検査のための肺気道音響インピーダンス直接測定法の基礎的検討，”第30回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム，6PM3-PSS-122, Nov., 2013, 仙台。

また現在国際会議1件に投稿中の他，試作機2を用いた実験をさらに進めその成果は国際会議・学術誌にて発表予定である。

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

Lightweight and flexible actuator to wear actively for appendicular skeleton of humans

2031010



研究代表者

滋賀県立大学

助教

西岡靖貴

[研究の目的]

近年のロボティクス分野における動向として産業機器だけでなく、医療・福祉機器、ヘルスケア機器等への応用が目立つ。中でも筋力支援システムや生体信号計測機器開発などにみられる装着型の機械システムが多く見られる。このような装着型機械システムには「身に着けやすさ」が重要な課題となる。本研究では「身に着けやすさ」に着目したアクチュエータ開発を目的とする。研究代表者らは、「身に着けやすさ」に対して「軽量性」と「柔軟性」、「能動的な装着」に着目して課題を解決する。アクチュエータを含む機械システムが軽量かつ柔軟であれば衣服のように常時身に着けることが可能と考えられる。さらに、能動的に装着することで、疲労や怪我も持った人、高齢者に対しても「身に着けやすさ」が高いと考える。

研究代表者らはこれまでに、折り込み加工を施したプラスチックフィルムを用いた袋構造による屈曲型極軽量ソフトアクチュエータを開発している。本アクチュエータの折り込み部を斜めに配置すると、螺旋状に巻きつく動作が設計可能と考えられ、上記課題の解決案として期待できる。本報では、アクチュエータ形状・発生力の設計手法、及びヘルスケア機器や他アプリケーションへの応用例について報告する。

[研究の内容、成果]

アクチュエータの構造・原理

図1に本アクチュエータの構造を示す。本アクチュエータはポリエチレンフィルムを2枚使用した袋形状である。片側のシートにはプリーツと呼ばれる折り込み加工をしているため、空気圧を内部に印加すると表面積の違いから屈曲動作を実現する。折り込みは幅方向に対して折り込み角度 β 傾けて加工されている。

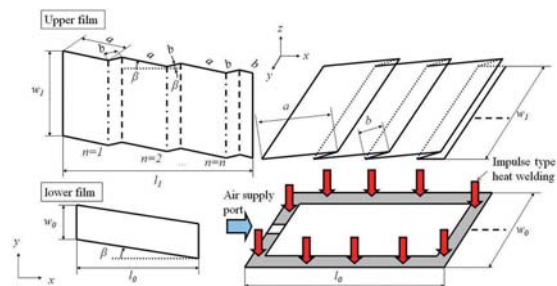


図1 巻き付き型アクチュエータの構造

- a : プリーツピッチ ($b < a$)
- b : プリーツ折り込み部長さ
- n : プリーツの数
- w_0 : 下シートの幅方向長さ
- w_1 : 上シートの幅方向長さ ($w_1 > w_0$)
- β : 折り込み角度 ($0 \text{ deg.} \leq \beta < 90 \text{ deg.}$)

その手順としては、まず図中に示す様に、フィルムから階段状に切り抜いたものを片側の

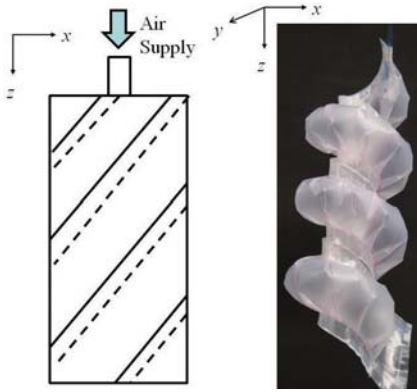


図2 アクチュエータを加圧した時の様子

フィルムとして使用する。切り抜いたものを線に沿って折り込むことで下のフィルムと同じ台形状になる。この大きさのことなる2枚の台形状のフィルムを溶着することで袋形状になる。図2に袋の内部に加圧した時の様子を示す。

形状設計モデル

巻き付き角度，巻き付き径，巻き付きリードについて，それぞれ形状に関するモデルにより幾何学的に導出した。それぞれのモデル化の方法について図3～5に示す。図3は1要素の巻き付き角度を梁の曲げモデルから導出している。その結果，巻き付き角度 ϕ は式(1)で示される。

$$\phi = \frac{4\pi bn}{(w_0 + w_1) \left\{ \cos \left(\frac{\pi w_0}{w_0 + w_1} \right) + 1 \right\}} \quad (1)$$

図4は図3の要素を上部から見た様子である。この時の巻き付き内径 d は式(2)で示される。

$$d = D - 2h = 2 \left\{ \frac{a+b}{\phi_i} - \frac{w_0 + w_1}{\pi} \right\} \cos \beta \quad (2)$$

D は巻き付き外径を， h はアクチュエータの断面の厚みについて円形断面に近似することで導出している。それぞれ式(3)，式(4)に示す。

$$D = 2R = \frac{2(a+b)}{\phi_i} \cos \beta \quad (3)$$

$$h = \frac{w_0 + w_1}{\pi} \cos \beta \quad (4)$$

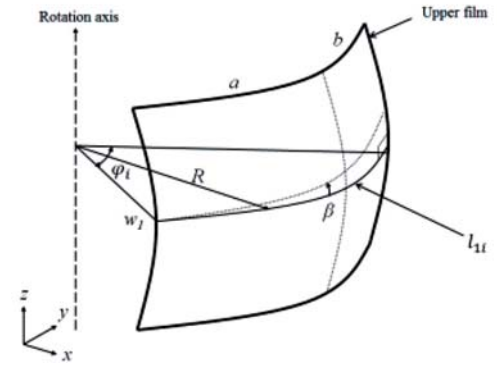
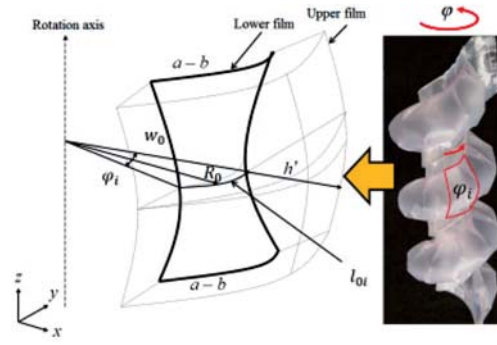


図3 巻き付き角度を導出するための曲げモデル

図5のモデルでは，コイルねじの幾何学からアクチュエータ全体の巻き付きリード L_T を式(5)の様に導出している。

$$L_T = L \frac{\phi}{2\pi} = (a-b)n \sin \beta \quad (5)$$

また， L は1巻あたりのリードを示している。

$$L = \pi D_0 \tan \beta = \frac{2\pi(a-b)}{\phi_i} \sin \beta \quad (6)$$

これらの様に巻き付き型アクチュエータの特性を示す3つのパラメータを幾何学的に近似し

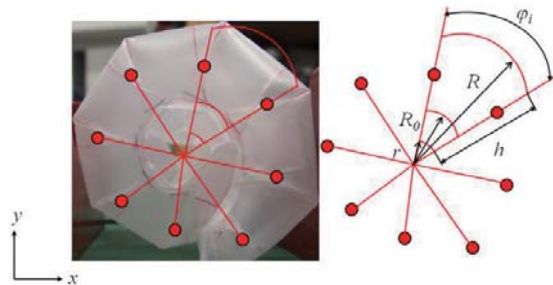


図4 巻き付き径を導出するためのモデル

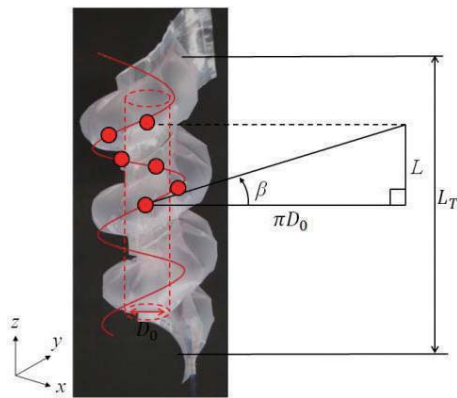


図5 巻き付きリードを導出するためのモデル

たモデルにより，平面における折り込みに関するパラメータを独立に決めることで導出可能となる。

モデルの妥当性検証実験

本モデルの妥当性について，上記3つのパラメータについて実験的に検証した。サンプルとして使用した3種類のアクチュエータの設計パラメータを表1に示す。また，表2に各アク

表1 実験用アクチュエータの設計パラメータ

	a [mm]	b [mm]	n	w_0 [mm]	w_1 [mm]	β [deg.]
Sample 1	34	15	20	50	100	10
Sample 2	34	15	20	50	100	30
Sample 3	55	13	10	100	200	60

表2 モデルによる理論値との検証結果

		ϕ [deg.]	D [mm]	L_T [mm]
Sample 1	theoretical value	960	116	67
	experimental value	960	116	135
Sample 2	theoretical value	960	102	193
	experimental value	960	100	190
Sample 3	theoretical value	208	187	364
	experimental value	200	128	420

チュエータのモデルによる理論値と実験により確認された実験値をそれぞれ示す。実験結果より，本モデルによる妥当性が確認された。ただし，計測精度については，機械的な目視測定のため多少の誤差がある。また，誤差の大きいものは，フィルムのしわをモデルに考慮していないためと考えられる。それぞれのアクチュエータの加圧前と加圧後の様子を図6に示す。各アクチュエータの重量は，それぞれ14.3[g]，24.7[g]，35.3[g]である。本アクチュエータの試作にはHDPEフィルムを使用した。

発生力の計測実験

本アクチュエータの巻き付きに関する発生力として，図7に示す様な実験方法で把持力を測定した。円筒物に巻き付けたアクチュエータを引張り，円筒物に固定しているフォースゲージで力を測定する。その時にアクチュエータが動く寸前の力を把持力とした。図8に横軸を円筒物の外径，縦軸を把持力とした実験結果を示す。本実験結果より，巻き付きに最適な径があることと，対応可能な対象物の径の範囲が広く取れることが示された。

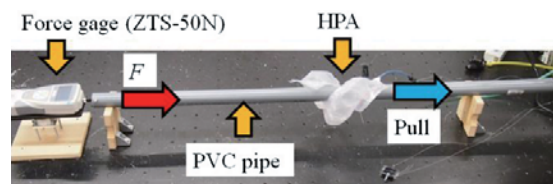


図7 力測定実験システム

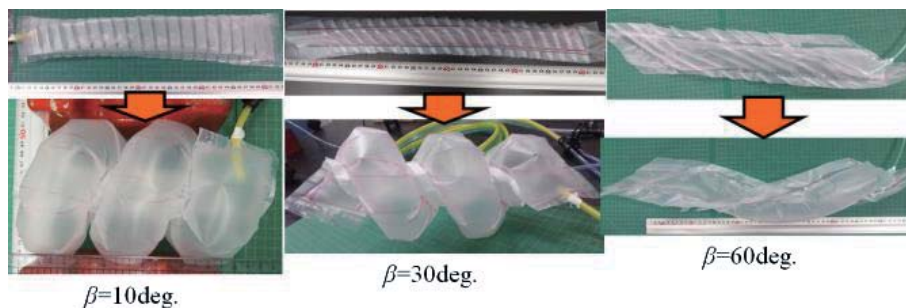


図6 駆動実験結果

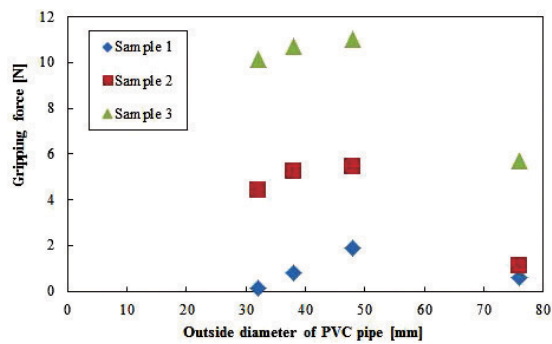


図8 力測定実験結果

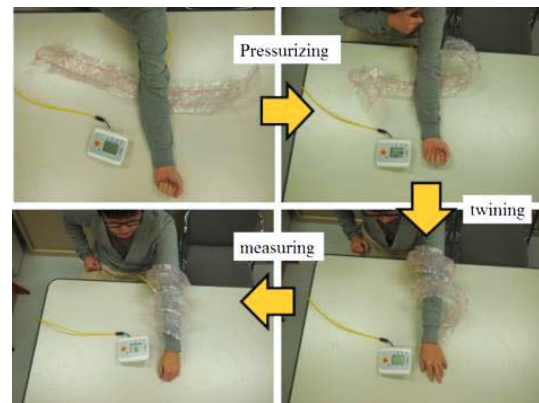


図9 能動的に装着する血圧計カフへの応用例

[今後の研究の方向, 課題]

本アクチュエータの設計手法の確立について達成した。また、力の測定実験から巻き付き対応径の広さが確認された。これは例えば人の腕の様に、不均一かつ不定型なものでもある程度の力を発生して、巻き付くことが可能と考えられる。図9に血圧計のカフとして利用した実験例を示す。自力でカフを固定することが困難な

高齢者や非健常者に対して、能動的に人の腕に装着するカフは有用であると考えられる。今後は、この様なヘルスケア機器だけでなく、ロボットグリップパとしての有効性も期待できる。

[成果の発表, 論文等]

- [1] 天瀬英之, 西岡靖貴, 安田寿彦, “螺旋状巻き型極軽量ソフトアクチュエータの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '14, 2A1-N05, 2014

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

Development of auditory cortex microimplants to restore auditory neural information processing

2031011



研究代表者

北海道大学
大学院情報科学研究科

准教授 西川 淳
(受領時の職名：特任講師)

共同研究者

北海道大学
大学院情報科学研究科

教授 館野 高

[研究の目的]

近年、人間と機械を直接繋ぐ brain-machine interface が注目されている。その先駆けとなる体内埋め込み型機器である人工内耳は、1980年代から実用化されている。既に30年以上の聴覚機能補償機器としての実績があり、世界で約40万人が利用するとの推定もあることから、一般的には確立された医療技術との認識があり、現代の最先端技術を利用した改良が進んでいない。また、人工内耳では蝸牛に電極を留置して電気刺激を行うため、内耳よりも中枢側に難聴の原因がある場合には機能補償を実現できない。さらに、言語獲得前から装用することができれば自然な言語獲得を促すことも可能となるため、幼児にも装用可能な人工聴覚器の小型集積化技術が望まれている。

本研究では、上記の諸問題を解決することのできる次世代人工聴覚器の構成要素として、音響センサ部、信号処理部、細胞インターフェースを試作し、その機能を評価した。また、人工聴覚器を用いて適切な電気刺激を行うために、大脳皮質聴覚野における音の神経情報表現を調べる基礎研究も同時に行った。

[研究の内容、成果]

① 音響センサの開発

ヒトの聴覚情報処理は、内耳にある蝸牛において音を各周波数成分に分けて多数の内有毛細胞における電位変動へ変換するところから始まる。その機能をハードウェアとして実現する音響センサを圧電素子である PVDF を用いて試作した。図 1A に全体図、図 1B に断面図を示した。PVDF フィルムに 64 チャンネルの電極パターンを形成し、裏面にはグランド電極を形成した。その下に音の共鳴条件を位置によって変えるための金属フレームを設置した。図 1C は、今回試作した音響センサを直上から撮影し

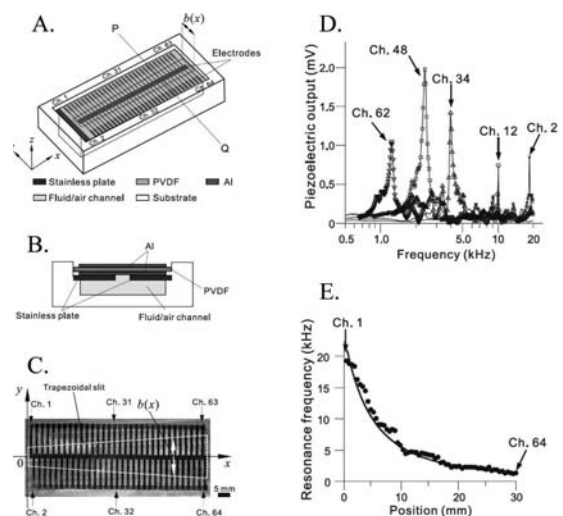


図1 圧電効果を用いて蝸牛の機能をハードウェアとして実装した音響センサ

た写真である。図 1D は、各周波数の音を呈示した際の出力電位であり、電極番号（位置）に応じて異なる周波数に特異的に応答しているのが分かる。また、その共鳴周波数は、位置に応じて連続的に変化し、共鳴条件から算出される理論曲線とよく一致していた（図 1E）。以上のように、蝸牛機能を代替することのできるハードウェアとしての音響センサを作成することができた。同様の構造を微細加工技術で形成することで、新しい人工聴覚器のフロントエンドとなる小型音響センサを開発することができる。

② 多点刺激/計測 LSI のインプラント開発

本研究では、従来の人工内耳と異なり、聴覚神経系の最も高次に位置する大脳皮質聴覚野を直接電気刺激することを試みる。蝸牛と同様に、一次聴覚野には周波数マップが存在するが、その対応関係は状況依存的にダイナミックに変化することが知られている。したがって、人工聴覚器の信号処理部としては、神経活動計測の結果に応じてリアルタイムに電気刺激パターンを自己調節するような機構を持たせる必要がある。しかしながら、こうした多点刺激/計測がほぼ同時に行えるような埋め込み機器（インプラント）は現在のところ報告されていない。そこで本研究では、電気刺激回路と信号増幅回路を高速にスイッチングする機構を組み込んだ 5 mm 角の CMOS-LSI チップを開発した（図 2A）。評価基板（図 2B）を作成して機能評価を行ったところ、ほぼ設計通りの動作を確認することができた。また、実際に動物（齧歯類）に埋め込むための 25 mm×35 mm のインプラント基板（図 2C）を試作した。こちらも動作テストを行ったところ、ほぼ設計どおりの動作を確認することができた。以上のように、本 LSI チップ及びインプラント基板は、聴覚皮質に直接電気刺激する新しい人工聴覚器の信号処理部として十分な機能を有していることが分かる。

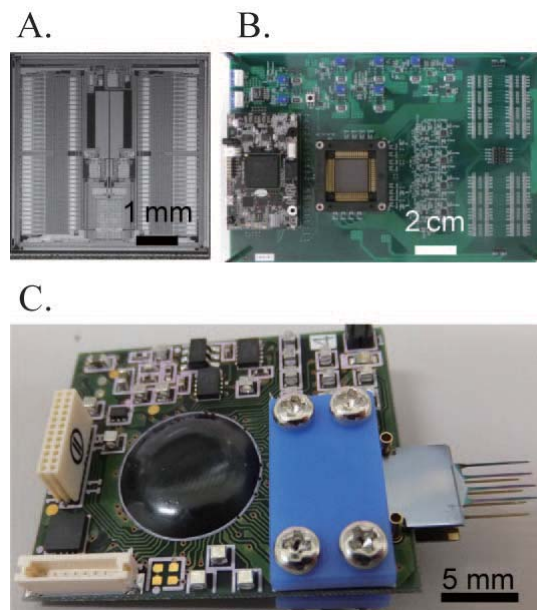


図 2 64 チャンネルで刺激と計測をミリ秒精度で切り換えることができる LSI チップ及びインプラント基板

③ 多点櫛形積層電極の開発

脳から神経活動を計測したり、電気刺激を印加したりするためには、用途に応じた多点電極の開発が不可欠である。また、大脳皮質には、表面に対して水平な方向に周波数マップや領域分けがあるばかりでなく、垂直方向には明確な 6 層構造があるため、効果的に電気刺激を行うためには、3 次元的に刺激/計測点を配置した多点電極を用いる必要がある。そこで微細加工技術を用いて、シリコン基板（SOI 基板）をベースにして成膜とエッチングを施し、図 3A のような $4 \times 4 = 16$ -ch の多点櫛形電極を作成した。図 3B は、そのうちの 1 本のシャンクの先端を拡大したものであり、 $30 \mu\text{m}$ 角の電極が露出しているのが分かる。これを図 3C のように 4 段に積層する機構を作り、 $4 \times 4 \times 4 = 64$ -ch の積層型多点電極を作成した。これにより、一次聴覚野だけでなく、その周りに存在する複数の高次聴覚野を 3 次元的にカバーすることのできる神経細胞インターフェースとなる。

④ 聴覚皮質における神経応答ダイナミクス解析 聴覚皮質に直接電気刺激を印加することで聴

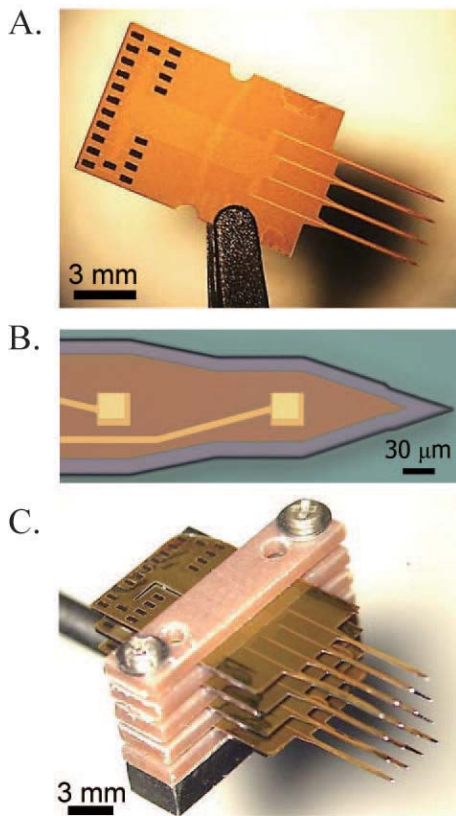


図3 開発した積層型多点電極

知覚を補償するためには、音の情報が聴覚皮質における多数の神経細胞の電気的活動のパターンとしてどのように表現されているかを知る必要がある。本研究では、その時空間的な神経活動パターンを調べるために、電位感受性色素を用いた光イメージングという手法を用いた。ラットに麻酔を施し、手術台に固定して頭蓋骨及び硬膜に穴をあけて脳表を露出させた。露出した脳表を膜電位感受性色素 RH-1691 で浸して染色し、脳表に近赤外光を照射すると、神経活動に応じて蛍光強度に変化が生じる。蛍光変化の測定は、高速 CMOS カメラを用いて 2 ms に 1 枚の高速イメージングを行った。これにより、聴覚野全域の神経活動の時空間ダイナミクスを可視化することができる。図 4 では、1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 kHz の純音を呈示した際に神経活動が最初に生じるスポットをそれぞれ楕円で示しており、AI 野では腹尾側から背吻側へ、AAF 野では腹吻側から背尾側へ、低い周波数

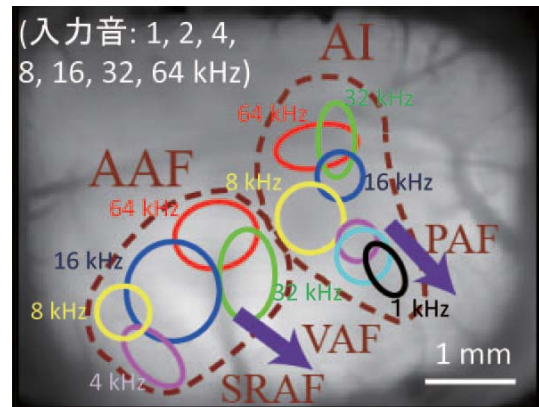


図4 ラット聴覚皮質のトノトピーマップと神経活動伝搬の様子

で応答が始まる領域から高い周波数で応答が始まる場所へと順序良く並んでいる。これはトノトピーマップと呼ばれており、大脳皮質聴覚野の低次領域に共通する特徴である。本研究では、神経活動がトノトピーマップ上をどのような時空間ダイナミクスで伝搬していくか可視化することができ、AI 野ではトノトピーの軸に沿って周波数が高い領域から低い領域へと伝搬し、高次領域である PAF 野へと伝搬していくことを明らかにした。また、AAF 野ではトノトピーの軸とは垂直に伝搬し、同じく高次領域である SRAF 野や VAF 野へと伝搬することが明らかとなった（図 4 の紫色の矢印）。

聴覚皮質神経活動に関するこうした基礎的な知見は、聴覚皮質に直接埋め込む電気刺激型インプラントを開発する上で非常に重要である。例えば、特定の音に対して聴覚皮質全体がどのような時空間ダイナミクスを起こすか分かていれば、インプラントからもそれと同様な時空間パターンを持った電気刺激パターンを印加することで、所望の音を感じることができるよう聴覚皮質神経活動を人工的に引き起こすことができる。

[今後の研究の方向性、課題]

本研究では、次世代人工聴覚器を実現するための構成要素となる、自動的に周波数分解して

多チャンネルの電気信号に変換する音響センサ、計測と刺激をほぼ同時に実現できる LSI チップ、聴覚皮質全域を 3 次元的にカバーする積層型櫛形多点電極を試作した。また、聴覚皮質における音の神経情報表現を明らかにするために、ラット聴覚皮質において電位感受性色素を用いた光イメージングを行い、次世代人工聴覚器を開発するための技術的基盤を確立することに成功した。

今後は、開発した 3 次元電極を用いて、脳表面とは垂直に形成されている層ごとに聴覚応答を解析し、より機能的な電気刺激パターンを見出したいと考えている。また、ラットで実験を行う場合、神経活動としては実際の音を聞いていると同じものを生じさせていても、その個体が本当にその音を知覚しているかどうか分からないため、オペラント条件付けを用いてラットに音弁別訓練を行い、各個体が音刺激をどのような音として知覚しているのかをレバー押し行動計測によって間接的に推定する実験系を立ち上げる予定である。これらの道具立てを総動員して、従来の人工内耳を遥かに越える聴覚補償能を持つ人工聴覚器を実現したい。また、本技術は聴覚に限らず、視覚、触覚、運動、さらには前頭前野などの高次連合皮質などにもそのまま適用できるため、様々な脳機能を補償する汎用 brain-machine interface 機器の基盤技術としても大きな応用可能性を秘めている。

[成果の発表、論文等]

投稿論文 (1 報)

1. T. Tateno, J. Nishikawa, N. Tsuchioka, H. Shintaku, and S. Kawano, "A hardware model of the auditory periphery to transduce acoustic signals into neural activity," *Frontiers in Neuroengineering*, 6: 12. doi: 10.3389/fneng.2013.00012, (2013).

学会発表 (5 件)

1. 能登将成, 西川 淳, 館野 高, "ラット聴覚野における聴覚誘導に関連した神経活動: 膜電位感受性色素を用いた光計測による検討," 社団法人 日本音響学会 聴覚研究会, 豊橋市, 愛知県, 2013 年 11 月 28~29 日.
2. J. Nishikawa, M. Noto, H. Kitamura, and T. Tateno, "Unidirectional dual-component propagation of neural activity evoked by sound and electrical stimulation in rat multiple auditory cortical fields revealed by optical imaging with voltage-sensitive dye," *The 43rd Annual Meeting of the Society for Neuroscience (Neuroscience 2013)*, San Diego, California, USA, November. 9-13, 2013.
3. H. Kitamura, J. Nishikawa, and T. Tateno, "Multielectrode array recording of propagation of activity evoked by electrical micro-stimulation in horizontal and coronal slices of the mouse auditory cortex," *The 43rd Annual Meeting of the Society for Neuroscience (Neuroscience 2013)*, San Diego, California, USA, November. 9-13, 2013.
4. 西川 淳, 能登将成, 北村宏幸, 館野 高, "ラット聴覚皮質における機能的な異方性: 音及び電気刺激に対する神経活動伝搬方向の解析," 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 北見市, 北海道, 2013 年 9 月 4~7 日.
5. 西川 淳, 能登将成, 館野 高, "音及び電気刺激が誘発するラット聴覚皮質の神経活動伝搬特性——膜電位感受性色素による光計測," 第 36 回 日本神経科学大会 (*Neuro 2013*), 京都市, 京都府, 2013 年 6 月 20 日~23 日.

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

Tool-Body Assimilation by Human Robot Imitation Based on Motionese

2031012



研究代表者

京都大学

特定助教

西 出 俊

[研究の目的]

近年、ロボット技術の発展は目覚ましく、人間と大差ない行動を生成することが可能になった。一方で、人間のように自己の経験に基づいて新たに知識や行動を獲得する機構を構築することは未だ困難な課題である。

知能ロボットの実現には、ロボットが自律的に行動を獲得する機構が必要不可欠である。ロボットに全ての行動を作り込むことは事実上不可能であるため、人間のように発達する枠組みが必要である。行動獲得における有力なアプローチとして模倣学習があり、本研究でも模倣学習に着目したロボットの行動学習を行う。

人間の親子において模倣学習を促進させる現象としてモーショニーズがある。モーショニーズとは養育者である親が幼児にある行動を教示する際、幼児の成長に合わせて段階的に教示動作を変化させる現象である。すなわち、幼児が未熟な時は動作を大げさに分かりやすく提示し、ある程度動作を学習すると親が提示動作を簡略化する。本研究では模倣学習にモーショニーズ現象を取り入れることでロボットの模倣学習を効率的に行うことが目的である。

[研究の内容, 成果]

本研究ではロボットの描画模倣学習を実験タスクとして設定し、再帰結合神経回路モデ

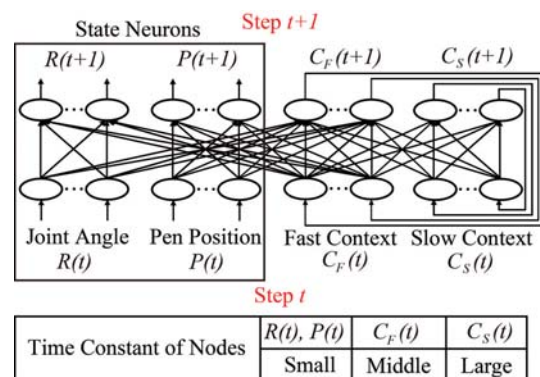


図1 MTRNNの概略図



図2 実験風景

ルの一種である Multiple Timescales Recurrent Neural Network (MTRNN) (図1) を用いて動作を学習した。実験環境は図2のように人間型ロボット NAO にペンを持たせ、ペンタブレット上で描画させて。下記の手順で実験を行った。

【実験手順】

1. ロボットのランダムな腕動作を行うことで身体ダイナミクスとペン先ダイナミク

スの連合学習

2. 人間が描画時に描き出し・描き終わり・角で止めを入れた図形を描画
3. ロボットが描画図形から描き方を連想し、図形を描画する。描画後、うまく描けなかった図形を用いて図1のモデルを追加学習する。
4. 人間が止めを入れずに図形を描画
5. ロボットが描き方を連想し、図形を描画する。描画後、うまく描けなかった図形を用いて図1のモデルを追加学習する。

これらの実験手順において、2～3.、4～5.はロボットの描画結果が収束するまで繰り返し行う。以下実験手順1～5.について説明する。

実験手順1.ではロボットの腕の関節2自由度を用い、乱数で指定された目標関節角に腕を移動する動作を繰り返し行った。動作中、腕の関節角系列とペンタブレットから得られるペン先位置系列を取得する。動作終了後、得られた系列をMTRNNで学習し、腕の関節角系列とペン先系列の関係性を学習する。この過程でロボットは以下の二つの機能を獲得する。

【獲得機能】

1. ロボットの腕の動かし方によって何が描けるか連想する機能
2. 人間が描いた図形に対し、腕をどのように動かせば描けるか連想する機能

ただし、この段階では感覚と運動の連想機能が未熟であるため、正確に連想を行うことはできない。

実験手順2.ではまず人間がペンタブレットを用い、基本図形を描く。本研究では基本図形として正方形、円、三角形を描画図形とした。人間が描画する際、認知科学分野におけるモーションニーズの知見を利用し、描画図形の基本要素である直線を分かりやすく提示しながら描画する。具体的には描き出し、描き終わり、図形の角で止めを入れつつ描画を行う。

実験手順3.では人間が描いた図形に対し、ロボットは獲得機能2.を利用し、どのように

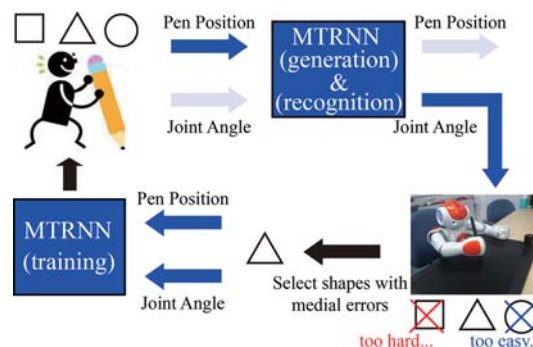


図3 描画模倣学習の概略図

腕を動かすか連想して図形を描画する。描画後、うまく描けなかった図形を選択して図1のモデルを追加学習する。さらに実験手順2で人間が描いた図形に対して獲得機能2.で連想し、描画を繰り返す。実験では描画結果が収束するまで手順2.と3.を繰り返し行う。手順2.と3.の概略図を図3に示す。

実験手順4.と5.では手順2.と3.と同様のことを行うが、人間が図形を描画する際、止めを入れずに描画する。これはモーションニーズ現象において幼児が成長したら親が教示動作を簡略化することに相当する。

本研究ではこの実験手順で実験を行い、ロボットの描画性能を評価した。描画性能については以下の3点が確認された。

【描画性能】

1. ロボットは右手を使った場合は右回りの円を、左手を使った場合は左回りの円を一番早く描くことに成功した。
2. 正方形と三角形については右手を使った場合、全体的に左回りの方がうまく描けた。
3. 止めを入れることで角の描画が通常の模倣学習に比べると向上していることが確認できた。

描画性能1.については人間の幼児も右利きの場合は右回りの円を最初に描くようになり、左利きの場合は左回りの円を最初に描くといわれている。これは人間の身体性によるものであると考えられ、人間の身体構造上利き腕と同じ

方向に描く円が描きやすいといえる。本実験でも人間と似た身体性を持つ人間型ロボットを用いたため、利き腕と同じ方向に描く円が最初に描けるようになったと考えられる。

描画性能 2. については、ロボットの動作空間を解析してその要因を確認した。その結果、実験手順 1. で行ったランダム動作の動作領域と左回りの正方形、三角形の動作領域が重なっており、右回りの正方形と三角形については動作領域が異なっていた。そのため、実験手順 1. で経験した動作で構成される左回りの正方形と三角形の方がきれいに描けるようになったと考えられる。

描画性能 3. については、特に三角形において描画性能の向上が確認された。また、角の描画だけではなく、止めを入れることで模倣描画そのものの性能向上も定量的に確認した。止めを入れることにより、描画における基本単位である直線の開始・終了を明確にし、ロボットが図形を認識する時も図形を直線の組み合わせとして認識できるようになったためであると考えられる。さらに、実験手順 4. と 5. のように止めを入れずに描画した結果、止めを入れた時に比べると描画性能は低下したものの、最初から止めを入れずに学習した場合よりは描画性能が向上することが確認できた。

ロボットが図形を描画した結果の一例を図 4 に示す。図 4 では左から順に人間が描画した図

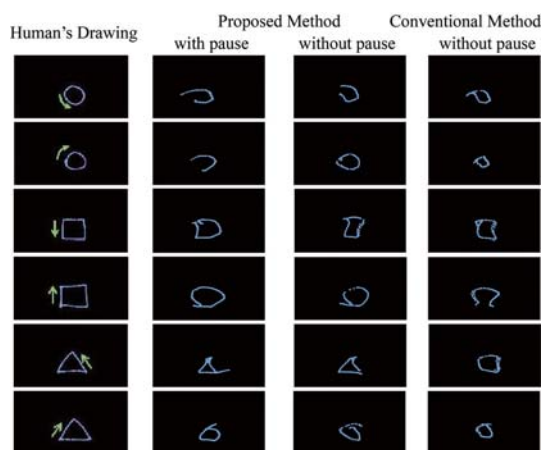


図 4 模倣描画結果の一例

表 1 絶対誤差平均

Proposed Method		Conventional Method
with pause	without pause	without pause
1.42	1.64	1.68

形、本実験において実験手順 3 における描画結果、実験手順 5. における描画結果、最初から止めを入れずに学習した場合の模倣結果を示している。また、上から順に左周りの円、右回りの円、左回りの正方形、右回りの正方形、左回りの三角形、右回りの正方形の描画結果を示している。定性的に結果を評価すると全体的に提案手法の描画性能の方がいいことが分かる。定量的に描画結果を評価するため、人間が描画した図形とロボットが描画した図形の絶対誤差平均を求めた。その結果は表 1 となった。表 1 から定量的にも提案手法の有効性が確認できる。

【今後の研究の方向、課題】

本研究成果では、ロボットの描画における道具使用を対象とし、人間の支援（モーショニーズ）を導入することで模倣性能の向上を実現した。今後の研究の方向性としては以下の 3 つを考えている。

【研究の方向性】

1. ロボットの模倣学習における人間の支援箇所の発見
2. ランダム動作から道具の機能性を発見するモデルの構築
3. 一般的な道具使用へのモデル拡張

研究の方向性 1. について、本実験ではモーショニーズの導入について、描画時に人間が角で止めを入れることで描画性能向上を実現した。これはスキルなどにおけるコツにも対応していると考えられる。本研究ではコツとなる角が分かっているという条件で実験を行ったが、一般的なスキルにおいて、コツとなる箇所が明確ではないことが多い。本実験ではランダム動作が円弧で形成されていたため、角の描画は曲線や直線よりも緻密な制御が必要であった。このよ

うにコツとなる箇所を模倣学習の過程で発見するモデルはより高次のスキル獲得においても重要な課題である。

研究の方向性 2. について、本研究では描画する機能性のみに注目し、ロボットにペンを持たせた状態で描画する実験を行った。一方で、人間の幼児はペンに描画する機能が備わっていることは知らず、様々な行動を経験する過程で描画する機能性を発見する。同様に他の道具についても他人の行動を観察したり、自身が道具を使用したりすることでその機能性を発見する。今後の研究の方向性として、道具の機能性発見にも注目し、複数の道具についてその機能を識別し、道具使用動作を生成するモデルに拡張していきたいと考えている。

研究の方向性 3. について、本研究では基礎実験として、道具をペンとし、描画模倣をする実験を行った。それは一般的に動作生成に関する研究は評価が難しく、描画実験は描かれた図形から性能評価ができるという利点があるためである。上記の研究の方向性 2. とも関連するが、ロボットがどのように道具の機能性を発見することは興味深い課題であり、他の道具にも応用することで一般的な道具使用モデルへと展

開できる。

今後はこれら 3つの研究の方向性についてそれぞれの課題に取り組み、人間の道具知覚・道具使用動作に関する知見をもとにロボットの道具使用モデル構築を実現していきたい。

[成果の発表, 論文等]

- [1] Shun Nishide, Keita Mochizuki, Hiroshi G. Okuno, Tetsuya Ogata, "Insertion of Pause in Drawing from Babbling for Robot's Developmental Imitation Learning," in Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2014. (accepted)
- [2] Keita Mochizuki, Shun Nishide, Hiroshi G. Okuno, Tetsuya Ogata, "Developmental Human-Robot Imitation Learning of Drawing with a Neuro Dynamical System," in Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 2336-2341, 2013.
- [3] 望月敬太, 西出 俊, 奥乃 博, 尾形哲也, 「ロボットによる描画運動発達モデルと軌道の重み付き区間認識・学習を利用した精度向上」日本情報処理学会第 76 回全国大会, 3C-5, 2014.
- [4] 望月敬太, 西出 俊, 奥乃 博, 尾形哲也, 「停止動作を活用した描画運動におけるロボットの発達模倣学習」日本ロボット学会第 31 回学術講演会, 1C2-06, 2013.

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

Dexterous robot hand control using neural signal recorded from the visual cortex

2031013



研究代表者

産業技術総合研究所

主任研究員

林 隆 介

〔研究の目的〕

人間と機械の調和促進のためには、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が操作できるインタフェース技術の進歩が望まれる。そこで、脳や神経細胞の電氣的活動として符号化されている情報を、機械や電子機器の制御に直接利用する、ブレイン・マシン・インタフェース (Brain Machine Interface, 以下 BMI) と呼ばれる技術が近年注目されている。

BMI 技術を使うと、ユーザが体を動かさずとも、頭で何かを考えただけで、さまざまな機械の制御が可能になることから、主に運動機能障害をもつ患者の支援機器、Prosthesis (人工補綴) 技術として多くの研究が行われている。初期臨床実験ではあるが、電極を四肢麻痺患者の運動野 (手足の運動信号を司る脳領域) に埋め込み、記録された神経活動からコンピュータのカーソルやロボットアームを動かす実験に成功している⁽¹⁻³⁾。

しかし、こうした従来手法による BMI 技術には、運動野損傷によって運動機能障害が生じた患者には適用できない問題点がある。これに対し、人間は日常、視覚情報に多くを依存しており、意図した身体動作は視覚的にイメージすることが可能である。また、顔や手など身体に関わる視覚像は、側頭葉の特定の領域に凝集した神経細胞群によって符号化されていることが

知られている⁽⁴⁾。したがって、動作に伴って変化する身体像を、視覚野の神経活動から復号化することにより、義手をはじめとする介護・補助機器の制御が実現できる可能性がある。そこで、本研究では、多くの現場で汎用的に利用できる5指ロボットハンドを制御対象として設定し、視覚野で記録した神経活動から脳内で表象される視覚イメージを読み解き、ロボットハンドの手形状を制御する BMI システムの研究開発に取り組んだ。

〔研究の内容、成果〕

1. システム設計

目標とする BMI システムの概念図を図1に示す。システムは主に3つの要素から構成される。第1に脳/神経活動を記録するコンポーネント、第2に記録した神経活動データを処理し、視覚表象を復号化するコンポーネント、そして、

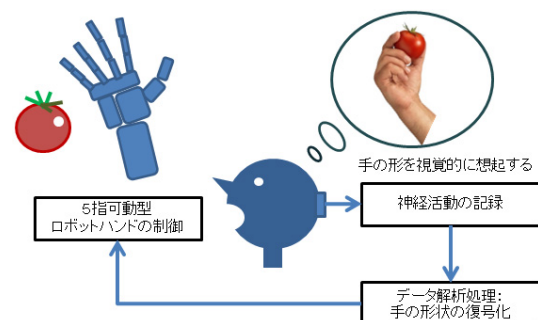


図1 システムの概念図

制御対象となるロボットハンド部である。以下、それぞれの構成要素について、詳述する。

1.1 神経活動記録

脳機能活動を計測する手法としては、脳波や脳磁図、fMRI など頭皮外から非侵襲的に計測する手法があるが、得られる情報量が少ないため、複雑な運動制御に利用するには限界がある。

そこで、多くの情報を得るため、脳に電極を埋め込み、神経細胞の電氣的活動を直接記録する、侵襲的脳機能計測法に基づく BMI 開発を行うこととした。一方で、侵襲的脳機能計測を人間の患者で行いながら、新しいインタフェース開発を行うには、技術面においても、安全面、倫理面においても多くの困難がある。そこで、人間と同等の視覚機能を有するマカクサルを記録対象とした。そして、下側頭葉には手を含む身体部位に関する画像に応答する神経細胞が数多く存在することから、当該領域を記録部位に設定した。

神経細胞の活動電位を数多くの細胞から同時記録することができれば、より精度の高い視覚表象の復号化が可能となる。そこで、微小な電極が剣山状に並んだアレイ型マイクロ電極を 3 つ（電極総数 224 本）脳に埋め込み、神経活動記録を行った。実験に用いた電極アレイは、Blackrock 社製 Cereport Array（10×10 本の電極配列）が 2 つと、MicroProbe 社製 Floating Microelectrode Array（4×9 本の電極配列）が 1 つである。下側頭葉の TE 野と呼ばれる脳領域表面に埋め込んだ。

神経信号は Tucker-Davis 社製 多チャンネル生体アンプによって増幅されたのち、AD 変換され、活動電位の検出処理が行われた。信号が全くとれない電極を除いた 190 チャンネル分のデータが記録媒体に保存された。

1.2 神経データ処理

記録した神経活動データは、100 ms ごとの活動電位の発火回数に変換され、190 次元の時系列信号として解析処理された。データの処理は汎用の WindowsPC（12 コア、3.1 GHz、64 bit、

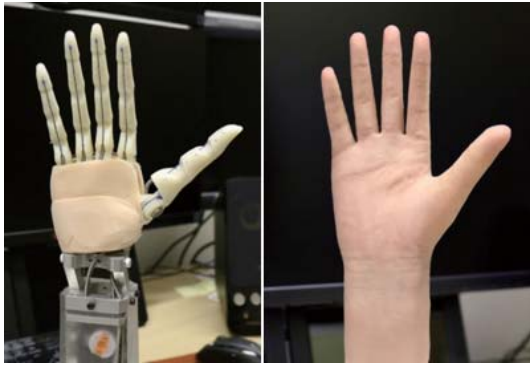
128 GB メモリ）上で、Matlab（Mathworks 社）数値解析ソフトウェアを利用して行われた。神経信号の具体的な復号化手法については、後述する。また、本研究期間中、データ処理は全てオフラインで行った。オンラインでのリアルタイム・データ処理とデバイス制御の実装については今後の課題とした。

1.3 5 指可動型ロボットハンド

本研究では、BMI の制御対象としてヒト型の 5 指可動型ロボットハンドを選定した。5 指の精緻な動作制御は、複雑で数多くの運動信号を解読する必要があることから、最先端の BMI 研究において、最も挑戦的な制御対象の一つである。そして、BMI による 5 指の精緻動作制御が実現できれば、電動義手の制御手法として有望であるだけでなく、食事や日常生活の動作支援に広く応用できる。

本研究では、視覚的に制御対象を操作することが最終目標であることから、BMI 研究開発用プラットフォームとして、ヒトの手に外見上、非常に類似したロボットハンドの作成に注力した。プラットフォームのベースには、ITK 社製、HANDROID8 を採用した。HANDROID8 は、3D プリンタで作成された 5 指可動なロボットハンドで、指の伸展/屈曲をゴム紐とばね/サーボモータとプーリー機構によって行う（親指 2 自由度、その他の 4 指、各 1 自由度）。ロボットハンドとして、物体把持能力が低いため、直接、電動義手や介護補助として利用できないが、1) 外形がヒトの手に近く、2) 構造がシンプルのため、比較的安価に入手可能で、3) 機構上、指部が細く、屈曲時に指同士の干渉が少ない利点がある。

HANDROID8 そのものは（図 2 左）に示したとおり、扁平で無機質な外見であることから、専用の装飾カバーを作成した（佐藤技研製）。カバーは指の伸展、屈曲に対応できるよう伸縮性の高い、非常に柔らかい RTV シリコンゴム製で作成し（硬度 10 Shore A 以下）、指部は、屈曲したときに、指同士がなるべく干渉しない



左) 装飾カバーなしの状態。手の平や甲の部分に肉盛り用ウレタンを装着。右) 装飾カバー着用時の状態。

図2 5指可動型ロボットハンド

よう薄く加工した。その後、手の甲や平にウレタンで膨らみを持たせ、爪や皺、血管などの装飾を施すことで、標準的な女性の手極めて類似したロボットハンドに仕上がった(図2右)。こうした高リアルティなロボットハンドを準備することにより、将来リアルタイム制御を行う際、本物の手を見るのと同様な神経活動が視覚野で誘発され、自然なBMI制御が可能になると期待される。指の伸屈はmbedマイクロコントローラを介して神経情報処理結果を反映した形で制御された。

2. 実証実験

下側頭葉の視覚誘発神経活動を利用した、BMIによる5指可動型ロボットハンドの形状制御の実証実験として、1)実験動物に「グー」「チョキ」「パー」三種類の手の形状画像を提示し、2)記録した神経活動から、各時刻においてどの画像を見ているのか推定し、3)推定結果に合わせてロボットハンドの形状制御を行った。

2.1 実験課題

実験動物が、500 ms 間、コンピュータモニタ画面上の中央に出現する点を注視すると、120種類の物体画像のいずれか1つがランダムに1500 ms 提示された。画像が消えた後、さらに500 ms 間、中央の点を注視続けると、報酬としてジュースが与えられた。1回の計測実験あたり、1つの画像は約10回提示された。

実験終了後、120種類の画像のうち、「グー」「チョキ」「パー」三種類の手の画像に対応する神経データだけを切り出し、以下に記す解析を行った。計5回計測実験を行った。

2.2 判別手法

各時刻(100 ms 刻み)において、「グー」「チョキ」「パー」「何も提示されていない」の4条件のうちどの状態であるかを、神経活動から判別するため、190次元の時系列データに対し、線形判別分析を行った。Leave-one-out法を使って、全データを訓練データとテストデータに分け、判別分析器の学習と判別テストを繰り返し行ったのち、その平均値で判別精度を評価した。訓練データは、bootstrap法を使って、同一SOA(画像刺激提示時点を基点とした時刻)、同一画像、同一電極の条件内でランダムサンプリングすることで、データの標本数を増やし、判別器の学習精度を向上させた。

2.3 実験結果

190 chの神経活動データが同時記録できたことにより、100 ms 間の神経活動データだけから、単純な線形判別分析を使って、実験動物がどんな手形の画像を見ているのか、平均80%以上の精度で判別することに成功した。ただし、判別精度は、画像の提示タイミングを基点として大きく変化した(図3)。「手の画像を見ていない」期間は95%以上の高精度で判別できるが、どの手の形状画像を見ている

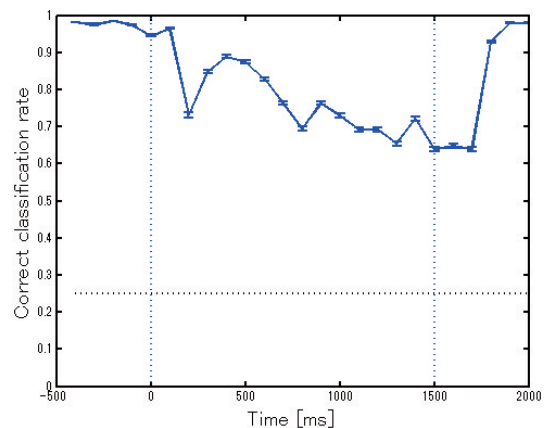


図3 画像判別精度の時間変化



図4 神経信号に基づくロボットハンドの形状制御

かについては、画像提示後 400 ms をピーク (88.8%) に、時間経過とともに低下した。判別精度に時間変動はあるものの、全期間を通じて偶然 (25%) より有意に高い精度で手の形状を判別することができた。上記の判別手法を用いて、実際に神経データをオフラインで読み出し、見ている手の形状を予測し、ロボットハンドを予測形状にあわせて制御した様子を図4に示す。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究は、動作のイメージを視覚的に想起するだけで機械が操作できるよう、視覚情報に関わる脳・神経活動を利用する BMI システムを提案した。そのための実証研究として、1) 人間の手に外観が極めて類似した 5 指可動型ロボットハンドを研究開発用プラットフォームとして作成し、2) 視覚野から記録された神経細胞群の活動から、見ている手の形状を判別する手法を確立し、3) 推定した手の形状に合わせて、ロボットハンドの制御を行った。

今後は、実物のロボットハンドを見ながら、視覚フィードバックによって 5 指制御をリアル

タイムで行う BMI システムの構築をめざす。

また、視覚情報を BMI に利用する場合、神経活動から引き出すことのできる視覚情報の質が時間変動することが明らかになった。こうした時間変動の影響を受けないような制御手法やアプリケーションを設定し、介護の現場などで利用できるようにシステムにつなげていきたい。

[参考文献]

- 1) Hatsopoulos, et al., IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference, pp. 7660–7663, 2005.
- 2) Hochberg, et al., Nature, vol. 442, pp. 164–171, 2006.
- 3) Hochberg, et al., Nature, vol. 485, pp. 372–375, 2012.
- 4) Pinski et al., Proc Natl. Acad. Sci. USA, vol. 102, pp. 6996–7001, 2005.

[成果の発表, 論文等]

〈Proceedings〉

- 1) R. Hayashi, S. Nishimoto: Decoding visual information in monkey IT cortex using deep neural network, *Proceedings of Life Engineering Symposium 2013 (LE2013)*, pp. 511–514, 2013.

〈学会発表〉

- 2) 林 隆介, 倉重宏樹: GIST 記述子を利用したニューロン活動に基づく観察画像の復元, 第 36 回

- 日本神経科学大会, 京都, 2013 年 6 月.
- 3) R. Hayashi, S. Nishimoto: Decoding visual information in monkey IT cortex using deep neural network, 計測自動制御学会 ライフエンジニアリング部門シンポジウム 2013, Yokohama, Sep., 2013.
- 4) R. Hayashi, S. Nishimoto: Image reconstruction from neural activity via higher-order visual features derived from deep convolutional neural networks, Neuroscience 2013, San Diego, USA, Nov, 2013.
- 5) 林 隆介, 西本伸志: サルの下側頭葉とディープニューラルネットの視覚情報表現の比較, 日本視覚学会 2014 年冬季大会, 東京, 2014 年 1 月.

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

Sarcopenia diagnosed by bioelectrical impedance analysis
and the association with metabolic syndrome

2031014



研究代表者	名古屋大学医学部附属病院 整形外科	医 員	飛 田 哲 朗
共同代表者	名古屋大学医学部附属病院 整形外科	助 教	今 釜 史 郎

【研究の目的】

「サルコペニア」。この聞き慣れない言葉は、ギリシャ語の「肉」を意味する「sarx」と、「減少」を意味する「penia」からなる病名である。古くから、高齢になるにつれ徐々に筋量や筋力が低下することが知られていた。1989年にRosenbergらは、これまでは当たり前と思われていたこの現象をサルコペニア（加齢性筋肉減少症）と名付け、高齢者の脆弱性の1つとして注目するように提唱した。

以降、高齢者の易転倒性、移動能力の低下、脆弱性の一因として、栄養学や疫学を中心として世界的にサルコペニアの研究が進んでおり、医療従事者のみならず一般社会においても注目を集める概念である。

一方、先進文明諸国では、近年脳血管障害、虚血性心疾患等の動脈硬化性疾患が主要な死因を占める。1988年に世界保健機構は動脈硬化性疾患のハイリスク状態を「メタボリックシンドローム」として定義付けその危険性を啓蒙してきた。サルコペニアは筋量低下による糖代謝異常のみならず、身体活動性の減少から肥満をも惹起するため、サルコペニアがメタボリックシンドロームの一因となる負の連鎖が指摘されている。サルコペニアの正確な診断と治療が動脈硬化性疾患の予防法開発に不可欠である。

サルコペニアの診断には筋量測定が必須である。従来、筋量測定にはCTによる筋断面積測定やdual energy X-ray absorptiometry法による測定が必要だったが、検査可能な施設は少なく被曝侵襲もある為、健常者の検査は困難だった。

Bioelectrical impedance analysis (BIA 法) は、簡便な機械で微弱な交流電気を流し生体組織の電気抵抗を計測、組織の違いによる電気抵抗の相違を利用し体組成を測定する無侵襲の筋量測定法で、サルコペニア診断に対する臨床応用が期待されている。

本疫学研究では、地域在住高齢者のサルコペニアの実態をBIA法による筋量測定で調査した。さらに生活習慣病であるメタボリックシンドロームとサルコペニアとの関連を検討した。

【研究の内容、成果】

【対 象】

名古屋大学は北海道八雲町にて30年間継続し、毎年住民健診を通じた疫学調査を実施した実績を有する。

本検診は整形外科の他にも内科、耳鼻科、泌尿器科、眼科、医療検査部、栄養学科が横断的に検診を実施するのが特色である。本研究は2013年度検診参加住民を対象とし、参加者の

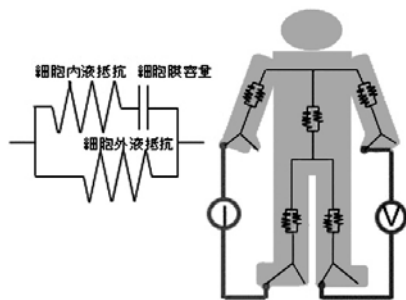
同意と院内倫理委員会の承認のもと行われた。

参加者のうち本研究の対象者は 335 名、平均年齢は 64.9 歳であった。

【筋量測定とサルコペニア診断】

体組成は医療用体組成計（Biospace 社、Inbody 720）を用いて bioelectrical impedance analysis（BIA；生体電気インピーダンス）法によって測定した。原理の概略を図示する（図 1）。

BIA 法は市販の体脂肪計と同様の方法で、生体に微弱な交流電気を流し、組織の電気抵抗（インピーダンス）を計測する。脂肪・筋肉・骨の生体組織の違いにより電気抵抗が異なる事を利用して体組成を測定する方法で、CT 断面積法に遜色ない正確性を有し、上下肢・体幹ごとの筋量測定が可能で、簡便で無侵襲の筋量測定法である。被検者は両手に電極を把持して大型の体重計のような外観の器械に乗る（図 2）。測定時間は 90 秒程度で、即時に測定結果を印刷して被験者に説明することが可能である。Tanimoto らは 18 才-39 才の若年ボランティア 1719 名の平均-2SD 値から、BIA 法による四肢骨格筋指標（appendicular skeletal muscle mass index, ASMI）が、男性 7.0 kg/m^2 未満、女性 5.8 kg/m^2 未満をサルコペニア診断基準値と報告した。この値を用いて、欧州サルコペニア診断ガイドラインに準じ、サルコペニアの診断を行った。



組織毎の電気抵抗の違いを利用し
筋量、脂肪量を測定

図 1 Bioelectrical impedance analysis 法の原理



図 2 Bioelectrical impedance analysis 法の測定の実際

【運動機能評価】

握力、背筋力、finger floor distance (FFD)、10 m 最大歩行速度、3 m timed up and go test (3mTUG)、最大歩幅テスト、2 ステップテスト測定を行った。

【メタボリックシンドローム診断および動脈硬化評価】

メタボリックシンドロームの診断は 2005 年の改訂 National Cholesterol Education Program-Third Adult Treatment Panel (改訂 NCEP-ATPIII) 基準を用いた。すなわち、腹部肥満（腹囲男性 90 cm、女性 80 cm 以上）、高トリグリセリド血症（血清トリグリセリド 150 mg/dl 以上）、低 HDL コレステロール血症（血清 HDL コレステロール男性 40 mg/dl 未満、女性 50 mg/dl 未満）、高血圧（収縮期血圧 130 mmHg 以上、または拡張期血圧 85 mm ）、高血糖（空腹時血糖 100 mg/dl 以上）の 5 項目のうち、3 項目以上満たすものをメタボリックシンドロームとした。動脈硬化の評価として頸動脈エコーによる内膜中膜複合体厚（intima-media thickness, IMT）を測定した。

【統計学的検討】

男女間のサルコペニア有病率は χ^2 乗検定で検討した。参加者をサルコペニアの有無により、サルコペニア群と正常群に分け、各種動脈

硬化因子測定結果を T 検定および一般線形モデル (GLM) による共分散分析を用いて比較した。補正は既知のサルコペニア関連因子である性別、年齢、BMI により行った。サルコペニアのリスク因子の評価には各種患者背景、測定値を共変量としたロジスティック回帰分析を強制投入法により行う事により検討した。統計学的検討には統計ソフト SPSS (Ver.22, IBM 社)を用い、 $P<0.05$ を有意水準とした。

【結 果】

被験者全員のメタボリックシンドロームの有病率、サルコペニアの有病率および体組成測定結果のうち上下肢の筋量分布を示す (表 1)。

男女別のメタボリックシンドロームの有病率は男性 14% (146 名中 20 名)、女性 11% (189 名中 21 名) で有意差を認めなかった ($P=0.69$)。男女別のサルコペニアの有病率は男性 21% (146 名中 31 名)、女性 31% (189 名中 58 名) で女性が高い傾向だった ($P=0.052$)。サルコペニア群におけるメタボリックシンドロームの有病率は 11% (89 名中 10 名)、正常群におけるメタボリックシンドロームの割合は 13% (246 名中 31 名) で有意差は認めなかった ($P=0.74$)。正常群およびサルコペニア群の運動機能においては 2 ステップテスト、握力、背筋力、歩行速度、最大歩幅において、サルコペニア群が正常群に比して有意な機能低下を示した。

BMI・性別・年齢を共変量として一般線形モ

表 1 被験者のメタボリックシンドローム有病率および筋量およびサルコペニア有病率

		全体 (n=335)		男性 (n=146)		女性 (n=189)	
メタボリックシンドローム有病率 (%)		12		14		11	
サルコペニア有病率 (%)		26		21		31	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
四肢骨格筋指標	(kg/m ²)	6.8	1.1	7.6	0.8	6.1	0.7
上肢骨格筋指標	(kg/m ²)	1.7	0.4	2.0	0.3	1.5	0.2
下肢骨格筋指標	(kg/m ²)	5.1	0.7	5.6	0.6	4.7	0.5
右上肢筋量	(kg)	2.2	0.7	2.8	0.5	1.7	0.3
左上肢筋量	(kg)	2.2	0.6	2.7	0.5	1.7	0.3
右下肢筋量	(kg)	6.3	1.5	7.6	1.2	5.4	0.8
左下肢筋量	(kg)	6.3	1.5	7.6	1.1	5.4	0.8

表 2 サルコペニア群と正常群の動脈硬化因子

	サルコペニア群 (n=89)		正常群 (n=246)		P 値
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	
IMT 左右平均値 (mm)	1.07	0.05	1.02	0.03	N.S
収縮期血圧 (mmHg)	133	2	126	1	$P<0.01$
拡張期血圧 (mmHg)	74	1	70	1	$P<0.01$

BMI、年齢、性別補正を一般線形モデルにより実施

N.S: not significant

デルにて補正した後の動脈硬化因子を示す (表 2)。血圧は収縮期、拡張期ともにサルコペニア群が有意に高く、IMT 左右平均値は、両群間に有意差はなかった。

【今後の研究の方向、課題】

人口の高齢化とともに世界的にサルコペニアの患者数が急増しており 2050 年には 2 億人と推計されている。筋肉は身体の運動を行うのみならず糖代謝の大半を占める臓器である。筋肉が減ることによりインスリン感受性の悪化が起きることが報告されている。また我々は以前の研究で日本人骨粗鬆症骨折患者における高いサルコペニアの有病率を報告している。

しかし、これまでの研究は DXA 法による筋量評価が中心であり、地域住民検診における BIA 法の有用性は検討されていなかった。さらにはメタボリックシンドロームとの関連性はこれまで不明であった。

本研究では地域在住高齢者におけるサルコペニアの診断に BIA 法を応用した。今回の平均年齢 65 歳のコホートにおけるサルコペニア有病率は 27% であり、従来日本国内および海外で報告されたもの (22.7-35.7%) とほぼ一致する値であった。一般住民においても BIA 法を用いたサルコペニアの診断法は有用であると考えられた。

メタボリックシンドロームの有無とサルコペニアの有無には一定の関連は認められなかった。動脈硬化そのものはサルコペニア重篤化の潜在的要因ではあるが、それにもましてるい瘦が筋量に及ぼす影響が強かったためと考えられた。

またサルコペニア患者において著明な運動機能の低下を認めた。さらにサルコペニア患者において動脈硬化の原因でもあり結果でもある、高血圧を認めた。日常における活動量の低下が筋量の低下と血圧の上昇を引き起こし、さらには高血圧による筋肉血管の動脈硬化性変化が、筋血流低下を引き起こし、さらなるサルコペニアの悪化を引き起こす悪循環が考えられた。

サルコペニアの治療による虚弱高齢者の予防は、限られた介護・医療資源を有効に活用するための切り札である。だが、わが国のサルコペニアの研究は緒に着いたところであり、高齢者脆弱性に関わる疾患との関連を調査した研究も未だ不十分である。今後も地域在住高齢者を対象とした疫学調査において、BIA法による簡便なサルコペニア診断の妥当性の検証を継続し、メタボリックシンドロームのみならず高齢者の脆弱性を惹起する疾患群とサルコペニアと関連性のさらなる検討を行い、その負の連鎖を断ち切る必要がある。

[成果の発表, 論文等]

本研究に関連する成果を下記の論文に報告した。

Hida T, Harada A, Imagama S, Ishiguro N. Managing Sarcopenia and Its Related Fractures to Improve Quality of Life in Geriatric Populations. *Aging Dis* 2013; Epub ahead of print.

本研究に関連する成果は下記学会で報告した。

第 87 回日本整形外科学会学術総会（2014 年 5 月，神戸）

- ・ 演題名：一般住民におけるサルコペニア肥満と運動機能への影響。筆頭演者名：飛田哲朗
- ・ 演題名：一般住民の骨粗鬆症患者におけるサルコペニアの実態と QOL への影響の検討。筆頭演者名：飛田哲朗
- ・ 演題名：一般住民における腰部脊柱管狭窄症罹患率と神経障害性疼痛，QOL の検討。筆頭演者名：今釜史郎，共同演者名：飛田哲朗

第 43 回日本脊椎脊髄病学会学術集会（2014 年 4 月，京都）

- ・ 演題名：変形性腰椎症とサルコペニア —— 地域在住中高齢者における検討。筆頭演者名：飛田哲朗

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

Control System Design for Wearable Robot Suit Working in Phase with
Human Motion Without Biological Signal Measurement

2031015



研究代表者

山口大学大学院理工学研究科

准教授

藤 井 文 武

【研究の目的】

近年、身体に装着して利用し、随意運動の補助やリハビリテーションの支援を行うリハビリテーションロボティクスと呼ばれる分野の発展が目覚ましい。ロボット技術を応用したリハビリテーション支援では、装置を装着した人の運動意図を如何に検出し制御に活用するかが重要な課題であり、表面筋電位（sEMG）の利用が提案されているが、妥当なアシストトルクを提供するためには、個々人によって異なるsEMGと筋活動量の関係を学習することが必須となり、従って計算負荷の高い制御系の実装が不可欠と考えられる。

一方、農林業など従事者に高齢者が多く、肉体的労働が負荷となりうる方の軽度な運動支援や、介護・建設等の肉体的に過酷な労働の労働負荷を軽減化する目的のロボットスーツも活発に研究開発がなされている。それらの装置では、装着されているアクチュエータの駆動を手動操作（呼吸、体姿勢の検出など）で行うものや、装着者が意図する運動を行った結果として得られる外界とのインタラクションの結果（床反力、筋肉の変形量など）を検出してアクチュエータの動作指令値決定にフィードバック利用するものが多い。これらの信号には、EMGを利用する場合のような学習過程が不要であるが、装置装着者の当初の運動意図と、測定信号フィード

バックの結果として生じるアクチュエータによるアシストの間には相応の位相遅れが含まれ、それが装着者の自然な運動を阻害する場合がありますと懸念される。そこで本研究では、装着者の運動意図をsEMGなどの生体信号によることなくできる限り速やかに検出し、ロボットスーツの動作支援に活用することで、装着者の運動と同調したアシストを提供することが可能となるアシストスーツ制御系を考案し、試作装置を用いた初期評価実験を行うことで、アイデアの有効性の検証を行う。

【研究の内容・成果】

2.1 関節角加速度推定システムの構築

我々は、従来の身体装着型ロボットによる動作支援で従来用いられている「動作結果のセンサによる検出とフィードバック」に代わり、動作筋起の段階での動作意図と強度の推定に、動作を起こす起源となる力・トルクとほぼ同相の信号であると期待される関節角加速度を利用することが有効であるとの考えから、各動作補助対象関節において独立に関節角加速度推定機構を実装しそれをアクチュエータの制御に活かすことを考えた。肘関節についてその装置構成を模式的に表したのが図1である。

各関節に、その回転角度を検出するためのポテンシオメータと、回転角速度を検出するため

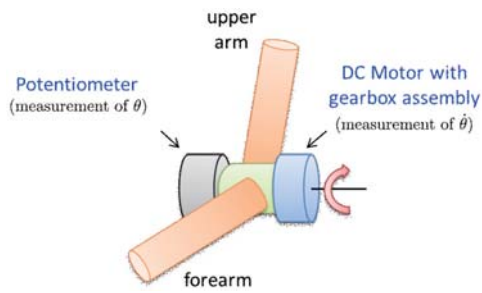


図1 関節角加速度推定のための測定機構

のDCモータを装着した。DCモータは、将来的な実用化を視野にタコジェネなど高感度な回転速度センサの安価な代用品として利用したものであるが、その構造上リップルと呼ばれる電圧の脈動がタコジェネより大きく表れる。人体運動に伴う関節の運動角速度は高くないと考えられるため、DCモータを直接関節に接続した場合の関節回転による起電力もさほど小さくなく、そこにリップルが乗れば回転角速度の測定精度は著しく劣化すると懸念される。そこで、関節軸に関して小型ギヤボックスを増速方向に接続し、起電力の増加とリップルの相対的な影響低減を図ることとした。

測定した関節角度 θ と関節角速度 $\dot{\theta}$ は、 $x = [\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}]^T$ を状態とする関節運動を支配するシステムにおける測定出力である。これをもとに $\ddot{\theta}$ を推定するカルマンフィルタを設計し、 $\ddot{\theta}$ の推定値を計算する。

2.2 駆動アクチュエータの選定と動特性モデル化について

身体装着型ロボットスーツにおいて、将来の実用化を考えればアクチュエータの選定も重要な検討課題である。研究代表者は本助成による研究課題の開始前より、アクチュエータ自体のコンプライアンスが重要なアプリケーションでよく用いられる空気圧人工筋肉（マッキベンアクチュエータ：PAM）の利用を前提に、制御のための検討を行ってきた。前節で述べた「加速度推定値をトリガとするアシストの実施」はアクチュエータをPAMに限る技術ではなく、

他のアクチュエータに対しても適用可能なものであるが、今回は制御によらないコンプライアンス特性を重視してPAMを利用することとした。

PAMへの空気圧入力に対する応答は、負荷の大きさにより変化することが知られており、その特性の厳密なモデル化は極めて難度の高い作業となる。しかし、精密位置決め用途と異なり、ロボットスーツでの利用には特徴を定量的に表現できるモデルがあれば十分であるとの考えから、できるだけ簡素なモデルの構築を目指して検討を行い、アクチュエータの外部スレッドの飽和型非線形弾性を表現する項を含む

$$m\ddot{x} + c\dot{x} = (a_1x + a_0)P - k\sqrt{x} - F_L$$

なる形の簡易な二次非線形モデルを提案した。ここで x はアクチュエータの収縮量、 c , k , n , a_1 , a_0 はアクチュエータの特性を表す物理パラメータであり、 m および F_L は外部負荷の質量及び力相当量である。実際に使用するアクチュエータを対象に、負荷をけん引する実験を行ってパラメータ同定を実行し、得られたモデルを用いて計算したアクチュエータ応答と実験での実測値を重ねてプロットしたのが図2となる。低圧域で多少差が観察されるものの、全般的に良好に実験値と一致していることがわかる。

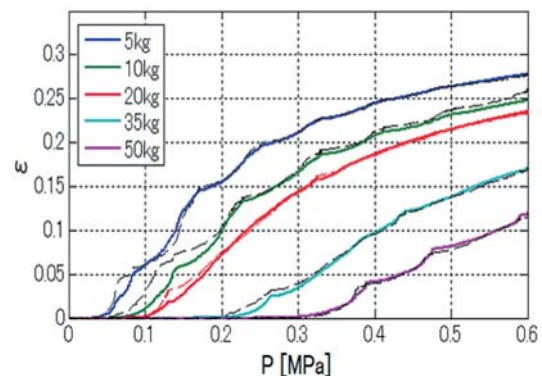


図2 空気圧人工筋肉モデルの応答シミュレーションと実測値の比較

2.3 身体装着型動作支援装置の試作

今回構築する制御系を評価するために、身体装着型のロボットスーツを試作した。介護作業において、ケアワーカーの身体的負荷が最も大きいのは、被介護者が寝たきりやそれに近い状態になっている場合の移動・移乗である。図3は、前傾姿勢からベッドに寝たきりになっている被介護者を抱き起す動作を行った際に腰・肩・肘の各関節に必要なトルクを数値計算したものであるが、特に動作の初期（腰の前傾角 θ_1 が大きい場合）において非常に大きなトルクが必要となっていることがわかる。この大きな負荷が日常的に作用した結果として腰痛・背筋痛や腱鞘炎の発症につながるものと考えられる。

そこで、腰の引き起こしと両肩と両肘を使った抱きかかえ動作に補助トルクを与えることが出来るよう、図4の模式図に示される5つの能動関節を有するスーツを製作した。両腕の肩・肘関節の駆動用に1本、背中の引き起こし動作用には負荷が大きいことを考慮して2本のアク

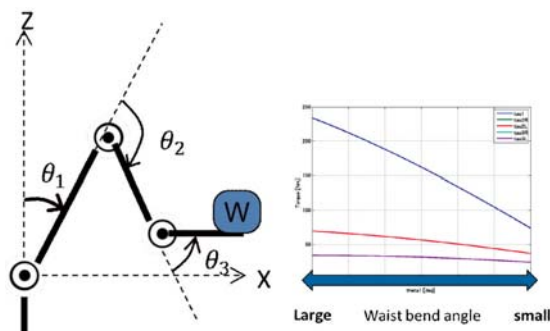


図3 抱き起し作業に必要な関節トルクのシミュレーション結果

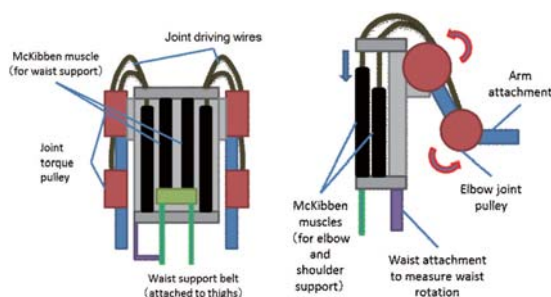


図4 試作ロボットスーツ構造の背面図（左）と側面図（右）



図5 試作ロボットスーツ

チュエータを並列に利用することとした。実際の装置の写真を図5に示す。

2.4 制御システムの構築

ロボットスーツの制御系の構成において最も重要な性能指標は装着者の身体運動との「同調」である。身体運動と同調することで、ロボットスーツは拡張された身体の一部となり、装着者はロボットスーツを装着していることを意識することなく自然な動作が可能となると期待される。今回のシステムではこれを実現するために、ロボットスーツを駆動する信号として制御系に与える「目標値信号」を装着者の運動意図から遅れないものにする、フィードバック制御系の目標値変化に対する速応性を十分なものとすることを目標に制御系の構成を考案した。しかし、速応性だけが設計の規範ではなく、必要十分なアシストトルクが適切な位相で供給されなければアシストスーツとしては機能しない。これら3つの要求を全て満足することを目標に、試作ロボットスーツに実装した制御系の全体図を図6に示す。

まず、人体運動意図と目標値信号の遅れがないということに関しては、前述のように各関節の運動加速度を推定し、これを関節運動補助の目標値として利用することで解決を図った。その場合、測定された関節角度および角速度と、

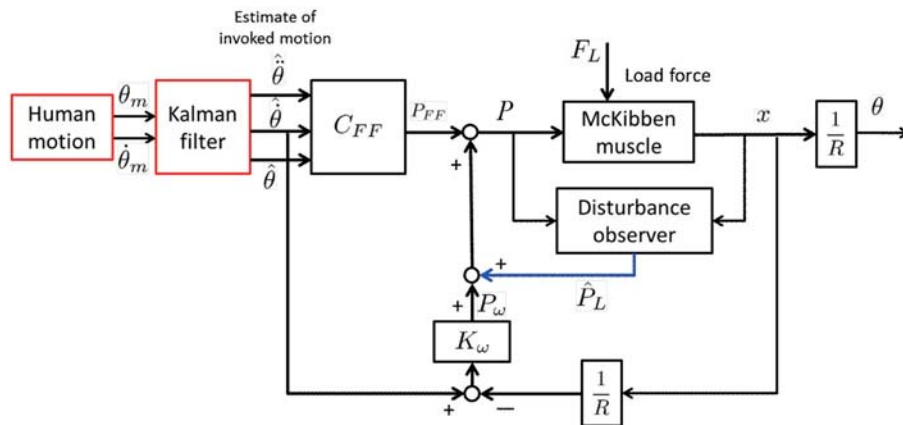


図6 フィードバック制御系の構成

推定された角速度と、アクチュエータの収縮による角度変化・角速度・角加速度が一致する必要がある。そのため、前述したPAMの提案モデルをフィードフォワード制御に利用して（図6中に C_{FF} ）、フィードフォワード供給圧力 P_{FF} を定めた。これが速応性向上のための対策である。

一方、アクチュエータに十分な関節補助トルクを発生させるため、一般に外乱オブザーバーと呼ばれる仕組みをPAMのモデルを用いて実装している。PAMにある圧力の空気を供給した時にアクチュエータに収縮が見られなければ、それはその時点においてはアクチュエータが発している収縮力が負荷に対して十分ではないことを意味する。その場合

$$\hat{F}_L = (a_1 x + a_0) P - (m \ddot{x} + c \dot{x} + k \sqrt[n]{x})$$

は正の値を取ると考えられるので、それを P_{FF} に加えて供給圧を高めれば、ある段階で外的負荷に打ち勝つだけの空気圧に達し関節の運動が始まると考えられる。一度関節運動が始まった後、不必要に大きなトルクが与えられると装着者の意図を上回る速度の運動が発生することになり危険である。これを抑止するため、カルマンフィルタによって低域のリップルが低減化された速度信号を目標値と見なして角速度誤差の比例フィードバック制御を行っている。図6の

K_ω はそのゲインである。

紙面の都合で省略するが、以上の制御系を実装して軽いおもりを持ち上げる動作を補助するという基礎的な評価実験を行い、初期段階としては十分な応答性と身体運動への追従性を実現できていることを確認した。

[今後の研究の方向・課題]

生体信号をアシストのトリガに用いないロボットスーツ制御系の実現に関し、補助対象関節の関節角加速度推定値を用いる二自由度制御系を構成し、試作したロボットスーツに実装してその動作を確認した。応答性についても違和感はなく、機械的な機構の身体への装着を意識することなく運動を行うことが可能であった。

しかし、例えば寝たきりの人のベッドから車椅子等への移乗という作業一つを取ってみても、ケアワーカーの姿勢により各関節に掛かる負荷は時間的に変動するため、固定のパラメータを用いた外乱オブザーバーが推定する負荷は精度が高いものとは言い難い。これに対応するため外乱オブザーバーの機能向上を図る作業に現在着手している。また、図6では2つのフィードバック制御はともに比例フィードバックであり、この部分の補償器の設計にも性能向上の余地がある。これら制御ソフトウェア面の機能向上に加え、フレームの試作2号機を製作し、1号機

で問題となった点を解消しより本格的な性能試験と実フィールドに近い環境での評価・改善を行う必要がある。

[成果の発表・論文等]

[論文・国際会議発表]

1. F. Fujii *et al.*, "A Simple Phenomenological Modeling of McKibben Pneumatic Actuator and its Application to Control," Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 4724-4730, 2013
2. Y. Hirose and F. Fujii, "Development of Joint Acceleration Based Control system for Wearable Assist Device," Proc. Int. Conf. Innovative Application Research and Education, 2013

3. F. Fujii *et al.*, "Use of Angular Acceleration and Velocity Estimates for Control of Pneumatic-Powered Wearable Motion Assist Device," Accepted for Presentation at the 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN14), Edinburgh, UK, 2014

[学会発表]

1. 村田宏嘉, 廣瀬湧太, 藤井文武, "マッキベン型アクチュエータの動特性のモデリングに関する研究," 日本機械学会ダイナミクス・デザインコンファレンス(D&D 2013), 九州産業大学, 2013年8月
2. 村田宏嘉, 藤井文武, "マッキベン型アクチュエータを用いた関節アシストシステムの制御系の構成," 日本機械学会 2014 年度年次大会, 東京電機大学, 2014 年 9 月

血管内超音波神経観察のための二自由度アクチュエータの開発

Two Degrees of Freedom Actuator for Nerve Observation using Intravascular Ultrasounds

2031017



研究代表者

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ユアトラック
助 教

真 下 智 昭

[研究の目的]

心臓病の治療などを目的として、カテーテルを用いて血管の中から神経を焼灼するアブレーション治療が注目を集めているが、血管の中からでは神経の位置や形状を特定することは難しいのが問題である。血管の中から神経を観察するの最も現実的な方法は、トランスデューサの素子自体を小さくできる超音波発振素子を用いることが一つの有力な方法である。超音波は、神経ブロックなどで知られるように経皮的に神経を観察することが可能であり、超音波そのものも胎児の診断でも使われるほどに安全なものである。その超音波発振素子を二方向に駆動しスキャンして神経を観察できるようなアクチュエータがあれば良いが、カテーテルの内径は大きくても3mmほどしかなく実用的なアクチュエータはこれまでにない。もし、このサイズのカテーテルに入れられる二自由度のアクチュエータを開発できれば、血管内での超音波による神経観察が現実的なものとなる。そこで、本研究では、「カテーテルに入る小型性」と「高速スキャンを実施できる高応答性」を実現できる二自由度アクチュエータの開発を目指して研究に取り組んだ。

[研究の内容、成果]

1. ステータの試作

図1に示すように、試作したステータの金属部は一辺1mmの立方体であり、金属部中心には、ロータを通すために直径0.7mmの貫通穴が開けてある。加工方法は、フライス盤に取り付けた金属材料から、1mm角の角柱を切り出し、一般的なエンドミルで0.7mmの穴を開ける。1ミリ立方メートルのサイズになるようにカットし、微小バリの除去や表面の研磨などを行う。金属部の材料に用いたりん青銅は、減衰率が小さく（振動が熱に変わりにくい）、加工性の良い材料である。ステータ周囲の側面には圧電素子が貼り付けられている。圧電素子は両面分極であり、そのサイズは1mm×0.8mm×厚さ0.2mmである。金属部材と圧電素子の接着には銀ペーストの混ざった導電性接着剤を用

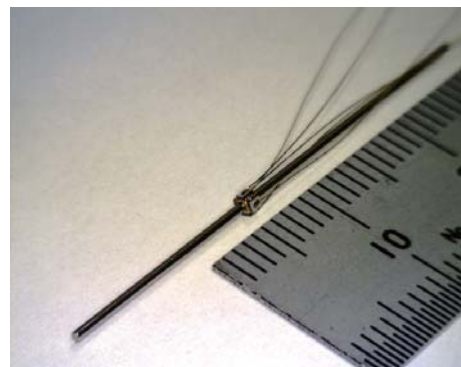


図1 試作したマイクロモータ

いている。圧電素子に接続される電線の直径は約 0.1 mm であり、圧電素子と電線の接合も導電性接着剤で行った。4 枚の圧電素子を駆動するためには、ステータの金属部は、電氣的に GND に接続される。したがって金属部に GND 線を取り付けるため、ステータの中心穴の横に、直径 0.12 mm、深さ 0.3 mm の穴が開け、ここに 0.1 mm の GND 用電線を通した。さらに抜け防止のために導電性接着剤で固定している。ロータには、穴の直径を測定するために使われる器具であるピンゲージを用いる。これは鉄鋼の軸材料を焼入れ硬化した後、研磨することによって、サブミクロン精度の直径を得ることができるものである。実験では、直径 0.700 mm、長さ 40 mm のロータを用いた。したがって、ステータの穴径は約直径 0.7 mm であるから、試作機における軸と穴の隙間は約 10 μm である。穴の内周面にバリなど局所的に摩擦の大きい部分があると性能に影響を及ぼすため、余裕を見て隙間を設定している。

2. 振動測定

ステータのインピーダンス特性を測定することで、印加電圧の周波数に対して、どれほど振動するのかを調べることが可能である。そこで圧電素子 PZT1 と PZT2 に接続される 2 本の電線と、GND の電線との間のインピーダンスを、インピーダンスアナライザを用いて測定した。その結果を図 2 に示す。結果を見てみると、900~950 kHz 付近で、インピーダンスの値は 2.2 kHz であり、位相は 90 度から 87 度まで変化することがわかった。モード解析において、

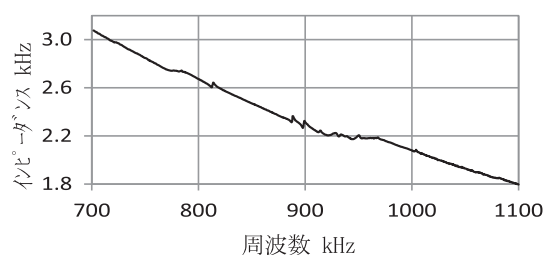


図2 マイクロモータのインピーダンス特性

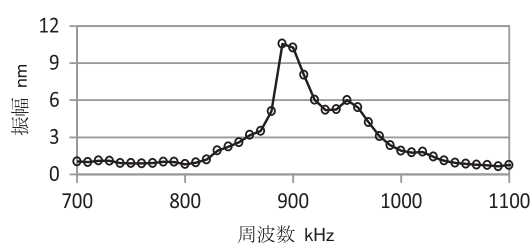


図3 レーザで測定した振動振幅

駆動原理である 3 波モードが励起されるのは 953 kHz であるから、誤差はあるものの、この周波数が 3 波モードの周波数と考えられる。また誤差の理由は、材料物性値や試作機の寸法精度などが影響していると考えられる。

ステータが発生する振動の大きさは、レーザードップラ振動計で測定することができる。振動振幅を測定する箇所はステータの内周面が望ましいが、穴の直径は 0.7 mm であり、この中にミラーを設置して反射光を読み取るのは難しい。そこで、レーザードップラ振動計からのレーザを、ステータの外面に貼られた圧電素子の銀電極部に照射し、その反射をみることで振動振幅を測定することとした。したがって圧電素子表面の振動を測定している。周波数を変えた場合の振動振幅の変化を図 3 に示す。電圧周波数が約 900 kHz の時に振幅は最大になり、その時の振幅の大きさは約 10 nm であった。実際には、圧電素子は二枚で、一つの振動モードが駆動されるため、実際の振動振幅は 20 nm 程度になると考えられる。

3. 性能評価

試作したマイクロ超音波モータの駆動テストを行う。波形発生器で発生した二種類の電圧を高周波アンプを用いて増幅する。増幅されて、モータに印加される電圧の振幅は 70 Vp-p としている。印加電圧の周波数は 930 kHz とする。これは最もモータがよく回転する周波数となるようにあらかじめ調整した値である。さらに、トルクの改善を目指して、ステータとロータの間に与圧を与える機構を付け加えている。

回転数を測定するためには、ロータの回転をビデオカメラで撮影し、フレームごとの角度変位から計算する。実験で得られた回転数の時刻歴応答を、図4に示す。回転の開始から100ミリ秒以内に定常状態になり、このとき最大回転数は約1000 rpmである。定常時のばらつきが観察されるが、これは、ステータとロータの表面状態および摩擦が影響していると考えられる。またその角加速度と慣性モーメントからトルクを算出すると、最大トルクは約 $0.6 \mu\text{Nm}$ であることがわかる。これは時計の中に入っているような針や歯車などの部品であれば駆動できるトルクであり、トルクの目標値をおおむね達成することができている。

出力を向上させるための取り組みとして、ステータとロータの間にはたらく与圧を変えた場合のトルクと回転数を測定した。トルクは角加速度から計算している。その結果を図5に示す。与圧の大きさを変えるごとに、3回の実験を行っている。実験では、与圧が大きくなるにつれ、回転数は減少した。これはステータロータ間に働く摩擦が上昇し、減衰係数もまた上昇したことで説明ができる。また与圧が大きくなるにつれ、トルクが上昇することが明らかになった。これはステータとロータ間に働く摩擦力が

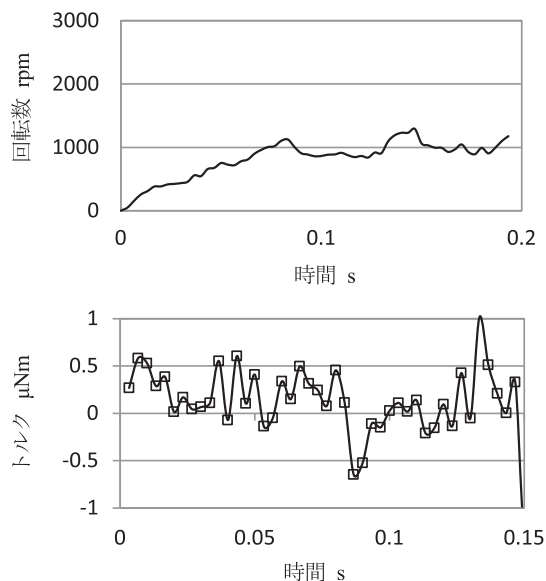


図4 マイクロモータの過渡応答

向上するためである。

モータの重要な特性の一つは、定常回転時における最大出力の安定性である。一般に電磁モータというコギング、トルクリップルなどと同様の現象が、マイクロモータの定常回転においても発生する。発生する理由は、ロータの真円度や、接触面における局所的な摩擦の変化の影響が大きい。そこで、与圧を変えたときの、定常状態の回転の安定性を調査した。その結果を図6に示す。図の縦軸である安定性は、最大回転数と平均回転数の差を表したものであり、数値が小さい方が安定していることを意味する。結果からは、与圧が大きくなるにつれ、回転が安定することがわかる。

また、二自由度を達成するリンク機構の検証を行うために、一桁大きいサイズでは約10

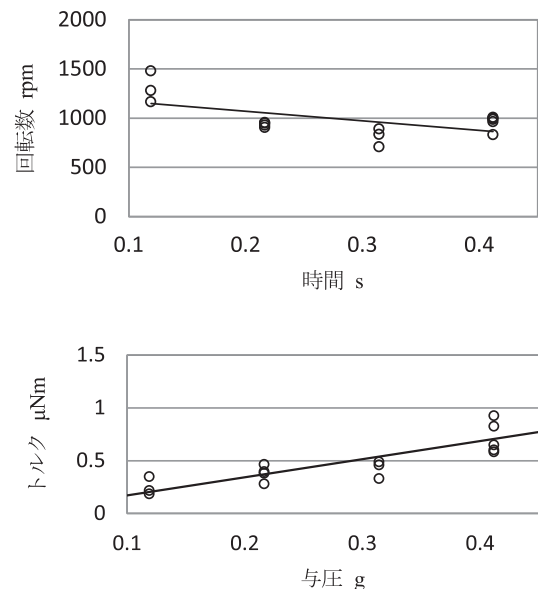


図5 与圧によるトルクと回転数の変化

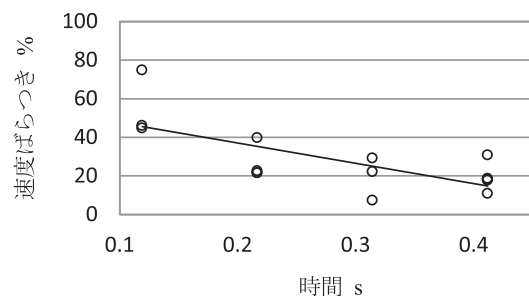


図6 定常回転時の不安定性

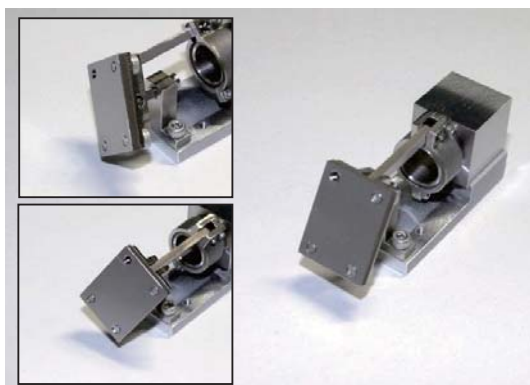


図7 二自由度のリンク機構の試作

mm のステータを用いて、リンク機構を設計し試作した（図7）。マイクロモータが発生した駆動力をこの機構を用いることにより、二自由度の方向に自由に駆動することが可能であることを確認した。小型化、評価、実装のプロセスは今後になる。

[今後の研究の方向，課題]

マイクロ超音波モータの試作方法，実験方法および性能評価について説明した。ステータのサイズは約1ミリ立方メートルであり，これは実用的な範囲においては，世界的に見ても最も小さいモータの一つである。マイクロ超音波モータに与圧機構を組み合わせることで，最大

で $0.9\mu\text{Nm}$ 程度のトルクを得ることに成功した。腕時計に使われるモータのトルクが $1\sim 2\mu\text{Nm}$ であることを考えれば，実験で得られたモータのトルクは概ね十分な性能を得ることができている。

しかし，目的の実現に向けてまだ改善すべきことも多い。今後，圧電素子の選択によるインピーダンス特性の改善，ステータとロータの隙間および接触状態の最適化などを行うことによって性能の向上を図る。リンク機構は，MEMS などのプロセスで加工を行うことにより，小型化し実装する必要がある。1 mm 程度の大きさの部品になると，加工が困難であるだけでなく，それらの部品をどのようにハンドリングするか，また組み立てするかも研究課題である。これらを開発したのちに，目標性能，安定性，耐環境試験などを達成し，臨床試験を目指した装置開発に取り組む予定である。

[成果の発表，論文等]

- 1) 真下智昭，1ミリ立方メートルのステータを用いた小型超音波モータの試作，精密工学会学術講演会，2014
- 2) T. Mashimo, "Performance of Micro Ultrasonic Motor using One Cubic Millimeter Stator," IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS2014), Chicago, 2014

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

Personal health records including self-measured daily home blood pressure implement
the alternative medical communication

2031018



研究代表者	福島県立医科大学慢性腎臓病（CKD） 病態治療学講座	助 教	谷田部 淳 一
共同研究者	会津大学コンピュータ理工学部	教 授	林 隆 史

〔研究の目的〕

技術革新により多くの臨床検査法が実用化され、医療データは多種多量となった。データ自体は患者固有の個人情報であると謳われつつも、現在は医療機関内外で自主的に参照する手段はない。たとえ参照の許可を受けても、生データから医学の知識なしに自分の病状を知る事は困難である。一方で、ネットワーク技術の発達と一般化により、血圧や脈拍数のように日々生み出される生体データを随時収集するシステムの整備も進んでいる。本研究ではまず、様々な医療データをどのように収集するかそのモデルの構築を行った。次に、ネットワークとデータマイニング技術の活用により収集したデータを分析し可視化するシステムを研究した。医師向けに限定せず、診療と自己健康管理の両面を支援するソリューションを目指した。身近な医療機器である血圧計を利用した、新しい医療コミュニケーションの形を提案するため、自治体の協力を得て社会実験を行った。具体的には、以下のような目標を設定し、研究を遂行した。

- ① 医療データを収集し、活用する際ににおける安全・倫理面への適切な対応
- ② Machine to Machine (M2M) 技術を活用した家庭血圧自己測定値の収集
- ③ 医師の専門知識を生かしたデータマイニ

ング

- ④ 利用する人にやさしいユーザーインターフェースの創造

〔研究の内容、成果〕

- ① 医療データを収集し、活用する際ににおける安全・倫理面の対応

本研究計画は、福島県立医科大学倫理委員会の承認を得て実施された（受付番号 1725）。

現在のところ、患者が医師や病院の許可なしに電子カルテ内に格納されたデータを参照したり、持ち出したりすることはできない。反対に、医師が患者の許可なしに患者から得られたデータを二次利用することには大きな制限が伴う。また、医療用イントラネットをインターネットに接続する方法も未整備である。そこで本研究においては、患者自身に自己の医療データ（投薬内容、検査結果など）を紙コピーにより積極的に収集するよう勧め、患者自らの意思においてサーバに対する医療情報の登録を促した。この仕組みを用いて、福島県会津美里町において実証研究を実施している。文書にて研究の趣旨に賛同した参加者は、町内3か所に設けられた会員用ブースへ個人の医療情報を持参する。持ち込まれた紙コピーは備え付けのドキュメントリーダー（図1）でデジタル化され、VPN回線



図1 倶楽部ブースに設置された機器



図3 社内に設置したスポットチェックモニタ

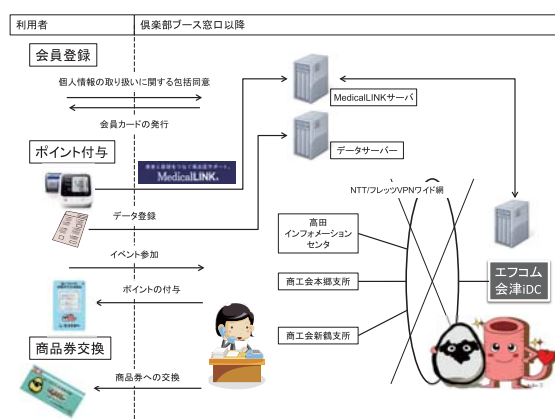


図2 ポイント倶楽部の概要

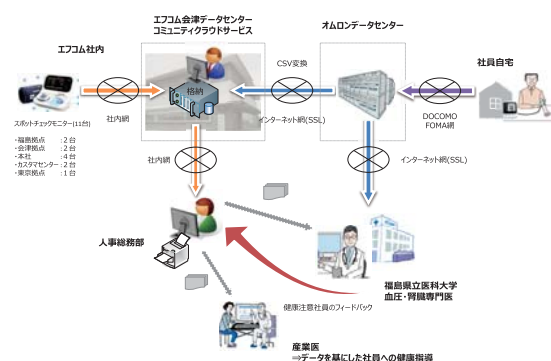
を通じて株式会社エフコム会津 iDC に送信され保管される (図 2)。保管された画像データは、会員番号と紐付けされた後、専任のオペレータにより再デジタル化される。参加者は、初回登録時に会員規約に同意しており、登録した医療情報を含む個人情報、サービス提供のために必要なオペレーション以外に、保健福祉活動の遂行、統計情報の活用、診療を含む医療・健康サービスの提供に二次利用可能となった。

また、保管データの安全性を担保するための技術的検証を行った。秘密分散法を利用するために適切なデータベースとして、「Radius」を選定した。

② Machine to Machine (M2M) 技術の活用した自己血圧測定値の収集

実証研究への参加者は、3G 回線を利用して

自動で血圧値を取得する MedicalLINK サービスを利用した。株式会社オムロンの運用する MedicalLINK サーバに蓄積されたデータは毎月 CSV ファイル形式にてダウンロードされ、会津 iDC に保管された (図 2)。また、データは集計され、測定の回数に応じて個人にインセンティブを与えるプログラムを実施した。さらに、診察室外で診察室内よりも有意に高血圧を示すいわゆる「仮面高血圧」のうち、特に職場高血圧への対応を進めるため、株式会社エフコムの本支社にスポットチェックモニタを設置した (図 3)。スポットチェックモニタは本来、病院内での運用を想定した製品であるが、ソフトウェアを会津 iDC の仮想環境にインストールすることで、社内イントラネットでの利用を実現した (図 4)。



※イラストは、オムロン、オムロンコーリン様の Web サイトから引用しております。

図4 家庭血圧と職場血圧管理システムの概要

③ 医師の専門知識を生かしたデータマイニング

本研究では、生活習慣病を代表する高血圧症の管理指針として完成度の高い、「高血圧治療ガイドライン 2009」に準拠した解析方針を採用した。作成された患者マスタ約 1,000 件のうち、期間内に薬剤 A の新規投与または追加投与を受けた 35 名のデータを解析対象として実証試験を行った。3G 回線を含むインターネット環境から接続し解析システムを運用できた。診察室血圧 69 件のデータからは、投与 2 か月前 136.9/74.6 mmHg（以降単位省略）、1 か月前 132.7/69.2、1 か月後 143.7/76.6、2 か月後 135.6/73.4 と推移しており、統計的に有意な薬剤 A の降圧効果は認められなかった。一方で、家庭血圧 2701 件のデータから、早朝血圧の平均は投与 2 か月前、投与 1 か月前、投与 1 か月後、投与 2 か月後でそれぞれ、143.3/82.5、143.9/82.3、138.6/77.9、132.9/75.4、また就寝前血圧の平均はそれぞれ、129.0/69.1、128.2/69.4、121.8/68.8、117.2/66.2 であり、薬剤 A 投与による有意な家庭血圧降下作用が認められた。代表的な検査値として血清クレアチニン、eGFR、尿酸、カリウム、総コレステロール、中性脂肪、HDL コレステロール、LDL コレステロール、HbA1c、空腹時血糖、尿蛋白定性の結果は薬剤 A の投与前後で有意に変化しなかった。今回、薬剤 A の投与タイミングでデータをソートし、平均を出力するなど診療傾向を簡便に把握するシステムの実証試験に成功した。薬剤 A の効果は診察室血圧のような点のデータを用いて把握することが困難だったが、データ数の多い家庭血圧を分析することによりその効果をよりの確に可視化することができた。家庭血圧のような、線や面でデータを評価できる医療ビッグデータを自由に扱える本研究のような技術開発の必要性を示すことができた。



図5 高血圧治療ガイドラインに基づいたデータマイニングのユーザーインターフェース

④ 利用する人にやさしいユーザーインターフェースの創造

デザイン面を考慮した画面設計を実施し、画面のサイズ（横幅）により、2カラム表示とするか、1カラム表示とするか自動で判断する仕組みを実装した。また、マルチデバイス対応のため、ブラウザ、アプリケーションとプログラムを変えたとしても、統一したデザインとなるよう考慮した（図5）。

〔今後の研究の方向、課題〕

本研究の描くビジョンの各部位における現状の到達度と今後の課題について述べる。

① 家庭血圧を含む日々の健康管理

本研究では、MedicalLINK 対応血圧計（HEM-7251G）を利用した。今回の実証研究では、家庭血圧の測定にインセンティブを付けることにより、インセンティブの無い場合よりも約 4 倍の稼働を得ることが出来た。また、

データの二次利用の同意を得るうえでも、インセンティブの設定は有用であったと考えられる。個人による健康情報管理に対し、行政がインセンティブを与える政策が必要と思われる。また、家庭血圧だけでなく、運動量、体重、睡眠の質、室温など、様々な生体・環境データをいかに継続的に収集するか、そのインフラ整備を行う必要がある。

② 個人の医療情報を収集する方法の確立

MedicalLINK で収集された個人が管理する生体情報と、かかりつけ医の臨床データをいかに紐付けのかが肝要である。本研究では、参加者本人より持ち込まれるデータの扱いに関して包括同意を得ることによって倫理的な課題を克服できた。ただし、個人が自らの医療データを集積し活用可能とすることの意義をいかに伝えるか、その努力に対してどのように報いるかという議論を深めるべきである。技術的な課題としては、多種多様な医療ビッグデータを統合・分類・編集するために、非構造化データの交換技術（Mediation 機能）を適用し、その有効性を検討する必要がある。

③ データのマッシュアップ

今回、情報基盤の構成には、会津大学「共創型クラウド」の環境を利用したが、今後はより大規模なデータベース・クラウドサービスシステムを想定する必要がある。また、生活習慣病の管理には、個人が暴露される様々な環境因子を解析する必要がある。生体・環境ビッグデータへの対応を想定して研究する。

④ データマイニング

患者個人の位置付け（治療到達度）を知ることだけでなく、特定患者集団（主治医ごと、病院ごと、自治体ごと等）の位置付けを容易に知ることができるようにする。患者と医療提供者双方のニーズを満たすデータマイニング法を開発する。高血圧だけでなく、様々な疾患に関するガイドラインにも対応可能なように、自動分析アルゴリズムに必要な診療データの種類をまとめ、分析パターンの抽出と分析結果の可視化

方法を設計する。アプリケーション開発には、Hadoop 等のビッグデータに対応した言語を適用する。

⑤ データの第三者提供に対する理解の浸透

集団内での個人の位置づけを知ることが健康管理において有効な手段となるため、匿名化した上でのデータの二次利用に関する必要性を理解させるための啓もう活動が必要である。

⑥ 患者自身による健康管理

データマイニングの結果を閲覧・理解するための、患者用ユーザーインターフェースを設計開発する。患者、家族、学生の協力を得て、専門的知識の少ない一般人から評価を受けて機能を補完する。

⑦ 多様なサービスへの対応

将来のサービス拡張に向けた研究を行う。特に、患者が救急病院などを受診した際、非かかりつけ医が患者の病歴を容易に把握できる環境を構築する試みが広がっている。さらに、取得・分析した医療データに基づき、保健師の保健指導や、パーソナライズした企業広告を行う環境の基礎研究が必要である。

〔成果の発表、論文等〕

1. Yatabe J et. al. Multidisciplinary Endeavors to Revitalize Rural Society through Telehealth Solutions in Fukushima. Transactions of Japanese Society for Medical and Biological Engineering. 51/ Supplement, M-156.
2. 谷田部淳一，他：生活習慣病関連情報基盤と高血圧診療支援システムの開発，第 36 回日本高血圧学会総会
3. 谷田部淳一，他：家庭血圧を含むパーソナルヘルスレコードの作成を通じた新しい地域づくりの提案，第 36 回日本高血圧学会総会
4. 谷田部淳一，他：家庭血圧の測定推奨を通じた地域づくりに関する実証研究，第 17 回福島高血圧研究会
5. 谷田部淳一，他：町づくりを目的としたインセンティブヘルスプロモーションの登録レコードから見る家庭血圧測定行動の現状，第 3 回臨床高血圧フォーラム

アクティブプラズモン及び Wood アノマリセンサの開発

Development of Active Plasmon and Wood's Anomaly Sensor

2031020



研究代表者 香川大学

助 教 山 口 堅 三

共同研究者 鳥羽商船高専

准教授 藤 井 正 光

[研究の目的]

二酸化炭素（以下， CO_2 ）は大気に含まれるガスで，人間には無色，無臭，無害な気体である。しかし，一旦濃度が高くなると人体にも悪影響を及ぼす。最近では， CO_2 濃度が不快感や健康被害を引き起こす要因として指摘されている。このことから，法律においても CO_2 濃度の基準値が示されている。また， CO_2 モニタリングによる環境状態の把握と， CO_2 濃度の空調制御システムが提案されている。このため，小型で，高感度な CO_2 濃度センサが求められている。

表面プラズモン（Surface Plasmon：以下，SP）は，光の回折限界以下の領域に光エネルギーを強く閉じ込めることから，光学素子の小型化と高感度なセンシング技術として注目されている。このような SP は，主にナノサイズの金属微粒子や金属微細構造において顕著に現れ，金属の種類やサイズ，形状，周囲の屈折率に依存した共鳴波長及び電場増強度をもつ。このため，SP 共鳴波長を単一試料内で自由に可変することができれば， CO_2 を始めとする複数の対象ガスを小型（20 mm×50 mm 以下）で高感度（300～3000 ppm 分解能+100 ppm）な検出が可能であると考えた。ただし，（ ）内は，センサ単体における実現のための目標値である。

本研究は，上述の研究背景を踏まえ，構造を

自由に可動できれば SP 共鳴波長も連動して，変化すると考えた。そこで，微小電気機械システム（Nano Electro Mechanical System：以下，NEMS）技術を用いて，SP の動的光学特性を電氣的に制御可能なアクティブプラズモンセンサ（Active Plasmon Sensor：以下，APS）の開発を目的とした。本研究では，APS の基礎的光学特性を解明し，ナノ光学の電氣的変調制御が可能な新たなガス濃度センサを創製するものである。図 1 に，開発した APS の概念図を示す。

APS は，金属格子を櫛型 NEMS アクチュエータ機構で駆動するもので，金属の梁を両端で固定するアンカー部と弾性変形するサスペン

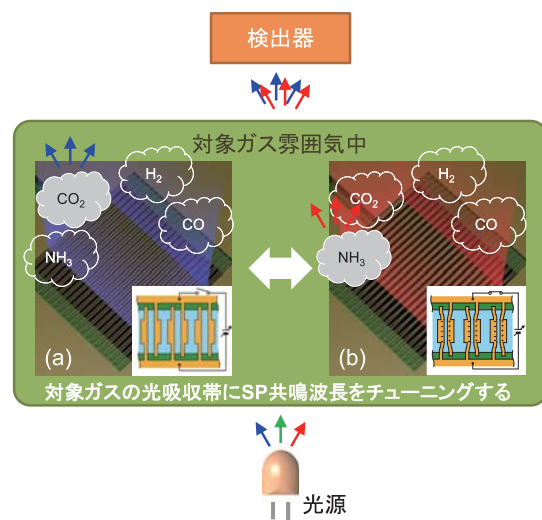


図 1 APS の概念図。電圧印加 (a) 前，(b) 後

ション部、サブ波長格子となるグレーティング部から成る（図 1(a)参照）。金属グレーティングは、SP を励起するナノ構造として働き、共鳴波長を持つが、本構造に電圧を印加すると、グレーティングギャップ部に静電引力が働き、グレーティング部がたわみ、周期構造が変化することで SP 共鳴波長を自由に制御できる（図 1(b)参照）。このため、構造を可変化する（電圧印加の前後に相当する）ことで、対象ガスの光吸収波長帯に SP 共鳴波長をチューニングすることができる。

〔研究の内容、成果〕

試料形成においては、 Si_3N_4 薄膜基板上に金薄膜をスパッタ法により成膜した。次に、集束イオンビームを用い、静電型 NEMS アクチュエータで変調可能な金属サブ波長格子を作製した。

特性評価においては、上記手順で得た試料の電圧依存透過光特性は、空気/対象ガス (CO_2) 雰囲気下中での顕微分光光学系を構築して調べた。また、走査型電子顕微鏡で光学評価前後における構造を確認した。さらに、有限差分時間領域 (Finite-difference time-domain: 以下、FDTD) 法を用い、作製試料と同一条件下での数値計算を行い、実験結果と比較した。

作製した APS の SEM 像を図 2 に、印加電圧 (可変及び連動型の金属格子間のギャップ幅 (G_v, G_e) に相当する) 依存の透過光 (実験) 及び反射光 (計算) 特性を図 3 と図 4 にそれぞれ示す。

図 2 の APS における一部のグレーティング部やサスペンション部、アンカー部の拡大図より、金属格子幅 (M_w) と (G_v, G_e) は、それぞれおおよそ 400 nm であり、弾性変形する金属サブ波長格子をアクチュエータ機構として可動可能な中空状の形成に成功した。

作製した APS の可視光領域における電圧

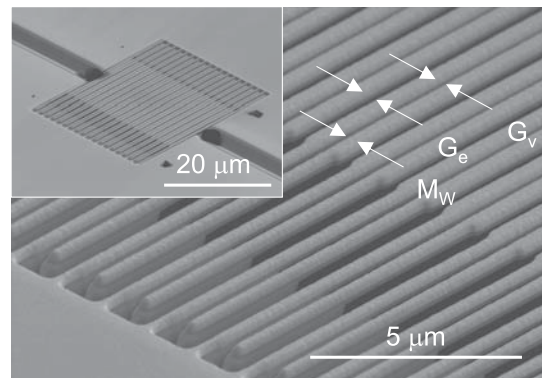


図 2 作製した APS の SEM 像

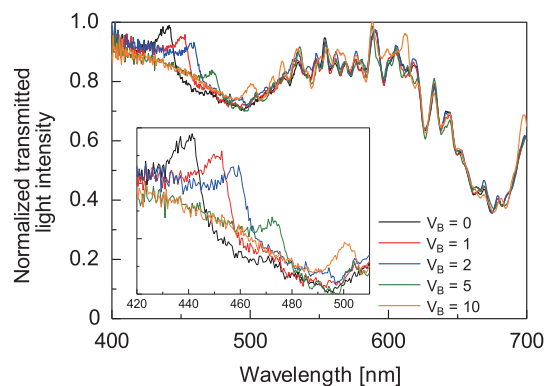


図 3 APS の透過光スペクトル (実験)

(V_B) 依存透過光特性より、波長 420 nm から 510 nm の領域に、共鳴ピークが得られ、 V_B が大きくなるに従い、本共鳴ピーク波長のレッドシフトを観測した。本シフト量は、 V_B に対応して単調に変化することから、(G_v, G_e) の間隔が電圧印加により変化したことによる。

図 2 の作製条件と同一な APS の 2 次元 FDTD 法により、(G_v, G_e) の構造変化に伴い、共鳴波長のシフトを観測した（図 4 参照）。また、電界強度分布スナップショットより、本共鳴は SP に起因することを明らかにした。さらに、本光学現象が実験計算と定性的な一致を示した。

金属表面に 1 次元の周期的な凹凸を設けた回折格子では、ある特定方向の回折光の強度が失われる現象 (Wood アノマリ) が知られている。提案した APS においても、アノマリの条件は周期構造に依存するため、構造を可動できれば

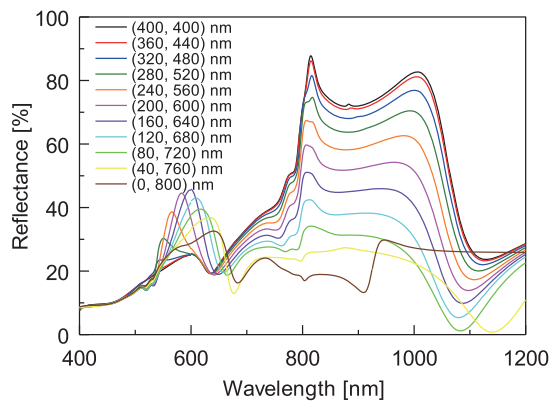


図4 APSの反射光スペクトル (計算)

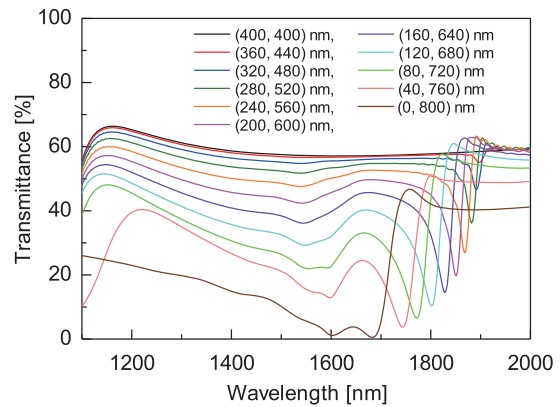


図5 APSの構造依存赤外透過光スペクトル

アノマリの共鳴波長も連動して変化すると考えた (図5 参照)。

$G_v \neq G_e$ ($\neq M_w$) のとき、波長 1600 nm から 1900 nm 領域の透過光スペクトルにおいて、Wood アノマリ共鳴が得られた。また、波長 1800 nm 周辺の反射率が減衰する波長は、可変型ギャップ G_v が小さくなる (印加電圧が大きくなることに相当する) に従い、短波長側へ大きくシフトし、透過率も変化した。反射光スペクトルにおいても、同様な結果が得られた。さらに、図5で示すように、Q 値が非常に高い共鳴波長のブルーシフトを観測した。以上のことから、本共鳴ピークは、 (G_v, G_e) の構造変化に伴い、波長シフトとその透過 (反射) 率が顕著に減少したため、Wood アノマリによる異常回折の可変化に成功したと考える。また、Q 値が非常に高いことから、複数の対象ガスを単一試料・単一構造でセンシング可能なマルチセンサとしての多様性に優れた素子になる。

そこで、上記の実験結果を基に、SP と Wood アノマリの2つの共鳴波長を利用し、これらを電氣的に制御可能なアクティブプラズモン及び Wood アノマリセンサ (Active Plasmon and Wood's Anomaly Sensor: 以下、APWAS) を開発した。本センサの対象ガスである CO_2 は、波長 $4.2 \mu\text{m}$ と $2.0 \mu\text{m}$ にそれぞれ吸収線を持つ。ここでは、他ガスの吸収線がない波長 $4.2 \mu\text{m}$ を Wood アノマリ共鳴で検知可能な構造を提

案した。

FDTD 法により、真空下での波長 3500 nm から 5000 nm における APWAS の透過光及び反射光スペクトルを図6(a), (b)にそれぞれ示す。図より、波長 4000 nm から 4500 nm 領域において、 (G_v, G_e) の構造変化に伴う共鳴波長の変化が現れた。これは、ある特定方向の回折の光強度が失われた Wood アノマリであり、 CO_2 の吸収線である波長 $4.2 \mu\text{m}$ に合致した。

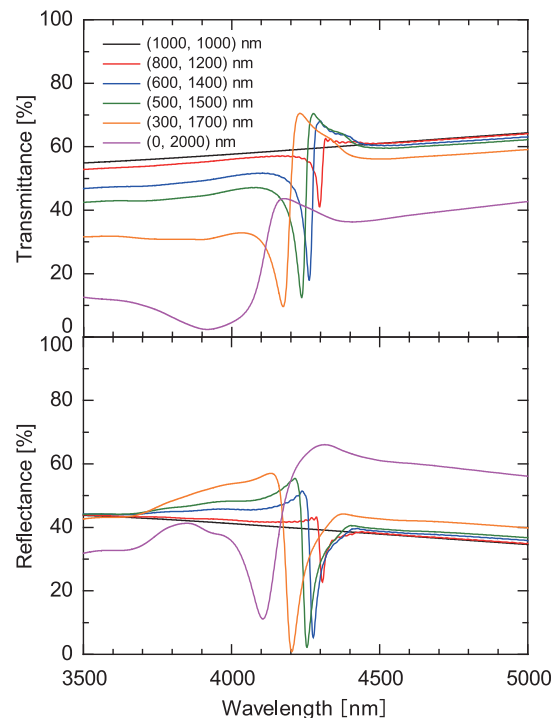


図6 真空下における APWAS の構造依存 (a)透過スペクトル, (b)反射スペクトル

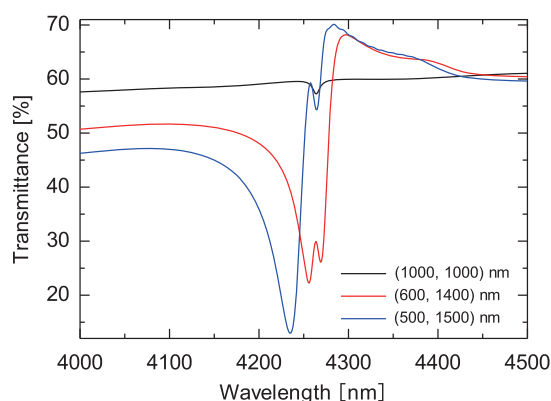


図7 CO₂ガス雰囲気下における APWAS の構造依存透過スペクトル

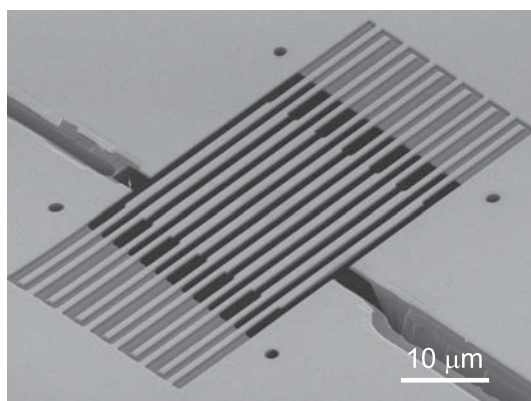


図8 作製した APWAS の SEM 像

次に、CO₂ ガス雰囲気下で、同様な計算を行った。ここで、CO₂ の気相及び液相に関する明白な屈折率データが見当たらなかったため、固相の誘電率を Lorentz 分散で近似することで求めた。このときの波長 4000 nm から 4500 nm における APWAS の透過光スペクトルを図7に示す。図7に示すように、 $G_v \neq G_e (\neq M_w)$ のとき、波長 4200 nm から 4300 nm 領域の透過光スペクトルにおいて、Wood アノマリ共鳴が得られた。同時に、真空下条件 (図6参照) と異なり、CO₂ ガス雰囲気下では Wood アノマリ共鳴が2つに割れた。これは、CO₂ に由来する吸収波長帯であり、(G_v , G_e) が変化しても同じ傾向が見られることから、Wood アノ

マリ共鳴による CO₂ 検出に成功したと考える。また、反射光スペクトルにおいても同様な傾向を観測した。

そこで、本計算構造と同一条件における APWAS を作製した (図8参照)。図8の SEM 像より、図2と同様で電氣的に制御可能な APWAS の作製に成功した。さらに、CO₂ ガス雰囲気下における APWAS の印加電圧依存透過測定により、Wood アノマリ共鳴による CO₂ ガス検出に成功した (未発表成果のため詳細を省く)。

[今後の研究の方向, 課題]

単一試料・単一構造で SP と Wood アノマリ共鳴波長の可変化を利用したマルチガスセンサを実現した。今後は、ガス濃度や様々なガス種に対する性能評価を行い、実用化を目指す。

[成果の発表, 論文等]

[雑誌論文] (計5件)

- (1) K. Yamaguchi, M. Fujii, T. Okamoto and M. Haraguchi, "Electrically driven plasmon chip: Active plasmon filter", *Appl. Phys. Express* 7 012201 (2014)
- (2) 山口堅三, 『プラズモンチップ～次世代光電子集積デバイスから光センサ用材料としての可能性～』 *MATERIAL STAGE* (1) 64 (2014)

[学会発表] (計26件)

- (3) K. Yamaguchi and M. Fujii, "Electric Field Characteristics of Active Plasmon Filter", *The 9th Asia-Pacific Conference on Near-field Optics*, Ext. Abstr., pp. 49-50, Singapore, July 4th, 2013

[受賞] (計1件)

- (4) 優秀講演賞
第18回知能メカトロニクスワークショップ, 2013年8月28日

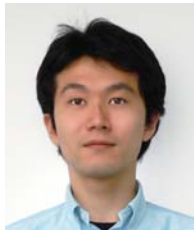
[その他]

- (5) <http://www.eng.kagawa-u.ac.jp/~kenzo/>

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

High-speed hi-accuracy 4-dimensional acquisition for performance bodywear design

2031021



研究代表者

(独)産業技術総合研究所

主任研究員

山 崎 俊太郎

[研究の目的]

2020 年の東京オリンピックに向けて、アスリートのパフォーマンスを向上する、高機能なスポーツ用具の設計技術が求められている。多くのスポーツ競技において、適切なデザインの用具を用いることで、アスリートのパフォーマンスを向上できる可能性がある。筋力を増幅するコンプレッションウェアや、トレーニングを効率化するベアフットシューズは、その典型例である。申請者らは、こうした高機能製品設計の実現を目指して、人体の運動を、高い時間分解能、高い空間分解能で観測する技術の開発に取り組んでいる。

運動計測の代表的な手法として、モーションキャプチャを用いたマーカ位置追跡や、高速度カメラによる連続画像撮影が挙げられる。モーションキャプチャは、疎な特徴点集合の追跡に有効であるが、空間的に密な情報を得ることができない。高速度カメラ撮影は、体表面などの連続領域の計測に適している一方で、3次元構造を復元できない制限がある。人体と密接に相互作用するスポーツ用具の設計には、これらの両方の特長を持つ新しい計測手法が必要である。

本研究では、高速度3次元スキャナを開発し、計測対象の全周から、同時に、高いフレームレートで、高精度の距離画像を取得する方法を提案する。構造化光投影とステレオ復元を併用した3次元復元によって、モーションキャプ

チャと同程度のフレームレートと、静止物体の3次元計測と同程度の計測精度を実現する。また、計測によって得られた距離画像の時系列に人体モデルを当てはめ、人間の皮膚の伸縮や皮下組織の移動、着装品の変形をモデル化する方法を研究する。

[研究背景]

運動物体の観測に適した距離画像計測手法としては、計測対象に固定パターン光を投影し、一回の撮影画像から距離画像を復元するワンショット法がある。近年、この原理を利用したkinect センサが普及し、運動物体の形状計測技術が身近なものとなった。しかし、ワンショット法は複雑な形状を測ることができず、計測結果の空間分解能が低いという欠点がある。また投影パターンの種類によって、対応点の曖昧性を排除できず計測ノイズが発生する、計測対象の表面反射率の不均一性の影響を受けやすいなどの問題があり、高い精度が要求される計測には適していない。

時間コード化光投影法は、静止物体の計測に用いられる高精度の3次元計測技術である。また、高速度カメラを用いることによって、運動物体に対しても適用できる。しかし、一般に光学素子の信号雑音比と露光時間は反比例するため、高フレームレートと高精度計測を両立することは難しい。特に、高輝度かつ高フレーム

レート of 光源を実現する方法が明らかでなく、これまで人間の運動機能解析には用いられてこなかった。

本研究では、高フレームレートと高輝度を両立する動的光源を開発し、時間コード化光投影法による運動物体の距離画像計測を実現した。

〔研究の内容、成果〕

計画の全体を3つのステップに分け、段階的に遂行した。

第1に、高輝度と高フレームレートを同時に実現する新しいDLPプロジェクタを開発した。DLPプロジェクタは、DMD (Digital Micromirror-array Device) を用いて光源のPWM (Pulse width modulation) 制御を行う装置である (図1)。DMDは、独立に傾斜角を制御可能な極小の鏡の集合であり、固定光源と組み合わせることで5 kHz~10 kHzで任意の2進パターンを投影するプロジェクタを作成できる。

本研究では、Infocus LP-120プロジェクタを改変し、480 Hzで4種類の8 bit XGA画像を投影できる1100 lumensの高輝度動的光源を作成した。これは市販のDLPプロジェクタ (60 Hz) と比べて8倍高速であり、開発者用のカスタムDLPプロジェクタ (30 lumens) と比べて36倍高輝度である。

第2に、開発したプロジェクタと2台の高速カメラを同期し、高フレームレート・時間コード化光投影・ステレオ3次元スキャナを構

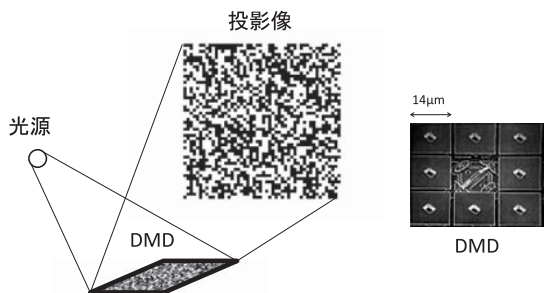


図1 DLPプロジェクタの光学系模式図

築した。さらに、同一のスキャナを2セット作成し、計測対象の全周を同時に撮影する計測システムを構築した。高速度カメラとして Allied Vision Pike F-032 を利用した。構造化光投影には位相が1/3異なる3組の正弦波パターンを用いる方法を用いた。また、ステレオカメラを用いて探索範囲を制限することによって正弦波パターンの周期性に起因する対応点の曖昧性を解消している。

開発した計測システムの写真を図2に示す。左上は単一のスキャナ、右上は同期回路、下図は2つのスキャナを複合した全周計測システムである。各スキャナは持ち運び可能であり、計測対象に応じて撮影視点を調節可能である。プロジェクタとカメラは160 Hzで同期し、撮影サイクル時間全体の1/3を使って投影・露光している。理論上、最大3つのスキャナを同時に、干渉なく利用できる。カメラとプロジェクタの幾何校正にはOpenCVライブラリを用いた。

開発した3次元スキャナで取得した距離画像の例を図3に示す。距離画像の計測速度は160 Hz、空間解像度は640×480ピクセル、距離の

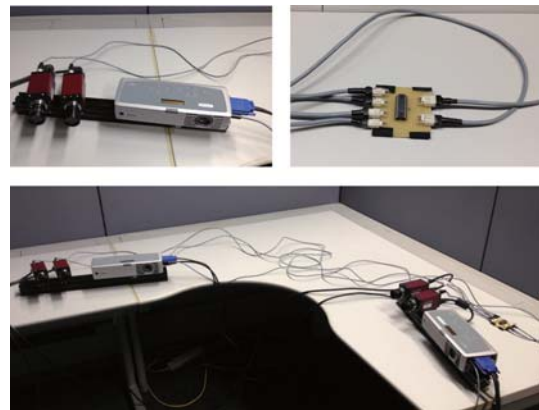


図2 構造化光時分割投影ステレオ



図3 距離画像計測結果

平均精度は約 0.1 mm 程度である。なお、距離画像の取得速度は 160 Hz であるが、1 つの距離画像の復元に 4 回の画像撮影が必要である。したがって計測対象は 1/40 秒間静止している必要があるが、多くの人体計測ではこの条件は満たされない。そこで 1/40 秒間の動きを線形近似し、動作補償を行うことで、距離画像の精度を向上している。

第 3 に、計測できなかった領域の補完と、人体上の解剖学的特徴点の自動抽出を同時に行う手法を開発した。人体の 3 次元計測では、手や足などによる遮蔽を避けることができず、カメラの数を増やしても、計測できない箇所が必ず存在する。その一方で、人体の形状はおおまかな形状が既知であるため、事前知識を使うことによって欠損箇所を精度良く補うことができる。

本研究では、人体の代表的な形状を表現するテンプレートメッシュモデルを作成し、これを計測点群に当てはめて計測欠損箇所を埋めると同時に、テンプレート上に定義された解剖学的特徴点から計測対象表面の特徴点を推定する技術を開発した。体型の個人差や姿勢のばらつきによる形の違いを単一のテンプレートメッシュモデルで扱うために、3 次元メッシュモデルの非剛体的な位置合わせの手法を用いた。

提案手法は、従来法と異なり、手作業による対応付けを必要としない自動対応点推定、局所相似変換モデルを用いた高精度な位置合わせ、多重解像度表現を利用した高速で安定した数値計算、といった特徴を持つ。図 4 に全身形状の 3 次元点群をメッシュモデル化した例を示す。

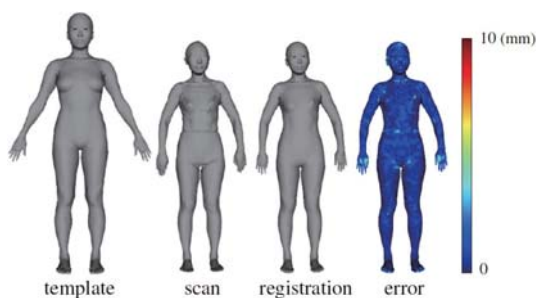


図 4 全身形状モデル

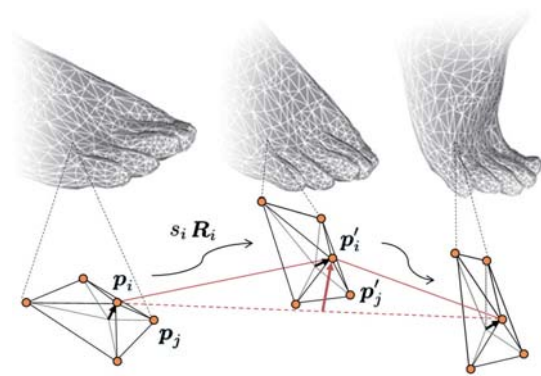


図 5 時間拘束を考慮した変形推定

解剖学的特徴点の推定精度検証のため、全身の代表的な特徴点から得られる寸法の精度を検証した。日本人の人体寸法・形状データである AIST/HQL 2003 データセットを用いて、全身 64 箇所の特徴点を抽出し、国際標準 ISO 20685 で規定された許容誤差と比較したところ、63 点が合格した。研究成果は国際会議で発表[1]し、成果物をソフトウェアとして公開した。

また、計測点群の時系列データに対して、時間方向の連続性を仮定してテンプレートを当てはめる手法を提案した(図 5)。空間的な 3 次元座標値と計測時刻の 1 次元を統一的に表現する Laplacian 座標表現を用いて、静止形状の場合と同様、高速かつ安定したモデル化を実現した。

提案手法を足の計測に適用した結果を図 6 に示す。上図は走行中の足を全周から計測した計測点群の時系列であり、下図は復元された 3 次元モデルと推定された解剖学的特徴点である。計測点群には多くの穴が存在するが、モデル化によって穴のないメッシュモデルが復元できている。推定された特徴点の誤差を図 7 に示す。誤差は足の変形に伴い増大する傾向があり、変

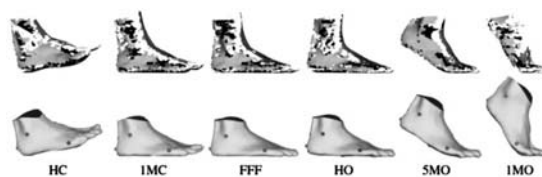


図 6 走行中の足の形状モデル化

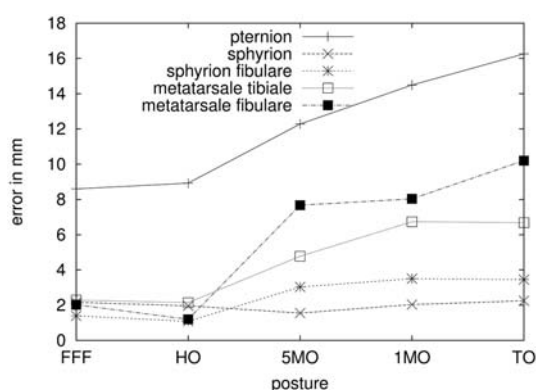


図7 解剖学的特徴点の推定誤差

形の小さい姿勢では数 mm 程度、最も変形の大きい姿勢で平均 5 mm 程度であった。研究成果を関連学会で発表し、高い評価を得ることができた[2]。

運動中の全身形状をモデル化した結果を図8に示す。全身運動の計測では隠れの問題が大きく、現在の計測システムではごく一部の表面形状しか測ることができない。しかし、テンプレートモデルを当てはめることによって、全く見えていない部位であっても、見えている部分から推定される、最もあり得る形として全身形状を補完することができる[3]。

[今後の研究の方向、課題]

本研究では、人体運動を計測する技術とモデル化する技術を研究した。今後は、複数の被験者実験を行い、統計的な手法によって人間工学的な知見を取得する研究に取り組む予定である。体型、性別、運動能力などに違いのある複数の

人体運動データから統計モデルを作成することで、集団としての傾向や個人差が明らかとなる。これによって、一方ではすべての人に有益な高機能着装品の設計を、他方では個人差を考慮したカスタム装具のデザインを実現することができる。また、皮膚表面の応力分布の推定や、筋骨格系を用いた動力学モデルの復元にも取り組みたい。

開発した計測装置はプロトタイプであり、研究を進める上で多くの現実的な課題を解決する必要がある。現在は、3次元スキャナの台数を増やして計測範囲を拡大するとともに、計測システムの使い勝手を向上させることに注力している。モーションキャプチャなど既存の計測手法との併用や、モデル化計算の実時間化などは、今後の研究課題である。

[成果の発表、論文等]

- [1] Shuntaro Yamazaki, Makiko Kouchi, and Masaaki Mochimaru, "Markerless landmark localization on body shape scans by non-rigid model fitting," Proc. Digital Human Modeling Symposium 2013, pp. 1: 43-8: 43, June 2013
- [2] Shuntaro Yamazaki, Makiko Kouchi, Masaaki Mochimaru, Shunta Saito, Yuji Yoshida, and Yoshimitsu Aoki, "Homologous Shape Modeling of Deforming Human Foot", Proc. the Eleventh Footwear Biomechanics Symposium, pp. S120-S121, July 2013
- [3] Shuntaro Yamazaki, Satoshi Kagami, and Masaaki Mochimaru, "Non-rigid shape registration using similarity-invariant differential coordinates", Proc. International Conference on 3D Vision, pp. 191-198, June 2013

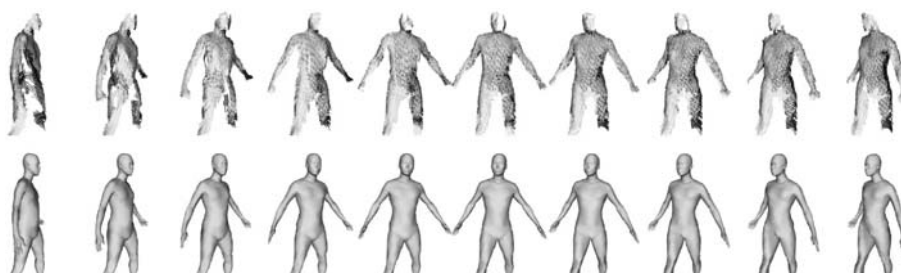


図8 運動中の全身の形状モデル化

国際交流報告の抄録一覧

〔派遣〕

- ◆ The 9th International ISAAC Congress 2013 (2032002) 117
藤ノ木健介 東海大学理工学部情報数理学科 講師
- ◆ 2013 IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics (2032101) 117
武田 隆宏 首都大学東京 システムデザイン学部 特任助教
- ◆ The 9th International Conference on Optimization : Techniques and Application (2032102) 118
田中 未来 東京理科大学 理工学部 経営工学科 助教
- ◆ The 17th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry
and Life Sciences (Micro TAS 2013) (2032103) 118
中島 雄太 熊本大学 助教
- ◆ 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2013) (2032104) 119
森 貴彦 岐阜工業高等専門学校 准教授
- ◆ 2013 Psychonomic Society Annual Meeting (2032105) 119
蒨田 貴子 東京工業大学大学院 理工学研究科 准教授
- ◆ Digital Holography & 3-D Imaging (DH) (2042001) 120
夏 鵬 京都工芸繊維大学 大学院生 博士後期3年
- ◆ IEEE International Magnetism Conference (2042002) 120
後藤 太一 豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系 助教
- ◆ Material Research Society 2014 Spring Meeting (2042003) 121
杉山 睦 東京理科大学 理工学部 准教授

〔一般招聘〕

- ◆ The 9th Asian Conference on Computer Aided Surgery (ACCAS2013) (2034001) 121
藤江 正克 早稲田大学 理工学術院 教授

〔国際会議〕

- ◆ IEEE COMPSAC2013 (IEEE International Computer Software
and Applications Conference 2013) (2025002) 122
岡部 寿男 京都大学学術情報メディアセンター 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) (2025006) 122
佐々木 実 豊田工業大学 工学部 教授
- ◆ Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (AP SAR) 2013 (2025009) 123
廣瀬 明 東京大学大学院工学系研究科 教授
- ◆ 2013 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA2013) (2035001) 123
板井 陽俊 中部大学工学部情報工学科 助教
- ◆ 知的メディア技術, 脳・健康情報学国際会議 2013 (AMT-BHI 2013) (2035002) 124
今村 一之 前橋工科大学 副学長 (研究・地域貢献担当)
- ◆ シリコンカーバイド及び関連材料に関する国際会議 2013
The International Conference on Silicon Carbide
and Related Materials (ICSCRM 2013) (2035003) 124
奥村 元 産業技術総合研究所 先進パワーエレクトロニクス研究センター 研究センター長
- ◆ The 20th International Display Workshops (IDW '13) (2035004) 125
志賀 智一 電気通信大学 先進理工学専攻 准教授
- ◆ 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2035005) 125
菅野 重樹 早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科 教授
- ◆ 2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing
and Communication Systems (ISPACS 2013) (2035006) 126
田口 亮 東京都市大学知識工学部情報科学科 教授
- ◆ 15th International Conference on Multimodal Interaction (ICMI)
Doctoral Consortium (2035008) 126
平山 高嗣 名古屋大学大学院情報科学研究科 助教
- ◆ 5th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (ADCONIP)
(第5回産業プロセスの高度制御に関する国際会議) (2035011) 127
山本 透 広島大学 工学研究院 電気電子システム数理部門 教授

〔派遣〕

派遣研究者	東海大学理工学部情報数理学科 講師 藤ノ木健介	2032002
研究集会名	The 9th International ISAAC Congress 2013	
出張期間	2013年8月3日～8月15日	
開催場所	ポーランド クラクフ	
発表論文	Redundant Lifting Scheme for Multiscale Keypoint Analysis 冗長型リフティング構成によるマルチスケールキーポイント解析	

概要：

本国際会議は解析学に関する2年に一度の国際会議である。今回はポーランドのクラクフで開催され、470名程度の研究者がヨーロッパを中心に世界中から参加した。この会議に参加する目的は、申請者が提案する新たな信号解析手法を世界に紹介し、徹底討論を行うことで更なる研究の進展を図ると共に、最新の研究動向を調査することであった。同分野では近年信号が疎であることといったスパース性を利用した信号表現方法に関する研究が盛んに行われているが、本研究では逆に冗長性を持たせた新たな信号解析手法を提案し、キーポイント解析などの特定の応用分野においては従来よりも有効で効率的であることを示した。これまでとは全く逆の発想で一見計算コストは増加したように見えるため、実際の計算方法に関する質問が多かったが手応えは感じる事ができた。

申請者の専門は信号処理であり、数学系の会議に参加することは今回が初めての経験であった。このため通常は参加しない講演を多く目にする事ができ、その中で分野の異なる研究者の研究課題や方法に加えて、プレゼンのまとめ方、発表方法、討論の雰囲気なども体感することができ、研究者としての視野が広がり大きな収穫となった。また、分野の違う研究者達との交流は刺激的で、得るものも多く極めて有意義であったと考える。このように分野が違ってても申請者と近い内容の講演はいくつかあったため、今後の研究の参考になる部分も多く研究動向の調査の面でも収穫があった。以上のことから本国際会議では当初の目的を達成できただけでなく、参加することによってはじめて得られた予想以上の収穫もあり、大変有意義であった。

〔派遣〕

派遣研究者	首都大学東京 システムデザイン学部 特任助教 武田 隆宏	2032101
研究集会名	2013 IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics	
出張期間	2013年10月11日～10月22日	
開催場所	英国 マンチェスター	
発表論文	Evaluation of Autonomy Walk by Dynamic Foot Pressure Analysis 動的な足底圧力の解析による歩行自立度の評価	

概要：

骨折などの整形外科疾患や脳卒中などの中枢神経系疾患を患った患者にとって、歩くことができないという苦痛は人生において初めての経験となる。そのため、本来であれば「目的」を達成するための「移動手段」であるはずの歩行が、「目的」そのものとなることも多く、歩行能力の改善は患者・利用者の精神的な満足へと繋がる。また、歩行能力の改善により運動量の増加が見込まれるため可能な限り早期に歩行能力の改善が必要とされている。本論文では現在医師や理学療法士により主観的に評価されている歩行能力を、マット型の荷重分布センサを用いることにより定量的に評価する手法を提案した。これにより、歩行能力に応じたりハビリテーションの計画やその効果を機械的に評価することが可能となる。本研究の発表により歩行機能の障害を抱えた患者の生活の質の向上を図るとともに、工学と医療の融合の一例であるこの論文を発表し、議論を行うことにより、医療情報処理や人間と機械の調和に関する研究の発展に寄与することを目的とする。

本研究は人とシステムに関する国際学会 2013 IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics における医療およびヘルスケアシステムに関するスペシャルセッション (Medical and Health Care Systems) において発表を行った。このセッションにおいて多数の医療・健康に関する研究者に対し発表および議論を行うことにより、『人間と機械の調和』の一分野である『工学と医療の融合』に関する国際的な意見交換を行うことができ、同分野の発達に貢献した。

〔派遣〕

派遣研究者	東京理科大学 理工学部 経営工学科 助教 田中 未来	2032102
研究集会名	The 9th International Conference on Optimization : Techniques and Application	
出張期間	2013 年 12 月 11 日～12 月 17 日	
開催場所	台湾 台北	
発表論文	MISOCP Formulation and Route Generation Algorithm for Ship Navigation Problem 船舶航行計画問題に対する混合整数 2 次錐最適化問題による定式化と航路生成法	

概要：

船舶航行計画問題とは、出発地から目的地まで船舶が航行する際に波浪や海流あるいは天候の状況を既知として燃料の総消費量を最小とする航路と船速を決定する問題である。私たちはこの問題を混合整数 2 次錐最適化問題として定式化した上で、この問題を航路の最適化と船速の最適化に分解して解く航路生成法というアルゴリズムを開発した。

今回の国際会議での発表の目的と意義は 2 つある。1 つは、私たちの研究成果について理論分野からの参加者と議論することで航路生成法の発展の可能性を探ることである。もう 1 つは、応用分野の参加者から実際の問題に関する情報を提供してもらうことで、私たちの手法を実際の問題解決に役立てるための改良の可能性を探ることである。

会議に参加することにより 1 つ目の目的に関して大きな成果を得ることができた。具体的には、整数計画問題に対するソフトウェアを開発している研究者と議論をし、航路生成法を高速化するための着想を得た。航路生成法では航路についての最適化問題を繰り返し解くが、そのときの計算の過程を記憶しておくことで 2 回目以降の航路についての最適化を高速に実行できる可能性がある。一方で、今回の国際会議は応用分野からの参加者が期待よりも少なく、応用分野の参加者との議論を行なうことはできなかった。しかしながら、本研究に関する論文が応用分野の研究者の目に触れる機会は作ることができたことは収穫であり、今後、研究の発展が期待できる。

講演は数値最適化の理論や計算に関するものが多く、私にとっては船舶航行計画問題と並行して研究している錐最適化問題について最近の進展を知ることができたことも収穫の 1 つであった。

〔派遣〕

派遣研究者	熊本大学 助教 中島 雄太	2032103
研究集会名	The 17th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (Micro TAS 2013)	
出張期間	2013 年 10 月 25 日～11 月 2 日	
開催場所	Germany Freiburg	
発表論文	Cell Stretching Microdevice for Evaluating Cellular Biomechanics Based on in-situ Cellular Response Observation 細胞応答のその場観察に基づく細胞バイオメカニクス評価のための細胞伸展マイクロデバイス	

概要：

International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (μ TAS) は、毎年開催される化学・生命科学の微小システムに関する世界最大かつ最も権威のある国際会議であり、特にマイクロデバイスシステムを体内埋め込み型生体センサや生体インタフェースなどのバイオ・医療分野への応用研究を行う研究者が多数出席する。この会議の採択率は 60% 以下であり、世界各国の最先端の研究成果が発表されるため、本会議に参加し、他の研究者との情報交換や議論などの交流を行うことは本研究を飛躍させる意味で非常に意義がある。

本研究は、マイクロマシン技術を駆使して伸展刺激を受ける細胞の応答挙動をその場で観察することが可能な細胞伸展マイクロデバイスを開発し、このデバイス上で細胞に引張り刺激を与えることによって、細胞バイオメカニクスを評価したものである。この研究成果についての発表を行った。発表形式はポスター発表であり、討論や意見交換を行うのに十分な 2 時間の発表枠が設けられていた。ポスター前での議論や意見交換は、時間的な制限がほとんどなく、お互いに納得の行くまで自由に行われるため、研究内容について世界各国の研究者たちと活発な議論や意見交換を行うことができた。ポスター前での討論は非常に有意義であり、その中で得たアドバイスやヒントは今後の研究を進めるための大きな指針となり得るものであった。また、議論や意見交換を行った研究者の中の一部とは、名刺交換や今後の研究の推進に関する各種情報交換等を行うことができ、今後の共同研究へと繋がる足がかりを得た。

〔派遣〕

派遣研究者	岐阜工業高等専門学校 准教授 森 貴彦	2032104
研究集会名	39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2013)	
出張期間	2013年11月7日～11月16日	
開催場所	オーストリア ウィーン	
発表論文	Power Assist System with Motion Estimation Using Constrained Predictive Functional Control 制約つき PFC を用いた動作予測に基づくパワーアシストシステム	

概要：

当国際会議に参加して発表する内容は、医療福祉分野において上肢動作支援を対象に、モデル予測制御を用いて人間の未来の手先トルクと未来の軌道をリアルタイムに予測し、さらに、安定で高いパワーアシスト率の実現が可能なモデル予測制御を用いた新たなパワーアシストシステムの有効性について議論を行うものである。本提案手法について日本国内では学会発表を精力的に行い、日本人有識者によって一定の評価を得てきた。しかし、本研究に関連した研究について2013年6月下旬に国際会議 ASCC2013に参加し発表したものの、これ以外に海外における国際会議での発表を行っておらず、日本人以外の評価を受けていなかった。そこで、当国際会議に参加する目的は、ロボットの制御理論や応用技術について発表が多い国際会議 IECON2013に参加し、自ら発表を行うことで国際的な意見を集約するとともに、関連分野の最先端の研究に関する知見を広げるためである。

IECON2013で発表した成果としては、本研究の「制約つきモデル予測制御とパワーアシストを融合した安定かつ安全なパワーアシスト技術」を世界的に周知できたため、今後、英論文として投稿する際に査読者の理解が得られやすい状況を作ることができた。また、直接評価をいただいたことで査読の際に想定される疑問・指摘に対して事前に対策を練ることができるようになった。

〔派遣〕

派遣研究者	東京工業大学大学院 理工学研究科 准教授 葭田 貴子	2032105
研究集会名	2013 Psychonomic Society Annual Meeting	
出張期間	2013年11月13日～11月18日	
開催場所	カナダ トロント	
発表論文	The Contribution of Efferent Copy to a Mirror Illusion Mirror Illusion に対する遠心性コピーの寄与	

概要：

カナダのトロントで開催された Psychonomic Society 2013 Annual Meeting に参加した。投稿数 1,264 件、北米地域の認知科学や知覚科学の学会としては比較的大規模な学会であるが、参加者は北米に限らず世界各地から集まっている。このほか、毎年この学会開催に合わせて複数のサテライト集会が併設されており、触覚に関する研究者による Tactile research group、若手を中心とした注意や記憶、物体認識に特化した学会 OPAM (Annual Meeting on Object Perception, Attention, and Memory) などが筆者の近接領域では活発である。発表に関しては、身体の中線に沿って設置した鏡の鏡面側を覗き込み、両手を同時に動かすと、手の鏡映像が視覚的捕捉を起こし、鏡の裏側に隠れた実際の手が鏡映像の位置から離れていても鏡映像の位置にあると感じられる Mirror Illusion という現象がある。この現象の生起メカニズムを知る目的で、振動により指が実際に運動しなくても動いた感覚を受動的に生じさせる錯覚を用いて (Mizuno, et al., 2010)、指の運動に対する遠心性コピーがない状態でも Mirror Illusion が生じるかどうかを検討した。Mirror Illusion が生じる領域を鏡面の 2 次元平面で記録し、その面積を条件間で比較した結果、遠心性コピーがなくても指が動いた感覚がある条件は、通常の Mirror Illusion の条件と有意差がない面積の視覚的捕捉が示された。この結果は、agency や ownership といった自己の身体感覚を説明するモデルに対して、従来仮定されている遠心性コピーと感覚フィードバックの時空間的情報の同期では説明できないことから、自己と他者の身体を区別する脳の理論との関係でさらなる検討が必要と思われる。また、この現象や原理を利用することで、あたかも自分自身の身体を操っているかのような操作性を有する機械システムを設計する原理をどのように提供するかが次の目標である。

〔派遣〕

派遣研究者	京都工芸繊維大学 大学院生 博士後期3年 夏 鵬	2042001
研究集会名	Digital Holography & 3-D Imaging (DH)	
出張期間	2014年7月13日～7月18日	
開催場所	アメリカ合衆国 シアトル	
発表論文	Spectroscopic measurement for fruit using spectral estimation digital holography 分光推定デジタルホログラフィによる果物の分光計測	

概要：

本会議で、デジタルホログラフィ（DH）に分光推定技術を世界に先駆けて融合することで世界初となる動く物体の3次元構造と物質の3次元分布の同時動画像計測法を紹介し、世界最先端の研究者と議論することを目的・意義とした。本会議では、被検物体の一例としてレモンを用いて、本技術における3次元形状と分光の3次元分布の同時計測に成功したとともに、食品への応用可能性を示したことを発表した。発表・議論した結果、構築したシステムにおいて分光推定誤差が大きい原因の一端が明らかとなり、本システムの計測精度を向上できるアドバイスを得た。また、提案技術は動く物体の3次元構造と分光情報の3次元分布を同時に計測でき、生細胞イメージングの研究者と議論を交わし、生体細胞の形状変化及び物質や機能変化の解明や理解などへの応用展開が有望であることが明らかとなった。提案技術は動く物体に対して、人間では観察し得ない分光分布の3次元分布を機械に獲得させ、解析・認識させるための3次元形状情報及び3次元分光情報入力装置に応用できる。そのため、実世界と人間とを繋ぐ次世代マン＝マシンインターフェースとなる画期的な技術である。本会議での発表と討論により、提案技術が『人間と機械の調和の促進』へ貢献し得ることを示し、意義を果たすことができた。

〔派遣〕

派遣研究者	豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系 助教 後藤 太一	2042002
研究集会名	IEEE International Magnetism Conference	
出張期間	2014年5月3日～5月10日	
開催場所	ドイツ ドレスデン	
発表論文	Magnonic Crystals using Micro-cavities for Logic Devices マイクロキャビティを利用したマグノニック結晶の形成と論理演算素子への応用	

概要：

今回参加させていただいた国際学会 IEEE International Magnetism Conference では、磁気の基礎から応用まで幅広い分野に関する先端物理、技術が報告される。最近の磁気分野では、モーター、ハードディスク、磁界センサなどの応用製品で、産業界の注目を集め、当該国際学会への企業の研究者等の参加数は多い。今回、私は、マグノニック結晶の応用例に関する研究について、口頭発表によって報告を行った。マグノニック結晶とは、磁化の波であるスピン波を、このスピン波の波長スケールの磁化の周期構造によって制御するものである。このマグノニック結晶を用いると、スピン波を情報キャリアとして扱うことができ、同時に、外部の磁場によって、局在位置を制御することが可能になる。逆に、スピン波の伝搬特性から磁気センサ、及び電流センサとしてマグノニック結晶が応用可能であることを示した。発表後、磁気抵抗効果（Magnetoresistance）素子について研究を行うシンガポールの研究者から、これと同程度の性能をもつ素子を開発中であり、それについて情報交換を行った。会議では、ロシアのグループなどによって、マグノニック結晶について活発な議論が交わされ、主に、パーマロイを用いたマグノニック結晶について議論されており、我々が今回報告したような極めてスピン波の損失が少ない酸化物磁性体であるイットリウム鉄ガーネットを用いた報告例は見られなかった。このことから、今後は、同種の応用先を志向した場合であったとしても、イットリウム鉄ガーネットの特徴・利点を活かすデバイス開発が求められることが分かった。

〔派遣〕

派遣研究者	東京理科大学 理工学部 准教授 杉山 睦	2042003
研究集会名	Material Research Society 2014 Spring Meeting	
出張期間	2014年4月19日～4月27日	
開催場所	アメリカ合衆国 サンフランシスコ	
発表論文	Material Design for Novel-Concept-Based Solar Cells —— Sulfurization or Oxidization of “Cheap” Metals —— 新しいコンセプトの太陽電池材料のデザイン —— 安価な金属の酸化・硫化プロセス ——	

概要：

現在市場に出回っている太陽電池は、高価な材料や人体に有害な材料などを用いており、結果的に販売価格が高いのが現状である。我々は「作るとき・使うとき・捨てるときに安心安全安価な太陽電池」の実現を目指し、材料探索・物性解明といった理学的側面と、作製プロセスなど工学的側面から研究を進めており、硫化スズ (SnS) を用いた高効率太陽電池材料の研究開発や、酸化ニッケル (NiO) を用いた透明太陽電池の研究開発を行ってきた。研究当初はほとんど類似報告のなかった分野であったが、Si 系太陽電池の発電効率の伸び悩みなどに伴い、脚光を浴びるようになってきた。

今回、米国材料学会 (MRS) 主催で行われた国際会議において、「Earth-Abundant Inorganic Solar-Energy Conversion (地球に豊富に存在する無機物を利用した太陽エネルギー変換)」のシンポジウムが初めて開催され、シンポジウム実行委員会より、我々が以前から提案してきた「簡便な装置で (毒ガスや複雑なプロセスを用いず) 安心安全に作製出来る太陽電池の製造法」に関する invite talk の招待を頂いた。これまでの太陽電池とは異なる、作り手にとってもメリットの多い安全安心な原料・プロセスおよび製造装置の開発が学会に認められたことは非常に名誉ある事であり、御財団の趣意『人間と機械の調和の促進』にも合致していると考え、派遣申請をさせていただいた。当日は、これまでの常識にとらわれない材料を、いかにコントロールして太陽電池材料として用いるかのマテリアルデザインを中心に講演を行い、大きな反響を得た。

〔一般招聘〕

招聘者	早稲田大学 理工学術院 教授 藤江 正克	2034001
研究集会名	The 9th Asian Conference on Computer Aided Surgery (ACCAS2013)	
出張期間	2013年9月15日～9月20日	
開催場所	早稲田大学 (東京都新宿区)	
被招聘者	氏名：曹其新 Qixin CAO 所属・職名：Shanghai Jiao Tong University/Professor Engineering Training Center, Shanghai Jiao Tong University / Director Research Institute of Robotics, Shanghai Jiao Tong University / Vice-director East China institute of university engineering training teaching / Vice chairman	

概要：

近年の高齢社会において、治療の低侵襲化ならびに高度化を進めるための研究が盛んに行われています。本国際会議は、アジアを中心として、医療・医学・生命科学分野におけるロボティクスやメカトロニクスを対象とした研究成果を発表する場として開催されている国際会議です。国内外の医学と工学の研究者が集まり、当該分野に関わる様々な情報を共有することで、より低侵襲かつ高度な治療技術の開発・研究ならびに実用化の推進を促進させることを目的として開催されております。本招聘では、手術支援ロボットを筆頭に導入が進んでいる中国において、その中でも最先端をリードする研究者に近年の傾向と最新の研究成果を講演していただき、アジアを中心とするコンピュータ外科の発展に向けて今後必要となる要素に焦点を当てた議論を行うことを目的として実施するものとなります。

本国際交流助成によって招聘した曹其新教授による講演発表は、めざましく発展を続けるアジア地域の中でも特に急速に発展してきている中国における当該分野の研究成果・研究動向を示す内容となっており、研究レベルが均衡するアジア各国の研究者へ、アジアを中心とするコンピュータ外科の発展に必要な要素を提供しました。招聘者による講演発表を契機に、アジア地域の研究者同士の議論・交流が活性化しました。本国際会議終了後には、アジア地域における今後の医工学研究活動の活性化をもたらされることが期待されます。

〔国際会議〕

申 請 者	京都大学学術情報メディアセンター 教授 岡部 寿男	2025002
研究集会名	IEEE COMPSAC2013 (IEEE International Computer Software and Applications Conference 2013)	
開催期間	2013年7月22日～7月26日	
開催場所	京都テルサ（京都市南区）	
申請者の役割	組織委員長	

概 要：

COMPSAC は IEEE（Institute of Electrical and Electronics Engineers, 電気電子技術者協会, 世界最大の学術組織）内の最大ソサエティである Computer Society が主催するフラッグシップ国際会議であり、コンピュータとソフトウェア、インターネットとアプリケーションの全てを扱っており、情報工学では最も重要な国際会議である。COMPSAC2013 は 37 年目の開催となり、また、日本での開催は 1991 年開催以来であり京都開催は今回が初であった。

COMPSAC は、今までは Computer Society 単独の会議であったが、今までの日本からの貢献が認められ、今回以降の COMPSAC は、情報処理学会（日本の情報工学の研究者・技術者を会員とする日本最大の学会）が Technical Sponsor となる。情報処理学会が Technical Sponsor となったことにより、情報処理学会会員は IEEE 会員と同等の資格・参加費で COMPSAC に参加できることとなり、今後、日本の研究者・技術者の国際交流、研究成果の国際への発信とアピールの場を提供することができる。以上のことから、COMPSAC2013 を日本・京都で開催できたことは、日本の情報工学分野にとって非常に大きな学術的意義をもつものであった。

〔国際会議〕

申 請 者	豊田工業大学 工学部 教授 佐々木 実	2025006
研究集会名	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)	
開催期間	2013年8月18日～8月22日	
開催場所	金沢市文化ホール（石川県金沢市）	
申請者の役割	議長	

概 要：

本会議は、本助成をはじめとする複数団体からの支援と賛助を頂き、金沢市文化ホールにおいて 5 日間にわたり開催された。会議の学術内容として、デバイス製作技術（ナノ構造材料を含む）、光機能の創発（プラズモニクスやメタマテリアルを含む）に代表される、マイクロ・ナノ科学における最先端の基礎技術開発から、それらを応用したデバイス機能の高度化、光波の制御、バイオメディカル分野への応用など、幅広い研究発表が行われた。論文件数の比率は、いわゆる光線幾何学を取り扱う光 MEMS が 7 割で、ナノフォトニクスが残りの 3 割であった。12ヶ国より 100 名を超える参加者があり、87 件の発表がなされた（開催直前の取り下げは 1 件も出なかった）。アジア地区からの発表件数が全体の 7 割を占めた（本会議のアジア開催年時の傾向ではあるが、今回はそれが強かった）。企業からの発表が 3 件、産学連携の発表が 7 件あった。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。全体の半数以上が海外からの参加者であり、日本国内で開催される国際会議としては、海外からの参加者割合が高い。高度な学術レベルの発表と共に、研究者間での学術交流が活発に行われた。また、地元ボランティアの協力による、金沢城、武家屋敷、兼六園の見学に加えて、バンケットでの日本舞踊など、金沢ならではの趣向を提供した。論文集発行（冊子体と CD）や会議の運営なども円滑に進められ、成功を収めることができ、有意義な会となった。

〔国際会議〕

申請者	東京大学大学院工学系研究科 教授 廣瀬 明	2025009
研究集会名	Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR) 2013	
開催期間	2013年9月23日～9月27日	
開催場所	つくば国際会議場（茨城県つくば市）	
申請者の役割	組織委員長	

概 要：

本会議は、合成開口レーダ（SAR）全般を対象としたアジア・太平洋（以後 AP と呼称）地区を中心とする国際会議である。SAR は、地球温暖化や自然災害等による地球表層変化の把握・地雷等の地中埋設物探査・非侵襲生体計測・非破壊検査・車載応用等の極めて多岐に亘る分野において、必要不可欠な要素技術であり、「人間と機械（電磁波計測器）との調和」を実現する重要な技術である。本会議で扱う研究分野は、エレクトロニクス・地球科学・情報工学等の幅広い研究分野にまたがる。本会議の歴史はまだ浅いが、それ故に現在の多種多様な研究動向に柔軟に対応可能であり、高度な専門性を保ちつつ、分野間の研究協働を促し、新たな研究領域を創出する場を提供する。

本会議では、Plenary session において、6 名の世界的に著名な研究者による特別講演がなされ、衛星観測による地球環境計測や大規模災害への対策等、多くの SAR 関連の研究者にとって非常に貴重な情報が提供された。また、世界中から注目されている次期地球観測衛星 ALOS-2 の打ち上げプロジェクトが 2013 年度末に予定されていることもあり、上記プロジェクトを担当している宇宙航空研究開発機構（JAXA）を中心に、ALOS-2 に関するスペシャルセッションも併せて企画した。また、当該分野における優秀な若手研究者（学生および一般）を発掘し支援することを目的として、Student Paper Competition（SPC）と Young Scientist Award（YSA）の顕彰を実施した。具体的には、SPC 及び YSA とともに Abstract 査読で 10 名の finalist を選考し、full-paper 論文と発表を選奨委員会が評価した。最終日には、JAXA つくば宇宙科学センターへのテクニカルツアーを実施し、日本の宇宙科学の最先端を間近に見学してもらった。全体を通して多くの参加者から充実した会議であったと評価を得た。

〔国際会議〕

申請者	中部大学工学部情報工学科 助教 板井 陽俊	2035001
研究集会名	2013 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA2013)	
開催期間	2013年9月30日～10月2日	
開催場所	愛知県産業労働センター ウィンクあいち（名古屋市中村区）	
申請者の役割	General Secretary	

概 要：

SISA は新しい情報技術とその「スマート」なシステムに関する国際ワークショップとして企画され、7 回目となる本年度は 9 月 30 日から 10 月 2 日にかけて愛知県名古屋市のウィンクあいちにて開催された。本会議は高度な適応性・柔軟性を持つ通信システムや情報処理システムなどの設計・開発、さらにそれらの実用化についても検討することを目的としており、専門領域が幅広い分野を横断することから、分野の壁を超えた専門的な情報交換・研究討論が可能である。また、本会議は若手研究者からの研究発表を奨励しており、ポスターセッションを主体とすることで議論が活発に行われ、特定領域の常識にとられない様々な知識が融合したアイデアの創出、研究推進が期待される。

会議には過去最大となる 128 名（日本から 121 名、外国から 7 名）が参加し、59 件のポスター発表、13 件のオーラル発表の中で無線通信やマルチメディア、信号処理など多岐にわたる活発な議論がなされた。さらに、理化学研究所の Andrzej Cichocki 博士によるテンソルネットワークを用いたビッグデータ解析、東京医科歯科大学の三林浩二教授による最新のバイオセンサ技術に関する招待講演が催され、いずれも聴講者の注目を集める講演であった。チュートリアルセッションでは、3 名の講師から若手研究者を対象とした様々な研究分野の基礎やトレンドなどに関する講演が行われた。

以上より、SISA2013 は会議の目的としている情報技術の発展、および若手研究者の育成に貢献できたものと考えられる。

〔国際会議〕

申 請 者	前橋工科大学 副学長（研究・地域貢献担当） 今村 一之	2035002
研究集会名	知的メディア技術，脳・健康情報学国際会議 2013（AMT-BHI 2013）	
開催期間	2013 年 10 月 29 日～10 月 31 日	
開催場所	前橋テルサ（群馬県前橋市）	
申請者の役割	会議統括	

概 要：

会議のテーマである AMT（Active Media Technology：知的メディア技術）は、コンピュータ科学や情報技術を融合した知的情報技術に関する学際分野である。また、BI（Brain Informatics：脳情報学）は、近年の脳研究の発展を踏まえ、脳の知覚から思考に至るまでの認知機能を系統的に研究する新しい学際分野である。

このような人間と機械を中心とした脳や知的メディアに関わる本国際会議において、人間の特性を考慮した新たな機械のあり方や、機械が人間の考えをどう理解するかといった議論が深められた。本会議では、「人間と機械の調和の促進」に大きく貢献する事を目的に、特に、AMT・BI・HI（健康情報学）の相互の研究促進や創発性により、個々の研究分野に新風を吹き込むことを目標とした。

基調講演(7)、招待セッション(2)、ワークショップ(4)、特別セッション(8)、が実施され、査読により採択された学術講演数は、187 演題、37ヵ国から 200 名以上の参加者があった。最終日の午後には、群馬大学重粒子線医学研究センターへの視察等が実施され、生命健康都市前橋への地域貢献も果した。

本国際学会の主な成果としては、高い学術レベルの論文集をそれぞれ、Active Media Technology (Springer LNCS8210)、Brain and Health Informatics (Springer LNAI8211) として上梓できたことである。また、本会議の成功により、新たな学術ジャーナル(オープンアクセス) が刊行されることが決定したことも大きな成果であった。

〔国際会議〕

申 請 者	産業技術総合研究所 先進パワーエレクトロニクス研究センター 研究センター長 奥村 元	2035003
研究集会名	シリコンカーバイド及び関連材料に関する国際会議 2013 The International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM 2013)	
開催期間	2013 年 9 月 29 日～10 月 4 日	
開催場所	シーガイア・コンベンションセンター サミットホール（宮城県宮崎市）	
申請者の役割	組織委員長	

概 要：

省電力高効率、超小型高耐熱等、従来の半導体を超える特長を有する、次世代パワーデバイス用半導体である、シリコンカーバイド（SiC）は、長年の研究開発の結果、実用デバイスが生産販売されるに至り、幅広い産業分野での応用に急速な関心が集まっています。こうした背景を踏まえ、1987 年を嚆矢に、15 回目を迎える本国際会議は、SiC 関連の最重要会議と位置付けられており、材料作製・評価からデバイスまでの広範な基礎研究分野のみならず、産業応用における課題解決、将来展望にも焦点をあてて、最新の研究開発成果を世界各国から持ち寄り、議論することを目的としています。

会議は、平成 25 年 9 月 29 日から 10 月 4 日まで宮崎市のフェニックス・シーガイア・リゾート シーガイア・コンベンションセンターにおいて開催されました。参加者数は 795 名（参加登録者 659 名、企業展示出展者 136 名）に達し、前回 2007 年の我が国での開催より 180 名増加しました。参加登録者の 43%（283 名）が海外からの参加で、欧州 127 名、米国 63 名、アジア・オセアニア 93 名と、真に国際的雰囲気での会議となりました。会議では、2つの基調講演セッション、24 の口頭発表セッション、4つのポスター発表セッションにおいて、結晶成長、材料評価、表面・界面、素子プロセス、素子特性、回路・応用等、幅広い議題がとりあげられ、基礎物理から素子応用に至る幅広い分野で、最新の研究開発成果に関する議論がなされました。加えて、企業技術紹介セッションでは、国内外 48 社からの発表があり、材料メーカ、装置メーカ、分析業者等の 61 社の展示ブースが会議中併設されるなど、着実に実用化に向けた進展を実感できるものとなりました。

〔国際会議〕

申請者	電気通信大学 先進理工学専攻 准教授 志賀 智一	2035004
研究集会名	The 20th International Display Workshops (IDW '13)	
開催期間	2013年12月4日～12月6日	
開催場所	札幌コンベンションセンター（札幌市白石区）	
申請者の役割	実行副委員長	

概要：

本国際会議は、電子情報ディスプレイ技術分野において、最新の研究開発成果を発表・議論する事を目的として毎年開催され、本年度は20回目の記念すべき開催となった。本会議はディスプレイ関連の基礎物性、製造技術などに加えて、画像処理、人間工学などを含む幅広い分野の研究を取り扱っており、さらに今年は、最近話題となっている1)Oxide TFT, 2)Augmented Reality and Virtual Reality, 3)Lighting Technologiesに特にスポットライトを当てる企画を実施した。3件の基調講演のほかに招待講演115件、口頭発表161件、ポスター発表203件の合計482件の発表が行われ、参加者は国内770名、海外21ヶ国から390名の合計1,160名であった。口頭発表セッション、ポスター発表セッションの他に、口頭発表者と一対一で議論することのできるAuthor Interviewを設け、また実際の機器を用いて体験のできるデモンストレーションセッションを行い、参加者に好評を博した。このほか20回記念イベントとして、過去のIDWで発表された優れた論文を紹介する基調講演、およびそれに関する試作機・製品の展示を行った。論文投稿を伴わない学生の研究展示に対しては、若手研究者育成を目的とした助成を行った。優れた研究発表に対し、“Best Paper Award”15件と“Outstanding Poster Paper Award”24件を授与した。以上のように、次世代を見据えたディスプレイ技術およびその周辺技術の最新動向を踏まえつつ基礎研究から応用研究までを網羅し、発表者にも聴講者にも満足していただけるような企画を通じ、活発で有意義な技術交流の場とすることができたと考えられる。

〔国際会議〕

申請者	早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科 教授 菅野 重樹	2035005
研究集会名	2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems	
開催期間	2013年11月3日～11月8日	
開催場所	東京ビッグサイト（東京都江東区）	
申請者の役割	実行委員長	

概要：

IROS (International Conference on Intelligent Robots and Systems) は、1988年に第1回が東京で開催された、日本発のロボットに関する国際会議である。今回が26回目となり、ロボットに関する国際会議としては世界最大に成長した。IROSは、IEEE RAS, IEEE IES, 日本のRSJ（日本ロボット学会）、SICE（計測自動制御学会）の4学会が共催している。

今回のIROS2013は新たな次の25年を目指して、再び東京に戻って開催されることとなり、会議のタイトルも「New Horizon」と名付けた。実行委員長は菅野重樹（早稲田大学）が務め、プログラム委員長は金子真（大阪大学）が務めた。

IROS2013は、2013年11月3日～8日に東京ビッグサイトの会議棟で開催した。今回は、日本のロボットの研究開発力を世界に示すことを目指し、1年おきに開催されている国際ロボット展（iREX：日本ロボット工業会主催）と協力して日程と場所を設定した。

IROS2013の投稿論文数は2094件、査読委員会とプログラム委員会による討議の結果、904件を採択し、採択率は43%となった。主要国別の論文採択数は、アメリカ：188件（21%）、日本：154件（17%）、ドイツ：104件（12%）であった。論文のキーワードの上位は、移動ロボット、認知、リハビリテーション、ヒューマノイドなどであった。

特別講演は、ボストンダイナミクス社のDr. Marc Raibert氏をはじめ3名にお願いした。ワークショップは28件を採択した。懇親会では、新たな25年の始まりを記念して、現在のロボット技術や国際会議の状況を25年後に伝える「タイムカプセル」を企画し、封入イベントを行った。最新センサー、初回と今回のIROSのProceedingsなどをタイムカプセルに封入し、日本ロボット学会で預かっていただき、25年後のIROSで開封することにした。いずれのイベントも大盛況で好評を得ることができた。

参加者数はIROSの最高記録である1771名となり、国際会議として大成功を収めることができた。

〔国際会議〕

申請者	東京都市大学知識工学部情報科学科 教授 田口 亮	2035006
研究集会名	2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS 2013)	
開催期間	2013年11月12日～11月15日	
開催場所	沖縄県市長村自治会館（沖縄県那覇市）	
申請者の役割	実行組織委員会委員長	

概要：

本国際会議はその名称が示すように、「メディア技術/システム」と「通信方式/システム」を2つの柱とする ICT (Information and Communication Technology) 分野の会議である。会議名称にある "Intelligent" とは「人間のための」、「環境に適応した」等の知的なソフトウェア/ハードウェア技術を追求することを意味している。すなわち、ICT 分野から『人間・環境との融合・調和を目指した技術を促進』する国際会議であり、今年が21回目の開催となった。本会議のスタート当初の1990年代はこれら ICT 分野の黎明期であったが、それから20年の月日が経ち、今日では円熟期を迎えている。

本年はタイ、台湾、韓国等の東南アジア諸国を中心に17ヶ国から65名の外国人研究者を含め、日本人研究者を加えると総勢200名の参加を得るに至った。33セッションで「メディア」と「通信」を中心に活発な討論が行われ、ICT 分野の研究発展に寄与したものと考えられる。

基調講演は「ICT 分野における先駆的研究」、「ICT 分野のビジネス」、そして、「良き ICT 社会構築のための提言」を目的とした講演であり、森川博之教授（東京大学）、Beyong Gi Lee 教授（Seoul National University）、藤本真樹氏（グリー株式会社）の3名が講演者であった。

本国際会議では優れた研究への称賛と若手研究者育成のために「論文賞」と「学生論文賞」の選出を行った。論文賞にも Korea University の学生を筆頭著者とする論文が選出され、3名の優れた学生研究者に授賞することができた。

〔国際会議〕

申請者	名古屋大学大学院情報科学研究科 助教 平山 高嗣	2035008
研究集会名	15th International Conference on Multimodal Interaction (ICMI) Doctoral Consortium	
開催期間	2013年12月9日～12月9日	
	ICMI2013 本会議は2013年12月10日～12月13日	
開催場所	Coogee Bay Hotel, Coogee Beach, Sydney	
申請者の役割	Doctoral Consortium Chair	

概要：

ICMI は、多様なモダリティに着目した次世代の知覚的、適応的インタフェースに関する国際会議で、人間と人間のインタラクションの分析、その知見を応用した人間と機械のインタラクションのモデル化、マルチモーダルインタフェースの設計と構築、およびその評価に関わる学術的に極めて質の高い発表が行われる。今回は、27件の口頭発表（採択率20%）、22件のポスター発表（同17%）、3件の基調講演で構成され、サテライトイベントとして、Doctoral Consortium、5つの Grand Challenge、3つの Workshop が企画された。

派遣従事者が企画した Doctoral Consortium では、博士課程の学生がそれぞれの研究成果を発表し、助言者として起用された HCI 分野の著名な産学研究者と“円卓を囲んで”、博士論文の執筆に至るプランについて議論を行った。また、ランチタイムに助言者がそれぞれのキャリアパスを披露し、それを議論の種としてパネルディスカッションを行った。このような活動が若手のコミュニティ作り促進に貢献したことは明らかであった。

発表内容としては、インタラクションの参加者の「個性」「感情」といった内部状態の推定に関するものや、計測モダリティについては「視線」に関するものが多かった。今後これらが HCI の設計における最重要な要素になることが顕在化した。また、コンピュータビジョンやマルチメディア分野などを席卷している機械学習が本分野に浸透していることも明らかであった。人間に関わる系に分析、設計、開発、評価といった様々な視点からアプローチするマルチモーダルインタラクション研究、そしてそれらが会する ICMI は、多くのコンピュータサイエンス研究者のターゲットとなり、今後益々盛り上がりを見せるものと期待できる。

〔国際会議〕

申請者	広島大学 工学研究院 電気電子システム数理部門 教授 山本 透	2035011
研究集会名	5 th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (ADCONIP) (第5回産業プロセスの高度制御に関する国際会議)	
開催期間	2014年5月27日～5月30日	
開催場所	メルパルク広島（広島市中区）	
申請者の役割	2014 国内組織委員会 委員長	

概 要：

産業界においては、国際競争が一段と進み、生産性の向上、省エネルギー化・省力化など、品質向上と生産コスト低減が、年々重要視されている。とくに最近では、深刻化するエネルギー問題や温室効果ガスの排出規制など環境問題の制約条件下において、上述のような問題解決が求められている。

このような現状に鑑み、産業プロセス（石油・化学プロセスなど）における高度制御に関する研究成果の発表、ならびに意見交換を目的として、本シンポジウム（ADCONIP 2014）が開催された。117件の研究論文が投稿され、そのうち99件が（ただし、1件は基調講演として）採択された。これに加え、4件のプレナリー講演、また5件の基調講演の併せて、107件の講演があった。参加者は招聘者を含め151名（国内82名、国外69名）であり、研究発表に加え、活発な意見交換が行われ、盛会のうちに終了した。本会議の開催は、今後、エネルギー問題や環境問題など、持続可能な人間社会の創出に向けた喫緊の課題解決につながるものと期待され、本会議の所期の目的は達成できたものと考えている。

最後に、本会議は、第1回大会が2002年に熊本で開催され、その後、Seoul（2005年）、Jasper（カナダ）（2008年）、Hangzhou（中国）（2011年）と開催され、このたび、第5回大会として広島で開催された。次回は3年後の2017年にTaipei（台湾）で開催されることとなっている。

-
- 2013 年度活動報告
 - 2014 年度助成報告
 - 第3回立石賞表彰式及び2014 年度助成金贈呈式
 - 受領者投稿
 - 研究室訪問
 - 2014 年度 研究助成課題一覧
 - 2013 年度後期 国際交流助成課題一覧
 - 2014 年度前期 国際交流助成課題一覧
 - 2013 年度国際会議開催助成課題一覧
 - 2014 年度研究助成課題の紹介
 - 2015 年度助成候補募集案内

2013 年度活動報告

(1) 主要業務日程

年 月 日	内 容
2013 年 4 月 1 日～	第 3 回立石賞候補の推薦受付開始 2013 年度後期国際交流助成課題の申請受付開始 2013 年度国際会議等開催助成課題の申請受付開始
5 月 20 日	第 15 回理事会開催 ・2012 年度事業報告及び決算報告承認等
5 月 23 日	2013 年度助成金贈呈式及び懇親交流会を開催
6 月 13 日	第 7 回評議員会開催 ・2012 年度事業報告及び決算報告承認 等
6 月 30 日	2013 年度後期国際交流助成課題の申請締切 (23 件受付) 2013 年度国際会議等開催助成課題の申請締切 (16 件受付)
8 月 1 日	2014 年度研究助成課題の募集案内発送
8 月 23 日	夏期選考委員会開催 ・2014 年度後期国際交流助成課題、国際会議開催助成課題の選考
9 月 1 日～	2014 年度研究助成課題の申請受付開始
9 月 24 日	第 17 回理事会開催 ・2014 年度助成課題募集方法の承認 等
9 月 27 日	助成研究成果集第 22 号発行
10 月 1 日	2014 年度前期国際交流助成課題の申請受付開始
10 月 31 日	2014 年度研究助成課題の申請締切 (135 件受付)
12 月 25 日	2014 年度前期国際交流助成課題の申請締切 (13 件受付)
2014 年 1 月 24 日	第 26 回選考委員会開催 ・2014 年度研究助成課題、前期国際交流助成課題、立石賞の選考
3 月 14 日	第 19 回理事会、第 8 回評議員会開催 ・2014 年度事業計画及び収支予算案の承認 ・2014 年度助成課題の承認 ・2015 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 2013 年 4 月 1 日 至 2014 年 3 月 31 日)

(単位：千円)

貸 借 対 照 表

(2013 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	126,000	現金	27
特定資産運用益	19,059	普通預金	31,427
寄付金収入	20,500	有価証券	0
雑収入	92	2. 固定資産	
2. 事業活動支出		(1) 基本財産	
事業費支出	82,327	有価証券	11,182,500
管理費支出	8,705	(2) 特定資産	
事業活動収支差額	74,618	事業運営資産	1,100,000
II 投資活動収支の部		事業積立資産	210,000
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	60,000	資産合計	12,524,104
2. 投資活動支出		II 負債の部	
助成事業積立資産取得支出	130,000	1. 流動負債	0
投資活動収支差額	△ 70,000	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	12,492,500
財務活動収支差額	0	寄附金	1,100,000
当期収支差額	4,618	寄附株式	11,182,500
前期繰越収支差額	26,836	事業積立資産	210,000
次期繰越収支差額	31,454	2. 一般正味財産	31,604
		正味財産合計	12,524,104

2014 年度助成報告

本年は、すでに研究助成、前期国際交流助成、および第3回立石賞顕彰を実施し14年5月22日に研究助成金贈呈式と合わせて、第3回立石賞表彰式を開催した。

研究助成	33 件	8,001 万円
国際交流助成（前期）	7 件	308 万円
立石賞（功績賞）	1 件	500 万円
立石賞（特別賞）	1 件	500 万円
合計		9,309 万円

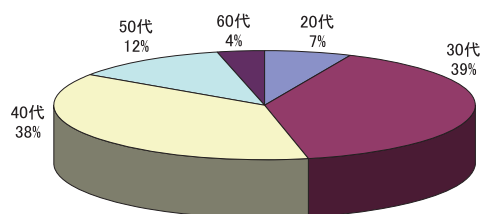
この結果、財団設立以来の助成・顕彰件数は、研究助成 551 件、国際交流助成 299 件、立石賞 7 件、合計 857 件数。助成・顕彰金総額は、14 億 2,999 万円となった。

なお、後期国際交流助成と国際会議開催助成は、2014 年 10 月に実施する。

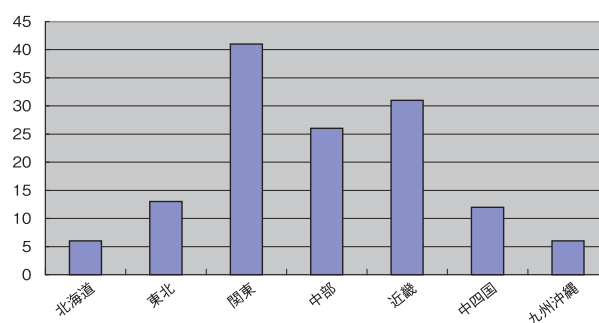
● 2014 年度助成の応募状況

(1) 研究助成（2014 年度）

① 年令別

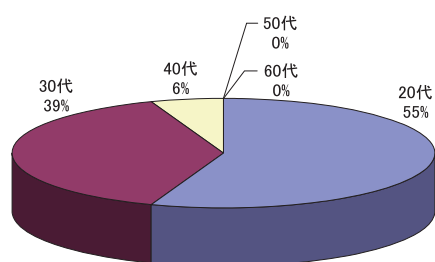


② 地域別

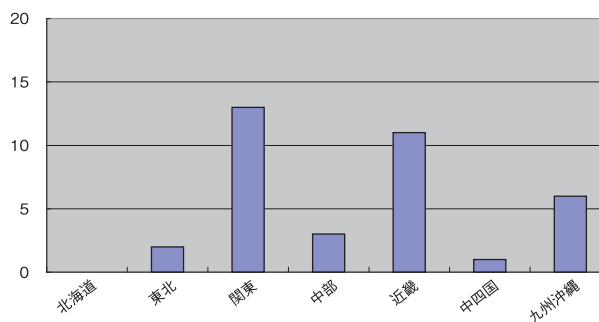


(2) 国際交流（国際会議発表、短期在外研究）助成（2013 年度後期～2014 年度前期）

① 年令別



② 地域別



第3回立石賞表彰式・記念講演 及び 2014年度助成金贈呈式

日時：2014年5月22日（木）

場所：グランドプリンスホテル京都

第3回立石賞表彰式・記念講演及び2014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 山脇良雄様、京都府副知事 山下晃正様、京都府商工労働観光部部長 岡本圭司様、オムロン株式会社専務取締役 作宮明夫様、第3回立石賞受賞者、2014年度研究助成金受領者、過年度立石賞受賞者・助成金受領者、財団関係者、一般聴講者を含めて、約170名の出席のもとに開催しました。立石義雄理事長より賞金及び研究助成金目録の贈呈を行ないました。



表彰式・贈呈式会場



立石理事長挨拶



研究助成目録の贈呈



立石賞功績賞の表彰



立石賞特別賞の表彰

立石賞受賞者 江刺正喜様（功績賞）、小川誠二様（特別賞）には記念講演を実施していただきました。また、研究助成金受領者には表彰時に研究概要と熱意を述べていただき、懇親交流会で研究課題の内容や目標についてポスターを用いた説明を行い、参加者との活発な質疑が行われました。

※課題発表は、147～151 頁に掲載



立石賞受賞者による記念講演

受領者投稿

安全なプラントオペレーションのためのオペレータ支援技術

福岡大学工学部 教授 野 田 賢

(第19回受領者)

高度に自動化が進んだ化学プロセス産業においても、人間のほうが機械よりも融通性に富むという理由から、依然として人間（プラントオペレータ）が運転業務において重要な役割を担っています。経験や勘などに基づく人間の高度な認識や判断に委ねられるオペレータの運転業務の一つに、プラントの異常原因の特定、異常時における対応操作などがあります。従来、日本のオペレータは、海外のオペレータに比べてプラント異常発生時の正確な異常原因の特定と的確な対応操作の点で定評がありました。しかし、ベテランオペレータの大量定年退職による急速な世代交代、定修間隔の長期化や国内での新規プラント建設数の低下による経験不足、プラントオペレーションの高度化とオペレータの守備範囲の拡大により、現場力の長期的な低下が懸念されています。実際、オペレーションが直接的な原因とは限りませんが、国内での大きなプラント事故が毎年のように報道されるようになりました。

このような背景の下、立石科学技術振興財団の研究助成金に採択される幸運に恵まれました。研究テーマのタイトルは、「プラントオペレータの認知情報処理モデルによるヒューマンエラー解析と事故予防対策立案」でした。従来、ヒューマンエラーに起因するプラント事故の原因調査は、事故後の聞き取りやデータ解析が中心でした。しかし、本研究では、事故後の解析

ではなく事故を未然に防ぐ予防策の立案の重要性を主張し、プラントオペレータの認知情報処理モデルの構築とシミュレーションによるヒューマンエラー解

析に取り組みました。研究は当初の計画通りには進みませんでした。本研究で得られた成果は、現在の研究テーマへと直接繋がるものとなりました。

現在、オペレータの異常診断を支援する重要なシステムの一つであるプラントアラームシステムに関する研究テーマに取り組んでいます。プラントの異常を早期に検知し、オペレータに適切な対応操作を促すアラームシステムの設計においては、人間とシステムの関わりを認知情報処理プロセスの観点から詳細に分析、評価し、その結果を設計にフィードバックすることが求められます。そのためのモデルとして、先のプラントオペレータの認知情報処理モデルを活用しています。今後も、安全なプラントオペレーションのためのオペレータ支援技術の実現を目指し、研究活動に邁進したいと考えています。最後になりますが、立石科学技術振興財団によるこれまでのご支援にあらためて感謝申し上げます。



受 領 者 投 稿

二足歩行でのヒトと機械の調和について

同志社大学 スポーツ健康科学部 准教授 上 林 清 孝

(第20回受領者)

脊髄損傷などによって中枢神経系が損傷してしまうと、多くのケースで歩行機能に障害が及びます。近年では動物実験の結果を基に、歩行機能障害者に対して積極的な歩行リハビリテーションが行われるようになり、歩行機能の回復に効果的であることが示されています。代表的な手法は体重を免荷した状態でトレッドミルでの歩行動作を繰り返すもので、重度の機能障害者に対してはセラピストが脚の動きを徒手アシストすることで実施されます。しかしながら、座位姿勢での徒手アシストはセラピストにとって身体的負担が大きく、疲労の影響でトレーニングの量や質が低下してしまいます。この問題を解決する目的で、ロボット技術を応用した歩行支援ロボットが多数開発され、医工学の融合が進んだ領域のひとつとなっています。

博士課程では、ヒトの運動制御に関して筋電図を用いた研究を行っていましたが、学位取得後にポスドクとして勤務した国立障害者リハビリテーションセンターで歩行支援ロボットによるリハビリテーション研究に携わり、基礎と臨床の両面からリハビリテーションロボットの有用性を実感することとなりました。3年後には筑波大学に着任しましたが、そこでもヒトの運動を支援する外骨格型ロボットを用いた研究に関わる機会に恵まれました。着任1年目、研究設備がまだ整っていないなか、新たな研究課題を着想し、貴財団への申請を行ったところ

「ロボットによる歩行支援が通常歩行時の歩容に及ぼす影響」というテーマで採択いただけることとなりました。

この研究課題では、ロボットアシストによる歩行を続けることで、その後の通常歩行にどのような即時影響が生じるのか、またその影響がどの程度持続するのか調べることを目的としました。ヒトの運動プログラムがロボットによる運動支援によってどのように修正されるか、ヒトの適応性を評価するこの課題は「人間と機械の調和」に関する研究であり、貴財団の目的に合致した内容だったものと思います。結果として、アシスト歩行直後には股関節の動きに短期適応がみられることなどを明らかにいたしました。

他の財団に比べて助成額が大きく、研究環境が変わってから早い段階で高額の研究機器を整えることができたことは、その後の研究発展に大きく関わっており、貴財団には深く感謝しております。また、懇親交流会でオムロンの開発者の方々と様々な意見交換させていただきましたことも貴重な経験でした。若手研究者の支えとなるこのような助成活動をこれからも継続していただきたいと心より願っております。



研究室訪問

東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科 医療福祉工学コース

福田恵子 教授 訪問記
(第21回受領者)

沖縄地方をはじめ全国各地で猛威を奮った台風8号は、日本列島南岸をかすめて予想以上の速度で東海上に抜けました。数日前から研究室訪問の延期も覚悟していた我々の心配をよそに、7月11日は梅雨明けを思わせるような東京の空が我々を気持ちよく迎えてくれました。選考委員の松田晃一様（独立行政法人 情報処理推進機構 顧問）にもご同行いただき、南千住駅近くにある東京都立産業技術高等専門学校・荒川キャンパスの福田恵子教授の研究室を訪ねました。

○ まずは、先生の学科や研究室をご紹介します。

私の研究室は、本科（ものづくり工学科）に8つあるコースの中の「医療福祉工学コース」に所属しています。医療福祉工学は人間の健康と幸福に貢献する工学であり、コースでは医療福祉機器を開発設計、製作するために必要な工学基礎力を有した学生の育成を目指しています。

そのために学生は、3年生までに電気・電子・機械・情報等の工学基礎科目を学習し、4年生以降はそれを土台に医療福祉分野を学習し、工学的観点から生体の機能や特性を理解するとともに、生体情報検出技術や障がい者支援技術などを修得します。研究室への配属は、4年生の週1回のゼミからで、5年生では卒業研究のために毎日のように研究室に詰めます。

研究室のメンバーは進級、卒業とともに毎年変わります。今年は4年生4名、5年生4名です。卒業後に大学の3,4回生に相当する専攻科を設置していますが、私の研究室には今年度は専攻科の学生はいません。また当高専では、准教授も助教も独立して研究室を持っているので、現在の研究室のメンバーは学生8名と私の9名ということになります。

○ 先生は現在どのような研究テーマに取り組んでおられるかお聞かせ下さい。

一言で言いますと、光による脳機能の計測に取り組んでいます。原理的には、脳の活動状態に伴い変化する大脳皮質の酸素化・脱酸素化ヘモグロビン濃度変化を近赤外線（NIRS）で計測します。

脳機能の計測にはほかにもfMRI、脳磁図、脳波計などの方法がありますが、光による計測はこれらに比べて生体への負担が少なく、装置規模が小さいという長所があります。逆に血中の酸素代謝物質を計測するため空間や時間の分解能があまり高くありませんが、それに見合った応用分野では光計測で十分に威力を発揮します。例えば、統合失調症などの精神疾患の診断への応用、学習効果の検証、



福田恵子教授



福田先生のプレゼンを聞く松田選考委員（右）と田中常務理事（中央）

さらに脳反応のフィードバックを利用することにより ALS（筋萎縮性側索硬化）症患者的の意思表示や BMI（ブレインマシンインタフェース）などにも応用できます。

- 当財団が助成した当時の状況と助成課題についてお聞かせ下さい。

私は 10 年ほど前に企業から本校に転職致しました。ある時学校の事務部門から御財団の助成募集の案内がメールで届き、応募したところ採択していただきました。転職後間もなくの助成だったので大変助かりました。

当時から近赤外光による生体計測に取り組んでいましたが、姿勢変化などによる皮膚血流（頭表から深さ 2 mm 程度に流れる表層血流）の変化が外乱となって生体情報に関する血流（頭表から深さ 10～15 mm に流れる組織血流）が正確に計測できないという問題がありました。御財団から助成いただいた課題は、その外乱を排除し、計測精度を向上させる研究でした。

従来は、組織血流を計測するために、照射点から 30 mm 程度離れた受光点だけで血流変化を計測していました。助成していただいた研究課題では、皮膚血流による外乱を排除するために、照射点と同一開口での受光を補正に使用する（補正 1）とともに、照射点と従来の受光点との等距離点での受光も補正に使用する（補正 2）ことにより計測精度を高める方法を提案いたしました。さらには、照射・受光点を正三角形に配置し、その重心を等距離点受光すなわち補正 2 に使うことで、受光点の総数を減らす、つまり効率化することも提案しました。そしてこの 2 つの提案を、生体を模擬したファントムで実験し、有効性を確認しました。



卒業研究課題のプレゼン



実験環境と装置の説明

- その成果はその後どのように発展したのでしょうか？

お陰様でこの実績が認められ、科学研究費補助金の獲得につながり、次のステップに研究を進めることができました。

先に提案した補正手段の実用化のためにデジタル信号処理を検討し、多重パルスとデジタル符号による変復調方式を採用することにしました。そしてファントム実験により、信号の分離と復調ができること、そして補正信号により表層血流の影響が低減できることを確認し、小チャンネル計測への適用に向けて進展しました。

また最近では、脳活動の反応部位の推定に取り組んでいます。従来は、チャンネル間の波形を目視で



実験の様子



福田先生と5年生の皆さん

比較していたのですが、相関係数の時間変化を用いて類似性を評価することにより、短時間で正確な反応部位推定方法の確立を目指しています。具体的には、短期記憶課題に対する脳の反応を新たに購入した16チャンネル測定可能な計測器で計測し、隣接するチャンネル間で相関係数が高くなる傾向が確認できています。評価者による個人差を減らし、評価者の負担を低減する効果が期待できます。

○ これらの成果を今後どのような分野に応用したいとお考えですか？

教育現場に身を置く者としては、やはり教育分野への応用を考えています。学習への集中度は脳の動きに現れるので、理解度や学習効果の検証に活用できます。理解できていない状態では脳全体の活動が散漫な感じ、理解が進展してくると部分的に活発になり、理解してしまうと全体的に活動レベルが低くなります。そういうことをモニタリングし、教育にフィードバックしていきたいと思います。また、東京都でも問題となっている認知症の早期発見にもつなげていきたいと思います。

○ 最後に、当財団への要望などがありましたらお聞かせ下さい。

大学に比べると高専は、研究よりも教育の比率が高く、研究に集中しにくい環境にあります。また研究室のメンバーは、教員を除くと、毎年配属される19歳から20歳の学生のみで、研究内容は代々先輩から後輩に引き継がれて行きます。そのような状況の中、外部からの研究費が獲得できると、一気に研究が進展し、また大きなテーマに取り組みます。是非とも高専の教員への助成を拡大していただきたいと思います。よろしくお願いします。

あとがき

福田先生からは、研究内容を大変丁寧にご説明いただき、着々と研究を進めていらっしゃることに、さらに当財団の助成課題の成果をその後の研究に繋げていただいていることが確認できました。また、授業が終わってから研究室に入ってきた5年生の池田彬さん、岡田裕貴さん、五島溪介さんにはご自身の卒業研究課題を我々に紹介していただき、しっかりとした対応に感激しました。ご本人の意識や努力もさることながら、福田先生の指導が行き届いていることがよく伝わってきました。

短時間ではありましたが、高専という教育中心の現場で遅しく研究活動を進めておられる福田先生と、初々しくも頼もしい学生の皆さんに触れ合うことができ、まさに台風一過の晴れ晴れとした気分になりました。皆様の益々のご活躍、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)

研究室訪問

慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科

桂誠一郎 准教授 訪問記
(第21回受領者)

今年はまだ1件、研究室を訪問させていただきました。一週間前の台風一過でそのまま梅雨明けという期待が外れて、7月18日に蒸し暑い曇り空のもと、当財団選考委員の藤田博之先生（東京大学生産技術研究所教授）とともに慶應義塾大学の新川崎（K2）タウンキャンパスを訪問しました。このキャンパスは、産学官地域連携を目指して2000年に慶應義塾大学と川崎市が協働で開設したそうです。現在17プロジェクトがここで最先端技術の産業化を目指しているとのことで、桂准教授は「超身体プロジェクト」としてその一翼を担われています。

研究室に到着したのが約束の時刻よりもかなり早く、桂先生はまだ研究室にいらっしゃらず、いきなり十数名の学生の皆さんに出迎えていただきました。若いパワーに圧倒されている我々を見て、その中のリーダ格である森光英貴さん（博士課程3年生）が、カメラからの画像に加えて力触覚がリアルタイムに運転手のハンドルやアクセルにフィードバックされる移動ロボット遠隔操作システム（テレリアリティロボット）のデモを手際よく開始していただき、その操作を楽しんでいるところに桂先生登場。



到着早々テレリアリティロボットの操作の感触を楽しむ藤田選考委員（左）と田中常務理事



桂誠一郎准教授

○ まずは、先生の研究室をご紹介下さい。

ご覧のように大所帯です。学生は24名で内訳は、博士課程5名、修士2年生6名、1年生7名、学部4年生6名です。学部及び研究科の本部は日吉の矢上キャンパスにあるので、私も学生も講義や会議は矢上、研究はこのK2タウンキャンパスまで来て行っています。

○ 先生は現在どのような研究テーマに取り組んでおられるかお聞かせ下さい。

「ハーモニアス（調和的）人間支援」ということで、人間と遠隔地にあるものが双方向で力触覚を伝達することにより、人間の活動を支援する研究です。人類の大発明である電話、テレビ、FAXなどは聴覚や視覚という

単方向の感覚を保存し伝達する手段でしたが、力触覚をリアルタイムで双方向に伝達し、また保存することにより、新たな人間と機械の調和の可能性が開拓できると確信しています。

従来のバーチャルリアリティではコンピュータ内のモデルを用いて対象物の応答をシミュレー

ションするのですが、私の研究は「実世界ハプティクス」と言い、遠隔地で実際に発生している力学現象をそのまま伝達します。ハプティクスとはギリシャ語で「触覚学」という意味です。

実世界ハプティクスの基本原理は、マスター（操作側）とスレーブ（動作側）の作用・反作用の法則（力の制御）と2つのモータの同期（位置の制御）という2つの命題を連立させる解を導くことです。ところが力と位置は双対性を有するパラメータであるため、一つのアクチュエータ内でこれら二つを同時に満たすことはできません。

そこで、直交モード座標変換により、力と位置の制御目標を共通の加速度次元に変換することで、ロバスト性（頑健性）を確保した理想制御を達成しました。

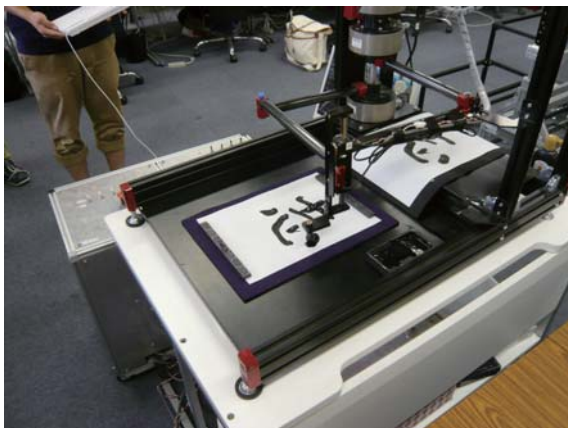
○ 当財団が助成した当時の状況と助成課題についてお聞かせ下さい。

2010年度に「人間支援空間構築のためのテレリアリティロボット技術の開発」という課題で助成していただきました。先ほどご覧いただいた移動ロボット遠隔操作システムの前身です。

助成課題では、開発したテレリアリティロボットで、マスターでの角速度応答とスレーブでの速度応答、そしてマスターでのペダルのトルク応答とスレーブでの車輪が受ける力応答、これら2組が次元の異なる情報間で制御できている（応答値が一致している）ことを確認しました。



藤田選考委員の達筆モーションをコピーして再現



すなわち、視覚情報と触覚情報をリアルタイムで取得することが可能な「テレリアリティ」の基盤技術の開発に成功し、ネットワークを利用して遠隔操作を高臨場感で直観的に実現するための基本技術を確立しました。

○ その成果はその後どのように発展したのでしょうか？

当時の力触覚フィードバックは、マスターとスレーブが同じ構造での実現となっていました。助成課題で得た知見をもとに理論拡張して、その後、先ほどデモでお見せしたように異なる構造での制御にも成功しました。

この技術を、モーションコピーシステムとして熟練者のスキルを保存して再現するというシステムに展開しました。例えば書道家の匠の技や動作の過程を永久保存し、筆のモーションを再現します。今では、書き手が筆を持つとまるで師匠が手を添えていっしょに書いてくれているかのように力覚でガイドできるようになりました。つまり書き手にどれだけ無駄な力が入っているかが伝わり、補正してくれます。

また、日本学術振興会の「頭脳循環を加速する若手研究者海外派遣プログラム」により、博士課程の学生を海外派遣して、人間支援ロ

ボットを日米欧の3極から相互に遠隔操作することにも成功しました。ネットワークによる時間遅れの問題を解決しています。

○ 様々な応用分野への広がり期待できますね。

そうです。例えば力触覚情報の伝達だけでもEラーニング、コンテンツ販売、エンターテインメントへの応用が考えられます。テレリアリティロボットとしては、危険な場所の探索や救助、メディカル分野では触診や遠隔手術、介護やリハビリ支援など、さらには超微細環境でのマニピュレーションへの応用も可能です。

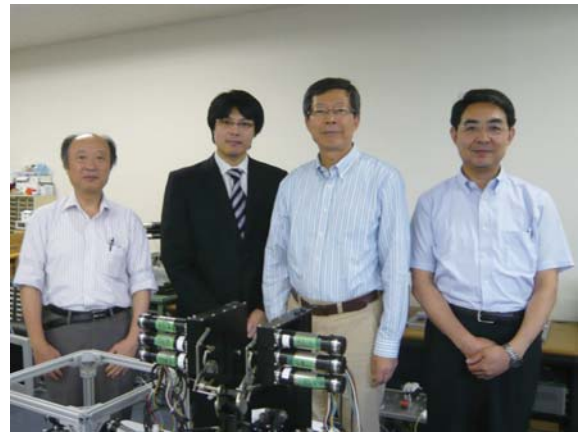
またモーションコピーシステムは、熟練技能の伝承のためのアシストや可視化により様々な分野での応用が可能です。

さらに機械系の双対性制御問題を一般化することにより、電気系や熱系のシステムにも応用が広がります。力触覚と熱の伝達により、例えば握手の力強さや優しさに加え温もりも伝わり、人間味あふれるふれあいが可能になります。

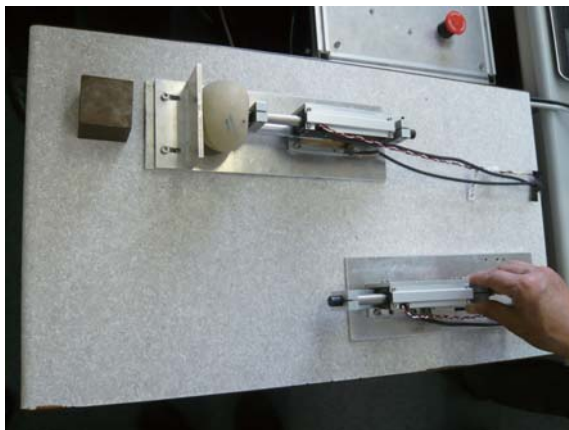
ITは情報伝達、特に視覚、聴覚に関する大量な情報の伝達により人間と機械の調和に大きなインパクトを与えました。そのIT革命の成果をベースに「身体革命」を積み上げて、「超身体」として広く普及させたいと思っています。

○ 大勢の学生を率いて研究を進められていますが、どのような指導方針をお持ちですか？

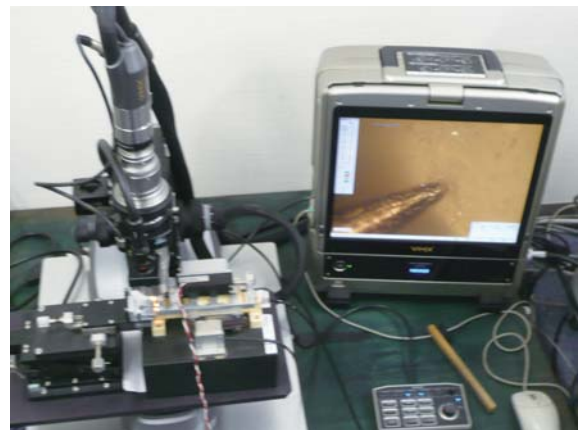
私からはテーマを与えない、本人のやりたいことをやらせるという方針です。学生には、私にも結果の見えないようなテーマをやって欲しいと思っています。もちろんそのために、毎週ミーティングをして、ビジョンや方向性は共有しています。また、博士課程の学生をリーダーとしたグループ制をとっています。



左から田中常務理事、桂准教授、藤田選考委員、麻事務局長



マスター（下）を手で押すとスレーブでボールを押した触覚がマスターにフィードバックされる



顕微鏡で拡大した物体を押した触覚が1000倍の力でフィードバックされる（マイクロマニピュレータ）

○ 最後に、当財団では今年から40歳以下の若手研究者を対象に短期在外研究助成、またこの9月募集からは博士課程（後期）の学生を対象に研究助成(C)を新設していますので、是非先生の研究室でもご活用いただきたくをお願いします。

いいですね。先ほども申しましたように、今後海外との共同作業が増えていきますし、学生には独立心をもって研究を進めて欲しいと思っていますので、そのような助成は大歓迎です。

あとがき

桂先生の研究は、各方面からの注目度が高く、テレビや雑誌への露出も多く、いろいろと面白いお話とデモで楽しませていただきました。多岐にわたる応用の可能性を見据えながらも、技術的な芯をはずさずに取り組んでいらっしゃるがよく分かりました。

藤田選考委員は、桂先生の恩師である大西公平先生（慶應義塾大学理工学部教授）と同級生とのことで、終始なごやかな中にも突っ込んだインタビューになりました。さらに藤田選考委員から、MEMSのピンセットで細胞をつかんだ時の感触を知りたいとのリクエストがあり、共同研究に発展するかもしれません。想定外の展開です。

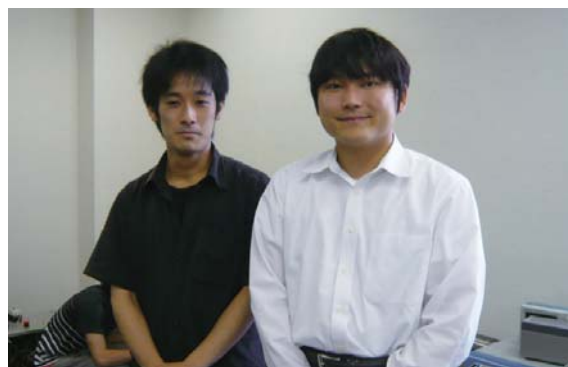
また先述の森光さん、齊藤英一さん（博士課程2年生）をはじめ研究室の皆さんによるデモは、今までに何回も実施されてきたのですが、それにしても非常にテキパキと手際よく実施していただき驚きました。さらに皆さんの前向きでいきいきとした姿勢は、桂先生のご指導の結果でしょう。

梅雨明け間近の半日、大勢の若い研究者と触れることが出来、先週の研究室訪問に続き晴れ晴れとした気持ちになりました。皆様の益々のご活躍、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）



桂先生と研究室の皆さん



齊藤さん（左）と森光さん（右）

2014 年度 助成課題一覧

〔研究助成〕

(五十音順)

氏名・所属機関・職名	申 請 課 題 名
青代 敏行 松江工業高等専門学校 電子制御工学科 講師	温水対応ウェアラブル手指リハビリテーション機器の研究開発
秋田 一平 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科 電気・電子情報工学系 助教	低消費電力 BMI アレイセンサのためのアナログ圧縮技術
有本 泰子 脳理化学研究所 脳科学総合研究センター 客員研究員	言語情報と音響情報の統合的利用による感情音声コーパスの大規模化
五十嵐 洋 東京電機大学 工学部電気電子工学科 准教授	協調作業のチームワーク支援システム
伊東 保志 愛知県心身障害者コロニー発達障害研究所 機能発達学部 主任研究員	筋音図を用いた咀嚼筋の非侵襲的機能評価法の確立
大城 幸雄 筑波大学 医学医療系消化器外科 講師	Patient dependent な力覚体感型手術エミュレータシステムの開発
大須理英子 ㈱国際電気通信基礎技術研究所 脳情報通信総合研究所 主任研究員	ブレインマシンインターフェース技術によるてんかん発作予防訓練システムの開発
河西 理恵 東京工科大学 医療保健学部 理学療法学科 講師	生体情報を用いた運動機能評価システムの開発
木野 久志 東北大学大学院 医工学研究科 特任助教	脳ー機械間高品質信号伝達のための高感度圧力センサ集積脳神経プローブの開発
桑名 健太 東京電機大学 工学部機械工学科 先端機械コース 助教	センサ付腹腔鏡下手術用把持鉗子を用いた粘弾性を考慮した生体組織の硬さ計測法の研究
神崎 素樹 京都大学大学院 人間・環境学研究科 准教授	剛性楕円に基づく冗長多自由度の立位平衡機能評価法の開発
黄 銘 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 特任助教	高精度で長時間計測可能なウェアラブル非侵襲深部体温計の開発
小林 太 神戸大学大学院 システム情報学研究科 システム科学専攻 准教授	人間の動態観測に基づく多指ハンドロボットによる手渡し動作生成
三枝 亮 豊橋技術科学大学 人間・ロボット共生 リサーチセンター 特任准教授	物語記述によるセンサネットワークアプリケーション開発環境の構築
鈴木 郁郎 東北工業大学 工学部 知能エレクトロニクス学科 講師	ヒト iPS 細胞由来ニューロンのエレクトロセンシング技術の開発
相馬 祥吾 大阪大学 医学系研究科 特任研究員	人工視覚システム開発のための基礎研究～失った光を取り戻す～
竹井 邦晴 大阪府立大学 工学研究科 電子・数物系専攻 助教	会話型ヒューマンインターフェースに向けたナノ材料電子機械フレキシブルデバイス

2014 年度 助成課題一覧

〔研究助成〕

(五十音順)

氏名・所属機関・職名	申 請 課 題 名
谷 忠大 立命館大学 情報理工学部 准教授	迅速なマルチモーダルカテゴリ推定のための能動的行動選択法
谷本 潤 九州大学大学院 総合理工学研究院 エネルギー環境共生工学部門 教授	情報共有型カーナビゲーションによる都市内交通渋滞の緩和プロトコル 開発
杜 偉薇 京都工芸繊維大学大学院 工芸科学研究科 情報工学部門 助教	半教師付き学習法による早期前立腺癌画像の分析
永瀬 純也 龍谷大学 理工学部機械システム工学科 助教	運動学習に基づく脳機能再建を目指した手指リハビリデバイスの開発
中楯 龍 九州大学 先端医療イノベーションセンター 助教	腹腔鏡手術用マスタスレーブ型 5 指ハンドロボットの開発と没入感に関 する研究
中山 良平 三重大学 医学部附属病院中央放射線部 助教	超解像技術に基づく冠動脈 MRA (磁気共鳴血管画像) の高解像度化
兵頭 健生 長崎大学大学院 工学研究科 准教授	ダイナミック吸着燃焼挙動を利用した揮発性有機化合物 (VOC) 極微 量検知の実現
福島 誉史 東北大学 未来科学技術共同研究センター 准教授	高集積フレキシブル Si デバイス作製技術の開発
藤岡 宏樹 東京慈恵会医科大学 医学部 助教	匂いの類似性を利用したセンサーによる泌尿器癌検査法、及び測定情報 共有法の開発
山下 和彦 東京医療保健大学 医療保健学部 医療情報学科 教授	靴型足底圧マルチセンシングシステムによるジュニアアスリートの障害 予防の研究
横田 悠右 脳情報通信研究機構 脳情報通信融合研究センター 研究員	ウェアラブルコンピュータとモバイル脳波計を利用した没入型脳情報計 測装置の開発
横山 直幸 沼津工業高等専門学校 制御情報工学科 助教	糖尿病患者の「汗」計測による常時容態管理システムの開発
吉見 靖男 芝浦工業大学 工学部応用化学科 教授	分子インプリント高分子を利用した脳・機械インターフェイスの開発
渡部 裕輝 山形大学大学院 理工学研究科 応用生命システム工学分野 准教授	卵巣内の卵子活動を可視化するリアルタイム光干渉断層計の開発
仰木 裕嗣 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科 准教授	力学解析による義足の調整方法および、セルフリハビリテーション方法 の基盤開発
並木 明夫 千葉大学大学院 工学研究科 准教授	人間と機械の協調制御による遠隔操作ロボットの研究

助成件数：33 件

助成額：8,001 万円

2013 年度後期 国際交流助成課題一覧

〔国際会議発表〕

(五十音順)

氏名・所属機関・職名	派遣先研究集会
武田 隆宏 兵庫県立大学大学院 工学研究科 博士後期課程	2013 IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics
田中 未来 東京工業大学大学院 社会理工学研究科 経営工学専攻 博士課程後期	The 9th International Conference on Optimization: Techniques and Applications
中島 雄太 熊本大学大学院 自然科学研究科 助教	The 17th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (Micro TAS 2013)
森 貴彦 岐阜工業高等専門学校 電子制御工学科 准教授	39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2013)
葭田 貴子 東京工業大学大学院 理工学研究科 准教授	2013 Psychonomic Society Annual Meeting

助成件数：5 件

助成額：139 万円

2014 年度前期 国際交流助成課題一覧

〔国際会議発表〕

氏名・所属機関・職名	派遣先研究集会
夏 鵬 京都工芸繊維大学大学院 工芸科学研究科 設計工学専攻 大学院生 (博士後期)	Digital Holography & 3-D Imaging (DH)
後藤 太一 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科 電気・電子情報工学系 助教	IEEE International Magnetics Conference
杉山 陸 東京理科大学 理工学部 電気電子情報工学科 講師	Materials Research Society 2014 Spring Meetings
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 特定研究補佐員 (客員准教授)	International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society

助成件数：4 件

助成額：127 万円

〔短期在外研究〕

氏名・所属機関・職名	申請課題名
邱 惟 東京工業大学 精密工学研究所 博士後期課程	潤滑剤の機能性を利用した超音波モータの効率・寿命改善 ― 潤滑メカニズムの解明
保原 浩明 (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 研究員	カーボン繊維製スポーツ用義足における生体力学的特性の全容解明
山口 堅三 香川大学 工学部 材料創造工学科 助教	可変プラズモンデバイスプラットホームの構築

助成件数：3 件

助成額：180 万円

2013 年度 国際会議開催助成課題一覧

(五十音順)

氏名・所属機関・職名	派遣先研究集会／役割
板井 陽俊 中部大学 工学部情報工学科 助教	2013 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA2013) 役割：General secretary
今村 一之 前橋工科大学 工学部システム生体工学科 教授	知的メディア技術・脳情報学及び健康情報学国際会議 2013 役割：組織委員長
奥村 元 (独)産業技術総合研究所 先進パワーエレクトロニクス研究センター長	シリコンカーバイド及び関連材料に関する国際会議 2013 (ICSCRM2013) 役割：組織委員長
志賀 智一 電気通信大学 先進理工学科専攻 准教授	第 20 回ディスプレイ国際ワークショップ (IDW '13) 役割：実行副委員長
菅野 重樹 早稲田大学 理工学術院創造理工学部 教授	2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013) 役割：実行委員長
田口 亮 東京都市大学 知識工学部情報科学科 教授	2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS 2013) 役割：組織委員長
長坂 耕作 神戸大学大学院 人間発達環境学研究科 人間環境学専攻 准教授	International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation, 2014 (ISSAC 2014) 役割：General Co-Chair と Local Chair
平山 高嗣 名古屋大学大学院 情報科学研究科 社会システム情報学専攻 助教	15th International Conference on Multimodal Interaction (ICMI) Doctoral Consortium 役割：Doctoral Consortium Chair
藤田 広志 岐阜大学大学院 医学系研究科 再生医科学専攻 知能イメージ情報分野 教授	12th International Workshop on Breast Imaging (IWDM2014) 役割：大会長 (Workshop Chair)
丸山 央峰 名古屋大学大学院 工学研究科 マイクロ・ナノシステム工学専攻 助教	2013 International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science and International Micro Robot Maze Contest 役割：Local arrangement chair 及び Organized Session Chair
山本 透 広島大学大学院 工学研究院 電気電子システム数理部門 教授	5th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (ADCONIP) 役割：国内組織委員長

助成件数：11 件

助成額：550 万円

ヒトiPS細胞由来ニューロンのエレクトロセンシング技術の開発 (研究期間: 1年)

東北工業大学 工学部 知能エレクトロニクス学科
講師・鈴木 郁郎

ヒトiPS細胞由来ニューロンを用いた神経疾患の解明や動物実験を代替する薬剤スクリーニングへの応用が期待されている

『問題点』: 培養したヒトiPS由来ニューロンの機能評価系が確立されていない
『求められている技術』: 情報伝達できるシナプス機能を非侵襲、長期間、リアルタイム、定量計測のできる技術

本申請 神経伝達物質 (プレシナプス) とシナプス後電位 (ポストシナプス) のエレクトロセンシング技術の開発

電極チップ ヒトiPS由来ニューロン 電極チップ	カーボンナノチューブ微小格子電極チップ カーボンナノチューブ微小格子電極チップ	人工脳スライスモデルの3次元構築技術 人工脳スライスモデルの3次元構築技術
--	--	---

集合シナプス後電位計測

集合シナプス後電位計測

ヒトiPSニューロンを用いて神経伝達物質/シナプス後電位を非侵襲、長期間、リアルタイム、定量計測のできる世界初技術の開発 ⇒ 神経疾患の解明や創薬スクリーニング技術へ応用

超解像技術に基づく冠動脈MRA（磁気共鳴血管画像）の高解像度化（2年間）

三重大学医学部附属病院 中央放射線部
助教 中山良平

冠動脈MRAに最適な超解像技術を開発し、画像診断における有用性を実証

【冠動脈MRA】
利点）放射線被曝や造影剤を
をを行わずに冠動脈を非侵襲
的に描出可能
欠点）解像度不足から冠動脈
末梢部の描出が不鮮明

【研究目的と方法】
冠動脈 ⇒ 太さの変化
Filter bank ⇒ 大ききの変化
冠動脈MRAに適した
超解像技術の開発

画像診断の正確度の向上。
診断時間の短縮
⇒冠動脈MRA検査への期待

MR画像
CT画像
超音波画像
アンギオ画像

空分解能（時間分解能）を
大幅に向上した高解像度画像

・ 診断精度の改善
・ 診断の再現性の向上
・ 読影時間の短縮

次世代型高解像度画像生成装置

卵巣内の卵子活動を可視化するリアルタイム光干渉断層計の開発(研究期間:1年)

山形大学 大学院理工学研究所 応用生命システム工学分野
准教授 渡部裕裕

【卵巣の解析】
従来：超音波画像診断(空間分解能:100μm)⇒初期発達段階の卵胞の観察は不可能
全ての高発達段階の観察⇒組織学的に連続切片を観察する以外に方法は無し
本研究：完全発光光干渉断層計(空間分解能:5μm)⇒全ての卵胞の観察が可能
さらに卵子活動の可視化⇒生命の機能情報

・光干渉断層画像化法(OCT)
・GPUによる超高速画像処理

↓

卵巣機能の実時間イメージング

【2次元計測】
断層構造・機能情報の実時間観測
最小検出サイズ:10ミクロン
【3次元計測】
卵胞の大きさ、数、位置の抽出

⇒ 獣医・畜産・医療への展開

2014 年度研究助成課題の紹介

カ学解析による義足の調整方法および、
セルフリハビリテーション方法の基盤開発 (研究期間:2年)
慶應義塾大学政策・メディア研究科
准教授・仰木裕嗣

現状の義足評価とリハビリテーション

- 本人による快適な適合性を目指して
 - 理学療法士・義肢装具士の目視による評価
 - 本人申告にもとづく関節負荷の主観評価
 - 病院・クリニックでの単発的アセスメント

将来の義足評価とセルフリハビリテーション

- ナチュラルスイングを目指し
 - 関節間力、関節トルク等の定量負荷によるアラート装置
 - 無線によるセンシング技術による、セルフモニタリング

カ学モデル+センシング技術=エビデンスベースド・セルフ・リハビリテーション

32

遠隔操作ロボットにおける高速ハンドリング (研究期間:2年)
千葉大学大学院工学研究科
准教授・並木 明夫

遠隔操作システム 超高速ビジョン

① 遠隔操作システムによる
遠隔操作による
遠隔操作による
遠隔操作による

② 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

③ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

④ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

⑤ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

⑥ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

⑦ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

⑧ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

⑨ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

⑩ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

⑪ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

⑫ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

⑬ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

⑭ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

⑮ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

⑯ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

⑰ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

⑱ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

⑲ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

⑳ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㉑ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㉒ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㉓ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㉔ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㉕ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㉖ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㉗ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㉘ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㉙ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㉚ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㉛ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㉜ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㉝ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㉞ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㉟ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㊱ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㊲ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㊳ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㊴ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㊵ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㊶ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㊷ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㊸ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㊹ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㊺ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㊻ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㊼ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㊽ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㊾ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

㊿ 超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる
超高速ビジョンによる

人の危険作業を代わりに行う高性能遠隔操作ロボットの開発

マスタ・スレーブ遠隔制御技術にスレーブ側の高速センシング機能を統合

- 1kHz高速ビジョン
- 視覚テレレイグジスタンス

器用さと
高速性の両立

33

公益財団法人 立石科学技術振興財団

2015 年度 研究助成 (A) (B) (C) 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 2015 年度の研究助成 (A) (B) (C) の候補募集を行なうこととお知らせいたします。2015 年度から若手研究者（博士課程後期の学生）向けの研究助成 (C) を新設します。（詳細についてはホームページの募集要項 (A, B) または募集要項 (C) をご覧下さい）

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 (A)	1 件 250 万円以下	20 件程度	研究期間 2015 年 4 月 1 日～原則 1 年
研究助成 (B)	1 件 500 万円以下	2 件程度	研究期間 2015 年 4 月 1 日～原則 2 年
研究助成 (C)	1 件 50 万円/年 (1 年, 2 年または 3 年)	10 件程度	研究期間 2015 年 4 月 1 日～1 年, 2 年または 3 年 ただし博士課程後期（または相当）への在学期間限定

(3) 応募資格

- ① 研究助成 (A) と (B) には日本国内に居住する研究者であれば応募できます。
- ② 研究助成 (C) には日本国内に居住する博士課程後期（または相当）の学生のみ応募できます。
- ③ 研究助成 (A) (B) (C) とも、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場合は、ご遠慮下さい。

(4) 募集期間と助成金交付

募 集 期 間：2014 年 9 月 1 日～2014 年 10 月 31 日（郵便局消印有効）
助成金交付時期：2015 年 5 月の予定
助成金受取方法：奨学寄附金（委任経理金）での受取りを原則とします

(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：info@tateisi-f.org

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下さい。
URL：http://www.tateisi-f.org/

公益財団法人 立石科学技術振興財団

2015 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 2015 年度前期国際交流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	} 2015 年度 前期助成件数
	短期在外研究	1 件 70 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：2014 年 10 月 1 日～2014 年 12 月 20 日（郵便局消印有効）
助成対象期間：2015 年 4 月 1 日～2015 年 9 月 30 日（日本出発日）

（５）助成金の交付

交付時期：2015 年 4 月の予定
交付方法：奨学寄附金（委任経理金）での交付を原則とします

（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：info@tateisi-f.org

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

2015 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 2015 年度後期国際交流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	} 2015 年度 後期助成件数
	短期在外研究	1 件 70 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

募 集 期 間：2015 年 4 月 1 日～2015 年 6 月 30 日（郵便局消印有効）

助成対象期間：2015 年 10 月 1 日～2016 年 3 月 31 日（日本出発日）

（５）助成金の交付

交付時期：2015 年 10 月の予定

交付方法：奨学寄附金（委任経理金）での交付を原則とします

（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：info@tateisi-f.org

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

2015 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 2015 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るものです。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) 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 100 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：2015 年 4 月 1 日～2015 年 6 月 30 日(郵便局消印有効)
助成対象期間：2015 年 10 月 1 日～2016 年 9 月 30 日

(5) 助成金の交付

交付時期：2015 年 10 月の予定
交付方法：奨学寄附金(委任経理金)または、会議主催者への寄附金での交付を原則とします

(6) 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、助成交付時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。)

(7) 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：info@tateisi-f.org

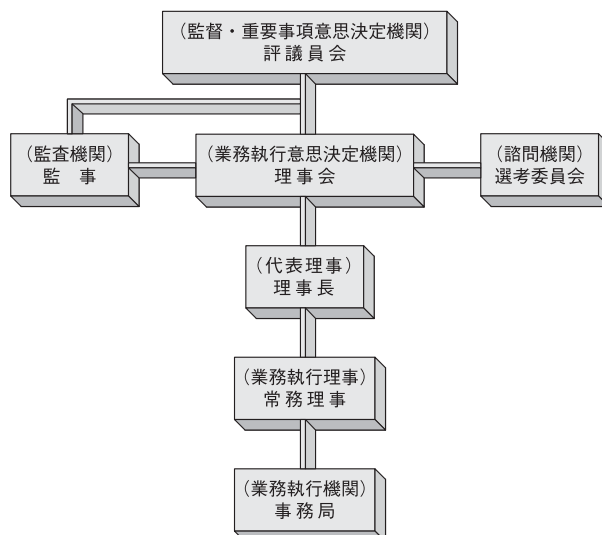
募集要項、申請書類に関しては当財団ホームページをご覧ください。
URL：<http://www.tateisi-f.org/>

■ 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) 365-4771 FAX. (075) 365-3697
<http://www.tateisi-f.org/>
E-mail: info@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。
 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
 - 研究助成(C) 50 万円/年, 10 件程度
(博士課程後期 最大 3 年間)
 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 70 万円以下/件
 - 国際会議開催 100 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



評議員・役員・選考委員

評 議 員

(2014 年 6 月現在)

評 議 員	朝 倉 利 光	北海道大学 名誉教授 北海学園大学 名誉教授
評 議 員	荒 木 光 彦	京都大学 名誉教授 松江工業高等専門学校 名誉教授
評 議 員	岩 田 一 明	大阪大学 名誉教授 神戸大学 名誉教授
評 議 員	川 路 茂 保	(株)システムインテグレーション研究所 代表取締役 熊本大学 名誉教授
評 議 員	立 石 峯 子	(公財)楽美術館 理事
評 議 員	葉 原 耕 平	(株)国際電気通信基礎技術研究所 顧問
評 議 員	柳 田 敏 雄	大阪大学大学院 生命機能研究科 特任教授 (独)情報通信研究機構 脳情報通信融合研究センター長 (独)理化学研究所 生命システム研究センター長
評 議 員	山 下 牧	(株)オプトクエスト顧問

役 員

(2014 年 6 月現在)

理事長	立石義雄	オムロン(株) 名誉会長
常務理事	田中敏文	オムロン(株) 経営基幹職
理事	荒巻禎一	弁護士（烏丸法律事務所） 京都府公立大学法人 理事長 元京都府知事
理事	石田隆一	(株)イシダ 名誉会長
理事	今仲行一	技術研究組合 NMEMS 技術研究機構理事長 (一財)マイクロマシンセンター MNOIC 所長
理事	沖村憲樹	(独)科学技術振興機構 特別顧問 (公財)全日本地域研究交流協会 理事長 元科学技術庁 科学技術審議官
理事	熊谷信昭	(株)国際電気通信基礎技術研究所 取締役会長 大阪大学 元総長・名誉教授 兵庫県立大学 名誉学長
理事	棚橋祐治	石油資源開発(株) 代表取締役会長 弁護士（シティユーワ法律事務所） 元通商産業省 事務次官
監事	愛知菜穂子	弁護士（イリス法律事務所）
監事	尾尻哲洋	税理士

(50 音順)

選考委員

(2014 年 4 月現在)

選考委員長	阿 草 清 滋	京都大学 情報環境機構 客員教授 南山大学 理工学部 ソフトウェア工学科 教授
選 考 委 員	荒 尾 眞 樹	オムロン(株) 執行役員常務 技術本部長
選 考 委 員	臼 井 支 朗	豊橋技術科学大学 エレクトロニクス先端融合研究所 特任教授
選 考 委 員	里 中 忍	熊本県立技術短期大学 校長 熊本大学 名誉教授
選 考 委 員	樫 木 哲 夫	京都大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻 教授
選 考 委 員	難 波 啓 一	大阪大学大学院 生命機能研究科 教授
選 考 委 員	畑 豊	兵庫県立大学大学院 シミュレーション学研究科長 教授
選 考 委 員	藤 田 博 之	東京大学 生産技術研究所 教授
選 考 委 員	松 田 晃 一	(独)情報処理推進機構 ソフトウェア高信頼化センター 顧問

(50 音順)

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のほか、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 23 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、2013 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 2013 年度後期から 2014 年度前期に助成いたしました成果報告の抄録を収録し、国際会議開催助成は 2013 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荒木評議員、投稿文をお寄せいただきました福岡大学工学部教授 野田 賢様、同志社大学スポーツ健康科学部 准教授 上林 清孝様、事務局取材に快く応じていただきました東京都立産業技術高等専門学校医療福祉工学コース 教授 福田 恵子様、慶應義塾大学理工学部 准教授 桂 誠一郎様をはじめ、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、2015 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もご覧いただければと思います。

今回、募集を開始する研究助成(C)は、博士課程後期（相当）の若手研究者の皆様に役立ていただきたいとの思いから新設させていただきました。他の募集と共に多くの皆様に活用いただければ幸いです。

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 23 号
2014 年 9 月

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: info@tateisi-f.org
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下さい。)

※ 記載の内容につきましては、ご本人に電話などで直接確認させて頂く場合があります。

※ 過去、当財団の助成を受けられた方（助成金受領者）は、当財団のホームページからも変更連絡が可能です。

変更前	お 名 前		職 名	
	所属機関			
	送 付 先			

1:□ 以下の通り追加・変更してください。(作成日 年 月 日)

① お 名 前	
② 研究者番号	
③ 所 属 機 関	(部門・研究科・学科まで記入をお願いします)
④ 職 名	
⑤ 送 付 先	☐ ：所属機関宛 / ☐ ：ご自宅宛 〒 -
⑥ 電 話 番 号	()
⑦ E-mail	@
⑧ URL	http: //

※ E-mail でお送りいただく場合も上記の各項目をお知らせください。

2: □ 以後, 成果集を送付しないでください。

ご記入者の所属・お名前 ()

※これまでの助成金受領者ご本人以外のおきも記入をお願いします。

以上

