

立石科学技術振興財団

# 助成研究成果集

【第20号】

平成23年(2011)



# 人間と機械の調和を促進する助成研究成果集

第 20 号

平成 23 年 9 月 (2011)

公益財団法人 立石科学技術振興財団

Tateisi Science and Technology Foundation

## 設 立 趣 意 書

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

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

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

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

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

---

---

# 助成研究成果集

---

---

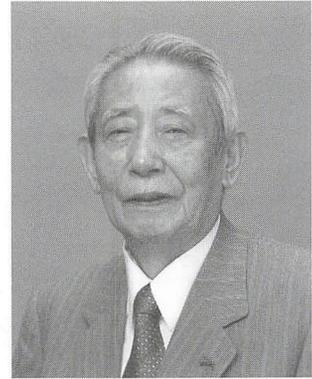
## 目次

1. 理事長挨拶	2
2. 財団関係者寄稿	
(株)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 川路茂保 (評議員)	3
3. 研究助成成果の抄録一覧	5
4. 国際交流報告の抄録一覧 (平成 22 年度)	121
5. 平成 22 年度活動報告 (業務日程・会計)	132
6. 平成 23 年度助成報告	133
7. 受領者投稿	134
山口大学大学院 技術経営研究科 准教授 石野洋子	134
東京大学大学院 工学系研究科 教授 廣瀬 明	135
8. 研究室訪問	136
金沢大学 理工研究域 機械工学系 准教授 渡辺哲陽	136
9. 第 22 回 (平成 23 年度) 助成課題一覧	138
10. 平成 23 年度研究助成課題の紹介	142
11. 平成 24 年度助成候補募集案内	145
12. 財団の概要	151
13. 評議員・役員	152
編集後記	153

## ごあいさつ

まずは、東日本大地震により被災された皆様に、心よりお見舞い申し上げます。また、皆様の安全と一日も早い復旧を心よりお祈りします。

当財団では、毎年5月に開催している研究助成金贈呈式を、今年は中止させていただきました。これは、震災の影響もありますが、被災地域を拠点とされている研究者を含む助成金受領者の皆様に研究に集中していただき、科学技術で強い日本を早期に復活させていただきたいという願いからです。



さて、助成研究成果集第20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）の創業者でありました、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設立しました。そして本年は第22回目の助成金の交付をとり行うことができました。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、助成研究の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・研究機関と共有することを目的とすると共に、研究者の相互交流の一助となることを願って、毎年継続的に実施しております。

第20号の発行にあたり、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。

21世紀の今日、情報化と科学技術の進歩がさらに加速し発展する中で、忘れてならないのは人間が主人公の社会の回復、すなわち人間と科学技術の高いレベルでの調和だと考えております。この人間重視の視点に立った豊かで健全な最適化社会の創造に向けて、私ども財団の助成活動がいささかでも寄与できればと願っております。

今後も引き続き、より一層のご支援ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。

理事長 立石 信雄

## 人間と機械の調和が新地平を拓く

東日本大震災は、身近な人々を失い、平穏な日常生活が破壊され、故郷が瓦礫と化してしまった状況から、先の太平洋戦争敗戦と重ね合せている。さらに原発事故も相俟って、そのような悲惨さから立ち上がって戦後復興を成し遂げた日本の力と逞しさが、震災復興への期待感を抱かせている。今回、人類が蓄積してきた科学や知恵が、自然の力の前にいかに微力であるかを思い知らされ、科学技術者は自然に対してあくまで謙虚であるべきことを再認識させられた。重大事故の発生ごとに「想定外」と言い訳や弁解をしないように、真の安全・安心を実現すべく常に事前の分析・指摘をしてこそ科学技術者の役割が果たせる。



太平洋戦争は人間と社会システムとの軋轢に起因するのに対して、今回の大震災は人間と自然環境との軋轢に起因する、と対比するならば、本財団の設立目的にある「人間と機械の調和」は極めて重要な意義を内包する。これまでの本財団が助成してきた研究課題を眺めてみても、初期の頃は機能性の高い機械の実現に関するものが多々見られたが、最近では人間そのものの機能を明らかにし、それに機械（現代ではシステムと拡張すべきであろう）を如何に設計し実現するかに焦点が移ってきており、益々の展開が期待される。しかし、以下の二つの課題も悩まされる。

まず、単に人間と機械との狭い調和（この場合は協調）に限定されるのではなく、人間と機械を包含する社会や自然環境の中での調和を実現する必要があると拡張してみよう。このとき、機械を実現する科学技術と人間社会とが果たして同じ領域であろうか？同じならば両者の調和の実現に致命的な困難性はないであろう。これに対し、システム科学者の市川惇信先生（東京工大名誉教授）は、“科学技術の知は無矛盾 $\Leftrightarrow$ 矛盾，過程論 $\Leftrightarrow$ 目的論，経験知 $\Leftrightarrow$ 先験知の3次元空間において、（無矛盾，過程論，経験知）の第1象限に限定される知であるのに対して，人間と社会を記述し理解しようとする人文社会学の知は全象限に展開される”と分析されている。すると，第1象限で展開される人間と機械の調和に関わる科学技術の知は残り7象限の人文社会学の知を積極的に補完せねばならない。ここにこの課題の難しさが存在する。

次に、人類が直面する環境福祉などの複雑化するシステムの諸問題を解決するため、人工物・人間・社会に関わるシステムの俯瞰的インテグレーションを可能とする科学技術が必要であるが、人間と機械の調和は根幹的課題である。

このような課題に深い洞察でもって臨むには、今回の大震災・原発事故がいかに悲惨な現実でもそれを直視しなければ、この先の道はない。若い研究者諸君に、質実剛健にして垂直登攀に挑戦することを期待したい。

熊本大学 名誉教授  
株式会社システムインテグレーション研究所 川 路 茂 保 (評議員)  
代表取締役社長

# 研究助成成果の抄録一覧

(年度順五十音順)

- ◆ 脳 X 線 CT 画像の標準化による救急医療のための  
脳画像解析システムに関する研究 (1081023) ..... 8  
Automated image analysis for brain X-ray CT scan images for emergency medical care  
原 武 史 岐阜大学大学院 医学系研究科 知能イメージ情報分野 准教授
  
- ◆ 柔軟性と周波数応答性を両立した皮膚感覚ディスプレイによる「生物感」の提示 (1091007) ..... 14  
A haptic device to present a feeling of living matter  
梶 本 裕 之 電気通信大学 電気通信学部 准教授
  
- ◆ 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 (1091008) ..... 18  
After-effect of robotic assistance on walking pattern during normal walking  
上 林 清 孝 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 助教
  
- ◆ ダイラタンシを利用した汎用的触覚ディスプレイの研究 (1091009) ..... 22  
Dilatant-fluid-based universal tactile display  
嵯 峨 智 東北大学大学院 情報科学研究科 助教
  
- ◆ マイクロ・プロセス・トモグラフィーによる高濃度多次元バイオチップの開発 (1091014) ..... 27  
High concentration multi dimensions bio chip by micro process tomography  
武 居 昌 宏 千葉大学大学院 工学研究科 教授
  
- ◆ 遠隔監視ロボットのための対話的な監視画像データベースの開発 (1091015) ..... 31  
Interactive Visual Image Database for Remote Surveillance Robots  
田 中 完 爾 福井大学大学院 工学研究科 知能システム工学専攻 准教授
  
- ◆ 人間支援機器の高能率化のための触覚信号処理 (1091016) ..... 35  
Haptic Signal Processing for Streamlined Operation of Human Support Robot  
辻 俊 明 埼玉大学大学院 理工学研究科 助教
  
- ◆ 海馬 - 前頭前野神経活動を基に駆動する脳 - 機械  
インターフェースの基礎的検討 (1091020) ..... 39  
Analysis between the hippocampal and prefrontal neuronal activities for the brain-machine interface  
藤 原 清 悦 聖マリアンナ医科大学 生理学(統合生理) 講師
  
- ◆ 圧電薄膜を用いた非侵襲的生体計測 MEMS センサの開発 (1091023) ..... 43  
Non-invasive bio MEMS sensor consisting of piezoelectric films  
柳 谷 隆 彦 名古屋工業大学 機械工学科 助教

- ◆ 視覚的に観察される自己身体部位に対して自分が動作行為主体だと  
 感じられる脳の要件 (1091024) ..... 47  
 Spatial limit of tge visual capture of the felt hand position in a mirror  
 葎 田 貴 子 東京大学 情報学環 特任研究員
- ◆ 生体信号を利用した体性感覚の客観評価システムの開発 (2001001) ..... 51  
 Development of an Objective Evaluation System of Somatic Sensations Using Biomedical Signals  
 秋 山 庸 子 大阪大学大学院 工学研究科 助教
- ◆ 金属・液体ハイブリッド型 MEMS 配線 (2001002) ..... 56  
 MEMS conducting wire using combination of metal and liquid  
 岩 瀬 英 治 東京大学大学院 情報理工学系研究科 助教
- ◆ 人間支援空間構築のためのテレリアリティーロボット技術の開発 (2001003) ..... 60  
 Development of Tele-Reality Robot Technology for Construction of Human Support Space  
 桂 誠一郎 慶應義塾大学 理工学部 准教授
- ◆ 眼表情からの意図推定を伴う弱視者向けウェアラブル視覚支援システムの開発 (2001004) ..... 64  
 Development of Wearable Visual Support System fow Low-vision People via Estimation of  
 Difficulty in Viewing Based on Expression around Eyes  
 河 野 英 昭 九州工業大学大学院 工学研究院 助教
- ◆ 乳がんに対する RFA 治療支援システムの開発 (2001006) ..... 68  
 Development of RFA assisted System for Breast Tumor  
 小 林 洋 早稲田大学 理工学術院 次席研究員
- ◆ 超音波による外部モニタリングおよび制御可能な  
 局所的薬剤投与用カプセルの開発 (2001007) ..... 71  
 Ultrasonically traceable and controllable microcapsule for local drug administration  
 小 山 大 介 東京工業大学 精密工学研究所 准教授
- ◆ テーラーメイド医療を実現する染色体ファイバ FISH 解析のための  
 マイクロチップの開発 (2001008) ..... 75  
 Development of a High-Throughput Fiber-FISH Microchip for Tailor-Made Medicine  
 鈴 木 孝 明 香川大学 工学部 知能機械システム工学科 准教授
- ◆ 人間と機械のリズムの調和に関する基礎研究 (2001009) ..... 80  
 A basic research on harmonious interaction between man and machine  
 竹 市 博 臣 独立行政法人理化学研究所 研究員

- ◆ 物体検出のための周波数スペクトルマーカに関する研究と開発 (2001010) ..... 84  
 Development of Frequency Spectrum Marker for Object Detection  
 豊 浦 正 広 山梨大学大学院 医学工学総合研究部 助教
  
- ◆ 高密度情報誘導手術環境を支援する手術工程解析法の開発 (2001011) ..... 88  
 Surgical process analysis for supporting complex information-guided surgery environment  
 中 村 亮 一 千葉大学大学院 工学研究科 特任准教授
  
- ◆ 検診を対象とした眼底病変の自動検出システムの開発 (2001012) ..... 94  
 Development of automated detection system for retinal lesions on mass screening  
 畑 中 裕 司 滋賀県立大学 工学部 電子システム工学科 准教授
  
- ◆ 最適設計 LED 照明による血行の明瞭化と定量化 (2001013) ..... 98  
 Clarification of the Blood Circulation by Optimally Designed LED Illuminant  
 羽 石 秀 昭 千葉大学 フロンティアメディカル工学研究開発センター 教授
  
- ◆ ブレイン・マシン・インタフェースの制御パフォーマンスに基づく  
 神経接続技術の性能評価 (2001014) ..... 103  
 Evaluation of neural implants by the performance of a Brain-Machine Interface device  
 深 山 理 東京大学大学院 情報理工学系研究科 助教
  
- ◆ 人に優しいロボットののための触覚センシングデバイス (2001017) ..... 107  
 Tactile Sensing Devices for Human Friendly Robots  
 山 下 馨 京都工芸繊維大学 大学院工芸科学研究科 准教授
  
- ◆ 慣性運動誘発度に基づく大體義足の慣性適合性評価 (2001018) ..... 111  
 Evaluation Method of Inertia Property of Trans-femoral Prosthesis based on  
 Degree of Inertia-induced Motion  
 和 田 隆 広 香川大学 工学部 准教授
  
- ◆ ハイブリッドシステム論が拓く人間機械学の新展開 (1091901) ..... 116  
 Innovation of Human-machine System based on Hybrid System Approach  
 鈴 木 達 也 名古屋大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻 教授

## 脳 X 線 CT 画像の標準化による救急医療のための 脳画像解析システムに関する研究

Automated image analysis for brain X-ray CT scan images for emergency medical care

1081023

研究代表者	岐阜大学大学院 医学系研究科 知能イメージ情報分野	准教授	原 武 史
共同研究者	泉州救命救急センター 放射線科		坂 下 恵 治
共同研究者	岐阜大学大学院 医学系研究科		周 向 栄
共同研究者	岐阜大学大学院 医学系研究科		藤 田 廣 志
共同研究者	岐阜大学大学院 医学系研究科		大 島 一 輝

### [研究の目的]

わが国における脳卒中は、死因の第3位、介護性疾患の首位を占めている。従来、脳卒中の中では脳出血の比率が高いとされていたが、近年、脳梗塞の占める割合が増加している。多くの医療機関で急性期脳卒中に対する画像診断はCT検査が第一選択とされる。しかし、急性期脳梗塞の画像所見はレンズ核陰影の不明瞭化、島皮質の不明瞭化、皮髄境界の不明瞭化、脳溝の消失として現れるが、CT画像上非常に淡く、医師の読影経験と知識が検出に影響するといわれる。これらは early CT sign (以下 ECS) と呼ばれ、判定者間一致度は 0.14~0.78、感度は 20~87%、特異度は 56~100% である。

急性期脳梗塞に有効な治療法として、t-PA (tissue plasminogen activator) 静注療法が挙げられる。この治療法は症状改善をもたらす一方、治療開始時間の遅れが治療の有効性を低くすることに加え、脳内出血などの重篤な合併症を招く可能性がある。このため、発症後3時間以内に脳出血と広範囲の ECS を否定することが治療施行の判断基準である [3]。MRI の新鮮梗塞巣の検出能は優れているが、頭部単純

CTによって脳出血と広範囲な ECS の否定が、現時点で最も確立した t-PA 静注療法の画像判定基準である。

このような状況の中、専門分野の医師が不在の場合や、読影経験の浅い医師であっても、短時間で正確に t-PA 静注療法適応の判断基準となる CT 画像読影を行えるように支援することを目的とした救急医療におけるコンピュータ支援診断 (CAD: Computer-Aided Diagnosis) システムの開発が期待されている。

これまで脳 CT 画像における急性期脳梗塞陰影の検出アルゴリズムに関する研究は、高橋らが ECS の半定量的指標である ASPECTS に基づいた領域を SPM2 を用いて標準化し、正常部と異常部を判別する手法を報告している。また、長島らは、コントララテラル差分技術により得られた画像から特徴量を利用して最終的に急性期脳梗塞を決定する手法を報告している。Maldjian らは判別指標として左右脳実質領域のヒストグラムを用いる手法を報告している。

本研究では多数の正常脳を用いて各座標において CT 値の平均値と標準偏差が保存される正常脳モデルを構築し、それを用いて ECS

領域の CT 値を Z-score に変換した。その後作成された Z-score 画像から測定値を算出し、正常症例と ECS の存在する脳梗塞症例の測定値が有意に異なるか否かを検討した。これにより ECS の検出が急性期脳梗塞診断のための CT 画像読影に有用であるか否かを検討する。

## [研究の内容と成果]

### 1. データベース

試料画像は、非造影頭部 X 線 CT 画像である。救急頭部 X 線 CT 画像は主に頭頂部から眼球、または耳までを撮影した CT 画像である。本手法に用いた CT 画像の撮影条件は、医師が現場で診断に使用する CT 画像の撮影条件と同じである。

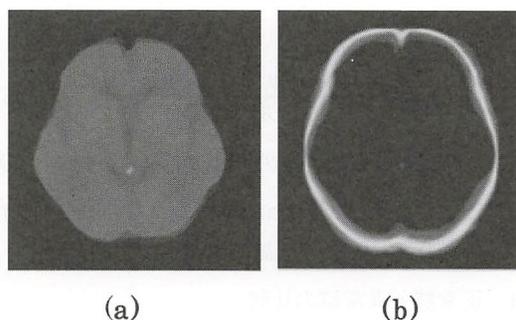
#### 1.1 脳領域の変形法

本手法では正常脳モデルを構築する際や、また構築した正常脳モデルを用いて対象症例の CT 値を Z-score に変換する際、原画像から脳領域を抽出し変形する必要がある。脳領域変形の手順は正中線の推定、回転処理、脳領域抽出、正規化、からなる。概要を Fig. 1 に示す。原画像 (Fig. 1(a)) から閾値処理を利用して骨領域を抽出した後に、骨領域から内側の輪郭線の傾き変化点を見つける。これにより前頭稜と内後頭隆起を抽出し、その 2 点を結び正中線を推定する。次に推定された正中線の回転処理により傾きを調整する。この結果、傾きが補正された

骨領域を得る (Fig. 1(b))。次に、補正後の骨領域の内部を抽出し脳領域を得る (Fig. 1(c))。頭部の大きさには個人差があるため、抽出された脳領域を  $350 \times 400$  画素の領域に正規化する (Fig. 1(d))。

#### 1.2 正常脳モデル構築法

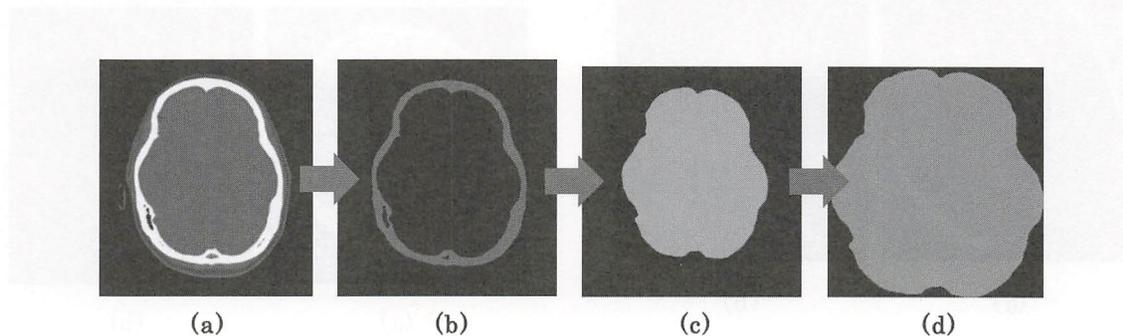
対象症例の各座標における Z-score を計算するためには、各座標での CT 値の平均値と標準偏差が必要である。そこで、前述した方法で正規化した正常症例を複数容易し、それらを重ね合わせ、各座標での CT 値の平均値と標準偏差を求める。こうして求めた平均値を画素値として持つ画像を平均値モデル画像、標準偏差を画素値として持つ画像を標準偏差モデル画像と呼ぶ。本研究ではこれらを正常脳モデルとする。今回は正常症例 60 例を用いて正常脳モデルを作成した。作成されたモデル画像を Fig. 2 に示す。



各座標に正規化した正常症例 60 症例の CT 値の平均値と標準偏差がそれぞれ保存される

(a) 平均値モデル画像 (b) 標準偏差モデル画像

Fig. 2 正常脳モデルの例



(a) 原画像。(b) 原画像から閾値処理により骨領域を抽出し、正中線を推定、傾きを補正する。

(c) 補正された原画像から閾値処理により脳領域を抽出する。(d) 抽出された脳領域を  $350 \times 400$  画素の領域に正規化する。

Fig. 1 脳領域の正規化手法

### 1.3 Z-score の計算

正常脳モデル構築に用いた脳領域変形手法によって対象症例の正規化画像を作成する。次に平均値と分散の脳モデルを使って対象症例の各座標での Z-score を計算する。この際に各画像における各座標の濃度値を  $P_{num}(x, y, z)$ 、各座標の平均値 (Mean) を  $M(x, y, z)$ 、標準偏差 (Standard Deviation) を  $SD(x, y, z)$  としたとき、以下の式によって各座標の平均値と標準偏差を表す。ここでの num はモデルを作成する際に使用した正常症例の症例数である。

$$M(x, y, z) = \left( \frac{\sum_{num} (P_{num}(x, y, z))^2}{num} \right) \quad (1)$$

$$SD(x, y, z) =$$

$$\sqrt{\left( \frac{\sum_{num} (P_{num}(x, y, z))^2}{num} - (M(x, y, z))^2 \right)} \quad (2)$$

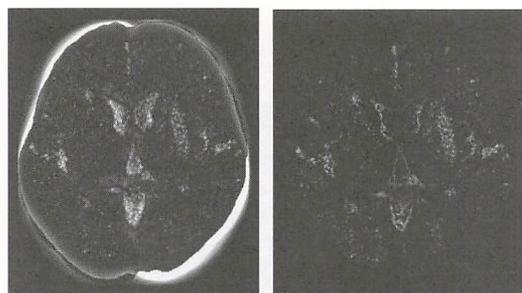
各測定値の CT 値: Value(x, y, z) は式 (3) によって z 得点 (Z-score) に変換される。これにより Z-score の絶対値が高い領域は統計的に異常である程度を定量的に示すことができる。

$$Z\text{-score} = \frac{\text{Value}(x, y, z) - M(x, y, z)}{SD(x, y, z)} \quad (3)$$

この処理を対象画像の頭蓋内領域に対して適用した。その結果 Z-score を持った画像が作成でき、それを Z-score 画像とする (Fig. 3(a))。

### 1.4 正常群と異常群の比較

ECS あり脳梗塞症例と正常症例を比較する



(a)

(b)

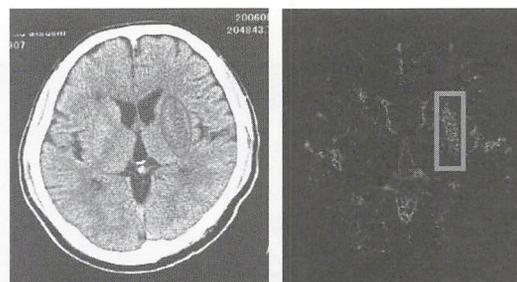
(a) Z-score を画素値として持つ Z-score 画像  
(b) Z-score が 0 よりも高い画素を削除した画像

Fig. 3 正規化された脳領域を作成した平均値モデル画像と標準偏差モデル画像を用いて標準化する

ため、作成された Z-score 画像から測定値を求める。そのために、解析領域を決定する。まず、標準偏差を利用した閾値処理によって Z-score 画像の辺縁部削除を行う。次に正規化した画像から閾値で脳溝を抽出し、その位置情報で Z-score 画像の脳溝部位を削除した。これは正規化した画像と Z-score 画像では画素の位置情報が変わらないことを利用している。なお、いずれも閾値については経験的に決定した。このように作成された画像を結果画像とする。その例を Fig. 3(b) に示す。

ECS が存在する脳梗塞症例においては、放射線技師によるスケッチを参考に、搬入直後 CT の結果画像から解析領域を目視で決定した。次に左上と右下の点を手動で設定しそれらの領域がすべて収まる矩形を定め、これを解析領域とした。ECS のスケッチと定めた解析領域の例を Fig. 4 に示す。正常症例と ECS のない脳梗塞症例においては ECS ありの脳梗塞症例と同じ方法で結果画像を作成したのち、全スライスの全画素を解析領域とした。

こうして定めた解析領域の中で Z-score が 0 以下の領域を対象にヒストグラムを求めた。階級幅は 0.02、階級数は 64 とした。作成されたヒストグラムを Fig. 5 に示す。その後頻度値が最も高い階級を求め、その階級内の Z-score 平均値を対象症例での測定値とする。



(a)

(b)

(a) 放射線技師による ECS のスケッチ  
(b) (a) を参考に ECS を囲むように手動で設定した矩形

Fig. 4 脳梗塞領域を含む画像とその Z-score 画像の例

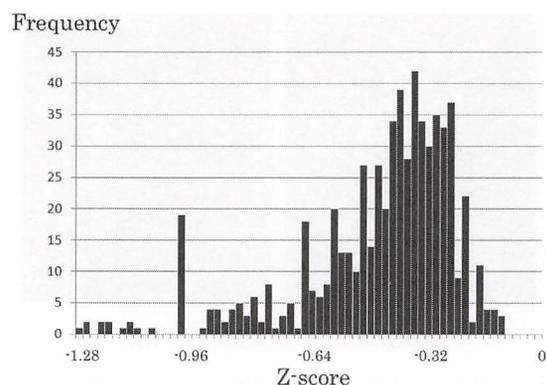
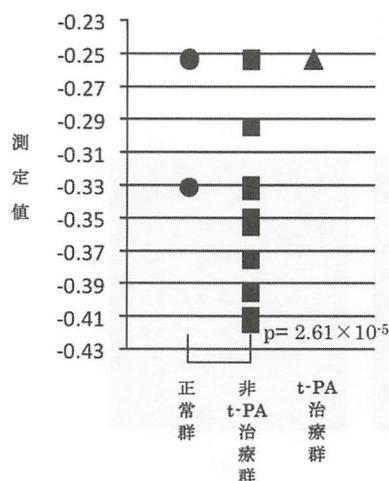


Fig. 5 定めた矩形の中で Z-score が 0 以下の領域を対象にした Z-score ヒストグラム

## 2. 結果

本手法では正常脳モデルを正常症例 60 例を用いて構築した。ECS のある脳梗塞症例で ECS を解析領域とした非 t-PA 症例を 16 例、ECS のない脳梗塞症例で全スライス全画素を解析領域とした t-PA 症例を 3 例、同じく全スライス全画素を解析領域とした正常症例を、モデル構築に用いた症例とは別に 25 例用意し、3 で述べた手法により測定値をそれぞれ算出した。その結果を Fig. 6 に示す。これにより ECS の測定値が、正常症例、t-PA 症例と有意に異なるか否かを検討した。Fig. 6 の正常群と非 t-PA 群の測定値の分布から t 検定を行い、それぞれの平均値は有意水準 1% で有意差を得



正常群と非 t-PA 群の測定値の平均値は有意水準 1% で有意差を得た (有意確率  $p=2.61 \times 10^{-5}$ )

Fig. 6 測定値の分布

た (有意確率  $p=2.61 \times 10^{-5}$ )。

## 3. 考察

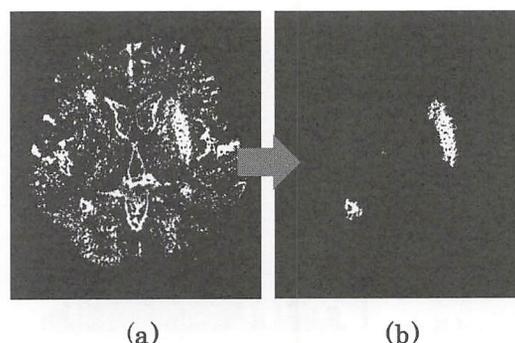
今回、非 t-PA 症例と正常症例の測定値の平均値に有意差を得たが、正常症例でも測定値が低くなった症例があった。これは脳溝、脳室の削除が完全でないからだと考える。脳溝、脳室は個人差が大きいため標準化した際 Z-score の絶対値が高くなる。閾値処理に代わる新たな手法の提案が必要である。

本手法においては対象領域を手動で設定しているため、設定法によっては結果が異なる可能性がある。そこで設定した対象領域についての考察を行う。ECS 領域についてはひとりの放射線技師が CT 画像を読影し、スケッチしている。より正確な領域を得るため脳梗塞の確定診断が可能な MRI や、複数の医師による読影が必要だと考える。

本手法では対象症例の CT 値を多数の正常症例から構築した正常脳モデルを用いることで Z-score に変換した。つまり Z-score は構築した正常脳モデルに依存する。そこで今回構築した正常脳モデルについて考察を行う。骨領域を今回は閾値処理によって抽出した。これは本手法で用いたデータベースにある画像を下に経験的に設定した値である。よって、この方法では他の CT 装置では抽出できない可能性があり、閾値に依存しない骨領域の抽出手法を検討していかなければならない。平均値モデル画像は脳の構造がよく表現されていると考えられる。よって辺縁部以外の頭蓋内領域に対しては本手法のモデルはとても有効であると考えられる。標準偏差モデル画像を見ると、脳の辺縁部の位置ずれが大きいことがよくわかる。これは脳形態の標準化が不十分であることが考えられる。今回の脳領域変形方法については線形補間による拡大は剛体変形であるので脳の個人差を許容できる範囲での変形手法であった。しかし精度を上げるためには脳の変形手法の改良が必要である。

Fig. 6 の結果から、Z-score を利用した ECS と正常症例の判別が可能であると考ええる。このことから Z-score を利用した ECS の自動検出を試みた。Fig. 4(b) は ECS のひとつであるレンズ核陰影の不明瞭化が現れた症例である。ECS のスケッチとこの画像を比較した結果、まだ多くの偽陽性が確認できる。辺縁部に存在する脳溝や、中心部に存在する脳室が偽陽性として現れることが画像から分かる。画像を二値化し、ラベリングを行った後に、各ラベルに対して特徴量を求め、閾値処理により偽陽性を削除する手法を用いる。脳溝、脳室は他の部位よりも低い CT 値を取ることから、CT 値を偽陽性削除の特徴量に用いた。また脳溝は辺縁部に存在することからラベルの重心を特徴量に用いた。さらに Fig. 6 の結果から Z-score を特徴量に用いた。上記 3 つの特徴量に面積を加え、計 4 つの特徴量を各ラベルに対して求め、経験的に決定した閾値処理により偽陽性削除を行う (Fig. 7)。

偽陽性削除後、残った領域を最終候補領域とする。さらに正規化した脳領域と最終候補領域を重ねあわせ、読影診断支援画像とした。評価として、放射線技師によるスケッチと抽出した候補領域が目視により重なっていると判断した場合を真陽性とし、それ以外を偽陽性とした。今回基底核を含む断面に ECS が存在する脳梗塞症例 15 例について以上の方法で ECS の検出を行った。結果として検出感度が 93.3%

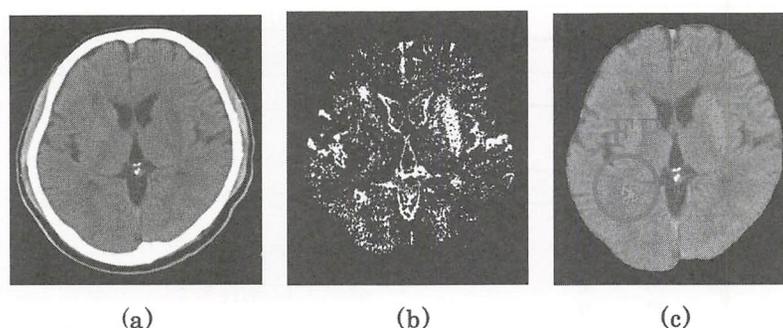


(a) Fig. 3(b) を二値化した画像。二値化後、ラベリング。  
 (b) 平均 CT 値、平均 Z-score、重心を特徴量を用いて削除。  
 Fig. 7 偽陽性削除処理の結果例

(14/15)、一症例あたりの平均偽陽性数は 2.0 個となった。検出できなかった 1 症例については面積が非常に小さい ECS であったため、閾値処理による偽陽性削除時に削除されたと考える。脳梗塞症例に本手法を適用した結果の例を Fig. 8 に示す。自動的に検出した ECS は、脳領域を正規化しているため実際にスケッチされた ECS と大きさは多少異なるが、その位置はほぼ満足できる程度に一致していることが Fig. 8 で確認できる。

#### 4. 結論

頭部 X 線 CT 画像の統計画像解析処理によって、急性期脳梗塞領域である早期虚血サイン領域の CT 値は有意に低いことが示された。これは、脳梗塞画像診断の上で、有益な知見となり得る。



ECS ありの脳梗塞症例  
 (a) 原画像 (b) Z-score を二値化した画像 (c) 正規化した脳領域と偽陽性削除後残った最終候補領域を Fusion した読影診断支援画像  
 Fig. 8 読影診断支援画像

## [今後の研究の方向, 課題]

本件研究助成では, 救急 X 線 CT 画像における急性期脳梗塞の基礎的な画像特徴を把握することができた。今後取り組む課題を以下に示す。

1. 臨床現場での読影実験について, 試験モデルの構築。
2. データベースの拡充。特に異常症例収集。
3. 研究協力施設の拡充。

現在, 項目 1 について泉州救命救急センターで準備を始めており, 3 名の読影者について実験を行う予定である。

これら読影実験は, 乳房 X 線画像や胸部 X 線画像/CT 画像におけるコンピュータ支援診断システムの有効性を検討する場合に頻繁に行われており, 本研究の読影者実験もその実験方法を踏襲して実施することが可能であるといえる。

項目 2 については, 協力病院において発症時間などの情報を収集しており, CT 値の減衰と発症時間との関連を明らかにすることを予定している。

項目 3 については, 読影実験終了後にシステムの試作を行い, 後ろ向き試験により実際の搬入症例における有用性を検討する。

なお, これらの統計画像解析に関する一般論を Society of Nuclear Medicine および Radiological Society of North America にて教育展示として発表予定である。これは, 統計画像解析は広く知られているものの, その技術的な原理や方法論は統計的な考え方に基づくため, その

内容を分かりやすくまとめ展示することは, 多くの研究者の理解につながると考えるためである。

## [成果の発表, 論文など]

(発表済み)

1. 大島一輝, 原武史, 周向榮, 坂下恵治, 村松千左子, 藤田広志: 頭部 X 線 CT 画像における脳梗塞の異常所見に関する統計解析, 電子情報通信学会技術報告, 110 (28), 127-130 (2010)

【発表予定】

1. Takeshi Hara, Tetsuro Katafuchi, Satoshi Ito, Takuya Matsumoto: Xiangrong Zhou, Hiroshi Fujita, Methodology of statistical image analysis by using normal cases, Society of Nuclear Medicine, 2011 年大会 (2011.6.3~8)

【演題申し込み中】

1. Takuya Sassa, Takeshi Hara, Kazuki Oshima, Keiji Sakashita, Xiangrong Zhou, Hiroshi Fujita: Development of automatic detection method for abdominal hematoma on X-ray CT images in emergency medical care, Radiological Society of North America (2011.11.26~12.2)
2. Takeshi Hara, Tatsunori Kobayashi, Xiangrong Zhou, Hiroshi Fujita: Methodology of statistical image analysis by using normal cases for torso FDG-PET images, Radiological Society of North America (2011.11.26~12.2)

【投稿予定】

1. 大島一輝, 原武史, 周向榮, 坂下恵治, 村松千左子, 藤田広志: 頭部 X 線 CT 画像における早期 CT サインの解析と自動検出法, 医用画像情報学会
2. Takeshi Hara, Naoto Matoba, Xiangrong Zhou, Shinya Yokoi, Hiroaki Aizawa, Hiroshi Fujita, Keiji Sakashita, and Tetsuya Matsuoka: Automated detection of extradural and subdural hematoma for contrast-enhanced CT images in emergency medical care, Medical Physics

# 柔軟性と周波数応答性を両立した皮膚感覚ディスプレイによる 「生物感」の提示

A haptic device to present a feeling of living matter

1091007



研究代表者 電気通信大学 電気通信学部 准教授 梶本 裕之  
共同研究者 大阪大学大学院 情報科学研究科 特任研究員 橋本 悠希

## [研究の目的]

現在、玩具やセラピーを目的とした様々なペットロボットが家庭に進出している。しかしこれらは触覚的な側面が重要視されておらず、ロボット独特の硬い感触がユーザーとロボットの親和性を大きく損なっていた。愛着という点に限れば、古来の「ぬいぐるみ」に較べて退化したとすらいえる。

本研究は、生物特有の触覚的表象である呼吸・脈動、震え等を、手掌部全体に提示する手法を提案する。提案手法では、非常に幅広い周波数帯域を持つ音響スピーカを用いることで、触覚提示デバイスとして従来にない超高忠実性と柔軟性を両立する。さらに各種のセンサも組み込みインタラクティブ性を確立することにより、人間と機械の新たな関係性を構築する。

## [研究の内容、成果]

我々はこれまでに、1 Hz 以下～20 kHz というこれまでにない広帯域性を備え、空気圧による間接的な圧力提示により機械由来の固さを感じさせない新たな触覚提示手法を提案した(図1)。本手法は今回の研究における技術的課題である、

- ・1 Hz 以下の呼吸から鼓動、震えまでの幅広い周波数帯域での触覚表現が可能であること
- ・生物独特の柔らかい感触を損なわないこと

を満たす。また、既に国際学会における1000名以上のユーザーテストにおいて高い評価を得ており、この手法が本研究の目的に最適なものの一つであると考えられる。以上から、本手法を導入した装置を用いて本研究の課題を実現することとした。本研究では、以下の4点について

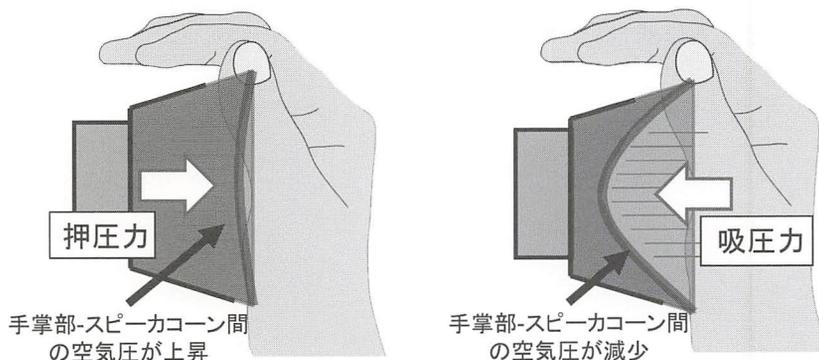


図1 触覚提示手法の原理

研究を行った。

### 1. 生物感の要素同定

触覚的に生物を感じさせる主な要素として、柔らかさ、毛並み、押されたら押し返すなどの力覚的な抵抗感、心臓の鼓動や筋肉の振動が考えられる。本研究では、これらの要素の中でも生物を感じさせる触覚情報は生体活動を最も分かり易く表しており、複数の先行研究からある程度有効性が実証されている「鼓動運動・呼吸運動の際に生じる生物特有の動的な触覚」に焦点を当てた。そして、鼓動運動・呼吸運動のそれぞれを模した波形を作成すると共に他の波形パターンも含めた比較実験を行い、鼓動運動・呼吸運動における生物感の要素を同定し、触覚提示の基本波形を得ることを試みた。

実験の結果、鼓動運動を模した波形と呼吸運動を模した波形を合成した波形を提示した場合に我々が最も生物らしく感じることを発見した。また、最適な合成比率も実験により求め、これを基本波形と定義した(図2)。先行事例では鼓動運動と呼吸運動を別々に考え、どちらか一方の提示もしくは別々に提示するのみであった。これに対して本研究では、鼓動運動と呼吸運動の両方が生物感にとって重要な要素であり、統合した波形を提示することにより生物らしく感じられる触覚が提示可能であることを示した。

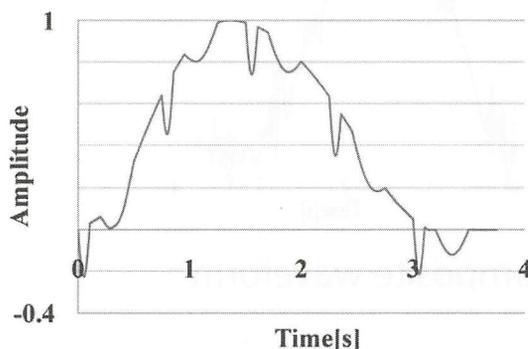


図2 実験から求めた基本波形

### 2. 波形の変調による生物感の拡張

一言に生物といっても、体長・テクスチャ・重量などの違いによって様々な種類が存在する。その中で鼓動・呼吸運動と密接な関わりがある要素として、動物の体長が挙げられる。動物の体長と鼓動・呼吸周波数の関係は既に方程式化されており ( $(\text{生物に関する時間}) \propto (\text{体長})^{3/4} = (\text{体重})^{1/4}$ )、生物の体長もしくは体重から生物の鼓動・呼吸周期が算出でき、それに合わせて「1. 生物感の要素同定」にて定義された鼓動・呼吸の合成波形を制御することで想起される生物の体長を操作可能だと考えられる。このことから、実際に基本波形を変調させ、人間の体長知覚の変化を実験により求めた。

実験では、人間(呼吸周期 = 0.27 Hz) からネズミ(呼吸周期 = 1.47 Hz) までの範囲において方程式から鼓動・呼吸周期を算出し、触覚刺激とした。

実験の結果、ほぼ方程式どおりの体長知覚が可能であることが判明し(図3)、本装置によって幅広い体長の生物を想起させ得る触覚提示が可能であることを示した。しかしながら、方程式から算出される理論値と実際の装置の体長・重量が大きくかけ離れた場合、理論値通りに知覚することは難しくなることも分かった。この問題は、極端に体長が異なる条件に対して装置自体の体長や重量を調整することで解決可能であると考えられる。

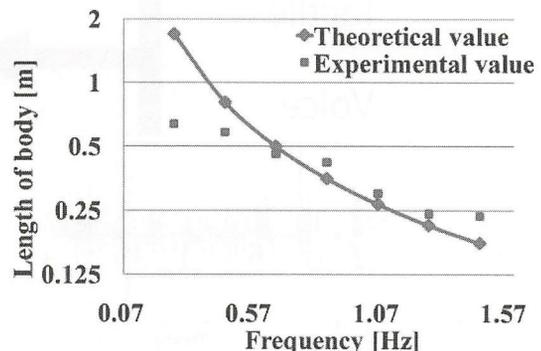


図3 体長知覚の理論値と実験値

### 3. テクスチャの種類と印象の関係

「2. 波形の変調による生物感の拡張」の冒頭においてテクスチャに言及したが、実際にテクスチャの触覚情報どの程度生物の判別に用いられているのかはこれまで調査されていない。よって、装置に様々なテクスチャ素材を付加し、テクスチャ感と基本波形を同時に知覚させる実験を行い、受ける印象との関係を分析した。

解析の結果、3グループ程度の大まかな分類傾向は見られるものの、上記2つの研究結果ほど明確な関係は認められなかった。このことから、人間は静的な触覚情報よりも動的な触覚情報からより多くの生物の特徴をつかんでいることが分かった。以上から、テクスチャ情報は生物の特徴把握にとって必要であるが、テクスチャ情報を詳細に提示する必要性は薄いと思われる。

### 4. 聴覚刺激との組み合わせとインタラクションの試験的実装

本研究の主目的は触覚による生物感の提示である。しかしながら、我々は日常的に複数のモダリティから情報を統合して物事を判断している。また「触れ合い」という言葉があるように、人間と他生物はインタラクションによってその

絆を深めてきた。よって本研究においても触覚以外のモダリティ導入およびインタラクションを試験的に実装した。

他モダリティでは、本手法と親和性の高い聴覚を選択し、触覚波形と音声波形を合成して出力する方法を用いた(図4)。また、音声は動物の鳴き声を模したものをを用いた。

インタラクションは、振る、強く押す、傾けるといったユーザからデバイスへの働きかけをセンサによって読み取り、触覚情報に反映させることとした。これらを実装した生物感提示システム(図5、図6)を製作し、実演展示を行った。

実演展示の結果(図7)、外観が生物を模した形をしていないにも関わらず「自分のペットを思い出す」といった報告が聞かれるなど、高い評価を得た。よって、本手法によって高いリ

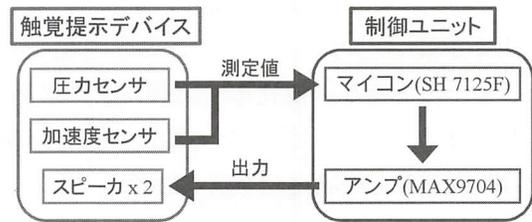


図5 生物感提示システムのブロック図

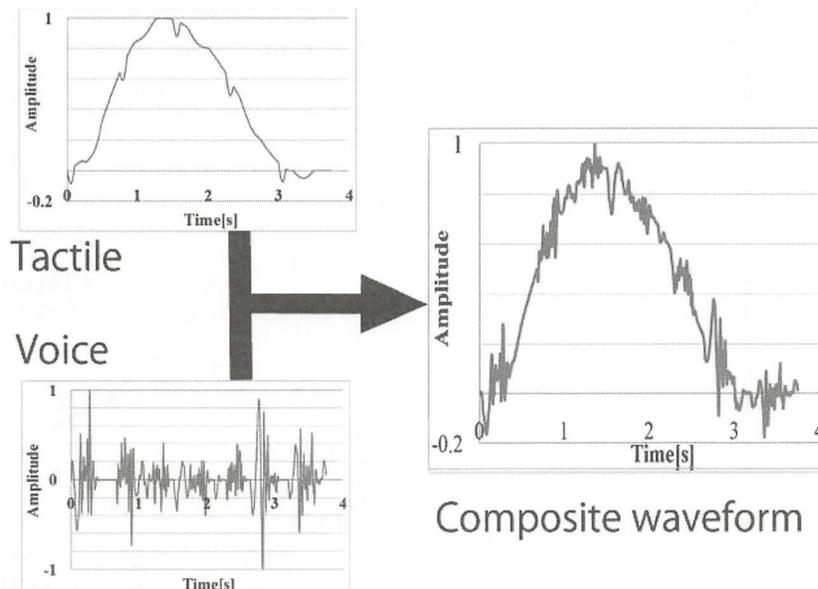


図4 触覚情報と音声情報の合成

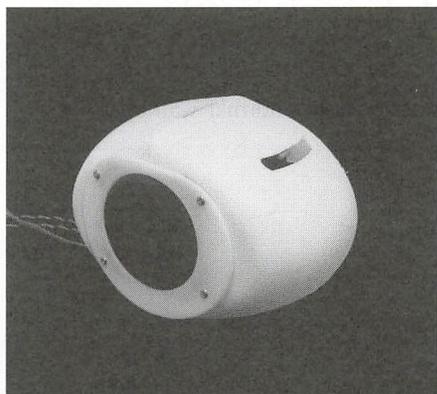


図6 生物感提示デバイスの外観



図7 体験の様子

アリティを持った生物感提示が実現できたと言える。聴覚とインタラクションの導入では、聴覚については反響があったものの、インタラクションについては反響が少なく、インタラクションの内容に課題が残った。

#### [今後の研究の方向, 課題]

本研究は、生物感の要素同定、波形変調による生物感の拡張、テクスチャによる印象変化に

関する検討を行い、触覚による生物感のリアリティ向上に寄与する知見を得た。以上から、触覚提示に関わる基礎的な検討課題はほぼ達成された。また、聴覚との組み合わせやインタラクションを導入した生物感提示システムを実装し、実演展示によって効果を確認した。

一方で、インタラクションの最適化、テクスチャや聴覚以外のモダリティ（視覚、温度感覚等）との組み合わせ、様々な抱き方に対応した触覚提示部の配置設計という、より自然で愛着の湧く装置とするための課題は未達成である。今後はこれらの要素について検討していくと共に、手掌部のみ限定していた触覚提示部位を、腕、胸、背中等にまで広げ、機械と人の関係性を変化させることによる親和性の向上を測ることを考えている。

#### [成果の発表, 論文等]

1. 中田, 橋本, 梶本: 鼓動・呼吸運動を模した触覚刺激による生物感の提示, エンターテインメントコンピューティング 2008, 金沢 金沢歌劇座 (2008.10.29-31)
2. 橋本, 中田, 梶本: Emotional Touch, インタラクティブ東京 2008, 東京日本科学未来館 (2008.9.13-14)
3. 橋本, 中田, 梶本: Hi-Fi 触覚提示に関する研究: ハードウェアの基礎的検討, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 14, No. 4, pp. 491-499 (2009)
4. 中田, 橋本, 梶本: 空気圧を利用した双方向触覚通信装置, インタラクション 2010, 学術総合センター (2010)
5. S. Nakata, Y. Hashimoto, H. Kajimoto: A Mutual Tactile Communication Device by Controlling Air Pressure, In Proceeding of IEEE VR 2010 Haptics Symposium, Boston, USA (2010)

## 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

After-effect of robotic assistance on walking pattern during normal walking

1091008



研究代表者 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 助教 上林 清孝

共同研究者 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 助教 河本 浩明

### [研究の目的]

近年、障害者の歩行回復訓練や高齢者の歩行支援にロボット技術が応用され始めている。しかしながら、ヒトの二足歩行に対する最適なアシスト方法は確立されておらず、機械的な歩行アシストによって生じる歩容の適応変化も明確ではない。そこで、健常者の歩行時にロボットアシストを与えることで、その後の歩行パターンが影響を受けるのか調べることを本研究の目的とした。ヒトの運動プログラムがロボットによる運動支援でどのように修正されるのか調べるこの研究は、ヒトの適応性を評価するものであり、ヒトと機械の調和という観点からも重要な研究課題であるものと考えられる。

### [研究の内容, 成果]

健常成人男性 10 名 (身長  $172.8 \pm 4.4$  cm, 体重  $62.9 \pm 7.1$  kg, 年齢  $24.0 \pm 3.9$  歳) が被験者として実験に参加した。ロボットアシストによる歩行支援には、両脚用のサイボーグ型ロボットスーツ HAL (Hybrid Assitive Limb, Cyberdyne 社製) を用いた (図 1)。このロボットスーツは股関節と膝関節にパワーユニットを装備しており、表面電極における下肢筋群の電位信号を基にトルクを与えて歩行支援を可能とする。

本研究では歩行アシストによる歩容の適応変



図 1 サイボーグ型ロボットスーツ

化を調べるため、歩行における下肢 3 関節の角度変化やステップ長をビデオ映像による 3 次元動作解析から算出した。片脚あたり 2 台、計 4 台のデジタルビデオカメラ (HDR-CX550V, Sony 社製) で撮影を行い、動作解析システム (Frame-DIAS IV, DKH 社製) を用いて映像をデジタル化した。ビデオ映像は非インターレース化によって 60 Hz のサンプリングにて分析した。身体ランドマークに用いた反射マークは直径 20 mm で、臨床歩行分析研究会で推奨されている両脚の第 5 中足骨骨頭、足関節外果、大腿骨外側上顆、大転子中央と上前腸骨棘を結んだ直線上で大転子から 1/3 の位置、肩峰の計 10 点に貼付した (図 2)。左右方向を X 軸、進行方向を Y 軸、鉛直方向を Z 軸とし、DLT (Direct Linear Transformation) 法にて 3 次元座標値を割り出した。

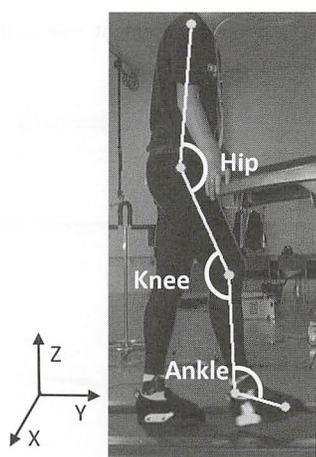


図2 身体マーカ位置と関節角度定義

歩行はトレッドミル (T630, SportsArt Fitness 社製) にて行い、速度は 3.5 km/h とした。ロボットスーツの大腿および下腿の長さは、あらかじめ被験者の脚長に合わせて調節した。歩行中、視線は前方の注視点に向けさせ、腕振りはずにトレッドミルの手すりを指で軽く掴ませた。歩行時には歩容を強く意識することなく、通常時と同様に歩くよう指示した。

実験プロトコルは、ベースラインとして3分間の通常歩行 (Pre 条件) を行った後、ロボットスーツを装着し、10分間のアシスト歩行 (Assist 条件) を実施した (図3)。その直後にロボットスーツをはずし、再度5分間の通常歩行 (Post 条件) を行い、後効果 (after-effect) として歩容の変化を観察した。それぞれの歩行条件で、歩行開始 30 秒後からを初期 (Early: E 期間)、Pre 条件で 1.5 分、Assist 条件で 5 分、Post 条件で 2.5 分からを中期 (Mid: M 期間)、条件終了の 30 秒前からを後期 (Late: L 期間) として動作解析を行った (図3)。時間の計測はトレッドミルが 3.5 km/h の定常速度

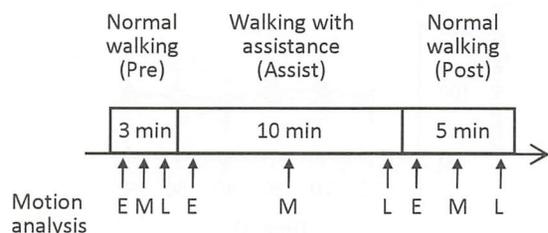


図3 実験プロトコル

に達してからスタートした。各期間ともに 10 歩行周期を解析した。

定量的な評価項目として、1 歩行周期における股・膝関節での最大伸展・屈曲角度から屈伸角度範囲、足関節の最大底屈・背屈角度から底背屈角度範囲を算出した。歩行周期時間は、右足の第 5 中足骨頭の矢状面座標データを用いて、最大の進行方向位置を基準に割り出した。また、イニシャルコンタクト時の左右の第 5 中足骨頭マーカでの進行方向位置の差 (2 点間距離) からステップ長を計算した。歩行周期とステップ長は、Pre・Assist・Post 条件のすべての期間で計測したが、ロボットスーツによって反射マーカが隠れてしまうことがあるため、関節角度は Pre および Post の通常歩行時でのみ解析を行った。各データ値は、平均値 ± 標準偏差で示した。

図4は、各歩行条件の初期に1名の被験者で得られた左右足の第5中足骨マーカの矢状面リサージュ図形である。Pre 条件と比較して、Assist 条件での地面に対するマーカ位置は遊脚初期には低かったが、接地直前にはより上昇していた。また Pre 条件に比べて、Assist 歩行時ではステップ長の延長 (右 9.2cm, 左 6.3cm) が観察された。一方、Post 条件では Pre 条件と比較して軌跡にばらつきが大きく、遊脚中期で中足骨位置が高くなる傾向を示したものの、移動パターン自体は Pre 条件に類似していた。

図5は、全被験者による左右足のステップ長および歩行周期時間の平均である。Pre 歩行と

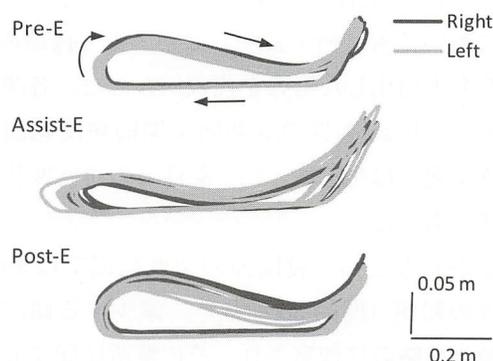


図4 矢状面における第5中足骨のリサージュ図形

Assist 歩行の E・M・L の 3 期間で得られた値に経時的な変化がみられなかったため、3つの歩行期間での平均値を用いてグラフ化した。左右ともにステップ長は、Pre 条件に比べて Assist 条件で延長がみられ、左右平均で 7.3 cm 変化していた。Post 条件の 3 期間では、初期からすでに Pre 条件でのステップ長に戻っていた。

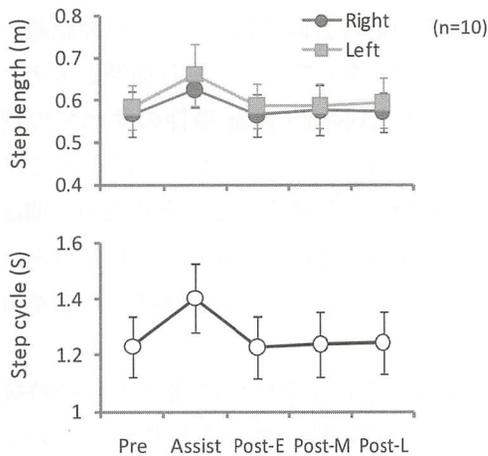


図5 ステップ長と歩行周期時間

同様に、歩行周期においても Assist 条件では Pre 条件に比べて  $173 \pm 106$  ms 長くなった (図5)。Post 条件の 3 期間では、初期で最も歩行周期が短く、その後わずかな増加傾向がみられたものの、Pre 条件での歩行周期時間と有意な差はみられなかった。

図6は全被験者で1歩行周期での各関節の角度範囲を平均したものである。Assist 歩行時には角度を計測することができなかったため、Pre と Post 条件での比較となっている。この図においても、Pre 条件では初・中・後期の 3 期間を平均化したものを代表値とした。各関節ともに、Post 条件の 3 期間で関節角度範囲に有意な変化は生じず、Pre 条件での角度変化と同様であった。

しかしながら、股関節の角度範囲では Post 条件の初期 (開始 30 秒後) に減少する傾向が半数の被験者に観察され、その解析時間より前にはさらに減少しているようであった。そこで、

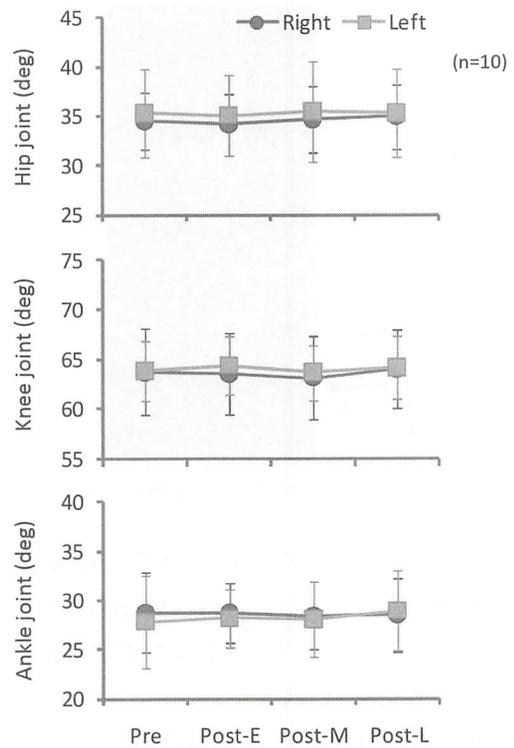


図6 1歩行周期における股・膝・足関節の角度変化

それら 5 名の被験者を対象として、より詳細に after-effect を調べる目的で、Post 条件の歩行開始時から 1 分後までの期間にて追加解析を行った。3.5 km/h の歩行速度に達した測定開始時から 10 秒ごとに区分し、各区分内のステップで股関節と膝関節の屈伸角度範囲を平均した結果が図7である。屈伸角度範囲は Pre

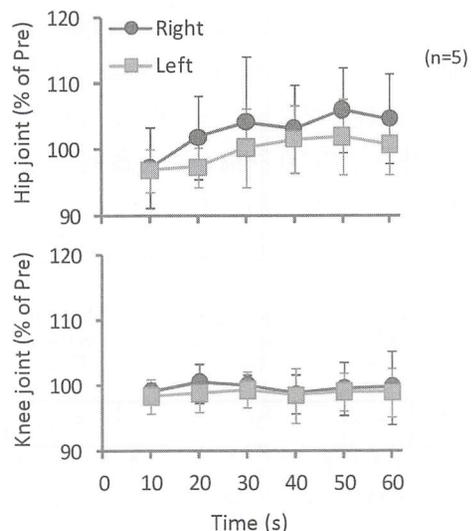


図7 Post 歩行開始 1 分間での股・膝関節の角度変化

歩行における3期間の平均値を100%に相対化して表示した。Post開始10秒間では、股関節の屈伸角度がPre条件のおよそ97%であり、その後漸増する変化が両脚にみられた。その1ステップにおける関節角度範囲はPost開始から1分以内で定常レベルに達するようであった。一方、膝関節においては、そのような屈伸角度範囲の経時的な変化がみられなかった。

#### [今後の研究の方向, 課題]

通常歩行と同一速度でのアシスト歩行によって、ステップ長や歩行周期時間が通常歩行に比べて延長されており、今回測定していない関節の角度変化パターンや発揮トルクも通常歩行とは異なっていたものと思われる。本研究では10分間の歩行アシストによってその後の歩容に生じる影響を調べる目的であったが、全被験者での平均からみた場合、Post条件で30秒経過した段階において測定項目には明確な適応変化が観察されなかった。しかしながら、Post歩行開始直後には半数の被験者において股関節の屈伸角度で経時的な変化が生じていた。したがって、今回のアシスト条件では全被験者から適応変化を引き起こすほど強い影響はなかったものと示唆される。そのため、今後はより長時間での歩行支援やアシストトルクを増大することでafter-effectを調べる必要があるだろう。

実際のアシスト歩行によって随意的な力発揮がどの程度が軽減していたのかについても、発

揮トルクや筋活動量などの評価項目によって定量的に評価すべきであろう。カメラ配置の変更などによって反射マーカがロボットスーツに隠れてしまう点を補足し、アシスト歩行時の角度変化や関節トルクを計測する計画である。

加えて、本研究結果から膝関節よりも股関節において適応変化が生じやすい可能性があげられる。ヒト二足歩行の遊脚期においては、大腿部と下腿部はつながった振り子として運動し、その原動力は股関節屈筋であり、膝関節の屈曲・伸展は受動的であることがこの結果に関連するかもしれない。今後はこの点に関して実験プロトコルを工夫して調べていく予定である。

このようなロボットによる歩行支援でヒト側に生じる変化に関する研究結果を蓄積することで、障害者に対する歩行訓練の効率化や歩行関連機器の開発へとつながることが期待される。

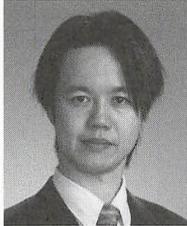
#### [成果の発表, 論文等]

- 1) 上林清孝, 中島剛, 小川哲也, 中澤公孝: 受動歩行時の速度増加による皮質脊髄路興奮性の促通とH反射経路の抑制. 第65回日本体力医学会大会 (2010. 9)
- 2) 上林清孝: ロボット型歩行支援装置の使用経験について. マスターズスレーブ方式リハビリテーションシステム研究会 (2010. 12)
- 3) K. Kamibayashi, T. Nakajima, M. Takahashi, K. Nakazawa: Changes in input-output relations in the corticospinal pathway to the lower limb muscles during robot-assisted passive stepping. 33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (2011. 9 発表予定)

## ダイラタンシを利用した汎用的触覚ディスプレイの研究

Dilatant- fluid-based universal tactile display

1091009



研究代表者

東北大学大学院 情報科学研究科

助教

嵯峨

智

### [研究の目的]

近年、触覚に訴えるインタフェースの拡がりとともに、触覚ディスプレイに関する研究が多くなされている。旧来の多くのディスプレイは形状や力といった、環境側の物理的意味の明確な情報を提示することを目的とするものが多かった。例えば、力および形状をディスプレイする触覚ディスプレイの代表として PHANToM (SensAble Inc.) があげられる。これは、提示可能な環境情報を一点に限定することで、その一点における力および位置情報を提示する。また、直動アクチュエータを2次元に配置し、その上下動により2次元に広がりをもつ形状を模倣することで物理情報を実現するディスプレイとして Nakatani, et al. の PopUp! [1] の研究などがみられる。これらのデバイスではやわらかさなどの触感を表現することが難しい。

これに対し、昨今は通常の物理的情報を提示可能なディスプレイとしてではなく、触覚という感覚そのものに訴える特殊な触覚ディスプレイも同様に多くみられる。クリック感を提示する触覚ディスプレイとしては、フォースフィードバックタッチパネル (SMK Inc.) などいくつかの商用ディスプレイが提案されている。また、研究レベルにおいては、指と対象との接触面積を変化させることで固さを表現する Fujita, et al. [2] や Bicchi, et al. [3] のディス

プレイや、指に巻いたバンドの締め付けにより発生する皮膚の物理的変形のみにより力覚を表現する手法を提案する Minamizawa, et al. [4] の研究などがある。また、Yamaoka, et al. [5] の研究では、皮膚と対象との干渉により起こる皮膚接触面の面積と粘着の現象を、空気圧を用いて再現することで粘着感を提示する独自のディスプレイを考案している。

このように、皮膚の一部の変形を用いて触覚を生成する研究もいくつか見られるようになってきた。しかし、これらの研究では一つの対象表現のために一つのデバイスが必要になり、汎用的とは言いがたい。そこで、我々は変形が可能であり、弾性を変化させる液体状の物体を用いることで、自由な変形の可能性を残しつつ、柔軟な硬さの表現が可能な汎用デバイスを模索する。本稿では、このような物質として、ダイラタント流体を用いるディスプレイを提案する。

粉粒体媒質を変形すると、粒子間の空隙が増して媒質全体の体積が膨張する。逆に、体積が膨張できないような状況では、粉粒体媒質は変形できず固体ように振る舞う。このような現象をダイラタンシ (図1) と呼ぶ。

非水溶性微粒子と水のある割合のコロイド溶液は、ダイラタンシを示すダイラタント流体となる。この流体に急激な変形を加えることにより流体から固体へと相変化する。この変形に伴う相変化を利用する。このようなダイラタント流体の起こす現象を利用し、加える振動を制御

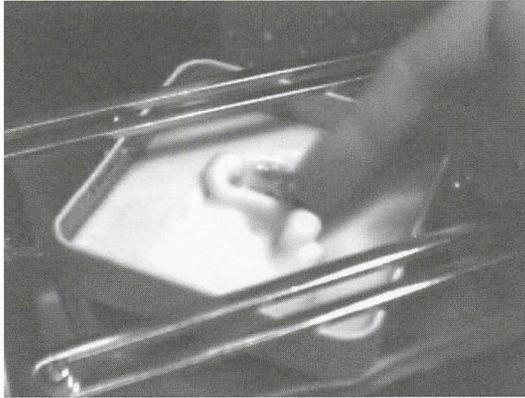


Fig.1 Dilatancy

することにより、固さを制御可能な触覚ディスプレイを提案する。このための初期実験として、ダイラタント流体を用いて触覚ディスプレイを設計するための制御可能性など基礎的な知見を得る。

#### [研究の内容, 成果]

本稿では、新たなコンセプトをもつ触覚ディスプレイの基礎となるダイラタント流体の特性を知るため、ダイラタント流体にさまざまな振動を加え、移動速度と振動を同時に変化させたときの弾性変化を調査する。

#### 1. 垂直方向変位における反力

図2のような加振実験装置を用意し、スピーカによりダイラタント流体に下方からさまざまな周波数で加振したときに上方から一定速度で接触子を押し込んだときの反力を測定した。押し込み先端には、指の形状を模した直径 20 mm のアクリル半球を利用した。ダイラタント

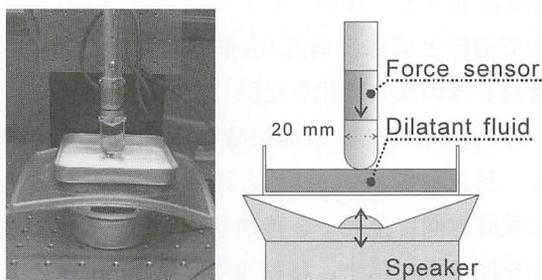


Fig.2 Experiment system (vertical)

流体として、片栗粉 20 g に対し、水 16 g を加えたものを用いた。

はじめに 100 Hz および 130 Hz で加振したときの反力変化を測定した。結果は図3上のようなになる。図3上から、押し込み直後にインパルス的な反力が観察され、その後 300 ms 程度の緩和時間があることがわかる。そして、反力が 0 N になった後、液体から引き戻す時には引き付ける力が発生していることがわかる。一方、より高周波な 130 Hz の振動では反力は小さくなる。さらに、振動源からの定常的な振動が測定された (図3下)。

次に加振周波数を 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65 Hz とし、それぞれの加振条件につき、上方からの移動速度 272 mm/s, 188 mm/s, 132 mm/s, 88 mm/s, 60 mm/s で表面から 3 mm 押し込んだときの反力を測定する。各速度、各周波数においてそれぞれ 10 試行の各軸での反力変化を測定し、このときの反力の最大値を各条件についてプロットした。結果を図4に示す。この結果

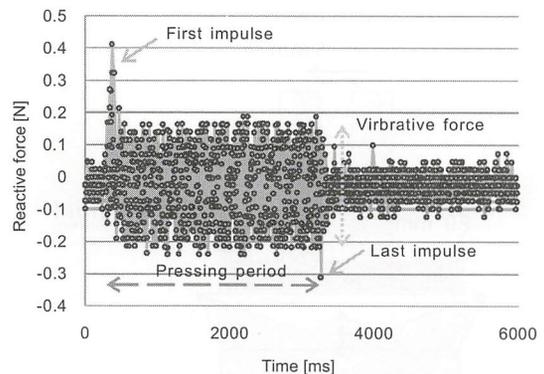
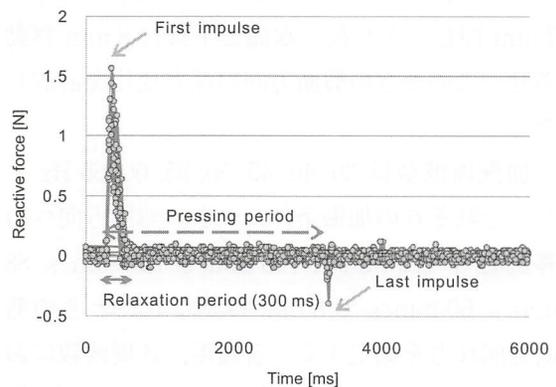


Fig.3 Example transition of reaction force (Upper: 100 Hz, lower: 130 Hz)

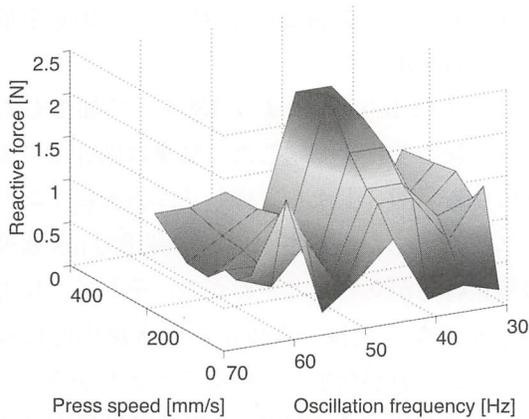


Fig. 4 Change of reaction force (vertical)

から、速度が増加するごとに反力が増加すること、ある周波数領域において大きな反力変化が発生することがわかる。この周波数帯における特性変化は以前の成果とも符合する結果となっている。その周辺では一度反力特性が低下していることも同時に読みとれる。

## 2. 水平方向変位における反力

次に、水平方向への移動の際の反力変化を測定した。図5のように、押し込み実験と同様に3 mm 押しこんだ後、水面と平行に8 mm 移動させ、このときの剪断方向の反力変化を計測した。

加振周波数は 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65 Hz とし、それぞれの加振条件につき、剪断方向への移動速度 272 mm/s, 188 mm/s, 132 mm/s, 88 mm/s, 60 mm/s で 8 mm 移動させたときの剪断方向反力を測定する。各速度、各周波数においてそれぞれ 10 試行の各軸での反力変化を測

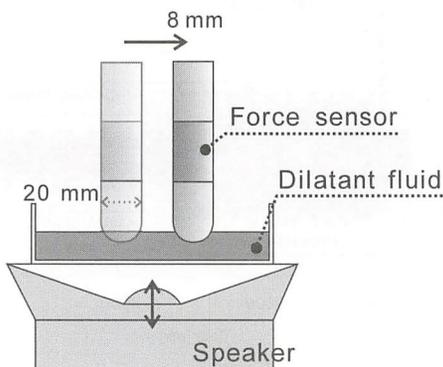


Fig. 5 Experiment system (horizontal)

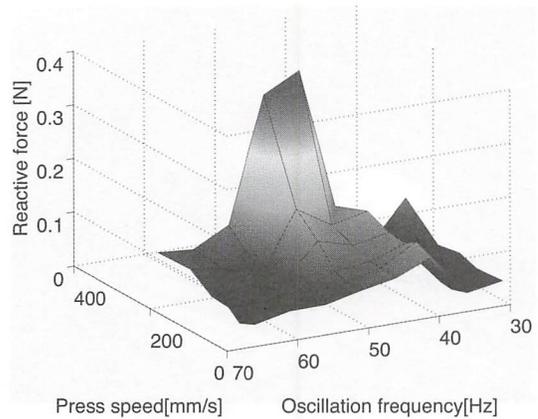


Fig. 6 Change of reaction force (horizontal)

定し、このときの反力の最大値を各条件についてプロットした。結果を図6に示す。この結果から、速度が増加するごとに反力が増加すること、ある周波数領域において大きな反力変化が発生することがわかる。この周波数帯における特性変化は垂直方向の変化とも符合する結果となっている。その周辺では一度反力特性が低下していることも同時に読みとれる。また、今回は 272 mm/s になると 50 Hz 付近で反力が極度に大きくなった。このことから、ある速度以上になると大きく反力を変化させることもわかる。

## 3. 封止状態での反力変化

現状では提案するディスプレイは流体を加振することで弾性を変化させている。そのため、触覚ディスプレイとして弾性変化を知覚するためには流体に直接接触する必要がある。また、流体そのままであるがゆえに取り扱いが難しい。そこで、流体を直接さわることなく、弾性変化を知覚できることが望ましい。そこで、ここではダイラタント流体を封止した状態での反力変化を計測する。覆いとしてラップをかぶせた状態で前節と同様に垂直/水平方向変位を発生させたときの反力変化を記録した。

今回は 50 Hz での加振時の弾性変化を計測し、封止していない状態と比較をした。はじめに垂直方向に接触子を移動させたときの反力変化を図7上に示す。移動速度は 400 mm/s とした。今回は 10 回の計測を行い、動作開始時を

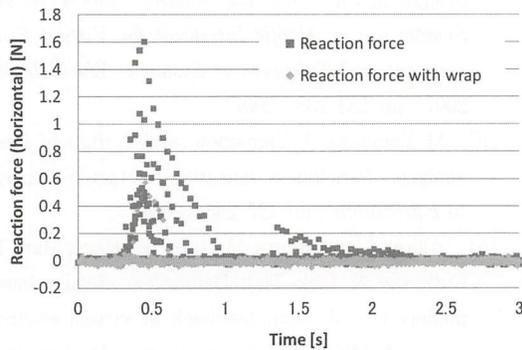
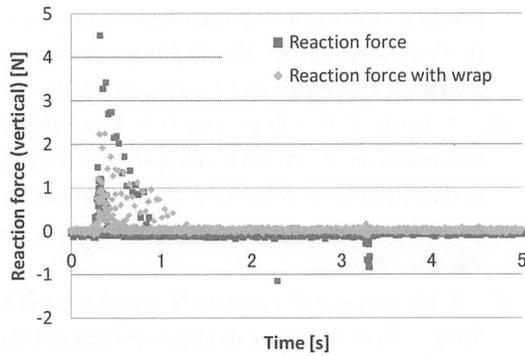


Fig. 7 Transition of reaction force  
(Upper : vertical, lower : horizontal)

あわせて重ねてプロットした。図の赤い■が封止していない状態、青い◆が封止した状態における反力変化である。立ち上がりが0sではないが、これは接触子が流体から少し離れた状態から開始したためである。この結果から、反力自体は1/2程度になるものの、反力の発生と伝達には影響があまりみられないことがわかる。続いて、同様に水平方向に移動させたときの反力変化を計測し、封止していない状態と比較をした。このときの反力変化を図7下に示す。

今回は10回の計測を行い、動作開始時をあわせて重ねてプロットした。赤い■が封止していない状態、青い◆が封止した状態における反力変化である。立ち上がりが0sではないが、これは接触子が流体から少し離れた状態から開始したためである。この結果から、垂直方向の変化と同様に、反力自体は1/2程度になるものの、反力の発生と伝達には影響があまりみられないことがわかる。以上のことから、ダイラタント流体は、ラップ程度の封止を介した接触においてもある程度の反力を提示可能なことがわ

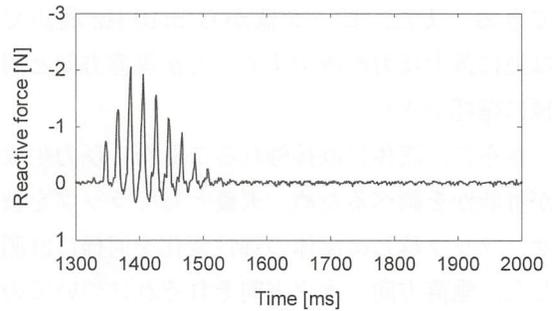


Fig. 8 Precise transition of reaction force (vertical)

かる。

図8は、衝突の瞬間における反力の時系列を拡大した図である。これは、衝突の瞬間に大きな反力を返しながらも、加振による振動が力センサに伝達されている様子を表している。

#### 4. 結果と考察

本稿では、触覚ディスプレイの現状について議論し、汎用性のある触覚ディスプレイの必要性について議論した。そして新しい触覚ディスプレイとして、ダイラタント流体を利用したディスプレイを提案し、このディスプレイの制御可能性を調査した。

実験により、加振周波数および押し込み速度により、反力が可変であることがわかった。今回の実験条件では50 Hz周辺での弾性変化の挙動について調べ、垂直方向への変位を加えた実験では、45 Hz近辺のときに最大2.3 Nの反力生成を確認した。また、移動速度増加とともに反力増加が確認できることもわかる。また、ピーク値から±10 Hz周辺では逆に最大反力が減少することが確認できた。

また、水平方向への変位を加えた実験では垂直方向と同様に、45 Hz近辺のときに最大0.35 Nの反力生成を確認した。垂直方向に比べると、力の大きさは1/7程度に小さくなることがわかる。また、移動速度増加とともに反力増加が確認できることも垂直方向と同様であることがわかる。しかし、移動速度272 mm/sのときに大きな反力が得られるものの、それ以下の速度ではさらに小さな反力生成となることが確認

できる。また、ピーク値から  $\pm 10$  Hz 周辺では逆に最大反力が減少することが垂直方向と同様に確認できた。

さらに、流体に直接接触することなく反力生成が可能かを調べるため、天蓋としてラップを被せ、ラップ越しに流体の弾性変化を同様に計測した。垂直方向、水平方向それぞれについての計測実験を行い、このときの結果をラップなしのときと比較し、ラップを加えることにより反力は  $1/2$  程度に減少するものの、反力生成の挙動には影響がないことがわかった。

また、図 8 の結果から、このような高周波振動をヒトが受けるとき、提示される反力より固いものと認識する傾向があることが Okamura, et al. [6] により知られている。すなわち、本手法により物理的に固い表現が可能であるが、ヒトへ提示することにより、錯覚としてさらに固い表現を実現可能なことを示している。

#### [今後の研究の方向, 課題]

今後は振動自由度を増加させての弾性分布の変化の調査や、現象論の解明のための流体シミュレーションによる共振挙動との比較などを行い、これらの結果から、ダイラタント流体の触覚ディスプレイについての可能性を探ることを目指す。

#### [参考文献]

- [1] M. Nakatani, H. Kajimoto, D. Sekiguchi, N. Kawakami, S. T.: in Proc. of 13th International Conference on Artificial reality, and Telexistence (ICAT), pp.179-184. 3d form display with shape memory alloy. In *13th International Conference on Artificial reality and Telexistence (ICAT)*, pp. 179-184 (2003)
- [2] K. Fujita and H. Ohmori : A new softness display

interface by dynamic fingertip contact area control. In *Proceedings of 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics* (2001)

- [3] A. Bicchi, E. P. Scilingo, and D. D. Rossi. Haptic discrimination of softness in teleoperation : the role of the contact area spread rate. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.16, No.5, pp. 496-504, (2000.10)
- [4] K. Minamizawa, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi : Wearable haptic display to present gravity sensation - preliminary observations and device design. In *2nd Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WorldHaptics 2007)*, pp.133-138 (2007)
- [5] M. Yamaoka, A. Yamamoto, and T. Higuchi. Basic analysis of stickiness sensation for tactile displays. In *EuroHaptics*, pp.427-236 (2008)
- [6] Allison M. Okamura, Matthew W. Hage, Mark R: Cutkosky & Jack Tigh Dennerlein. Reality-based models for vibration feedback in virtual environments. *ASME/IEEE Transactions on Mechatronics, Vol.6, No.3*, pp.245-252 (2001)

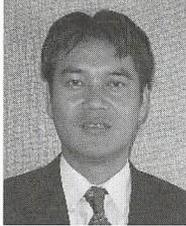
#### [成果の発表, 論文等]

1. 嵯峨 智, 出口光一郎 : ダイラタント流体を利用した触覚ディスプレイの検討. 第9回 SICE システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 953-954 (2008)
2. 嵯峨 智, 出口光一郎 : ダイラタント流体を利用した触覚ディスプレイの検討 (第二報). In *Proceedings of the 2009 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, pp.2P1-L04 (2009)
3. Satoshi Saga and Koichiro Deguchi : Dilatant fluid based tactile display -Basic concept-. In *Proceeding of IEEE Haptics Symposium 2010* (2010)
4. 嵯峨 智, 出口光一郎 : タッチパネルインタフェースにおける剪断力による 2.5 次元触覚提示についての検討. In 第5回力触覚の提示と計算研究会 (2010)
5. 嵯峨 智, 出口光一郎 : 剪断力を用いた 2.5 次元触覚ディスプレイによる凹凸感提示. In *Proceedings of the 2011 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Okayama, Japan* (2011)

# マイクロ・プロセス・トモグラフィーによる 高濃度多次元バイオチップの開発

High concentration multi dimensions bio chip by micro process tomography

1091014



研究代表者

千葉大学大学院 工学研究科

教授

武居 昌宏

## [研究の目的]

直径が $\mu\text{m}$ であるマイクロ流路を用いた、バイオチップの研究が多く行われている。しかしながら、この従来のマイクロ流路では、ナノサイズの高濃度粒子を超高速高効率に分析するという発想が存在しない。したがって、現在、サイトメトリーや遺伝子解析などの人間生活レベル発展のための最重要項目について、大きな足かせとなっていた。本研究の目的は、多次元的にナノサイズの高濃度粒子を超高速高効率に分析するマイクロ流路を用いたバイオチップを開発することにある。

## [研究の内容, 成果]

### 1. 研究の内容

マイクロチャンネルの応用範囲は広く、医療や機器、科学などその用途は多岐にわたり、マイクロチャンネルは大きさを変えずに数を増やすことにより生産量を増大させるために、実験室での合成から工業的な生産への移行が格段に高速・効率的に行えると期待されている。これらのために、マイクロチャンネル内での粒子の分離や分級などの技術が不可欠である。

本研究ではマイクロチャンネル内での電場による粒子操作技術を確認させるため、初めに基礎研究とし、①から⑥について研究を行った。

① 高濃度多次元バイオチップの詳細設計：前

年にすでに実施した基本設計を元に、Fig.1とFig.2に示した通り今までにない120個もの大多数の電極をマイクロ流路に配置したセンサを設計し、MEMSセンサを応用したMPTを製作して固液二相流のインピーダンスを測定した。ナノ粒子の三次元的な分布を求めることができた。

② 高濃度多次元バイオチップの製作および多次元MPTバイオ流体チップの製作：基本設計に従い、自作にて製作し、その製造ノウハウも蓄積することができた。電気的な処理、AD変換器後のソフトウェア的処理なども、自作にて行った。インピーダンス値の特徴成分のみを抽

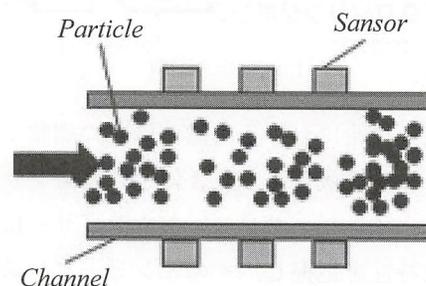


Fig. 1 マイクロ流路のPT側面図

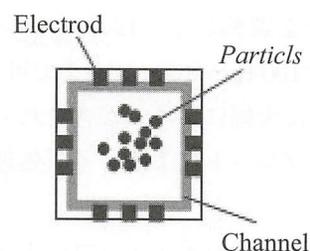


Fig. 2 マイクロ流路のPT断面図

出できた。

③ 多次元 MPT 用感度マップの計算：マイクロ流路断面マイクロ粒子位置の全パターンについて感度マップを計算した。本研究代表者が開発した IPT において実績のある一般化ベクトル・サンプルドパターンマッチングを用いた画像再構成法のパラメータを、多次元 MPT 用に最適に調整した。

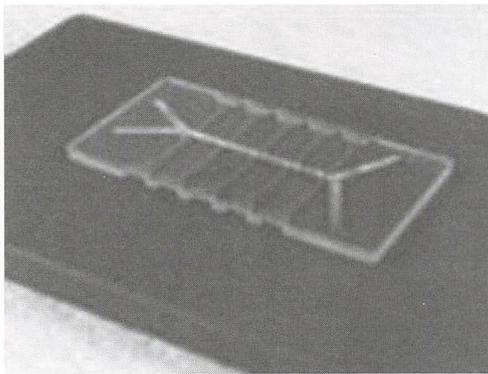


Fig. 3 120 個の電極を配置した MPT センサ

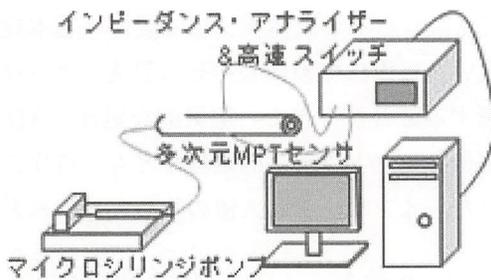


Fig. 4 実験装置

④ 定量供給における画像再構成の調整：静止した一様分散液体を Fig. 3 に示したセンサ内に挿入し、インピーダンス・アナライザにより周波数特性を把握し、そのインピーダンス値の妥当性を定量的に検討し、センサの各周波数条件を変化させ、精度が高くなるように周波数およびセンサを調整した。12 個のセンサへの交流周波数は 100 Hz~100 MHz まで可変とした。センサ出力は大幅にノイズが含まれていたので離散ウェーブレットによるノイズ処理法を適用した。

⑤ 高濃度多次元バイオチップによる可視化計測実験：Fig. 4 に示した通り、水の流量、粒子

供給量を変化させて、ファンクション・ジェネレータにより印加電位と周波数を変化させインピーダンスを計測した。実施項目③で求めた感度マップより、濃度分布画像を取得し、データベースを構築することができた。

⑥ 動的制御の可能性の検討とまとめ：全実験データを基にして、精度の確認を行った。さらに、動的制御の可能性について理論的に検討した。

## 2. 研究の成果

実験より得られた粒子挙動を以下に示す。Fig. 5 は、 $d=1.3\mu\text{m}$ ,  $E=1\text{ V/mm}$ ,  $f=100\text{ kHz}$  における電極近傍の粒子挙動を時系列に示したものである。画像のコントラストを調整して示しており、右側の黒い部分は電極であり、 $t$  は電場印可からの時間である。ここで、矢印に示す 2 つの粒子に着目すると時間経過とともに相互の粒子の位置関係を保ちながら粒子は右側から左側にほぼ平行に移動する。なお、ほかの粒子も同様にほぼ平行に移動し、これらの粒子の挙動は、その強弱はあるものの、いずれの電場強度、周波数ならびに粒子径についても同様である。

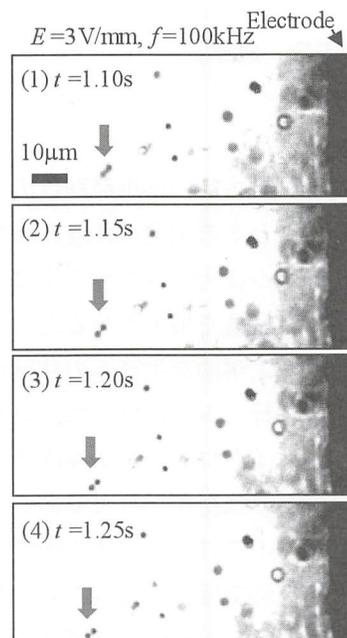


Fig. 5 電極付近の粒子の動き ( $d=1.3\mu\text{m}$ )

Fig. 6 は各周波数条件における粒子の移動速度を電場強度により整理した図である。代表として、粒子直径  $1.3 \mu\text{m}$  の結果を示す。電場強度の増加に伴い、粒子の移動速度は増大する。何れの周波数においても周波数に依らずほぼ同様の粒子の移動速度となっている。

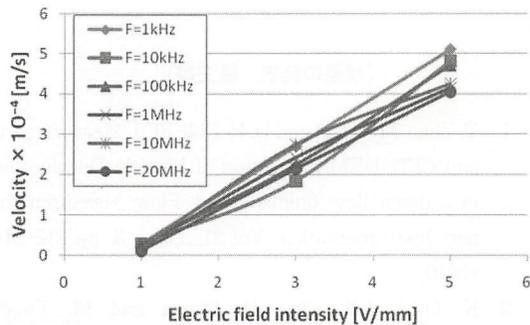


Fig. 6 交流電場における粒子の移動速度

Fig. 7 は電極中央部と電極端部における粒子の移動速度を周波数により整理した図である。粒子直径  $1.5 \mu\text{m}$ 、電場強度  $5 \text{ V/mm}$  の結果を示す。電極中央部より電極端部のほうが粒子の移動速度が増大する。

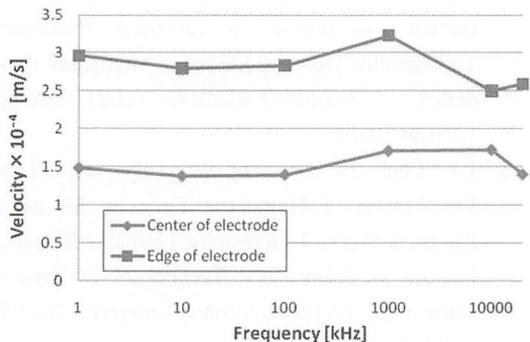


Fig. 7 電極位置の違いによる粒子の移動速度の変化

Fig. 8 は粒子（ポリスチレン）と媒質（水）の誘電率より求めた Clausius-Mossotti factor を周波数により整理した図である。

Fig. 5 において、粒子挙動は移動途中で粒子が可視できなくなることが多い。これは粒子の移動が平行に左に動いているわけではなく、斜め（上から下または下から上）に動いているため、CCD カメラのピントから外れてしまうためである。また、電極近傍と電極から離れた場

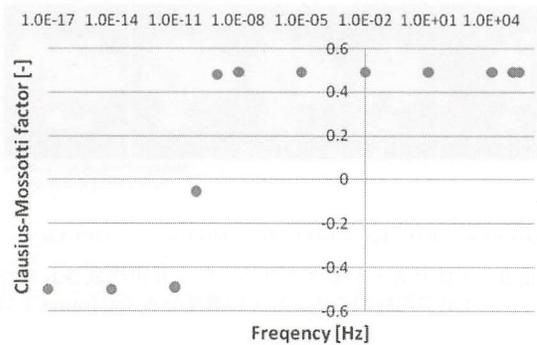


Fig. 8 Clausius-Mossotti 関数

所では面外速度の違いがみられた。このことから計測面内に局所的に三次元的な電場が構成されていると考えられる。

Fig. 6 において、電場強度  $E$  に対応して速度は増大しているが、周波数による影響はほぼ見られなかった。このことは Fig. 8 に示した図で、周波数が  $10^{-6} \text{ Hz}$  以降、 $K(\omega)$  が一定だったためである。このため周波数が変わろうが、誘電泳動力  $F_{dep}$  は影響を受けず、電場強度  $E^2$  の影響を受けたために Fig. 8 のような形になったと考えられる。また、本実験で使用したファンクション・ジェネレータは  $1 \text{ Hz}$  以下の周波数を出力することができないため、周波数による粒子挙動の変化を測定することはできなかった。

Fig. 6 において、電極中央部より電極端部の方が粒子の移動速度が増大しているが、前述した三次元的勾配が電極端部では大きく、電極中央部では小さいと考えられる。

マイクロチャンネル内での粒子の分離・分級を目的とし、基礎的な知見を得るために粒子の観察を行った。電場強度が増加するに伴い粒子の移動速度も増加し、各周波数においても同様の移動速度となることが明らかになった。今後、 $Re[K(\omega)] = 0$ ,  $Re[K(\omega)] > 0$ ,  $Re[K(\omega)] < 0$  が粒子にどのような影響を及ぼすか評価が必要である。

Fig. 9 は、プロセス・トモグラフィーにより、再構成されたマイクロ流路内のナノ粒子の濃度分布を示したものである。Fig. 10 は、その時間平均の濃度分布を定量的に示したものである。

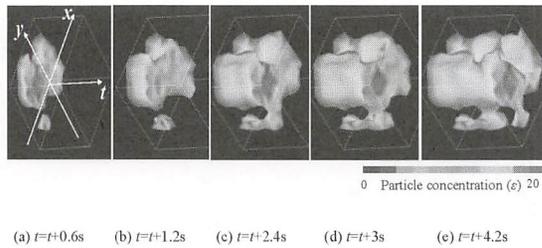


Fig. 9 プロセス・トモグラフィーにより再構成されたマイクロ流路内のナノ粒子の濃度分布 (50 frame/1s)

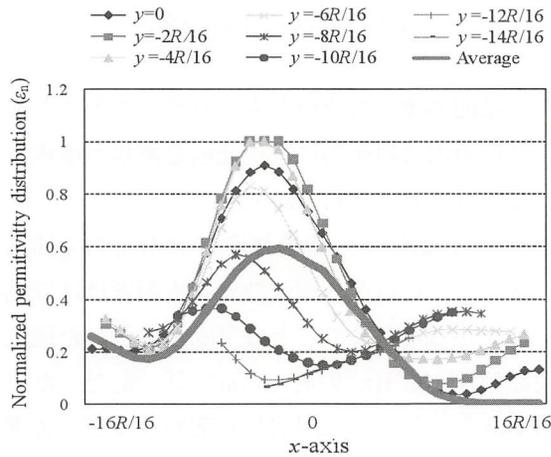


Fig. 10 X 軸断面におけるナノ粒子濃度分布

[今後の研究方向, 課題]

高濃度多次元バイオチップ開発のためのキーテクノロジーとして、管路断面の粒子濃度分布をリアルタイムで計測する電気プロセス・トモグラフィー (PT) 法がある。

今後の研究は、ナノサイズの高濃度微小粒子における混相状態の粒子濃度分布、粒子流速分布、粒子数分布、粒子流量分布、および、加速度分布を、高効率かつ高精度に求めることがで

きる高濃度多次元バイオチップを開発し、フローサイトメトリーや遺伝子解析に適用可能性を検討することを目標とする。

その意義は、この高濃度多次元バイオチップという機械が、遺伝子難病の解決や新薬開発の観点から、更には、新規産業の創出の視点からも人間社会に大きく貢献できることにある。

[成果の発表, 論文等]

1. T. Zhao, M. Takei and D. H. Doh, ECT Measurement and CFD-DEM Simulation of Particle Distribution in a down-flow fluidized bed, Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 21, Issue 3, pp. 212-218 (2010)
2. K. Oshi, J.E. Choi, H. Obara and M. Takei, Measurement of Dielectrophoretic Velocities of Microparticles in a Minichannel, Journal of Japanese Society for Experimental Mechanics (日本実験力学会誌) Vol. 10, pp. 79-84 (2010)
3. T. Zhao and M. Takei, CFD-DEM Simulation of Particle Behaviors under Acceleration in a Solid Air Two Phase Flow, 日本冷凍空調学会論文集, Vol27, No. 2, pp. 161-168 (2010)
4. J. E. Choi, M. Takei and D. H. Doh, Simulation of the relationship between the Current Pattern and Particle Distribution in Electrical Resistance Tomography, Japanese Journal of Multiphase Flow 混相流, (日本混相流学会論文集) Vol. 24, No. 2, pp. 179-188 (2010)
5. J. E. Choi, T. Zhao and M. Takei, Real-Time Visualization of Multiphase Flow by Means of Electrical Process Tomography, Journal of Research Institute of Science and Technology, Colleges of Science and Technology, Nihon University, No. 120, pp. 11-20 (2010)

## 遠隔監視ロボットのための対話的な監視画像データベースの開発

### Interactive Visual Image Database for Remote Surveillance Robots

1091015



研究代表者

福井大学大学院 工学研究科  
知能システム工学専攻

准教授

田中 完爾

#### [研究の目的]

監視カメラを搭載した巡回警備ロボットなど、様々な分野で、遠隔監視ツールとしてのロボットの有用性・利便性が明らかとなってきた。しかし、その一方で、監視画像の可視化技術は整備されておらず、ユーザにとって膨大な監視画像群を視認する作業が大きな負担となっている。そこで本研究では、ロボットからの監視画像群をリアルタイムに記憶・検索することのできる新しいデータベース技術「監視画像データベース」を実現することを目的とした。医用画像のような、通常の画像データと異なり、監視画像は、視点位置と画像特徴という2つの異なる属性を持つという特色がある。そこで本研究では、各々の属性に有効な2技術、視点位置推定(SLAM)技術およびデータベース(視覚検索)技術を開発・結合することを基本的なアプローチとした。

#### [研究内容]

監視画像データベースの実現を目的とし、具体的に、1) 視点位置推定(SLAM)技術、および、2) データベース(視覚検索)技術の研究開発を行った。

#### 1) 視点位置推定(SLAM)技術

自律移動ロボットの分野において、視点位置

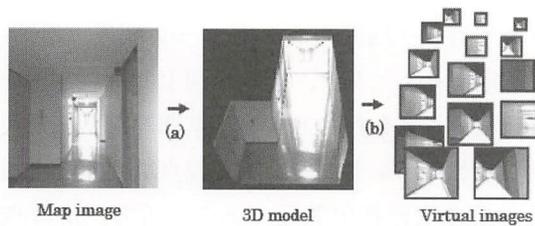
推定(SLAM)は、最も基本的な問題の一つである。一般に、SLAM問題は、ロボットが、自己移動量(オドメトリ)および視覚特徴(ランドマーク)のセンサデータ列をもとに、リアルタイムに、周囲のランドマーク配置(地図)を推定するとともに、その地図上で視点位置を推定することを目的とする。本問題は、未知変数の数が、ランドマーク数と視点数に比例する、高次元の状態推定問題である。近年、計算機ハードウェアおよびアルゴリズムの発展により、大規模環境のSLAM問題を実用時間で解くことが可能になってきた。これらの技術を基盤とし、監視画像データベースに有効なSLAM技術の研究開発を行った。

従来のSLAM技術は、ロボットの移動経路に沿って、密な視覚画像が得られることを前提にしていた。この前提の下では、SLAM問題を、ロボットの視点位置および周囲の視覚特徴を追跡する追跡問題に帰着して解くことができた。代表的な解法として、カルマンフィルタやパーティクルフィルタなどのフィルタリング手法が用いられた。しかしながら、本研究で扱う遠隔監視タスクでは、ロボットの移動経路に沿って、密な視覚画像が得られるとは限らない。そこで本研究では、ロボットからの疎な視覚画像列をもとに視点位置推定を行う問題に焦点を当て、研究開発を行った。

#### 1-1) 疎な画像列に基づくSLAM

ロボットの疎な視覚画像列をもとに視点位置

推定を行う場合、視点位置のずれによる、見え方の違いが大きな問題となる。しばしば、視点位置のわずかな違いによっても、見え方の大きな違いが生じる。この、見え方の違いは、認識誤差の原因となる。この課題を解決するために、本研究では、典型的な「マンハッタン環境」に有効な、新しいSLAM技術のアプローチを提案した(図1)。マンハッタン環境とは、天井・床・壁など、互いに直交する三平面から構成される環境のことであり、屋内や都市など、人工環境に多くみられる。本研究の基本的なアイデアは、三次元マンハッタン環境を再構築し、この仮想環境を用いて、より精確な見え方予測を行うことにある。



単眼画像(左)からの三次元再構築(中)を行い、別視点の視覚画像(右)を生成する。

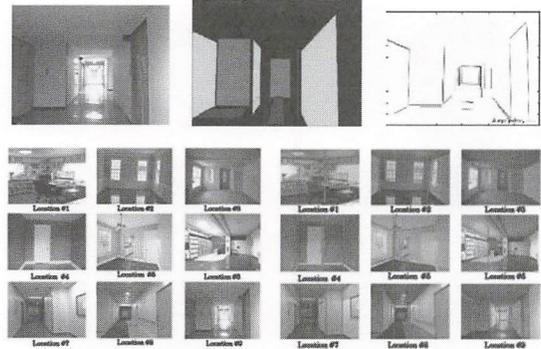
図1 認識パイプライン

本アプローチでは、三次元マンハッタン環境の候補を複数生成し、入力した視覚画像に最も当てはまりのよいものを採用する。具体的には、

- 1-1-1) 入力画像から、消失点推定を行い、三平面の法線を推定する方法
- 1-1-2) 入力画像の見え方をもとに、マンハッタン環境の候補を絞り込む方法の開発を行った。一方、マンハッタン環境の各候補に対し、入力画像との当てはまり度合いを評価する方法として、
- 1-1-3) 入力画像中の各画素について、三次元空間中の面の法線を推定する方法
- 1-1-4) マンハッタン環境を入力画像へ投影する方法
- 1-1-5) 法線画像とマンハッタン画像との比較により尤度を評価する方法

を開発した。以上の方法を統合し、図1に示す

ような三次元再構築を行うことに成功した。また、この三次元再構築の結果を用いて、視点位置推定を行う、簡便な方法を開発し、実験により、本方法の有効性を確認した(図2)。



入力画像(左上)から法線推定(中上)、構造推定(右上)を行う。疎な画像列(左下)に対し、三次元再構築を行う。

図2 三次元再構築

## 2) データベース(視覚検索)技術

監視画像データベースは、ロボットの移動観測にともない、逐次的に新規画像を記憶していくことが要求される。既存のデータベース技術の多くは、全画像列を所与とし、オフラインでデータベースを構築していた。これに対し、我々は、オンラインで新規画像を逐次的・リアルタイムに記憶・検索することのできる、逐次型データベースの研究開発を行ってきた。具体的には、確率的なハッシュ技術、LSH (Locality Sensitive Hashing) 技術を用いて、記憶画像を、記憶領域中のアドレス値へ変換する新しいデータベース技術を開発してきた。本研究では、この逐次型データベース技術を応用し、監視画像データベースの研究開発を行った。

監視画像データベースでは、記憶画像数の増大にともない、主記憶に占めるデータ量が膨大になるという課題があった。素朴な方法として、画像中の局所特徴(色、形状など)群を用いて、画像を表現する方法がある。しかし、この方法は、依然として、画像当り、数キロバイト程度の、膨大なデータ量がかかる。代表的な解決方法として、BOF (Bag-Of-Features) 法がある。これは、局所特徴群を、いくつかの種類(クラ

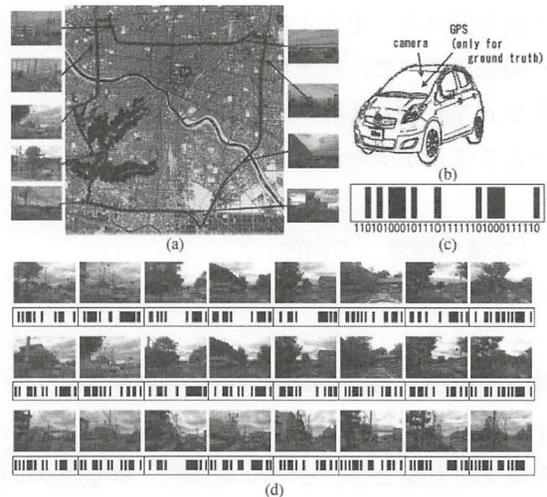
ス)へ分類した上で、クラスの出現頻度ヒストグラムにより画像を表現する方法である。この方法は、コンパクトではあるが、特徴の出現頻度だけに注目するため、特徴の空間配置を捉えることができないという問題がある。以上のように、いずれの方法も、データ量や検索時間の面で、一長一短がある。これに対し、本研究では、画像特徴の空間配置を捉えつつ、画像をコンパクトに表現する、新しい視覚特徴技術の研究開発を行った。

### 2-1) 視覚特徴のバイナリ表現

従来の視覚特徴技術は、ロボットが視覚画像を認識し、それに類似するものを記憶中から検索することに主眼を置いていた。一方、近年、ユーザインタフェースやネットワークロボットなど、様々な分野において、不特定多数のユーザやロボットが、視覚画像群を共有利用するアプリケーションが注目を集めている。これらの共有利用を伴うアプリケーションにおいては、従来の認識性能・検索性能に加えて、新たに、(a) 普遍性：普遍的であり、様々な作業環境（例：都市、自然）に有効であること、(b) 軽量性：軽量であり、記憶・送受に有効であること、という二つの要求を満たす新しい視覚特徴技術が求められる。

本研究では、上記要求を満たすものとして、シーンの Gist 特徴に注目した。一般に、ヒトの視覚システムは、シーンの空間表現を瞬時に獲得することができる。この空間表現は、シーンの要点 (Gist 特徴) と呼ばれ、たとえば、シーンの意味 (例：道路がある)、主要な物体 (例：道路の両側に高い壁がある)、大域的な構造 (例：視野の広がり) など、シーンに関する豊富な情報を含む。これは、Gist 特徴のコンパクト性および普遍性を表している。近年、コンピュータビジョンの分野において、この Gist シーン特徴を画像処理技術として工学的に実装する試みがなされている。Oliva らは、画像の低空間周波数成分を抽出するフィルタを用いて、Gist シーン記述子を開発した。さら

に、多層グラフィカルモデルに基づく次元削減技術、セマンティックハッシング (SH) を利用して、この Gist シーン記述子を圧縮し、コンパクトな 32 bit の 2 値 (バイナリ) 表現、圧縮 Gist (以下、cGist) へ変換する方法を開発した。この Gist および cGist は、最近、画像補完や画像検索などの応用において、最先端の認識性能・検索性能を達成している。



(a) 実験環境。(b) ロボット。(c) バイナリ視覚特徴。(d) 視覚特徴列。

図3 cGistに基づく視覚検索

本研究では、ロボットが移動観測中に取得する時系列 cGist に基づく視覚検索問題を考える。Gist を認識タスクに用いた研究事例として、上記の画像補完や画像検索があるが、これらは、単一画像の Gist のみに基づいて認識を行っていた。本研究は、時系列 cGist を用いるため、単独の cGist で得られる (高々 32 bit) よりも多くの情報量を利用することができる。その一方で、時系列 cGist の持つ冗長な情報量を利用して、さらなるコンパクト性の向上を期待できる。以上の観点から、時系列 cGist に基づく自己位置推定システムを提案することを目的として研究開発を行った。

実験プラットフォームとして、視覚センサを搭載した自家用車を利用し、街中の約 20 km の道路を、0-40 km/h の速度で走行し、視覚画像データベースを構築した。多くの既存研究のよ

うな、内界センサや GPS などの位置計測センサを前提としない。事前に、各々の視点について、32ビット cGist を記録し地図とする。この地図に基づき、標準的なパーティクルフィルタを用いて推論を行う。本実験を通して、cGist 特徴の多様性、出現頻度、視覚特徴としての顕著性、従来法との性能比較など、各種の調査を行った。さらに、ビットマスクを用いて、cGist の冗長なビットを間引き、さらなる情報圧縮を試みた。その上で、ビット数と推定性能の関係を調べた。以上の実験により、コンパクトな cGist 地図を用いて、高性能の視覚検索を行えることが明らかとなった。

#### [今後の課題, 方向性]

本研究では、監視画像データベースに有効な、疎な画像列、および、軽量の視覚特徴を特色とする新しい認識技術を開発した。今後、これらの成果を基盤とし、さらなる疎性・軽量の向上に向けて研究開発を行っていきたい。

#### [成果の発表, 論文等]

- 1) Dictionary-based Map Compression Using Modified RANSAC Map-Matching, T. Nagasaka and K. Tanaka, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Biomimetics (2010)
- 2) Multi-Scale Bag-Of-Features for Large-Size Map Retrieval, K. Kondo and K. Tanaka, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Biomimetics, 2010.
- 3) Robot Self-Localization Using Simulated Experience, T. Nagasaka, K. Tanaka, T. Ishimaru and I. Uesaka, Proc. Int. Conf. Instrumentation, Control and Information Technology (2010)
- 4) Map Building by 3D Map Matching, T. Ishimaru, K. Tanaka, K. Saeki and T. Daitou, Proc. Int. Conf. Instrumentation, Control and Information Technology, 2010.
- 5) LSH-RANSAC: Incremental Matching of Large-Size Maps, K. Tanaka, K. Saeki, M. Minami and T. Ueda, IEICE Trans. Information and Systems, E93-D(2), pp.326-334 (2010)
- 6) Visual Robot Localization Using Compact Binary Landmarks, K. Ikeda and K. Tanaka, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA), pp.4397-4403 (2010)
- 7) Scalable Robot Localization Using Incremental Map-Matching Techniques, Takaehi Ueda, Kanji Tanaka, J. Computational Science and Technology, 4 (1), pp.1-10 (2010)

# 人間支援機器の高能率化のための触覚信号処理

## Haptic Signal Processing for Streamlined Operation of Human Support Robot

1091016



研究代表者 埼玉大学大学院 理工学研究科 助教 辻 俊 明

### [研究の目的]

人間支援ロボットは特に生活分野等における今後の発展が期待されている。しかし人間-機械系の協調作業時に生じる強度の力学的干渉の処理方法が重要な課題となっている。特に実用化を想定した場合には安全性の確保が不可欠である。安全性確保のための衝撃力緩和制御においては力覚センサが実装されることが多いが、一般的な力覚センサの検知領域は限られている。人間との接触はロボットの全身あらゆる箇所が発生しうることから、安全性の確保には、ロボットの力検知領域を全身に拡張しなければならない。これを全身力覚化と呼ぶこととする。また、外力ベクトルのみでなく、外力の作用点の位置が計測できる場合には全身触覚化と呼ぶこととする。

近年では触覚センサアレイのように曲平面上の力分布を計測するメカニズムが広く応用されているが、センサデバイスや配線の数が増大となり、実用上の大きな課題となっている。筆者らは外殻にセンサおよび配線を配置する必要のない全身型触覚センサ「ハプティックアーマ」を開発し、力覚センサのみで接触情報を同定できることを示している。また、本センサでロボットを被覆することによって、全身あらゆる箇所において衝撃力緩和が可能な安全技術を開発している。ロボットが全身触覚化された場合には、ロボットの安全性が向上されるばかりで

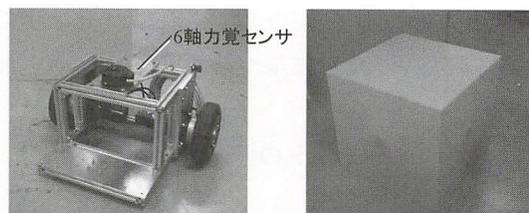
なく、ロボット全身が触覚インタフェースとしての機能を持つ。

本研究課題では本技術に基づき、触覚センサが獲得する信号から人間の指令や操作力のみを確実に抽出・選別する信号処理技術を開発する。そして抽出された触覚情報を人間の命令認識に利用することにより、人間支援ロボットの操作性が画期的に向上されることを示す。触覚センサに基づく安全技術に、触覚インタフェースの高度化をもたらす信号処理技術を加えることによって、安心かつ高能率な人間支援機器の開発技術が築かれると期待される。

### [研究の内容, 成果]

#### 実験機の構成

デバイスが外殻に配置される必要のない甲殻型触覚インタフェース、ハプティックアーマを搭載した移動ロボットの写真を図1に示す。本センサは甲殻状のエンドエフェクタとセンサデバイスで構成される。エンドエフェクタは成型



a) センサデバイスと骨格部

b) エンドエフェクタ

図1 ハプティックアーマを搭載した移動ロボット

プラスチック等の単なる部材であり、センサデバイスに外力を伝達するはたらきを持つ。また、甲殻形状で全身を覆うため全ての外力はここに作用する。エンドエフェクタはセンサデバイスを介してロボットに固定され、ロボット本体に直接触れない。すると全ての外力の総和がセンサデバイスに集約されて伝わることになる。本研究ではセンサデバイスに商用の6軸力覚センサを用いる。

エンドエフェクタは3mm厚のアクリル板5枚を接合したものであり、車輪の接地する床面方向以外を全て被覆する立方体形状となっている。ただし、必ずしも外殻形状を立方体に限定する必要はない。外殻部は支持部材を介して移動ロボット上の6軸力覚センサに固定されている。本機構はロボットを覆う甲殻の働きを持つ。そしてそれと同時に力検知の働きを兼ねることから「ハプティックアーマ (haptic armor)」と呼ばれる。

次に6軸力覚センサの応答値に基づいて接触情報(外力のベクトルおよびその作用点)を計算する方法を示す。まず、式(1)にエンドエフェクタに作用する力の平衡を表す。

$$\begin{aligned} F^e + F^s &= w^c \dot{P}^o - w^c G \times \dot{\phi} \\ G &= P^s - P^o \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $F^e$ は3軸の外力ベクトル、 $F^s$ は力覚センサから支持点に作用した3軸の力ベクトルを表す。また、 $\dot{P}^o$ 、 $\dot{\phi}$ はロボットの移動に伴い発生する支持点の加速度および角加速度ベクトルを表し、 $P^s$ 、 $P^o$ はそれぞれエンドエフェクタの重心と支持点の位置を表す。 $w^c$ はエンドエフェクタの質量である。エンドエフェクタの質量 $w^c$ と重心位置 $G$ が既知であれば、センサで検出された $\dot{P}^o$ 、 $\dot{\phi}$ 、 $F^s$ に基づいて $F^e$ がもとめられる。

次に力のモーメントの平衡式(2)を示す。

$$F^e \times (P^e - P^o) + M^s = w^c G \times \dot{P}^o + I^c \dot{\phi} \quad (2)$$

ここで $P^e$ は接触点の位置を、 $M^s$ は力覚センサ

から作用した支持点周りの力のモーメントを表す。そして $I^c$ はエンドエフェクタの慣性モーメントを表す。

本センサはセンサアレイを持たないため、圧力分布を計測することはできない。しかし、力の作用点を一つの圧力中心点で代表すれば、作用点を同定することが可能である。式(2)を展開すると以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} p_z^e &= \frac{-M_x^o - F_z^e P_y^o}{F_y^e} + P_z^o + \frac{F_z^e}{F_y^e} P_y^e \\ &= \frac{M_y^o - F_x^e P_x^o}{F_x^e} + P_z^o + \frac{F_z^e}{F_x^e} P_x^e \end{aligned} \quad (3)$$

ここで添え字の $x, y, z$ はデカルト座標系の各軸を表す。そして、式中の多くの変数のうち、 $F_x^e, F_y^e, F_z^e, M_x^o, M_y^o$ の5つが式(1)と式(2)に基づいて導出可能であり、 $P_x^o, P_y^o, P_z^o$ の3つが位置計測のセンサから得られる。すると式(3)は、未知の情報である $P^e$ を $F^e$ に平行な直線上に拘束する式となる。力センサの外殻形状が既知であれば、外殻を構成する面と式(3)で得られる直線の交点を求めることによって接触点 $P^e$ が同定可能となる。

以上の原理により、6軸力覚センサの応答値から接触点の位置が同定される。外力ベクトルのみならず外力の作用位置が同定可能であることから、ハプティックアーマは一点接触時には触覚インタフェースとしての機能を有することとなる。

### 命令認識の手法

本研究課題では、操作者がロボットの触覚インタフェースを指でなぞり、その軌跡から命令の内容を認識する方式を提案している。各命令を遂行するための規定の動作モードが実装されており、ロボットは命令認識後に該当のモードへ移行する。原理的にはエンドエフェクタの全ての面で認識が可能であるが、本稿では簡単化のため操作者が入力しやすい天板のみで検証を行う。本研究では6種類の動作モードを規定し

ており、それぞれのモードに移行するためには、各モードに対応して記号化された命令の入力パターンを与える必要がある。

図2に命令認識のフローチャートを示す。本アルゴリズムはなぞり動作の終了時に起動し、命令認識番号  $N_{com}$  を出力し、命令実行用パラメータを計算して終了する。接触点の軌跡が直線か否かはなぞり動作の面積  $S$  で、往復軌道か否かは軌道の長さ  $r$ 、 $R$  の値に基づいて判断する。また、軌跡の角度  $\psi$ 、接触時間  $t_c$ 、始点の位置  $P_s$  を命令認識の判断基準としている。

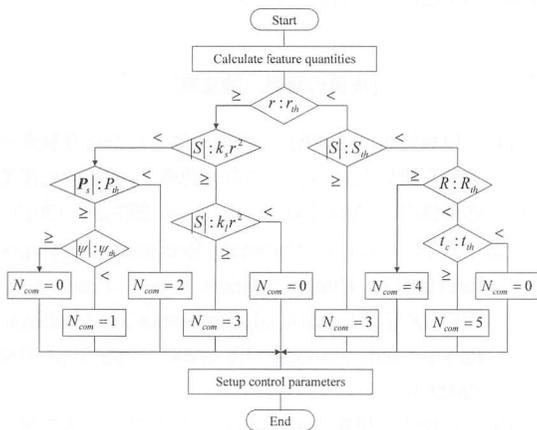


図2 命令認識のフローチャート

### 実験結果

実機における命令認識の結果を以下に述べる。なぞり動作によって直進の命令を2回入力したときの応答と接触点の軌道を図3に示す。図中上部の長方形の領域はハプティックアーマの天板に対応しており、その中に描かれた黒い線は接触点の軌跡を表す。また、グラフ中の鉛直点線は動作モードが切り替わった時間を表している。いずれの場合も進行方向へ接触点が移動するよう、なぞり動作を行ったが、2回目においては長い軌道を短い時間で与えたところ、直進距離が1回目比べて長くなり、速度も高くなった。このことから、直進距離や速度をなぞり動作の軌道に基づいて調整できることが確認された。

図4に荷物を搭載したときのパワーアシスト

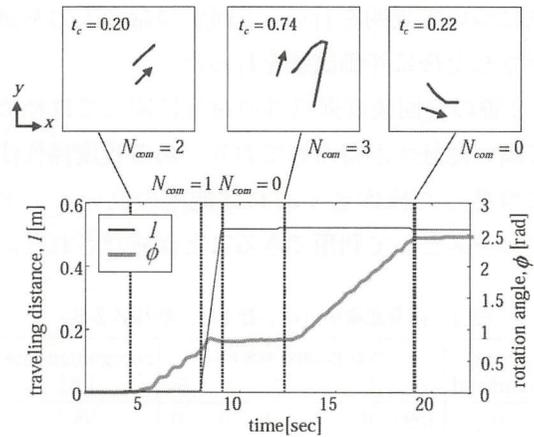


図3 直進の命令入力時の応答

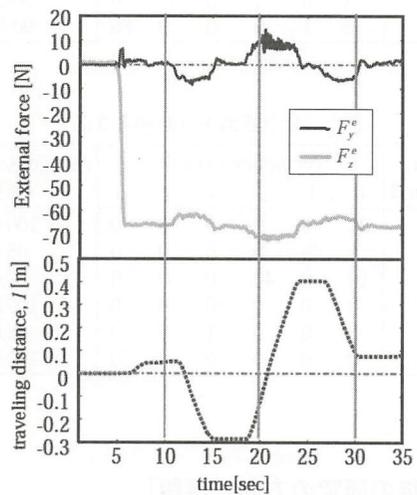


図4 パワーアシストの実験結果

の実験結果を示す。ロボットは約 6.7 kg の荷物を搭載して 0.1 sec 経過後にパワーアシストのモードへ移行し、その結果前後方向の外力に倣って前後に移動した。小さい操作力でロボットが前後に移動していることからパワーアシスト動作が実現されていることが確認された。また、外力センサと命令認識インターフェースとしての特性を両立していることが確認された。

全ての命令の入力パターンについて、認識率の評価を行った。その結果を表1、2に示す。表1は初心者4名、熟練者3名による試験結果であり、表2はそのうち熟練者の結果のみを抽出したものである。ここで熟練者とは、本触覚インターフェースによる命令認識を20分間練習した者を指す。初心者に対しては命令の入力方

法について説明を行い、1回ずつ命令入力を試行させた後に評価試験を行った。

2番の巡回後直進以外の命令に関しては極めて高い認証率が得られており、ある程度操作法に習熟した操作者であれば能率の高いインタフェースとして利用できることが確認された。

表1 命令認識率（初心者4名，熟練者3名）

input command	recognized result						recognition rate [%]
	0	1	2	3	4	5	
0	159	0	3	0	0	0	98.2
1	17	78	0	0	0	0	82.1
2	31	0	64	0	0	0	67.4
3	3	0	0	91	0	1	95.8
4	4	0	4	5	82	0	86.3
5	5	1	0	0	3	86	90.5

表2 命令認識率（熟練者3名）

input command	recognized result						recognition rate [%]
	0	1	2	3	4	5	
0	81	0	0	0	0	0	100.0
1	1	49	0	0	0	0	98.0
2	10	0	40	0	0	0	80.0
3	0	0	0	50	0	0	100.0
4	0	0	0	1	49	0	98.0
5	0	0	0	0	0	50	100.0

[今後の研究の方向，課題]

本提案課題では触覚に基づく命令認識技術を開発し、高い能率が実現されることを確認した。今後の更なる汎用化のためには一般的な環境で汎用的に用いるための精緻な理論的・実験的検

証を今後実施する必要がある。そして触覚コミュニケーションの帯域がどの程度向上されるかを実験で定量的に評価する必要がある。

触覚コミュニケーションは視聴覚に次ぐ新たなモダリティとして注目されているが、他のモダリティと異なり、作用反作用の法則に代表されるように入出力が同時に発生する双方向性という制約を有する。双方向性により触覚制御系の解析は複雑になるため、触覚情報を用いた認識技術は未確立である。今後の研究により触覚認識技術が確立され、ロボットの動作との相関が明らかになれば、触覚モダリティの統一的設計論への発展が期待される。

[成果の発表，論文等]

- [1] 伊藤達也，辻俊明：“低次元化された全身触覚センサを用いたロボットの命令認識,” 電気学会産業応用部門誌, Vol. 130-D, No. 3, pp.293-299 (2010)
- [2] T. Tsuji, T. Ito: “Command Recognition by Haptic Interface on Human Support Robot,” Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2009), pp.3178-3183 (2009.10)
- [3] 辻俊明, 伊藤達也：“触覚インタフェースを用いた命令認識によるロボット操作の能率化,” 平成 21 年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集, Vol. 2, pp. 453-458 (2009)
- [4] 伊藤達也，辻俊明：“全身触覚センサに基づく命令認識と安全化処理の実装,” 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, 3C2-05 (2009)

## 海馬 — 前頭前野神経活動を基に駆動する脳 — 機械 インターフェースの基礎的検討

Analysis between the hippocampal and prefrontal neuronal activities for the brain-machine interface

1091020



研究代表者

聖マリアンナ医科大学  
生理学 (統合生理)

講師 藤原 清悦

### [研究の目的]

近年、脳 — 機械 — インターフェース (Brain-machine Interface: BMI) の研究が盛んに行われている。これらの研究の多くは、運動野、頭頂葉等、運動に関与する部位の神経活動を利用して行われている。認知系は、意識下のコントロールをより受けやすいため、運動系の信号とあわせて、正確な BMI を実現するのにも有用であると考えられる。

前頭前野 (Prefrontal Cortex: PFC) と海馬 (Hippocampus: HPC) は、認知と実行機能に対して重要な領域と考えられている。そのため、上記の BMI を実現するための信号源の候補となり得る。しかしながら、BMI の信号として使用する事を念頭に置いた前頭前野および海馬の神経活動に関する報告は少ない。

本研究では、前頭前野と海馬の神経活動を BMI の信号として使用する事を念頭において、その神経活動から動物の行動が予測できるか否かを検討するために、遅延付学習課題 (Delayed reinforcement task: DRF) を遂行中のラットの神経活動を解析し、課題の成否が予測できるか検討した。

### [研究の内容, 成果]

電極の埋め込み: ラットをペントバルビタールで麻酔 (0.15 mg/kg) し、脳定位装置に固定

した。麻酔は必要に応じて追加した。差動記録のために双極のタングステン電極 (A-M Systems, 5M $\Omega$ ) から成る電極束を2セット準備した。脳定位座標に基づき、1つは海馬の CA1 region (Bregma site より尾側 3.2 mm, 左外側 5.0 mm, 脳表面深度 2.5 mm) に刺入し、もう1つは比較のために前頭前野の Prelimbic region (Bregma site より吻側 3.2 mm, 左外側 0.8 mm, 脳表面深度 3.2 mm) に刺入して神経活動電位が十分に記録できる箇所ではレジンを (GC Corporation) を用いて固定した。電極が十分に固定されたのを確認した後に電極と IC ソケット (DIP-8) を半田付けし、レジンを用いて固定した。術後、動物が十分に回復してから訓練を行った。

訓練: 遅延付学習課題 (Delayed reinforcement task: DRF task) はスキナー箱を用いて行われた。スキナー箱はレバーと給餌器が装着された箱で、種々の条件で動物がレバー操作すると給餌されるシステムである。

DRF 課題の模式図を図1に示す。まず、ラットが自発的にレバーを押す (R1) と、4秒間の待ち期間 (Waiting phase) が開始される。4秒間レバーが押されなかった場合、その時点で条件刺激となるブザー (3 kHz, 70 dB) が2秒間提示される。その間にレバーが押された場合には報酬が与えられ、これを正解試行 (Correct trial) としてカウントした。また、Waiting phase の間にレバーを押す、若しくは条件

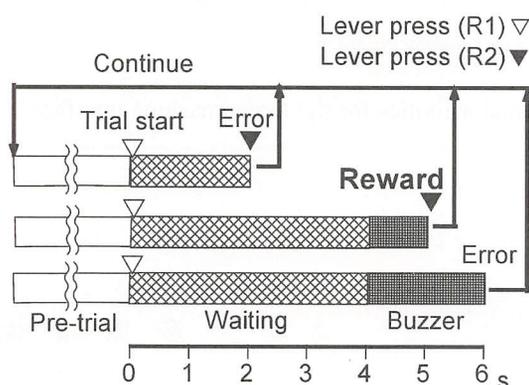


図1 訓練の模式図

刺激提示時にレバーが押されなかった場合には、報酬が与えられずその試行はリセットされ、これを不正解試行 (Incorrect trial) としてカウントした。DRF 訓練は 200 回の正解試行が得られるまで行い、これを 5 日間継続して行った。

DRF 課題は、ラットの自発的なレバー押し (R1) と報酬の間に遅延時間が設定されている課題で、ラットは、遅延時間中にはレバーを押すことを禁止される。(もしレバーを押したら、報酬は与えられない)。はじめのレバー押しの直後にレバー押しが禁止されるため、この課題を成功させるためには、遅延期間中にレバーを 1 回押した経験 (記憶) を保持し続ける事が要求される。そのため、記憶に関連する神経活動が記録できる可能性が高い。

**神経活動の記録：**訓練時間中の神経活動を全て連続的に記録した。記録された神経活動は、ヘッドアンプおよび差動増幅器 (日本光電 MEG-2100) を用いて帯域周波数 0.5-3 kHz 間で 5000 倍に増幅され、AD 変換ボード (DAQ6036E, National instruments) を通じて 20kHz のサンプリング周波数でコンピュータに取り込んだ。記録された神経活動は、自作のプログラム (LabVIEW) を用い、オフラインで解析を行った。70% 以上の正解率を示した訓練 5 日目のデータを解析に用いた。

**課題遂行中の神経活動：**図 2 に記録された神経活動の生データを示す。ここでは、前頭前野の

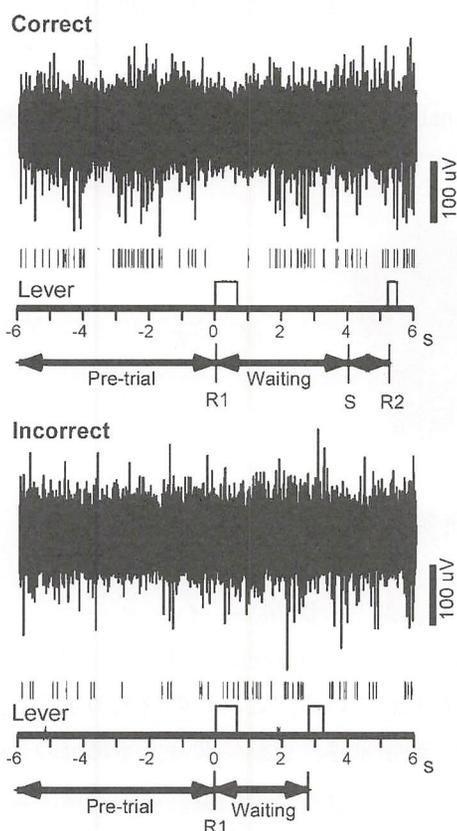


図2 遅延付学習課題遂行中の前頭前野の神経活動

神経活動を表示した。上段が正解試行、下段が不正解試行である。

各々のデータの下には、検出したスパイクをラスター表示した。正解試行では、R1 の前後の区間でスパイク数が減少しているが、不正解試行では、顕著な変化は見られなかった。次に、神経活動の変化を定量的に観察するために、正解試行 (n=132), 不正解試行 (n=56), それぞれにおける神経活動について、スパイクヒストグラムを作成することにより平均発火頻度を求めた。bin のサイズは、10, 50, 100, 500, 1000 ms で変化させて、発火頻度の変化が一番分かりやすい 100 ms を選んだ。図 3 に 1 匹分のデータを示す。

前頭前野 (PFC) の平均発火頻度について、正解試行時には R1 の周囲で減少し、不正解試行時には大きな変化を示さなかった。海馬 (HPC) の平均発火頻度については、正解試行、不正解試行共に R1 の 2-3 秒前から大きく減少した。このことより前頭前野の平均発火頻度は、

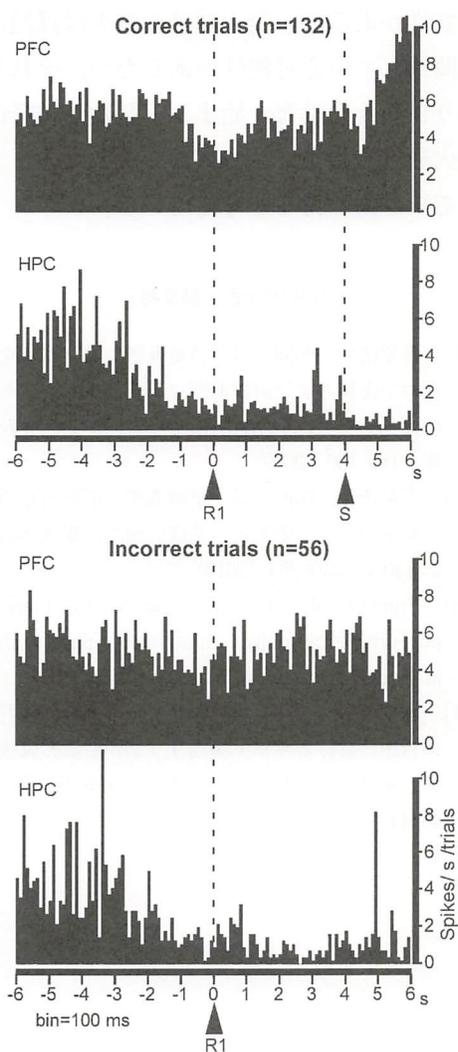


図3 スパイクヒストグラム

正解、不正解によって異なる傾向を示す事が示唆された。R2の時刻については、レバー押しの時刻が一定ではない（ブザー呈示期間（2s）中に押せばよい）ため、図中には示さなかった。

統計的な解析を行うために、図3のデータをR1時刻より前6秒間を「Control」期間、R1時刻から前後0.5秒を「Lever」期間として、それぞれの期間で平均した平均発火頻度を求めて比較を行い、 $\chi^2$ 乗検定を行った（図4上）。前頭前野では、正解試行でLever期間とControl期間の平均発火頻度に有意な差が見られた（ $p < 0.001$ ）が、不正解試行では有意な差は見られなかった（図4左）。海馬では両方の試行において、Lever期間とControl期間の平均発火頻度に有意な差が見られた（ $p < 0.001$ ）

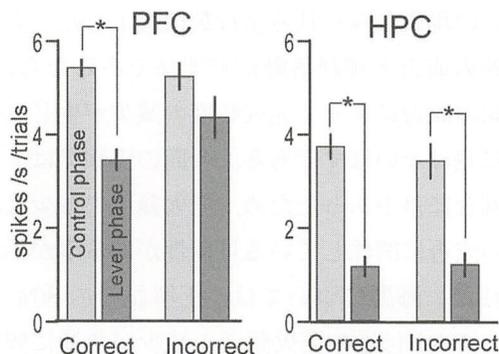


図4 平均発火頻度の比較

（図4右）。

神経活動による課題の成否の予測：これまでは、神経活動の平均値を求めて解析を行ってきたが、BMIを考慮した場合、1試行で得られる信号から推定を行わなければならない。そのため、Lever期間の発火頻度がControl期間より減少するか否かを、1試行毎に調査し、どの程度予測できるか2匹のラットについて検討した。

Rat#1の前頭前野では、正解試行において、Lever期間の発火頻度がControl期間より減少する試行が81%を占めたが、不正解試行においては、59%を占めるに過ぎなかった。また、同様の解析を海馬の神経活動に関して行ったところ、正解試行では、83%、不正解試行では80%を占めた。Rat#2において、前頭前野ではRat#1とほぼ同様な結果が得られたが、海馬では、正解試行において、Lever期間の発火頻度がControl期間より減少する試行が79%、不正解試行においては57%を占めた。これらの結果を基に、発火頻度が、Control>Leverで正解となると仮定した場合の予測の正確度を求めたところ、前頭前野を用いた場合、Rat#1では69.1%、rat#2では72.8%となった。また、海馬を用いた場合はそれぞれ63.8%および74.3%となった。これらの予測について $\chi^2$ 乗検定を行ったところ、すべての結果について有意となった（ $p < 0.001$ ）。

まとめ：前頭前野では、Rat#1とRat#2共に大部分の正解試行でR1時刻付近における発火頻度の減少が見られた。また、不正解試行で

はこの現象がみられる試行数は低下した。もし、課題の成否と神経活動が無関係であるならば、課題の成否によって発火頻度の減少が生じる割合に差はないはずである。今回の実験では、この割合に差があったため、発火頻度の減少は課題の成否に関係している可能性がある事が示めされた。海馬については、正解試行の 80% において R1 付近の発火頻度の減少が共通に観察されたが、不正解試行においては Rat#1 と Rat#2 で異なる結果となった。この原因は、電極刺入部位の違い、動物の学習履歴の違い等によるものと考えられる。

今回の結果では、前頭前野の発火頻度の減少と、海馬における発火頻度の減少には、明白な相関は無かった。そのため、今回は前頭前野と海馬について別々に解析を行ったものについて検討を行った。

#### [今後の研究の方向・課題]

本実験を応用して、発火頻度の増減で機器を制御しようとしたときに意図しない動作が起こ

る可能性があるが、発火頻度の減少は課題の成否に関係している可能性があるため、それを手がかりに新たな学習が始まり、動物が神経活動の発火頻度を指標にして機器を制御できるようになる事もあり得ると考えている。

#### [成果の発表・論文等]

- [1] 藤原清悦, 明間立雄, 伊崎義憲: 覚醒下ラットにおける海馬および前頭前野マルチプルユニット活動の関係. 第 24 回生体・生理工学シンポジウム論文集, 165-166 (2009)
- [2] 藤原清悦, 明間立雄, 伊崎義憲: 前頭前野の神経活動を用いた行動推定の基礎的検討, 電気学会論文誌 130-C: 249-253 (2010)
- [3] Fujiwara SE, Akema T, Izaki Y.: Rat hippocampus-prefrontal multiple units and synaptic efficacy in vivo. Neuroreport, 21: 1003-1007 (2010)
- [4] 藤原清悦, 明間立雄, 伊崎義憲: 遅延付学習課題遂行中におけるラット海馬リップル活動と成績の関係. 第 25 回生体・生理工学シンポジウム論文集, 43-44 (2010)

## 圧電薄膜を用いた非侵襲的生体計測 MEMS センサの開発

Non-invasive bio MEMS sensor consisting of piezoelectric films

1091023



研究代表者

名古屋工業大学 機械工学科

助教

柳谷 隆彦

### 【研究の目的】

本研究では MEMS センサ技術を駆使して、生体検査用センサデバイスを開発することを目的としている。具体的には尿などからのマーカー反応を質量付加、粘性、導電率の物理量から計測する液体用センサ基盤技術を開発する。そのために本研究では横波型表面波を用いた液体中導電率センサの実現を目指す。

物質に圧電分極が存在するときはしなないときに比べて硬くなる。このことから、もし物質に導電性があると圧電分極が短絡され音速は遅くなる。表面に伝搬する音波（表面波）の場合は、伝搬路に導電物質を乗せると表層の内部電界が短絡され、導電性の大きさに依って表面波の速度が変化する [1]。このセンサ原理では物質の表面の質量付加と粘性に加えて「導電率」の変化を測定できる。ここで、弾性表面波には二種類あり、変位方向が表面に垂直な「レイリー型」と表面に平行な「横波型」がある。生体などの液相の物理量を測定する場合には、レイリー型では液体中に音波のエネルギーが漏洩してしまい伝搬できないため、漏洩のない横波型が必要となる。

一般的に表面波センサは圧電単結晶基板を用いて作製される。これに対して圧電薄膜を使えば、さまざまな種類、形状の基板上にセンサを作製することができる。例えばシリコン集積回路からなるセンサ駆動回路とセンサのワンチッ

プ化や、シリコン MEMS との融合が期待される。これまで横波型表面波の励振は単結晶基板でしか達成されておらず、「横波型表面波を励振する薄膜」は実現されていない。研究代表者は、結晶が持つスパッタ率の異方性を利用すれば、本来の c 軸方向の成長を一方向のイオン照射により抑制できることをつきとめた。これによりはじめて面内配向 ZnO 膜、AlN 膜の作製に成功し、高効率なバルクの横波励振を達成している [2-4]。

一方で、これらの膜は理論的に横波型表面波も励振するため、表面波励振用電極 (IDT) を作製できれば、これまで難しかった薄膜を使った横波型表面波の励振が実現すると考えられる。

### 【研究内容、成果】

電気的特性を測定する SAW センサの感度は電気機械結合係数 ( $K^2$ ) に比例するため、高い  $K^2$  を持つセンサ基板が必要となる。本研究ではさまざまな構造において  $K^2$  の理論解析を行った結果、ZnO 膜 ( $0^\circ, 90^\circ, \psi$ ) / IDT (くし型電極) / 石英基板構造 (図 1) における  $\psi = 55^\circ$ 、 $H/\lambda = 0.21$  において  $K^2$  が最大となり、3.4% となることが判った。

さらに本研究では、この ZnO 膜 ( $0^\circ, 90^\circ, \psi$ ) / IDT / 石英基板構造を実際に作製し、 $\psi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  と変化させた際の  $K^2$  を評価し、理論解析結果と比較した。また、液体中での横波

型表面波の励振実験を行った。その結果、初めて薄膜を用いて横波型表面波を励振させることに成功した。次にデバイスに液体測定プールを作製し、液体中の導電率の測定を試みた結果、表面波の音速変化から液体の導電率を検出することができた。以下にその結果の詳細について述べる。

・横波型表面波センサデバイスの作製 [5]

石英基板上に RF マグネトロンスパッタ法を用いて c 軸平行配向 ZnO 膜を成膜した。 $\psi$  角 =  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  (図 1 参照) と変化させた 4 種類の試料を作製した。各試料の膜厚はそれぞれ 4.5~5.0 nm である。次に成膜した基板に Al 膜を真空蒸着し、フォトリソグラフィ技術を用いてトランスバーサル型 IDT を作製した。IDT (くし型電極) の構造は、電極指間隔 ( $\lambda/2$ ): 10 nm, 開口長: 5 nm, 伝搬路長: 2 nm および 7 nm, 電極指対数: 54 対とした。今回作製したデバイス全体の構造を図 1 に示す。また作製した IDT の写真を図 2 に示した。

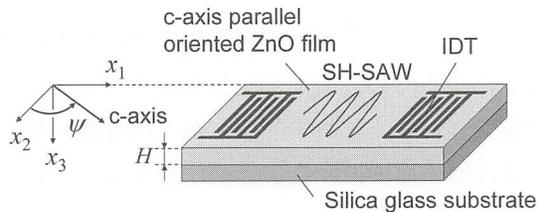


図 1 ZnO 膜 ( $0^\circ, 90^\circ, \psi$ )/IDT/石英基板構造

なお、試料の配向性は XRD パターン、極点図により評価 [2-4] し、c 軸平行配向 ZnO 膜が形成されていることを確認している。

・横波型表面波センサデバイスの電気機械結合係数 (感度) [5]

感度の大きさの指標となる電気機械結合係数  $K^2$  を評価するためにネットワークアナライザを用いてデバイスの反射特性と透過特性を評価した。これにより IDT の反射特性から横波型表面波の放射コンダクタンスとサセプタンスを求め、寄生成分を除去し、スミスの等価回路モデルによる解析結果から  $K^2$  を見積もった。

図 3 (b) に  $H/\lambda=0.21$  の各電極配置 (図 3

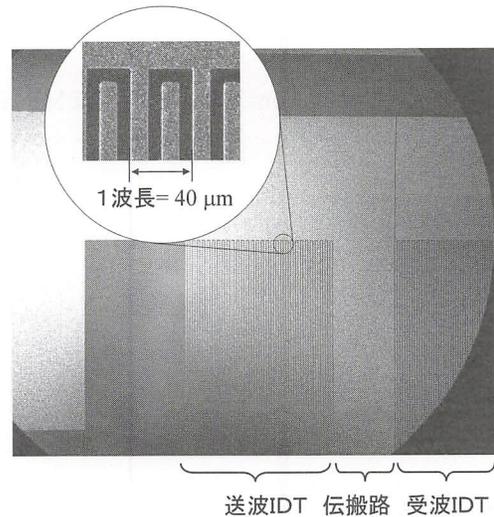


図 2 IDT (くし型電極部) の拡大写真

(a) に関する  $K^2$  を示す。 $\psi=30^\circ, 90^\circ$  付近で  $K^2$  は最小値となり、 $\psi=55^\circ$  で最大値となることがわかる。Type A, B の  $K^2$  が Type C, D に比べて高くなる理由として、電界の方向が挙げられる。Type A, B の場合は短絡電極がないため、SH 型 SAW の伝搬方向に平行な電界が支配的となる。

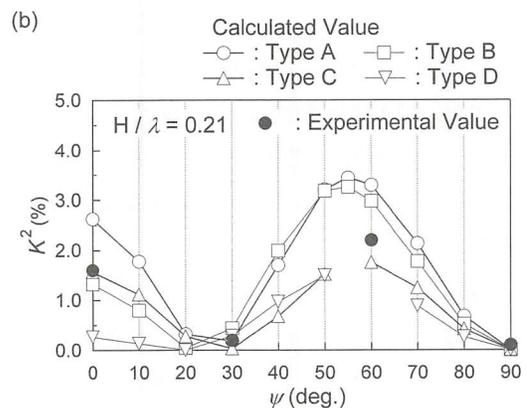
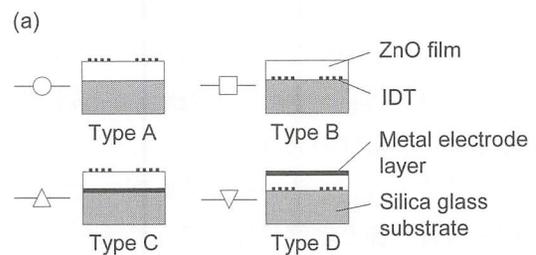


図 3  $H/\lambda=2.1$  における、横波型表面波 (感度) 電気機械結合係数  $K^2$  の角度依存性

逆に Type C, D は短絡電極があるため、伝搬方向に垂直な電界が支配的となり、 $K^2$ は小さくなる。

・横波型表面波の液体中励振 [5]

次に感度の大きさの指標となる電気機械結合係数  $K^2$  が最も大きかった  $\varphi=55^\circ$  のデバイスを作製した。図4に示すようなこの上にシリコンゴムから成る液体測定用プールを作製し、液体中の横波型表面波励振を試みた。図5に実際に作製したセンサデバイスの写真を載せた。図6に示すようなネットワークアナライザによる透過特性評価系により、液体中の横波型表面波励振を観測した。その結果を図7に示す。デバイスでは通常のレイリー型表面波とSH型SAWの両方の波が励振される。空気中では二つの波が励振されていることが確認できる。これに対して液体中では通常のレイリー型表面波はエネルギーが液体に漏洩してしまい伝搬しないのに対して、横波型表面波は液体中においても損失なく伝搬していることが確認された。

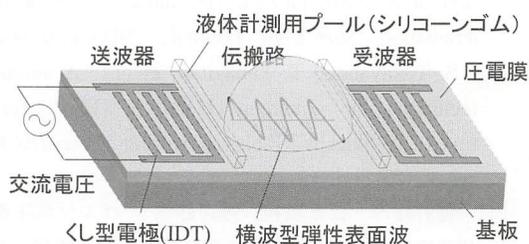


図4 作製したセンサデバイスの概略図



図5 作製した小型センサデバイスの写真

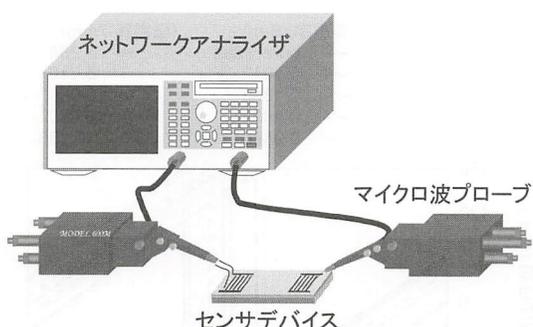


図6 センサデバイスの評価系

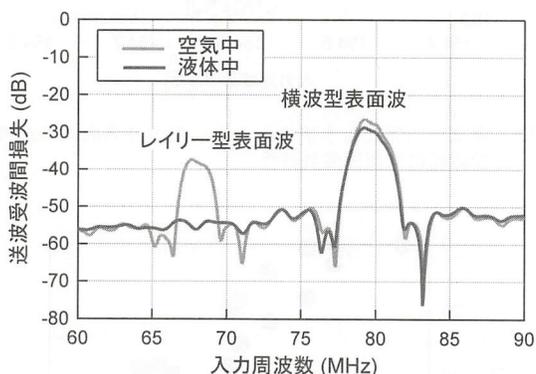


図7 通常のレイリー波と横波型弾性表面波の励振と伝搬特性

・液体中導電率センサの試作

次にセンサの導電率検出特性を調べるために、あらかじめ導電率が既知の濃度の異なる塩化カリウム水溶液を液体測定用プールに導入し、横波型弾性表面波の伝搬特性を測定した。図8に導電率の異なる水溶液中の横波型弾性表面波の送波受波間の位相一周波数特性を示す。まず各水溶液において、液体中においても位相ひずみのほとんどない直線的な特性が得られていることがわかる。さらに導電率の増加とともに位相角は減少し、予想どおり表面波の音速が低下していることが確かめられた。これは冒頭で述べたように、表面波伝搬に伴って生じる圧電分極による電界が液体の導電性により遮蔽され、圧電効果により実効的な弾性定数が低下したためである [1]。

図9に図8から読み取った位相差を液体の導電率を横軸としてプロットしたものを示す。青色プロットを見ると導電率の増加とともに顕著に音速が低下し、横波弾性表面波音速から導電

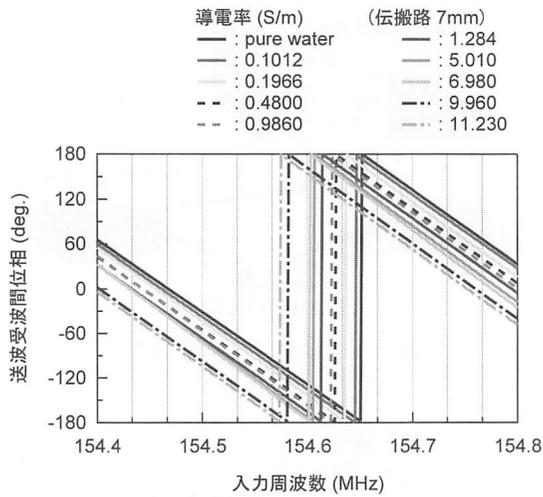


図8 導電率の異なる水溶液中の横波型弾性表面波の送受波間の位相周波数特性

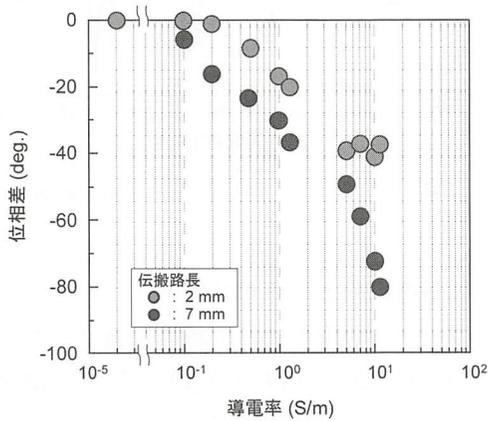


図9 導電率の異なる水溶液中の横波型弾性表面波の純水を基準とした位相差

率を明確に検出できていることがわかる。また伝搬路2 mmと短かくしたデバイスの位相差を赤色プロットで示す。伝搬路7 mmのものとは比べると、長距離を伝搬させて方が位相差を大きくとることができ、感度を稼げることがわかる。

この結果から7 mm以上のさらに長い伝搬路のセンサを作製すれば、特性の向上が期待でき

るが、音波の回折や電極での反射・散乱の影響により、位相の直線性も劣化するため、本実験の伝搬路7 mm程度が最適と思われる。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では、薄膜を使った横波弾性表面波の液体中での送受波に初めて成功した。さらに表面波音速から液体の導電率を検出できることを示した。このセンサでは電極構成によって導電率の他に液体の質量付加、粘性と誘電率を測定できる。今後これらの物理量の検出により尿などからのマーカー反応を非侵襲的に測定できる小型な生体情報検出センサの開発を行う。在宅で日常的にマーカーをモニタリングできる予防医学に基づいたセンサチップの実現を目指す。

[成果の発表, 論文等]

- [1] T. Yanagitani, H. Sano, and M. Matsukawa: "A method for measuring in-plane unidirectional electrical properties in a wide band-gap semiconductor using a Brillouin scattering method," *J. Appl. Phys.* **108**, 024910 (2010)
- [2] T. Yanagitani and M. Kiuchi: "Texture modification of wurtzite piezoelectric films by ion beam irradiation," *Surf. Coat. Technol.*, (2011) in press.
- [3] S. Takayanagi, T. Yanagitani et al.: "A simple technique for obtaining (11-20) or (10-10) textured ZnO films by RF bias sputtering," *Proc. IEEE symp.* (2011) in press.
- [4] 柳谷隆彦, 鈴木雅視, 渡辺好章: 「ウルツ鉱圧電体薄膜, 該薄膜の製造方法及び製造装置, 並びに薄膜共振子」特願 270539 (2010)
- [5] 中東佑太, 柳谷隆彦, 他: 「c 軸平行配向 ZnO 膜/非圧電性基板構造における SH-SAW の電気機械結合係数およびセンサ応用の検討」*圧電材料・デバイスシンポジウム, 講演論文集* pp.129-132 (2011)

## 視覚的に観察される自己身体部位に対して自分が動作行為主体だと 感じられる脳の要件

Spatial limit of tge visual capture of the felt hand position in a mirror

1091024



研究代表者

東京大学 情報学環

特任研究員

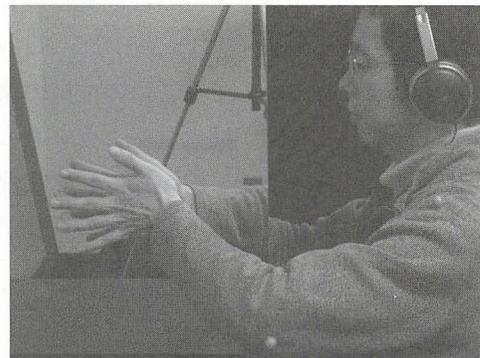
葎田 貴子

### [研究の目的]

ある種の義手や手の形をしたブレイン・マシン・インターフェース、内視鏡手術、遠隔地ロボットハンドの制御等、自己の手を模した像を視覚的に観察しながら制御するタイプのマン・マシン・インターフェースの操作には、手像の動作の時間遅れや不自然な形状など、実際の手と比較して視覚像の変容を伴うものである。それにも関わらず、あたかも自己身体の一部であるかのように意識せず使える視覚・触覚・自己受容感覚統合型インターフェースの設計指針を得る目的で、ここでは人が実際の手腕の様相とは異なる手の視覚像に対して、使用者が自分自身がその所有者 (ownership) ないし動作行為主体 (agent) であると錯覚するための脳の要件を検討した。これら一連の研究を通じて、1) どのような形状の手腕に対して脳がそれを自分の身体の一部であると認識するのか、2) 実際の手腕の位置と見えている手の位置のずれはどこまで許容範囲か、また、3) 脳が発する身体の運動指令情報とタイミングと実際に見える手の運動の遅れ時間はどの程度まで許容範囲かの3点に関して知ると同時に、我々の脳がどのような手がかりによって自己と他者、および自己の身体位置を認識しているか認知心理学的に知ることが一連の研究の大きな目標である。ここでは特に、2に関して重点的に検討した結果の一例を報告する。

### [研究の内容, 成果]

実験には、ミラー錯視 (Mirror Illusion) と呼ばれる錯覚を利用した。健常被験者の体の正中線に対して垂直に左側片面の鏡を立て (Figure 1), その中に映る自身の左腕の像を観察させ、この状態で左右の手の手首より先を鏡合わせになるよう同時に指をそろえて1秒に1回づつタッピング動作を繰り返し行くと、わずか数秒の間に被験者は次第に鏡の中に写り込んだ左手の虚像が自分の右手であるかのように感じ始め、あたかも自分の右手が鏡の中に視覚的に観察される位置にあるように鮮明に感じるよ



Note: that gray balls on the participant's shoulder and elbow are reflectors to detect their position via infra-red motion capture system.

Figure 1 When normal healthy participants views their left arm in a mirror positioned along the midsagittal plane, the impression of viewing his right hand visually captures the felt right hand location and participants rarely notice their unseen real right hand location, which is far from the virtual hand.

うになり、実際の右手が観察される像より離れた位置にあってもなかなか気づかない。本研究ではこの錯視が鏡の中に観察される右手像と実際の右手がどの程度離れていても生じるかを、鏡に沿った垂直面に対して調べることで、我々の脳が実際の我々の手指位置とは無関係に我々の手指を模した視覚像や効果器の位置に対して自己身体の延長がそこにあると錯覚しやすいのか、その要件を検討した。

被験者は右手中指・右手首と両肩、両肘の関節にポジションセンサーとしてモーションキャプチャーセンサー用のリフレクターを装着し (Library co. ltd.)、モーションキャプチャー用の CCD モノクロカメラと近赤外線照射セットを使用した 2 台の赤外線カメラでリフレクターの位置を記録した。被験者は左手位置を予め実験者に指定された鏡上の位置に固定した状態で、右手を鏡に沿って任意の位置 200 箇所にも動かし、それぞれの位置で上記のタッピング動作を 6 回以上行った後、その時点における自己の右手の位置は自己の左手と鏡合わせの位置であると感じるか否かを口頭で報告した (Figure 2, 3)。

鏡の他に、比較参照条件として鏡と同じアクリル素材で作られた黒いマットな板を用い、同じ実験を実施した。この条件では、手指の視覚像が観察されず、観察者は主に自己受容感覚に頼って右手位置を判断していると考えられる。この条件のデータに対して、右手の位置の錯覚が認められる空間範囲が拡大することをもって、自己受容感覚のみに頼る手腕の位置判断状況と比較し視覚像の影響による手腕位置の錯覚が生

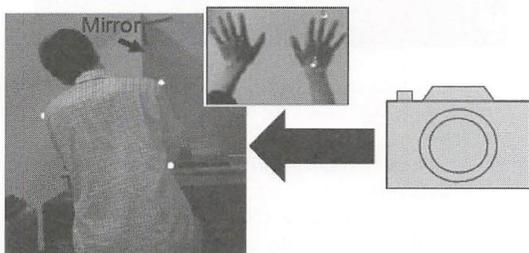


Figure 2 Schematic representations of the experimental procedure

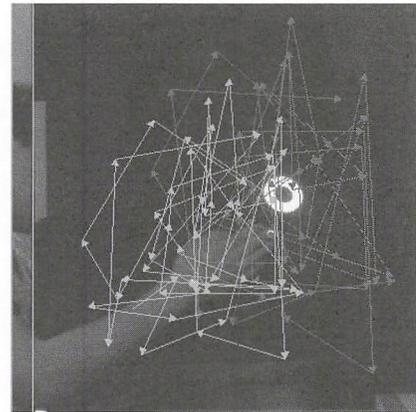


Figure 3 An example of the recorded hand and finger positions for a participant in a condition. Red allows show results from the wrist marker and green allow show results from the middle finger marker.

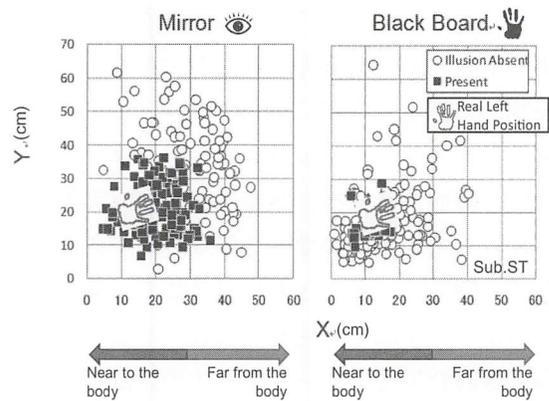


Figure 4 Typical results from one participant

じていると判断した。

一条件につき 12 名の被験者で実験を実施したが、結果は非常に頑健であり被験者間の差違は殆ど認められなかった。Figure 4 に被験者一名による結果の典型例を示す。被験者の肩や腕などに複数の位置マーカーを設置し手腕位置を記録したうち、ここでは最も簡便に錯覚の有無を示していると考えられる右手首に設置したマーカーから記録された位置結果を示す。左側の図は鏡を用いた条件の実験結果を示しており、右側の図は黒いマットな板を用いた条件の結果である。プロットされている点は、被験者が任意に自己の右手を設置し右手の位置に関して評価した位置 200 箇所を示している。赤で示されているものは、この時被験者の左手が固定され

ていた位置である。黒い点は被験者が右手と左手は鏡合わせの位置にあると感じたと報告した場合（錯覚あり）の右手位置を示しており、白抜き丸は被験者が右手と左手は鏡合わせの位置にないと報告した場合（錯覚なし）の右手位置を示している。これらの結果により、鏡を用いた条件において、図中に示される左手の位置に対して、右手の位置が前後左右に10センチから20センチ程度移動していても被験者は右手と左手の位置が鏡合わせの位置にあるように感じると報告していることが分かる。このことから、これらの領域において右手位置の錯覚が生じていることが読み取れる。一方、黒い板を用いた条件においては、右手位置が左手位置と板を挟んで鏡合わせの位置にあるように感じると被験者が報告した位置はほぼ図中に示される左手位置の近傍に集中していることから、被験者は自己受容感覚のみでは正確に右手位置を判断できることが読み取れる。それと同時に、黒い板の条件と比較して鏡を用いた条件において左手の位置と比べて広範囲に右手位置の錯覚が認められていたことは即ち、鏡の中に左手が写り込んだことによる虚像の右手を観察者が視覚的に観察したことが何らかの原因であることが伺える。なお、従来この錯覚は身体近傍空間（peripersonal space）と呼ばれる手腕の届く範囲内で生じると考えられてきたが、本研究結果は全て被験者の右手が届く範囲内で計測したものである。従って、本研究結果は身体近傍空間というよりは他の要因がこの錯覚の有無を規定している可能性を初めて明示したものと見える。

では、身体近傍空間以外にこの錯覚の有無を規定している要因とは何であろうか。本研究に参加した被験者の主観報告によると、右手がその可動域の限界に近づき、肘が伸びきったり、右手が鏡の上方に上がり続けて肩が疲労している場合には、錯覚が生じにくいという。実際に肘や肩のマーカーから記録された結果を解析すると、被験者の肩が一定の高さよりも上部に上がると錯覚が生じなくなることが示された。そ

こで、これらの結果や被験者の主観報告等を総合し、手腕位置がその可動域の限界に近づくことで腕や肩が伸びたり不自然に曲がったりして深部感覚が強くなると、視覚的入力よりもこれらの感覚入力が打ち勝ち、脳が虚像による視覚的な見た目の手位置に騙されずに自己受容感覚に従って正確に右手位置を把握できるようになるとの仮説を立てた。

これを受けて、この仮説を検証する複数の追加実験を行った。その一例を Figure 5 に示す。ここでは、錯覚の有無が右手と左手の位置のずれの大きさではなく、手腕が手腕の可動域の許容限界に近い位置にあるか否かで規定されている可能性を検討するために、被験者の左手と右手を予め鏡合わせに同じ位置に固定した上で、右手だけを手首を中心に任意の位置に回転させながら、どこまで回転させれば錯覚が生じなくなるかを検討した。この時、右手と左手は身体近傍空間内では常に同じ位置にあるが、ある回転角以上右手を回転させ右手がその可動域の限界に近づくと、被験者はタッピング中無理な姿勢で右手を捻り続けることになり、右手や右腕、右肩の痛みによる深部感覚を意識するようになる。この条件における被験者の応答は、右手指先が左手と鏡合わせに同じ方向を向いていると感じるか（錯覚あり）、異なる方向を向いてい

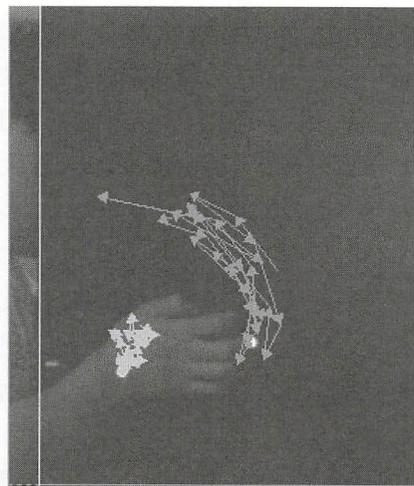


Figure 5 An example of the recorded hand and finger positions for a participant in the supplementary condition

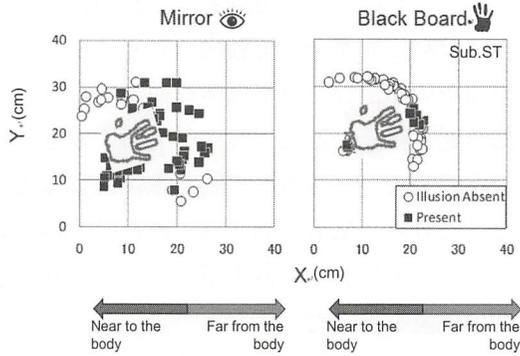


Figure 6 Typical results from one participant

ると感じているか（錯覚なし）とした。

Figure 6 にこの時の被験者の右中指先端に設置したマーカーから得られた位置情報に基づきプロットした結果を示す。黒いマットな板を用いた実験結果により、実際の左手の方向と比べて右手が同じ方向を向いていると判断された条件は実際の左手の方向とかなりの精度で一致していることが分かる。即ち、右手と左手が手首を鏡合わせに合わせている状況においても、中指が両の手で同じ方向を向いているかどうかの判断はかなり正確に自己受容感覚のみで正答できることが分かる。一方、この条件と比較して鏡を使用した実験条件の結果は、右手がある程度左手と比較して回転した条件においても左右の手が同じ方向を向いていると報告されていることが分かり、この実験状況においても鏡の中の虚像の手という視覚像による視覚的捕捉が右手方向ないし右手位置の錯覚を引き起こしていることが分かる。同時にこの結果は、右手がある程度以上捻られその可動域の限界に近づくと、右手と左手が同じ方向を向いていないという報告が増えることも示している。即ち、ここでは右手と左手が空間内で鏡合わせにほぼ同じ位置に置かれていても、右手が強く捻られるなどしてその可動域の許容限界に近づくと消滅することを示している。

以上の結果により、現時点ではこの錯視は実際の右手がその可動域の範囲の限界に近付くと消滅する性質のものと考えている。腕や手首が

その可動域の限界に近付くと錯視が消滅するという事実は、この現象における視覚的捕捉が、可動域の限界で筋肉の緊張や関節からの信号が強まると上書きされ、視覚と自己受容感覚の不一致が補正されることを示唆していると考えられる。これらの結果の応用として、手指を模したアームによる遠隔操作システムや内視鏡システムなど、自己の手指と同期して動く虚像をほぼリアルタイムに視覚的に観察しながら制御する状況において、モニタ位置やマニピュレーター位置等何らかの制約により自己の手指が観察される手指の位置とは異なる位置に設置される状況は多々生じうる。本研究結果はそのような状況において、文字通りモニタ内の効果器の位置に自己の手指があると感じられるようなシステムを設計する指標としては、実際の手指がその可動域の限界よりは少し距離を置いた場所にあつて、無理に捻じれたり伸びきったりすることがない位置に設置されていることが不可欠であることを示唆していると考えられる。

#### [今後の研究の方向, 課題]

今後の研究結果を条件間で定量的に評価するために、被験者間の結果の傾向を客観的・定量的に表記する目的で、サポートベクターマシンを用いて各被験者において錯覚が消滅する領域を定量的に計測した上で、それらの被験者間の違いをヒートマップとしてグラフ上に表記する手法の開発を進めている。また、限界で筋肉の緊張や関節からの信号が強まると視覚と自己受容感覚の不一致が補正されるという仮説に関しては、今後筋電図等を併用し考察すべき問題であると考えている。

#### [成果の発表, 論文等]

葎田貴子・宮崎由樹・和氣典二：鏡に映った手位置が視覚的捕捉により錯覚される現象が消滅する条件について —— 実際の手の位置と錯覚される手の位置の距離の関係から ——。VISION, 22, 1, 90 (2010).

# 生体信号を利用した体性感覚の客観評価システムの開発

Development of an Objective Evaluation System of Somatic Sensations Using Biomedical Signals

2001001



研究代表者 大阪大学大学院 工学研究科 助教 秋山庸子  
共同研究者 大阪市立大学大学院 看護学研究科 教授 白井みどり

## [研究の目的]

本研究の目的は、表情、脳波、心電、筋電、体表面温度などの非侵襲かつ簡易に計測可能な生体信号を用いて、疼痛や搔痒などの体性感覚を客観的に評価し、提示するシステムを開発することである。介護現場や医療現場において、被介護者あるいは患者の体性感覚を理解し、それに応じて適切に対処することが求められるが、言語による意思表示が困難な高齢者や障がい者の場合は理解することが容易ではない。そこで、被介護者と介護者の間に介在し、実時間で体性感覚を定量的かつ客観的に評価・提示することによって、日常生活に支障をきたすことなくコミュニケーションを支援すると同時に被介護者・患者を見守るための実用的なシステムを開発する。

## [研究の内容、成果]

### 1. 表情解析による実時間疼痛評価

#### 1.1 研究概要

本研究では、体性感覚の中でも見守りやケアで重要となる疼痛に着目し、その強度を言語以外の手段を用いて推定するシステムの研究を行った。このシステムは、非侵襲かつ簡易に観察・測定可能な表情を用い、実時間で疼痛を数値化するものであり、顔認識に特化したAPI (Application Program Interface) の出力デー

タを利用した画像解析プログラムからなる。健康成人を被験者にコールドプレッサー法による疼痛刺激を付与した実験を行い、本システムにより数値化された表情変化のデータと、本人申告による官能評価結果との相関を検討した。さらに、上下の頭部の傾きに対する評価精度の向上を試み、実用的なシステム構築を目指した。

#### 1.2 表情解析による疼痛評価システムの理論

表情解析から疼痛を定量的に求めるために、行列化を行った。基準とする表情からの表情変化は、 $[X1 X2 \cdots X9] \cdot [F1 F2 \cdots F9]$  の形にした。これは、Fig.1 で示される全9箇所の顔面部位の変化を表す行列である。 $[X1 X2 \cdots X9]$  は  $[F1 F2 \cdots F9]$  で表される変化をしているかどうかを、式(1)のように1・0・-1の3値化表記し、疼痛表情係数を算出するため、上記により得られた行列を用いて、式(2)を定義した。

$$X_i = \begin{cases} 1: & \text{A facial change indicated by F;} \\ 0: & \text{No facial change indicated by F;} \\ -1: & \text{Opposite change indicated by F;} \end{cases} \quad (1)$$

$$\underbrace{[X1 X2 \cdots X9]}_A \times \underbrace{\begin{bmatrix} F1 \\ F2 \\ \vdots \\ F9 \end{bmatrix}}_B = Y \times \underbrace{[-1 -1]}_C \times \underbrace{\begin{bmatrix} F1 \\ F2 \\ \vdots \\ F9 \end{bmatrix}}_C \quad (2)$$

A = Determinant of objective facial expression analysis

B = Pain facial expression coefficient

C = Determinant of pain facial expression

この式は、疼痛強度を求めたい解析対象となる表情の行列 (A) を、疼痛強度の値 (B) と事前に決定した疼痛表情の行列 (C) の線型結合で表した式である。疼痛表情の行列 (C) は、正座実験の被験者とは異なる 6 名の男性被験者に疼痛刺激を与えた時の表情から決定された定数行列である。よって式 (1) に解析対象となる表情の行列 (A) を入力することで、(B) で表される「疼痛表情係数」が得られる。この手法を用いて、自動的に各パーツの動きを 3 値化し、1 秒間に 5 フレームずつ疼痛強度の解析を行う画像解析プログラムを作成した。当該プログラミングは、OpenCV を利用した Application Program Interface (Face API: seeing machine 社) によって作成されている。

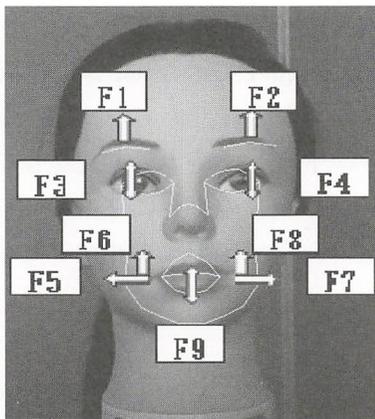


Fig. 1 Face landmarks

### 1.3 疼痛評価システムによる疼痛評価実験

提案した表情解析システムの妥当性を検証するため、コールドプレッシャー法 (氷水による冷水刺激) を疼痛刺激とする実験を行った。この実験では、当該システムを用いて「疼痛表情係数」を求め、同時に行った疼痛の官能評価値との相関をみた。

被験者は健康な男女 10 名 (男性 4 名、女性

6 名) で、実験前に本実験の目的、内容、倫理的配慮について十分な説明を行い、途中でいつでも実験を中止できることなどの倫理的配慮を行った。なお、本研究は大阪大学工学部倫理委員会の承認を得ている。

被験者の正面にウェブカメラを設置し、実験の様子を動画 (5 f/sec) で撮影した。安静 30 秒、疼痛刺激 30 秒の 2 つのセッションをまとめて 1 セットとし、連続して 3~5 セット行った。各セッション直後に、現時点で感じている疼痛強度の官能評価について VAS 法 (Visual Analogue Scale, 意味尺度法) を用いて行った。(Fig. 2)

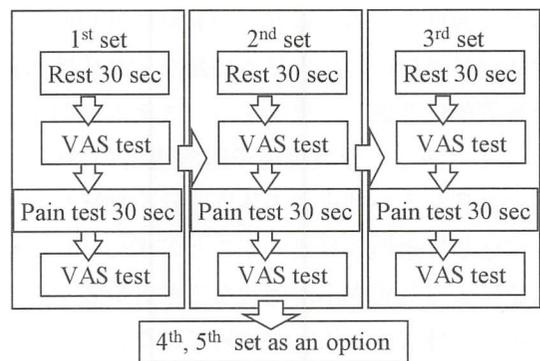


Fig. 2 The protocol of pain stimulus experiment

撮影には正面ウェブカメラに加え、左右に 2 箇所設置し、被験者には常に正面のウェブカメラを見るように指示した。記録された全てのフレームにおける表情評価得点を算出し、前述の方法で表情の解析をすることで「疼痛表情係数」の時間変化を求めた。一方 VAS 法から「VAS 値」を求め、両者の相関を評価することで、「疼痛表情係数」による疼痛評価の妥当性を検討した。疼痛表情は 30 秒間ランダムに変化するため、VAS 値との相関には、各セット最終の 10 フレーム (2 秒間) のデータの平均値を利用した。疼痛表情係数と VAS 値との間には、 $r=0.93$  から  $r=0.69$  の間で、平均  $r=0.83$  の相関が得られた。この結果より、本プログラムを用いた正面顔における疼痛評価の妥当性を確認することができた。Fig. 3 に結果の一

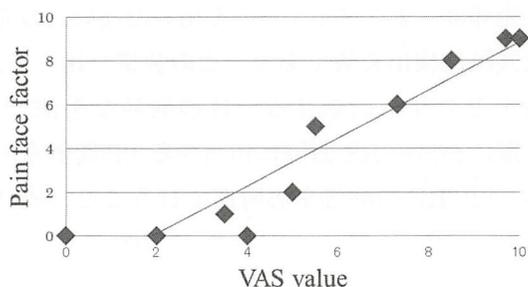


Fig.3 A typical result of correlation between pain face factor and VAS value in cold pressor test (r=0.77)

例を示す。

#### 1.4 頭部の傾斜角と表情解析精度の検証

疼痛評価実験により、被験者の正面からの疼痛評価の妥当性は検証できたが、実用性を考えると、上下左右方向からでも表情が解析できる必要がある。そこで、Face APIにより、顔が存在すると認識できる認識限界角を検証した。その結果、顔の認識限界角は左右約50°、上約80°、下約50°となった。(Fig.4)



Fig.4 Functional limit of face tracking

一方、疼痛表情の認識は、左右の傾き約30°以内の範囲であれば正面顔における疼痛表情係数との相関が75%以上となり、実用可能な精度であると考えられた。しかし、上下への首の傾きについては左右の傾きよりも精度が低かったため、任意の疼痛表情を様々な角度で3回ずつ繰り返し解析し、正面顔における疼痛表情係数との相関を検証した上方向10°から20°においてはその相関は80%以上あったものの、30°では48%となり、下方向ではその精度はさらに下がり、10°で51%、20°では9.7%であった。(Fig.5)

このように、顔の傾きに対する精度の検証実験では、上下方向が左右に比べ低い事が分かった。これは、表情解析方法が、顔の各認識点の

上下方向への移動パターンを主に計測しているため、上下への傾きに対する表情解析精度が下

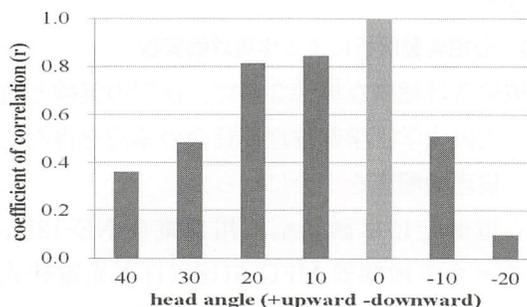


Fig.5 Correlation coefficient of pain face factor between frontal face and inclined faces

がるためであると考えられる。

測定精度の向上のためには、疼痛表情の認識ポイントの変更と各ポイントにおける評価得点に対する寄与率の変更が必要である。また今回用いた9ヶ所の部位 (Fig.1) の変化以外にも注目し、頭部上下左右の振りの認識角度の拡大と、その複合した斜め方向の傾きに対する精度向上に向けての改善を行うことを検討している。

## 2. 心拍変動解析による疼痛評価

### 2.1 研究概要

表情を用いた非接触の疼痛解析システムによる疼痛評価の可能性が示されたが、その精度を上げ、誤作動を防ぐには、他の方法と組み合わせることが望ましい。そこで、疼痛刺激は交感神経を刺激すると予想されること、コンパクト化が進み脈波による簡易な手法での心拍変動解析も開発されていることから、心拍変動解析による疼痛評価を試みた。

### 2.2 心拍変動解析による疼痛評価の理論

心電図の最大振幅であるR波とR波の間隔をRR間隔という。この間隔には周期的な変動が見られ、呼吸周期の変動(高周波成分:HF)は副交感神経系のみの活動を反映するのに対し、血圧変動の成分(低周波成分:LF)は交感神経活動と副交感神経活動の両方を反映する。したがって心拍変動を周波数解析して高周

波成分と低周波成分を評価すれば、交感神経活動と副交感神経活動を分離して評価することができる。

### 2.3 心拍変動解析による疼痛評価実験

被験者は健康な男性3名で、前回の実験と同様に大阪大学工学部倫理委員会の承認を得た上で、倫理的配慮を十分に行った。

心電測定には誘発脳波用皿電極 NE-121J、多チャンネル増幅器 MEG-6116（日本光電株式会社）を用いた。鳩尾、左脇腹、喉元の電極位置で行い、500 Hz でサンプリングした後、10~30 Hz の帯域通過フィルタを適用した。電極は、貼付ける位置を消毒用エタノールで消毒し、電極ペーストを塗布してそれぞれ配置した。また各電極はテープを用いて固定した。計測したデータは、パワースペクトルから LF/HF 比を求めて解析した。0.05~0.15 Hz の積分値を LF、0.15~0.40 Hz の積分値を HF とし、LF/HF を算出した。検証実験は1と同様の手法によるコールドプレッシャーテストによって行い、心電計測と同時に VAS 法による官能評価を行った。

### 2.4 心拍変動解析を用いたシステム構築

Fig. 6 は横軸が官能値、縦軸が最初のセッションの LF/HF の値で各セッションの値を規格化した値で、3名で計5回行った実験データを1つにまとめたグラフである。このグラフのプロット点に対して線形近似と指数近似でフィッティングを行ったところ、指数近似でフィットし指数近似の方が良好にフィッティングできた。この結果より官能値と変化率の相関係数を求めたところ、およそ0.85という表情よりも強い相関が得られた。

このことから、心拍変動解析によっても疼痛評価が可能であり、表情に表れない疼痛についても検出可能であることが示された。さらに LF/HF については、Fig. 7 に示す脈波検出装置を作成した。発光部はヘモグロビンの吸収スペクトルに対応した近赤外波長で発光波長帯域の狭い発光ダイオード (LED) を用い、

受光部はフォトダイオードを用いた反射式の光電式脈波検出装置である。この装置を用いて、指をセンサーに乗せるだけの簡易な手法で、心電における RR 間隔に相当する PP 間隔を用い、LF/HF の評価を実時間で行うことに成功した。

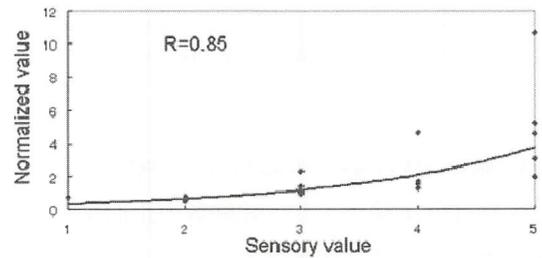


Fig. 6 Normalized LF/HF as a function of sensory value

### [今後の研究の方向, 課題]

表情および心拍変動解析により、疼痛が実時間に客観的に評価できることが示された。このことにより、当初の計画であった正確性、汎用性、迅速性はある程度達成できたといえる。現在、高齢者を被験者とした予備実験を行っているが、高齢者の見守りを視野に入れた応用にはいくつか課題がある。

まず、被験者によっては表情自体が捉えにくかったり、慢性疼痛であれば相対的な表情や生体反応として表れにくかったりすることが挙げられる。また疼痛の位置や強度、種類を推定することも今後の課題であり、まず介護現場においてどこまで詳しい情報が必要かを明確にし、それぞれの被介護者に適切な閾値設定の手法を確立して緊急時やケアが必要な時に介護者に知らせる必要がある。

今後の方針としては、介護現場で必要とされている疼痛の情報を抽出し、本研究で構築した要素技術を施設レベルで導入できるシステムへと発展させていくことを考えている。

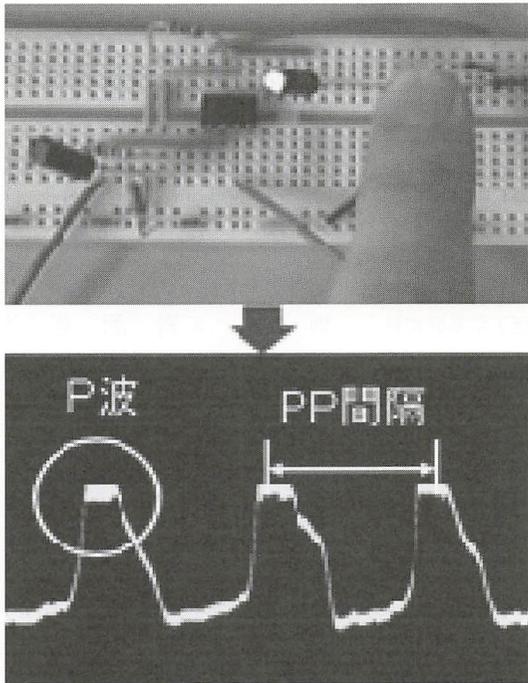


Fig. 7 Pulse wave measurement system

[成果の発表, 論文等]

- 1) 前川義量, 秋山庸子, 西嶋茂宏: 表情の画像解析による高齢者見守りシステムのための基礎的研究, 生体医工学シンポジウム 2010 予稿集 (2010)
- 2) 前川義量, 森達也, 久森康平, 秋山庸子, 西嶋茂宏: 表情の画像解析による高齢者見守りシステムのための基礎的研究, 第 49 回日本生体医工学会予稿集 (2010)
- 3) Yoshikazu Maekawa, Takeshi Abe, Yoko Akiyama and Shigehiro Nishijima: Development of a Pain Evaluation System by Image Analysis of Facial Expression, Proc. of Bio Medical Engineering 2011, 723-147 (2011)
- 4) 前川義量, 阿部武志, 秋山庸子, 西嶋茂宏: 表情の画像解析による疼痛評価システムの開発, 第 50 回日本生体医工学会予稿集 (2011)

## 金属・液体ハイブリッド型 MEMS 配線

### MEMS conducting wire using combination of metal and liquid

2001002



研究代表者 東京大学大学院 情報理工学系研究科 助教 岩瀬 英治

#### [研究の目的]

これまでの機械は固体の硬い構造が主であったが、人間との調和のためには柔らかい構造であることが望ましい。そのため、「柔らかい機械」が必要となる、曲げられかつ伸縮可能な電気配線を目的とする。

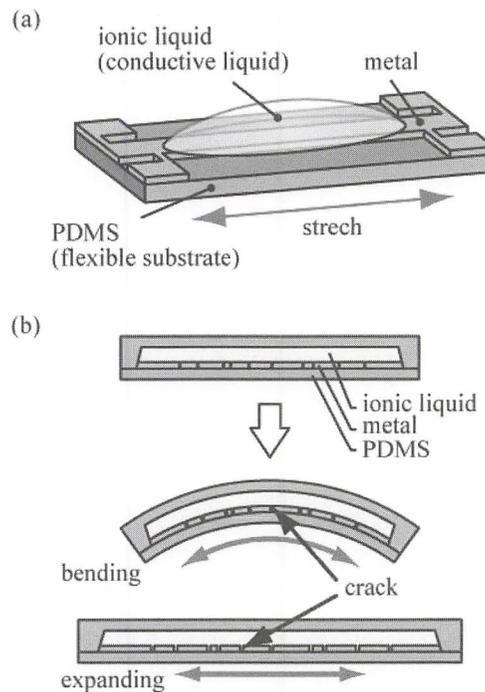
近年フレキシブルデバイスの研究が盛んに行なわれているが、これらの材料としては有機材料やゲル材料が主であった。従来の伸縮可能な配線としては導電性ゴムが挙げられるが、代表的な導電性ゴム（ゴム材料にカーボン粒子を混ぜたもの）の電気伝導率は  $10^1$  S/m 程度である。また、近年報告された高い伝導率をもつとされるゲル材料（カーボンナノチューブをイオン液体に混ぜたゲル）でも  $10^4$  S/m オーダの電気伝導率である。金属の電気伝導率は  $10^6 \sim 10^7$  S/m オーダであることを考えると、従来の伸縮可能な配線は電気伝導率の点において性能が低いといえる。

本課題では、Fig.1 に示すような柔軟基板上に金属の配線とそれを覆うように液体を配置した構造を基本とし、MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) の加工技術により製作する。これにより、曲げや伸びによって金属部にクラックが生じたとしても液体部分が電子の授受を行い、高い電気伝導率でかつ高い伸縮耐性をもつ電気配線の実現を目指す。曲げられかつ伸縮可能な電気配線という実用的な意義を持つ

だけでなく、これまでは有機材料やゲル材料が主であったフレキシブルデバイスの分野において、液体をデバイスに用いる点が特徴的である。

#### [研究の内容, 成果]

柔軟基板上に金属の薄膜を蒸着し、その上に液体を載せ、金属 - 液体ハイブリッド配線とした (Fig.1 (a))。金属としては Au を、柔軟基板としてはシリコンゴムの一種である PDMS (polydimethylsiloxane) を用いた。液



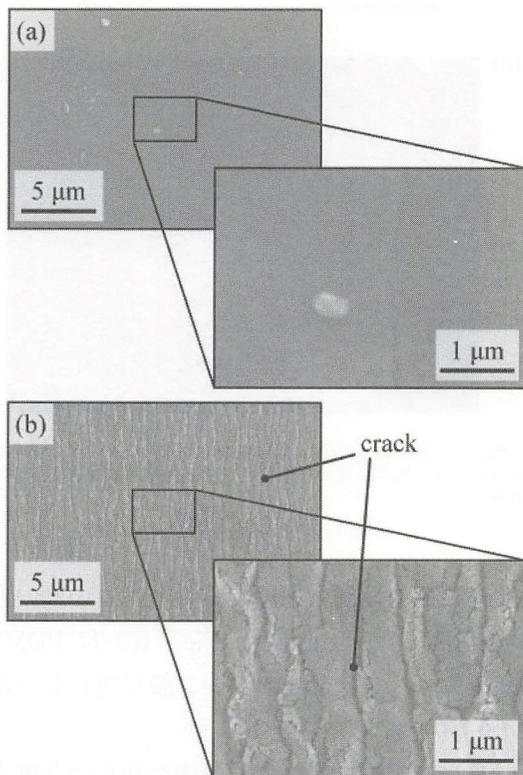
(a) 全体構成, (b) 変形による金属部へのクラックの発生

Fig.1 デバイスの概要図

体としては、イオン液体を用いることとした。その理由としては、高いイオン伝導率を持つことに加え、水に比べ広い電位窓をもつため電氣的に利用しやすいこと、化学的安定性が高いことが挙げられる。イオン液体としては EMIES (1-ethyl-3-methyl imidazolium ethyl sulfate) を用いた。

まず初めに、柔軟基板 (PDMS 基板) 上で金属 (Au) 薄膜のクラックに関して観察を行った。Au は真空蒸着により 50 nm の厚さで成膜した。PDMS は熱によって膨張するため、蒸着条件に依っては成膜後の Au にクラックが生じている可能性があったが、成膜レートを低くすることで Fig.2(a) のようにクラックのない Au 薄膜が得られた。これを 40% 伸ばした後に SEM で観察したものが Fig.2(b) である。約 1  $\mu\text{m}$  間隔でクラックが生じていることが観察された。

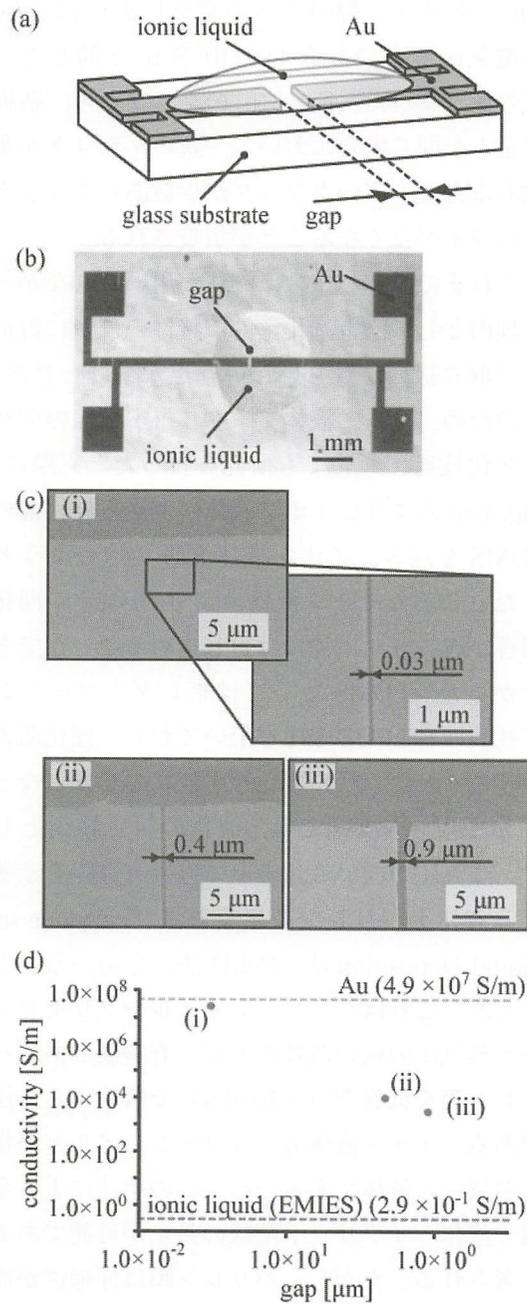
次に、金属配線に収束イオンビーム (Focus-



(a) PDMS 上に蒸着した Au 表面の SEM 写真, (b) 40% 伸ばした後の Au 表面の SEM 写真

Fig.2 PDMS 基板上に Au を蒸着した際のクラックの様子

ed Ion Beam: FIB) によって幅 0.03  $\mu\text{m}$  から 0.9  $\mu\text{m}$  までのクラックを作製し、クラック幅と電気伝導率の関係を計測した。この計測では、伸縮の必要がないことと FIB で加工することの理由から、PDMS 基板ではなくガラス基板を用いた (Fig.3(a), (b))。Fig.3(c) に FIB で加工したナノクラックの SEM 写真を示す。

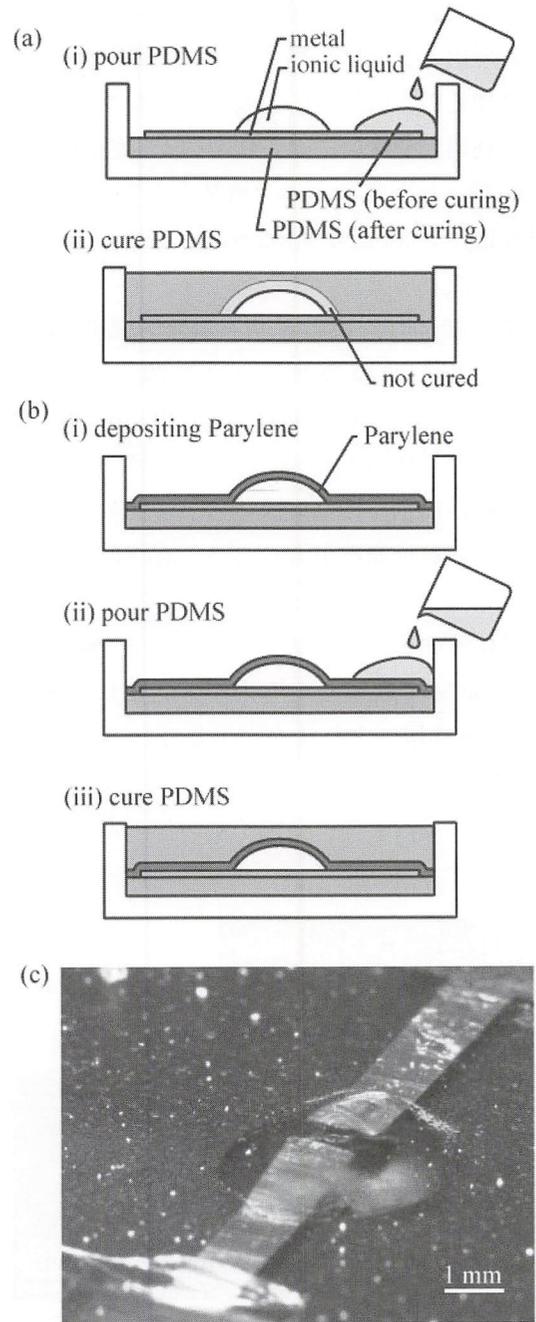


(a) 計測用デバイスの概要, (b) 計測用デバイスの写真, (c) FIB 加工によるナノクラックの SEM 写真, (d) クラック幅と電気伝導率の関係

Fig.3 クラック幅と電気伝導率の関係の計測

計測において、イオン液体が Au 配線を覆う領域を変化させても全体の電気伝導率には大きな変化はなく、クラック幅が電気伝導率に大きく寄与していることが示唆された。Fig. 3(d) にクラック幅に対する電気伝導率の計測結果を示す。0.03  $\mu\text{m}$ , 0.4  $\mu\text{m}$ , 0.9  $\mu\text{m}$  のクラック幅のときの電気伝導率はそれぞれ  $2.6 \times 10^7$  S/m,  $9.3 \times 10^3$  S/m,  $2.9 \times 10^3$  S/m であった。0.03  $\mu\text{m}$  のクラック幅のときの電気伝導率は、Au の電気伝導率である  $4.9 \times 10^7$  S/m と同じオーダーの値となった。Fig. 3(d) のグラフから、基板の歪みが同じ場合において、狭いクラックが多数ある方が、広いクラックが少数あるよりも電気伝導率が良くなることが示唆される。

これまで、デバイスに液体が用いられなかった理由として、電気化学的な特性のほかに封止など取り扱いが難しいという点が挙げられる。そのため、金属・液体ハイブリッド配線のデバイス化技術についても研究を行った。実際に、Fig. 4(a)のようにイオン液体の上から硬化前の PDMS を注ぎ、イオン液体を封じ込めようとしたところ、イオン液体により PDMS の硬化阻害が起こり、単純には封じ込めることができなかった。PDMS としては東レダウコーニング社製の SILPOD 184 を用いており、硬化阻害が起こるとゴム状に硬化せず液状のままになってしまう。本課題では、液体の封止技術として、蒸気圧の低い液体の上に直接有機膜を蒸着する液体上パリレン直接蒸着法 (Parylene on Liquid Deposition 法, PoLD 法) を用いることとした。これはシリコンオイルやグリセリンなど蒸気圧の低い液体の上に、有機膜であるパリレン膜を低真空 ( $\sim 10$  hPa) で蒸着する方法である。イオン液体もシリコンオイルと同様、低蒸気圧の液体であるため、この手法により金属・液体ハイブリッド配線の封止が可能であると考えられる。ただし、パリレン膜は伸縮性が高くないため、パリレン膜で封止した後、全体を PDMS の中に埋め込む。これにより、伸縮されたときにはパリレン膜は破れるが、デバイス

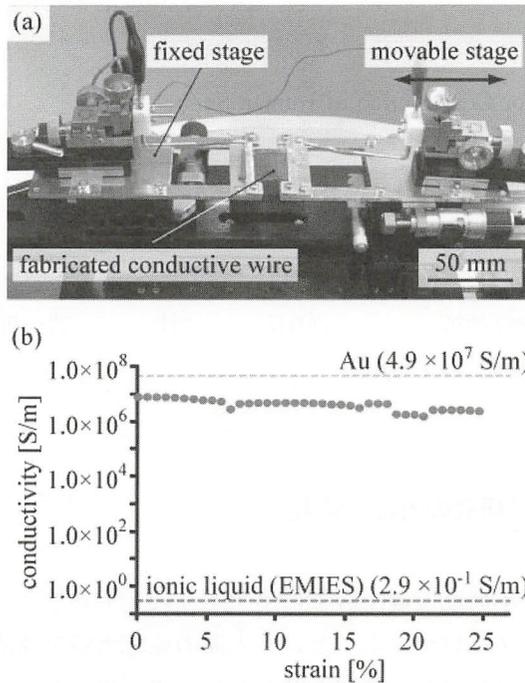


(a) PDMS のみの封止方法, (b) PoLD 法を利用したイオン液体の封止方法, (c) PDMS 基板上的イオン液体をパリレン膜で封止した写真

Fig. 4 イオン液体の封止

としては液体が漏れ出てくることはないという構造となる (Fig. 4 (b)). Fig. 4 (c) は PDMS 基板上的イオン液体をパリレン膜で封止した段階の写真である。

最後に、歪みに対する伝導率の変化の計測を行った。Fig. 5(a)に計測セットアップを示す。伸縮配線を抑える治具と計測用の電極端子が直



(a) 計測セットアップ, (b) 0% から 24% まで伸ばしたときの電気伝導率計測の結果

Fig. 5 歪みと電気伝導率の関係の計測

動ステージに取り付けられた構成となっている。歪みが 0% のときには  $8.1 \times 10^6$  S/m, 歪みが 24% のときには  $2.5 \times 10^6$  S/m と電気伝導率が得られた (Fig. 5(b))。これは 24% までの歪みにおいて、 $10^6$  S/m オーダの高い電気伝導率を維持したことを意味する。また、この結果は他の実験結果とも整合した結果である。PDMS 基板を伸ばしたときの Au 配線のクラックの観察において、クラックは約  $1 \mu\text{m}$  間隔で生じて

いた。PDMS 基板を伸ばしたとき、Au 配線は伸びず、クラックの部分のみ幅が拡がると仮定すると、24% の歪みのときには 1 つのクラックの幅は  $0.24 \mu\text{m}$  となる。 $0 \mu\text{m} \sim 0.24 \mu\text{m}$  のクラック幅で、 $10^6$  S/m オーダの電気伝導率という結果は、FIB 加工でナノクラックを製作したものと近い値である。

#### [今後の研究の方向, 課題]

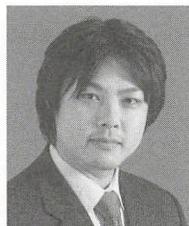
本課題では、PDMS 基板を伸ばしたときに自然に生じるクラックを利用して、0% から 24% の歪みにおいて、 $10^6$  S/m オーダの電気伝導率を実現した。しかし、クラック幅と電気伝導率の関係の計測結果から得られた結果に従うと、より狭い間隔でクラックが存在すれば、より大きな変形に置いても高い電気伝導率が維持できることとなる。そのため、クラックをナノ加工により製作することで、より性能の良い伸縮配線が実現可能であると考えられる。

また、他の性能向上の方向性として、本課題では金属として Au, イオン液体として EMIES の組み合わせのみであったが、他の各種金属と各種イオン液体の組み合わせにおいて、どれが電気配線として適しているかを調べる方法がある。これには、実験的な方法の他、イオン液体と金属との接触面における電子の授受現象の解明が役立つと考えられる。

## 人間支援空間構築のためのテレリアリティーロボット技術の開発

Development of Tele-Reality Robot Technology for Construction of Human Support Space

2001003



研究代表者

慶應義塾大学 理工学部

准教授

桂

誠一郎

### [研究の目的]

本研究では、人間にとって安全で豊かな生活を支援し、生活に伴うエネルギー消費の削減を実現するため、人間や知的機械、ロボットシステム間に感覚情報を伝送するリアルタイムネットワークを巡らすことによって、実際に空間的移動を伴わなくても授受すべきサービスを実現することを目的とする。多数の人間が多数の機械系と協調を取るような人間支援空間の構築は、高齢化社会における人間活動の活発化といった社会問題の面でも、モニタ・保守作業などの省力化と高度化といったインフラの充実化といった面でも、あるいは遠隔手術といった医療面の充実の面からも必要不可欠であり、「テレリアリティーロボット」技術の開発の意義は大きい。

### [研究の内容、成果]

本研究では、図1に示すように「テレリアリティーロボット」という人間の感覚情報を遠隔地に伝送し、空間や時間を越えて再現を行うシステムがリアルタイムネットワークで結合された人間支援空間の構築を目的とし、以下のような研究計画に基づき研究を遂行した。

#### 1. 「テレリアリティーロボット」の基本設計・試作

本研究では、将来の「テレリアリティー」を実現するためのマスタ・スレーブロボットとして、アクセル・ブレーキ・ステアリングインタフェースに力覚フィードバックを行うモバイルロボットの新しい遠隔操作システムの開発を行った。

特に、開発した「テレリアリティーロボット」は、遠隔地での人間の「知覚・行動」を再現するという新しいタイプのヒューマン・イン



図1 テレリアリティーに基づく人間支援空間

タフェースであり、視覚情報に加えて力覚情報のフィードバックが可能となっている。これまでの研究により、力覚情報の再現においてマスタ・スレーブシステムの双方に高精度なセンサを配置しても良い性能が得られないのは機構中の共振や摩擦が原因であり、実用化を妨げている一因となっていることを明らかにしている。そこで本研究では、人間との親和的な接触動作を実現するため、使用するアクチュエータをすべてダイレクトドライブモータとすることで、外乱オブザーバに基づいた力覚センサレスでの広帯域な触覚フィードバックを実現した。

開発したマスタコクピットは図2に示すようにステアリング部とアクセル・ブレーキからなるペダル部を備えている。また、スレーブ側は図3に示すように多自由度のモバイルロボットとして構成されている。モバイルロボットは3個の車輪にインホイールモータを導入しており、それぞれリニアモータによるアクティブサスペンションを装備している。さらに、前輪のステアリングにもダイレクトドライブモータを導入しており、ステアバイワイヤが実現可能になっている。このように、7自由度の構成とすることで、路面状況を多くのモータを使用してセンシングし、操作者にフィードバックすることが可能になっている。

マスタ・スレーブいずれもダイレクトドライ



図2 マスタコクピット

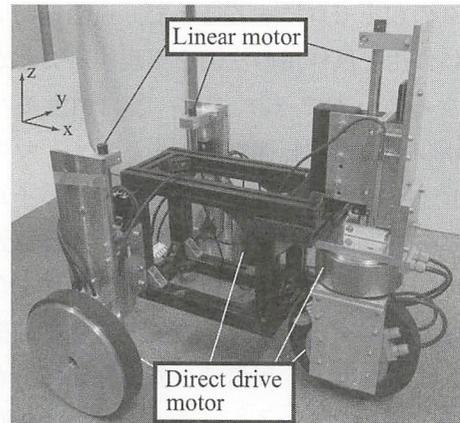


図3 多自由度モバイルロボット

ブモータを直結することで、遠隔地における作用・反作用の法則を人工的に再現し、あたかも遠隔地で作業しているような臨場感を得ることが可能になる。したがって、これまでの画像情報のみのフィードバックにおける作業の問題点を解決することができる。

## 2. 「テレリアリティーロボット」による触覚伝送制御系に関する基本設計

従来の遠隔操作システムでは、操作を行うマスタシステムと遠隔地で動作するスレーブシステムが同構造のものに対して主に開発が進められているため、本研究の目標を実現することは困難であった。本研究では、マスタシステムとスレーブシステムが異構造かつ異動作範囲のシステムに対しても実世界触覚フィードバックを実現するための双方向制御手法について新たに開発を行った。

提案手法では、マスタコクピットに搭載されているペダルインタフェースの角度情報によって多自由度モバイルロボットの並進速度を決定するという新しいバイラテラル制御系を構成している。バイラテラル制御系の目標式は以下のように表される。

$$\tau_m + \tau_s = 0 \quad (1)$$

$$\theta_m - \theta_s = 0 \quad (2)$$

(1) 式は、マスタコクピットの操作トルクと多自由度モバイルロボットが路面から受ける反力

トルクの和をゼロにすることで、遠隔地間で人工的に作用・反作用の法則を実現することが可能になる。一方で(2)式は、多自由度モバイルロボットの操作範囲を拡張するため、マスタコックピットのペダル位置と多自由度モバイルロボットの速度の差をゼロにするという目標式になっている。(2)式の目標式は微分操作を含んでいるため、ダイナミカルモード変化を制御系に導入することで、異構造・異動作範囲を有するマスタ・スレーブシステムにおける力覚フィードバックが実現できる。

### 3. 人間支援空間の構築及び実機による実験・評価

開発したテレリアリティーロボットを使用して感覚フィードバック試験を行った。図4(a)にマスタシステムの角度応答およびスレーブシステムの速度応答を示し、図4(b)にペダルのトルク応答と車輪が受ける力応答を示す。図

4より、提案手法により次元の異なる情報間での応答値の一致が達成されていることが確認できる。さらに、作用反作用の法則が遠隔地間でバイラテラル制御により実現されていることが分かる。

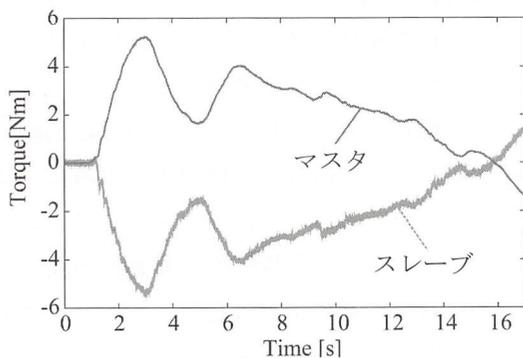
また、ハプティックデバイスをネットワーク環境内に分散配置して人間を適切なタイミングで支援するための人間支援空間の基本設計を行った。まずハプティック通信に適した伝送プロトコルの評価を行い、順序制御の有効性を確認するとともに、再送制御は不安定化の原因となることを明らかにした。また、ハプティックデバイスを使用して得られた人間の動作データについても解析を行い、デバイスを介した支援をするために必要な動作データベースの構築についても検討を行った。

#### [今後の研究の方向、課題]

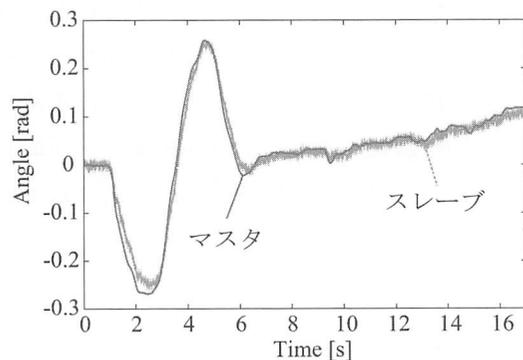
本研究では、視覚情報と触覚情報をリアルタイムで取得することが可能な「テレリアリティー」の基盤技術の開発に成功した。ネットワークを利用して遠隔操作を高臨場感で直観的に実現に伝送するための基本技術として使用可能であることを明らかにした。

実用化が期待される分野として、自動車のステアバイワイヤシステムに導入が考えられるばかりでなく、様々な機構のインタフェースを介した触覚通信・放送の実用化が期待される。特に、今後電気自動車化が進み、電気モータをインホイールモータとして用いることで、路面の情報を力覚センサレスで高精度に抽出し、地図上に路面の凹凸情報などをリアルタイムにマッピングすることが可能になる。この情報をGPS(Global Positioning System: 全地球測位システム)やカーナビゲーションシステムと連動して共有することで、安全・安心なITS(Intelligent Transportation Systems: 高度道路交通システム)を構築することにつながる。

さらに、将来の触覚通信・放送の実現に関し



(a) マスタコックピットのペダル操作トルク・多自由度モバイルロボットの反力トルクの関係



(b) マスタコックピットのペダル位置・多自由度モバイルロボットの速度の関係

図4 テレリアリティー実験結果

ては、ハプティックインタフェースに使用するためのアクチュエータに用いるリニアモータが相対的に大きなサイズになってしまうことが実用化に際して問題になることが予想される。今後、ハプティクスに特化したエネルギー変換技術を開発することで、さらなる装置の小型化が見込まれ、実用化・社会インフラとしての普及が期待される。

[成果の発表, 論文等]

論文発表

- [1] 渡部達人, 桂誠一郎: “モバイルロボットによる摩擦情報に基づいた路面環境の認識と分類”, 電気学会産業応用部門誌, Vol. 131-D, No. 3, pp. 357-363 (2011. 3)
- [2] Seiichiro Katsura, Wataru Yamanouchi, Yuki Yokokura: “Reproduction of Human Motion Based on Real-World Haptics,” IEEE Industrial Electronics Magazine. (査読中)
- [3] Wataru Yamanouchi, Seiichiro Katsura: “Mobile-

Hapto: Bilateral Haptic Interaction System Using a Mobile Robot,” IEEE Transactions on Industrial Electronics. (査読中)

他 13 編査読中

発表論文

- [1] Kazuki Nagase, Seiichiro Katsura: “Bilateral Control of Walking Haptic System,” 2011 Joint IEEE International Conference on Industrial Electronics & Southeastern Symposium on System Theory, ICIT-SSST11-Auburn, pp. 387-392 (2011. 3. 14-17)
- [2] Takahiro Kosugi, Seiichiro Katsura: “Experimental Investigation of Variable Scaled Bilateral Control,” 4th International Conference on Human System Interaction, HSI2011-Yokohama, pp. 250-255 (2011. 5. 19-21)

**The Best Paper Award 受賞**

- [3] Hiroyuki Nagai, Seiichiro Katsura: “Environmental Embedded Haptic System Based on Modal Transformation,” 4th International Conference on Human System Interaction, HSI2011-Yokohama, pp. 262-267 (2011. 5. 19-21)

**The Best Paper Award 受賞**

他 国際会議 20 件, 国内会議 40 件

## 眼表情からの意図推定を伴う弱視者向け ウェアラブル視覚支援システムの開発

Development of Wearable Visual Support System for Low-vision People via Estimation of  
Difficulty in Viewing Based on Expression around Eyes

2001004



研究代表者 九州工業大学大学院 工学研究院 助教 河野 英 昭

### [研究の目的]

「弱視」と呼ばれる視覚障害により、日常生活に不自由を感じている人は多い。とくに、街中の看板・標識、本や雑誌、機器や端末の操作法など、生活空間にあふれる文字情報を見ることが困難な場合、視覚によって得られる情報は非常に限定的なものとなる。図1に文字画像に対する弱視者の見え方のシミュレーションを示す。図1からわかるように、文字の太さや構造、大きさと認識のしやすさが大きく変化することがわかる。このような問題に対し、さまざまな視覚支援システムの開発が取り組まれている。例えば、丸茂ら [1] や田中ら [2] は、文字認識を行いユーザへ音声で伝達する支援技術を提案している。しかし、紙面などと異なり、日常

生活に存在する任意の文字情報を認識するのは技術的な課題がある。また、Sakamakiら [3] は画像拡大技術を視覚支援に用いるシステムを提案している。これは視覚情報を拡大して提示することによりユーザの視認性を高めるというものである。しかし、これまでの拡大技術が再現性を最大の目的として発展してきたことから、ただの拡大では実現できない「ユーザの見やすさ」への配慮はなされていない。

本研究では、弱視者の「像がぼけて見える」、「視野が狭くなる」といった個々の見え方に対して視覚情報処理を行うことでユーザに「認識しやすい」像を提供することを目的とし、デジタル文字画像を文字のフォント種に依らず弱視者が認識しやすい文字像へ変換するアルゴリズムを提案する。

想定する使用形態としては、頭部搭載型カメラとディスプレイから成るウェアラブルシステムを考えており、弱視者が特に見えにくいと感じる文字中の細い線（例えば明朝体の横線）を文字の本質構造を失うことなく太線化すると同時に、鮮明な拡大像の提示を可能とするシステムの開発が目標である。また、目元の表情（眼表情）から「見づらい」という意図を抽出し、像提示のキー入力とすることで、システムの無意識下の操作を実現し人間と機械の新たな調和を図る。

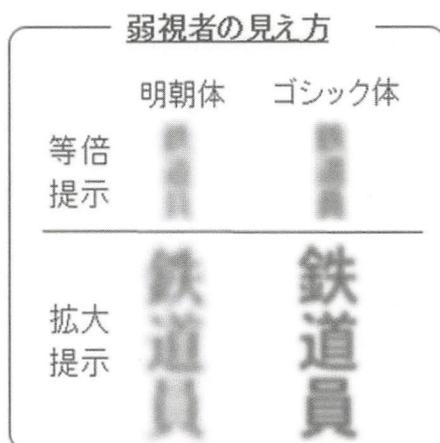


図1 弱視者の文字の見え方の例

[研究の内容, 成果]

1. ウェアラブルシステムの構築

本研究では、ウェアラブルカメラを用いた視覚支援システムへの実装を前提に、目元周りの表情である眼表情データを取得する実験環境を構築した。図2にシステムの構成を示す。

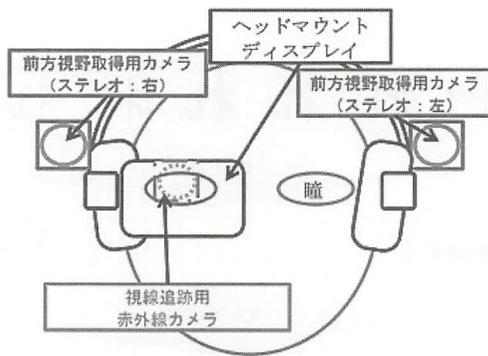


図2 ウェアラブルシステムの構成

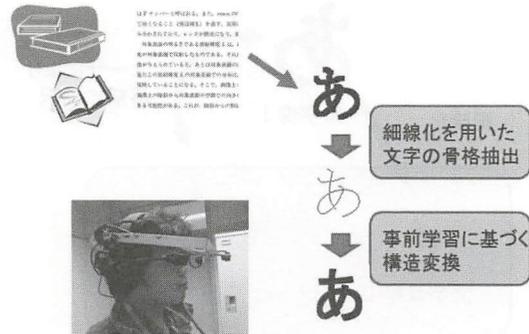
2. 文字構造の変換

弱視者の見え方には、像がボケて見えるという特性がある、図1はその特性を模擬したものである。この例は、晴眼者（健常視力の人）には読める文字サイズであっても、弱視者には読むことができず、拡大して提示したとしても、フォント種によっては読みにくい場合があることを示したものである。このように、弱視者のためには単純な拡大像の提示を行うのみでは不十分であり、「見やすさ」に配慮した拡大、文字の構造変換というものが必要である。

本研究では、ウェアラブルカメラを用いた視覚支援システムへの実装を前提に、「見やすさ」に配慮した文字構造変換を事前学習を用いた事例ベース処理により実現する。提案手法の概要を図3に示す。提案手法では、まず文字画像に対して細線化処理を適用することにより文字の骨格を抽出する。その後、事前の学習に基づいて太字化・構造変換処理を行う。以下の節においてそれぞれの処理について詳説する。

2.1. 細線化処理

ここでは、構造変換の前処理として入力文字



ARシステムによるユーザへの提示

図3 提案手法の概要

画像に対して行う細線化処理について述べる。一般に、ユーザが生活する日常空間には多種多様な太さ・フォント種の文字が存在する。本研究ではこれらの「文字の多様性」に対応するため、細線化処理を用いる。文字画像に対して細線化を行った場合文字の装飾や太さ情報が失われ文字骨格が抽出され、この文字骨格に対する構造変換処理を学習することで、提案法は様々な太さ・フォント種の文字に適用することが可能となる。細線化処理には田村の手法 [4] を用いる。図4に細線化の結果画像を示す。

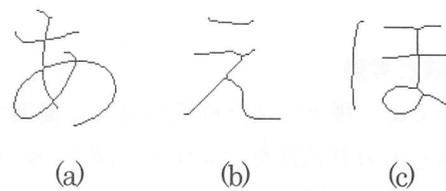


図4 各種文字に対する細線化結果

2.2. 構造変換処理の詳細

ここでは、細線化により得られた文字骨格画像に対する構造変換処理について述べる。本研究では、ユーザが「見やすい」と感じる文字の太さや特性を構造変換に反映するため、フォント・太さの異なる同一文字のグループからユーザに最も認識しやすいと感じる文字を事前を選んでもらう。それを数文字に対して行ってもらう、認識しやすい「理想文字像」とその他の「認識し難い文字像」を得る。最後に「認識し難い文字像」を細線化し、「認識し難い文字像」

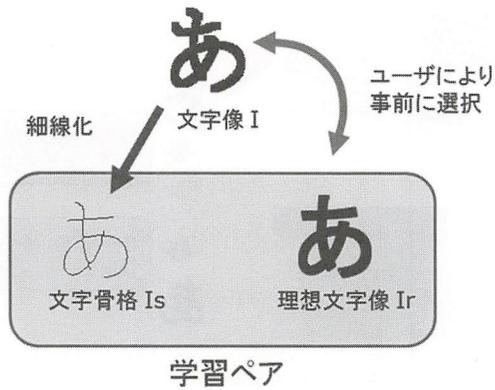


図5 学習ペアの作成

の文字骨格に対する「理想文字像」という学習ペアを得る。図5にこの学習ペアの作成処理について示す。

次に、これら学習ペアから学習データを作成する。学習データは図6に示すように、学習画像ペアからパッチ単位でラスタスキャンにより取得する。したがって、パッチサイズを  $S_w \times S_w$  とすると、 $D(=S_w \times S_w)$  次元の骨格文字像ベクトルデータ  $y_i (i=1, \dots, N)$  とそれに対応する理想文字像ベクトルデータ  $x_i (i=1, \dots, N)$  を得る。本研究ではリッジ回帰により学習を行い、 $y_i$  と  $x_i$  の関係性を学習する。

### 3. 実験と考察

本節では、種々の文字画像に対して提案手法を適用しその有効性を検証する。図7, 8, 9はひらがな「れ」, 「ほ」, 「を」の3種類に対して提案手法を適用した結果である。これらの結果からわかるように、各種太さの文字に対して、構造変換結果の文字の太さは、ほぼ同一となっている。しかしながら、各文字において何箇所か文字が空洞化している部分が存在する。これは学習をパッチ単位で行っているため、文字骨格をほとんど含んでいないデータの変換も同時に学習するという現象が起り、学習が良好に行えていないためだと考えられる。そこで本研究では、構造変換結果に対して空洞を埋める「穴埋め」処理をしたものを最終出力として採用する。文書画像に対する適用結果を図10に、

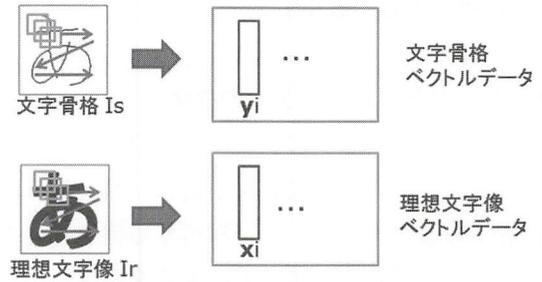


図6 学習データの取得

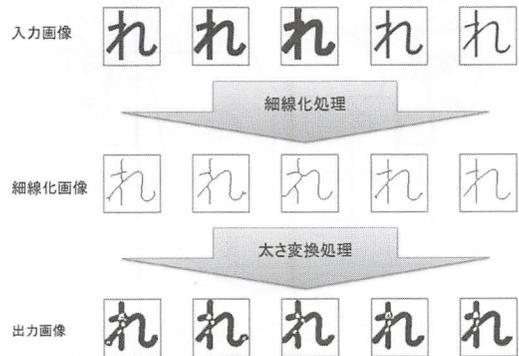


図7 ひらがな「れ」に対する構造変換結果

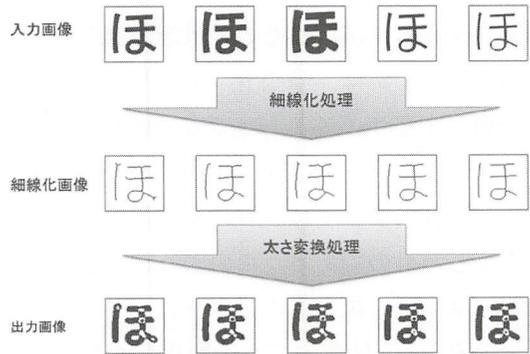


図8 ひらがな「ほ」に対する構造変換結果

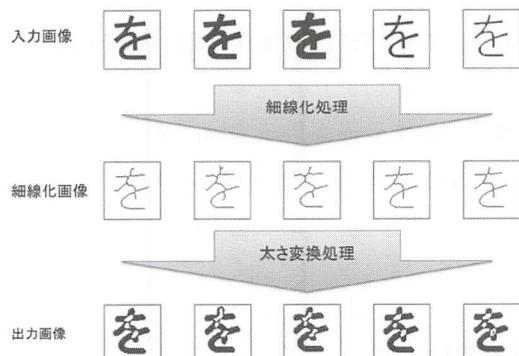


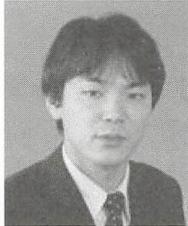
図9 ひらがな「を」に対する構造変換結果



## 乳がんに対する RFA 治療支援システムの開発

### Development of RFA assisted System for Breast Tumor

201006



研究代表者	早稲田大学 理工学術院	次席研究員	小林 洋
共同研究者	早稲田大学 理工学術院	研究助手	渡辺 広樹

#### [研究の目的]

近年、世界各国における乳がん罹患率および死亡率は急激な増加傾向にある。こうした中、診断技術の発展に伴い、従来の診断では確認できなかった微小病変を早期に発見することが可能になっている。それに付随して、治療法についても、従来の外科的切除法に代わる新たな治療法として、腫瘍に電極針を穿刺（針を刺す）し、ラジオ波をながすことでジュール熱により腫瘍のみを局所的に焼灼・壊死させるラジオ波焼灼療法（Radio Frequency Ablation: RFA）を選択する症例が増加している。RFA は病変のみを局所的に壊死させることが可能であり、患部以外の組織の損傷が少ない。特に乳がんの治療においては、乳房の形状保全が可能であり、整容面で優れていることから、女性の精神的な負担を軽減できる点に大きな利点がある。

しかし、その一方で、その手技には困難な点も多い。たとえば、RFA 施行時の超音波画像の診断画像からは焼灼領域が正確に把握できない。また、一般に乳がんは不整形であり複雑な形状を有するが、既存の RFA 装置では、楕円形状の焼灼領域しか形成できず、腫瘍を過不足なく焼灼することができない。

本研究では、従来の RFA 装置では治療が困難であった任意形状の乳がんに対し、過不足ない最適な焼灼領域の形成を高精度に実現する RFA 治療支援システムの開発を目的とする。

特に、本申請では、システムの最重要要素である生体の熱力学特性の取得、および、医師が術中に操作し、焼灼の進行状態を確認する RFA 用温度分布シミュレータの開発に取り組んだ（図 1）。

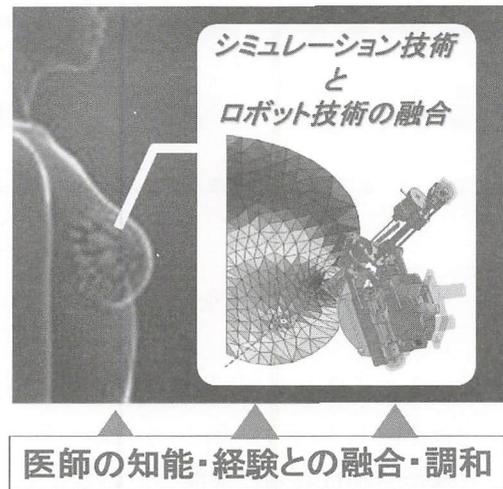


図1 コンセプト

#### [研究の内容・成果]

本研究にて開発する焼灼支援システムは、RFA 中の患部の時間的・空間的温度分布をリアルタイムに推定する高精度温度分布シミュレータを規範とし、シミュレータから提示される温度分布情報に基づき、患部への供給熱量をシステム自らが調整するものである。シミュレータにより求解された最適な熱量を患部に供給することで、最終的に腫瘍のサイズ・形状に

即した理想的な焼灼形状を形成することが可能になる。本申請では、豚肉の熱力学特性を実験より詳細に取得し、取得した特性を用い、数値計算手法を用い RFA 用温度分布シミュレータを開発した。

### 1. 生体組織の熱力学特性

生体組織は温度上昇に伴い組織の組成が変化するため、熱物性値が変化することが知られている。したがって、高精度な温度分布シミュレータを開発するには、生体組織の熱物性値の温度依存性をシミュレーションに反映させる必要がある。そこで食用の豚肉を用い、解析精度に大きく影響する熱伝導率および比熱の温度依存性をそれぞれ非定常熱線法、温度変調法より取得した。実験結果を図2に示す。実験結果より、豚肉の熱伝導率は、75℃以下では線形増加し、75度以上では、たんぱく変性に伴う水分の減少により、値が急激に減少することが分かった。また比熱については、すべての温度領域について線形増加する結果となった。

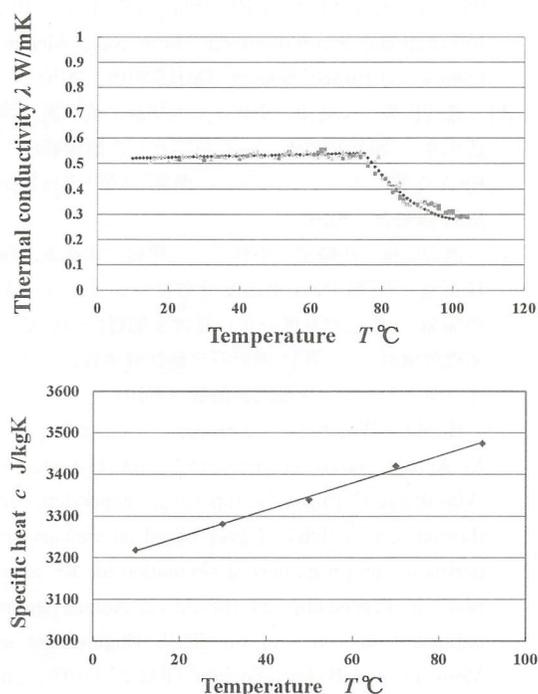


図2 熱物性値

### 2. 温度分布シミュレータの開発

実験より取得した熱力学特性に基づき、有限要素法にて RFA 用温度分布シミュレータを開発した。この際、術中に医師が直観的にシステムを利用することを可能とするため、医用画像解析用フリーオープンソースソフトウェア 3D Slicer を用い、温度分布シミュレーション用 GUI を構築した。図3に開発した GUI を示す。本システムは、MRI, CT 等から取得した DICOM 形式の医用画像から臓器の外形を抽出し、解析のためのメッシュ作成、発熱量計算、温度分布計算を一貫して行うことが可能である。有限要素解析にあたっては、RFA 中に生じる実際の誘電加熱の原理に即し、電気的作用と熱的作用の連続問題として解析を行った。具体的には、まずラジオ波が肝臓内部に形成する電界分布を算出するため、静電場の原理式であるラプラス方程式を有限要素法により離散化し電界分布の数値解析解を求めた。続いて発熱量分布を算出するため、ジュールの法則に基づき空間的な発熱量分布を求めた。最後に、温度分布を算出するため、Pennes の生体熱輸送方程式を有限要素法により離散化し、繰り返し計算により温度の時間的な変化を求めた。なお温度の算出にあたっては、熱物性値の温度依存性を考慮するため、各要素の温度に応じて逐次熱容量マトリクス、および、熱伝導マトリクスを更新した。

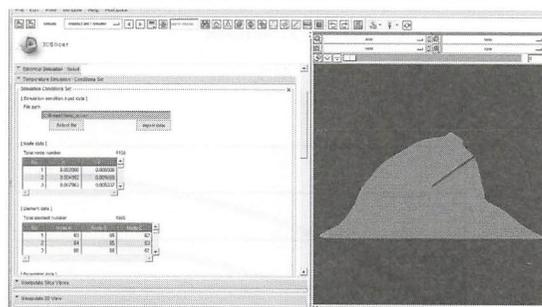


図3 シミュレーション用 GUI

### 3. 乳房 RFA 中の温度分布評価

医用画像から取得した乳房外形データを元に、GUI を用いて、乳房 RFA 中の温度分布解析を

実施した。解析にあたっては、モデル底面には対極板が存在することを仮定し0Vを、針先端には28Vを設定した。また、初期温度は体温を想定し36℃とした。

図4に、本解析から得られた40分後、80分後の乳房の温度分布を示す。解析の結果、時間経過とともに針先端近傍の温度が上昇している。しかし、針から一定距離以上の領域においては、温度が十分に上昇せず、局所的な焼灼がなされている。

図5は、針先端からの距離がそれぞれ0[mm]、5.7[mm]、18.5[mm]の3点、点A、点B、点Cの温度変化を示す。組織が変性する温度は一般に60℃といわれているが、針先

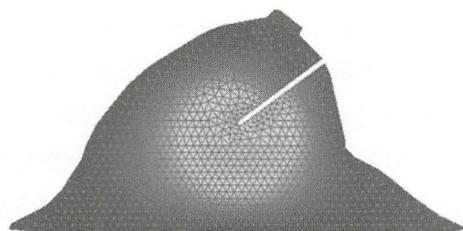
端から最も遠方に位置する点Cにおいては60℃に達していない。これは、生体組織の熱伝導率が極めて低いため、針近傍に生じた発熱が周辺組織に十分に伝わらないためと考えられる。

[今後の研究の方向、課題]

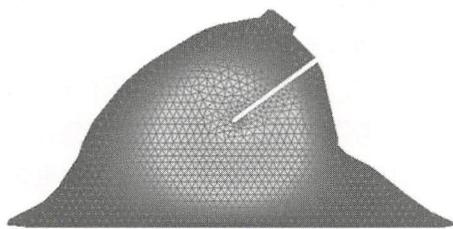
今後は、乳腺、脂肪等の乳房が有する組織の複雑性を反映したシミュレータに改良していくとともに、摘出乳房を用いたin vitro実験、およびブタ等を用いたin vivo実験を通じ、シミュレータの精度評価を行っていく。これらのプロセスを経て、「豊富な経験を有する医師」と「定量化が得意な外科支援機器」の能力・知能を調和させ、一体となって手術に取り組むシステムの完成を目指す。

[成果の発表・論文等]

- 1) 渡辺広樹, 山崎望, 小林洋, 大平猛, 橋爪誠, 藤江正克: “血流の存在を考慮した肝臓RFA用温度分布シミュレータの開発”, 第19回日本コンピュータ外科学会大会 (2010)
- 2) Hiroki Watanabe, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, “Organ Biomechanical Simulators for Model based Control of Robotic RF Ablation System”, 2010 International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science (MHS2010), 2010
- 3) 渡辺広樹, 山崎望, 小林洋, 大平猛, 橋爪誠, 藤江正克: “臓器物理モデルを規範とした画像誘導下RFA支援ロボットシステムの開発”, 第5回OpenMRI研究会 (2010)
- 4) 渡辺広樹, 山崎望, 小林洋, 大平猛, 橋爪誠, 藤江正克: “肝臓RFA用温度分布推定シミュレータの開発 ~血流が温度分布に及ぼす影響についての基礎的検討~”, 第11回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2010)
- 5) Hiroki Watanabe, Nozomu Yamazaki, Yo Kobayashi, Tomoyuki Miyashita, Makoto Hashizume, Masakatsu G. Fujie: “Temperature dependence of thermal conductivity of liver based on various experiments and a numerical simulation for RF ablation”, in Proceedings of the 32nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2010), pp. 3222-3228 (2010)



(a) 40分加熱後



(b) 80分加熱後

図4 温度分布

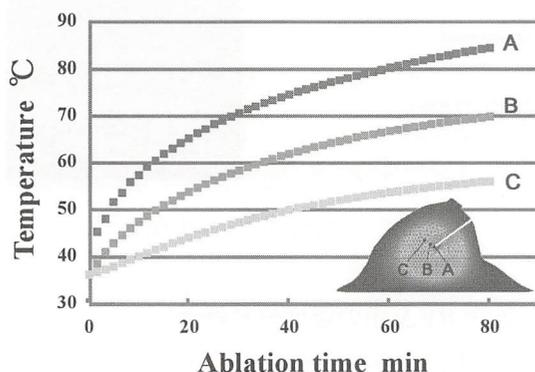


図5 温度の時系列変化

## 超音波による外部モニタリングおよび制御可能な 局所的薬剤投与用カプセルの開発

Ultrasonically traceable and controllable microcapsule for local drug administration

2001007



研究代表者 東京工業大学 精密工学研究所 准教授 小山大介  
共同研究者 同志社大学 生命医科学部 教授 渡辺好章

### [研究の目的]

薬物投与の空間的・時間的制御を目的とした本手法は、局所的薬剤投与に伴う副作用の抑制や、薬剤量の減少に伴うコストパフォーマンスの改善等の効果が期待される。我々のグループが提案するマイクロカプセルを用いた超音波 DDS は、周囲に弾性膜を有し、中空で内部に薬液と気泡を内包した3層構造の粒径がマイクロメートルオーダのカプセルを血流内に投与、超音波を用いて外部モニタリングを行いながら患部付近で捕捉、強力超音波によりカプセルを破壊し患部付近のみに薬液を放出するという3段階で構成される。超音波 DDS において、マイクロカプセルを破壊するための強力超音波を体内に照射した際、衝撃波の発生や強力超音波による局所的な温度上昇により生体に対して悪影響を及ぼす恐れがあるため、超音波の照射音圧は極力低く抑える必要がある。しかしながら弾性膜を有するカプセルの超音波による破壊条件(破壊に適した超音波の周波数と音圧)は、カプセル膜材質の弾性定数、膜厚等の機械的要素に強く依存すると考えられ不明瞭な部分が多い。本研究では超音波 DDS に使用可能な生体適合性を有するセンサ型マイクロカプセルの作製およびその周囲弾性膜の定量的評価について検討した。

### [マイクロカプセルの作製]

カプセル作製法は乳化によって発生した液滴(薬液)をカプセル核とし、液滴周囲にカプセル膜を精製後、フリーズドライにより内部液体を蒸発しカプセルを作製する方法(ダブルエマルジョン法)を用いた。本手法は従来のカプセル膜生成後に熱を加えることにより内部液体を蒸発させる手法とは異なり、従来法では作成できなかった非常に薄く、生体内で分解可能な材質の膜を持つカプセルを任意の大きさで作製できることが期待される。作製手順の一例を以下に示す。

- ① カプセル膜となる生体適合性を有するポリ乳酸(分子量 100000) 0.5 g を高揮発性の媒質(塩化メチレン 20 ml) にマグネチックスターラを用いて溶解して高分子溶液を作製する。
- ② 上記高分子溶液に 4 ml の水を加え、ホモジナイザを用いて回転数 10000 rpm で乳化する。
- ③ カプセル核を保持するための高粘度溶液(PVA 水溶液, 2 wt%, 100 ml) と②の乳化液を混合し、ホモジナイザ(10000 rpm, 1 分間) で攪拌することにより、カプセル核となる  $\mu\text{m}$  オーダサイズの液滴が発生し、その液滴周囲にポリ乳酸製カプセル膜が精製される。攪拌速度、攪拌時間、PVA 水溶液粘性などの条件により、カプセル径を

コントロールできる。

- ④ ③に 100 ml の水を加えて約 5 時間マグネチックスターラで攪拌し、カプセル内部の塩化メチレンを十分に蒸発させ、作製したカプセルを水で洗浄する。
- ⑤ 24 時間程度フリーズドライ (-70℃) を行い、カプセル内部の液体を除去する。

図 1, 2 は作製したカプセルの電子顕微鏡像と粒径分布であり、人体投与可能な 8 μm 以下の平均粒径 2 μm のカプセルの作製に成功した。

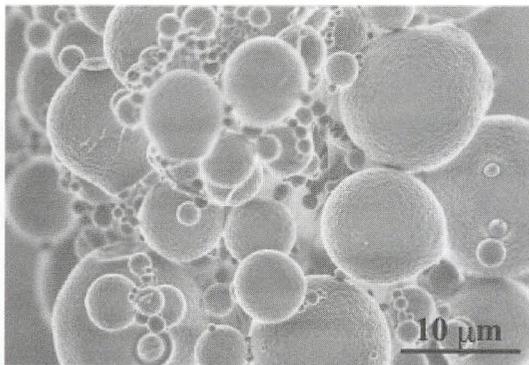


図 1 生体適合性カプセルの電子顕微鏡像

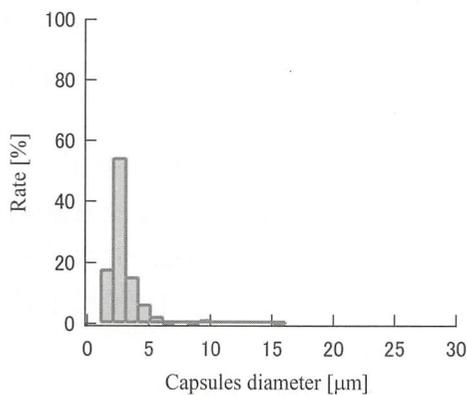


図 2 作製したカプセルの粒径分布

[カプセルの音響特性]

作製したカプセルに超音波を照射すると、駆動超音波の周期に呼応してカプセルは膨張収縮運動を繰り返す。カプセル振動を観測することにより周囲膜弾性を評価した。複数個のカプセル群を生体ファントム内水中に分散させ、そのカプセル懸濁液中に向かって超音波パルスの送

受波を繰り返した。図 3 は水中にカプセルが存在する場合としない場合の各超音波受波波形であり、カプセルの存在によって超音波パルスが減衰していることがわかる。図 4 はその周波数スペクトルをあらわしており、各波形のスペクトルの差を表したのが図 5 である。伝搬した超音波パルスのエネルギーの一部は、カプセルの膨張収縮運動によって熱エネルギーとして消費されると考えられる。したがって図 5 より、カ

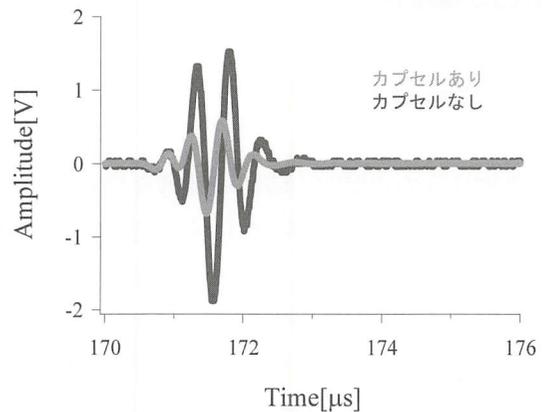


図 3 超音波透過波の時間波形

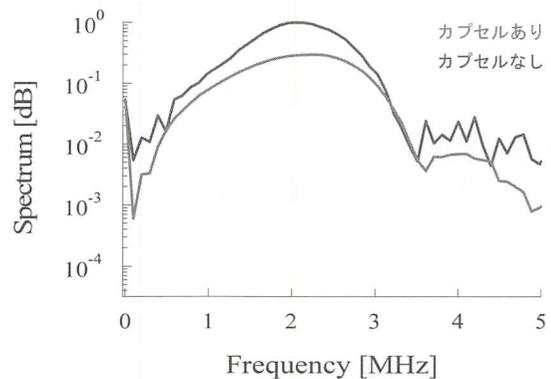


図 4 超音波透過波の周波数スペクトル

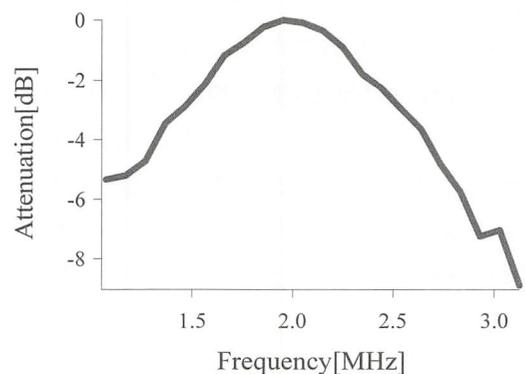


図 5 周波数スペクトルの差

プセルの共振周波数は減衰が最も大きい 2 MHz であると考えられる。周囲に膜を持たない直径  $2\ \mu\text{m}$  の自由気泡の場合、理論式より共振周波数は 1.7 MHz であることから、カプセルの共振周波数は、同じサイズの気泡に比べて周囲膜弾性の効果により上昇することがわかった。

[単一カプセル振動の光学的観測]

微小気泡の挙動観測手法としては、高速度カメラを用いた観測システムが主流である。しかし画像の空間分解能が低い等の欠点があり、微小振幅振動する気泡挙動の観測は難しい。本報告では、レーザドップラ振動計（以下 LDV）を用い、定在波音場中のカプセル挙動の観測を試みた。最初に、振動振幅が大きい自由気泡について高速度カメラとの光学的同時観測を行い、振動波形を比較し、その有用性について検討した。図 6 は実験系であり、高さ 60 mm 内径 55 mm のセル内を脱気水で満たし、下部に接着した共振周波数 27 kHz のボルト締めランジュバン振動子より超音波を照射する。水面高さを調節することによりセル内に定在波を形成させ、音圧腹部に気泡を捕捉した。捕捉された気泡の半径はおよそ  $40\sim 100\ \mu\text{m}$  である。高速度カメラ (HPV-1, SHIMADZU) と LDV (NLV-2500, Polytec) の焦点を気泡の捕捉位置に一致させた。高速度カメラはキセノンランプの連続光をバックライトとし、LDV はセルの上部に設置し、気泡の挙動を観測した。高速度カメラには長距離望遠鏡を装着し、空間分解能は  $4\ \mu\text{m}/\text{pixel}$  である。また、LDV には対物レンズ (M Plan Apo 20 $\times$ , Mitutoyo) を装着した。対物レンズの倍率は 20 倍、作動距離は 20 mm であり、このレンズにより集光されるレーザの最小スポット径は  $1.5\ \mu\text{m}$  である。図 7 は高速度カメラによる観測画像とその時間変化 (円プロット) であり、実線は LDV による観測結果である。LDV 及び高速度カメラにより測定した両波形の振動振幅値が約  $2\ \mu\text{m}$  とほぼ一致してい

ることが確認でき、LDV を用いた観測システムでも挙動観測が可能であると実証している。また、 $2\ \mu\text{m}$  と非常に小さい振動振幅を鮮明に観測できていることから、LDV による観測手法は微小振幅振動を行うマイクロカプセルの挙動観測に適していると考えられる。

超音波照射下における単一カプセルの振動を光学的に観測した。図 8 はその測定系であり、

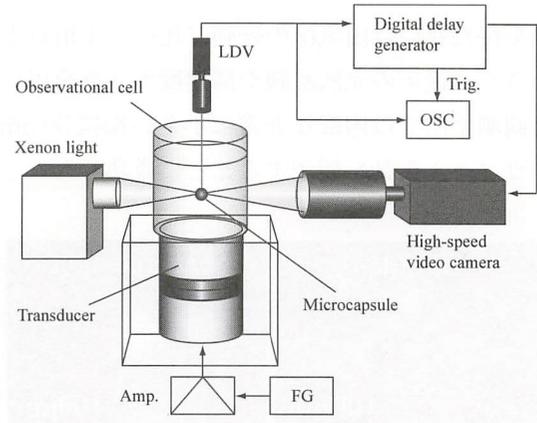


図 6 高速度カメラと LDV による観測系

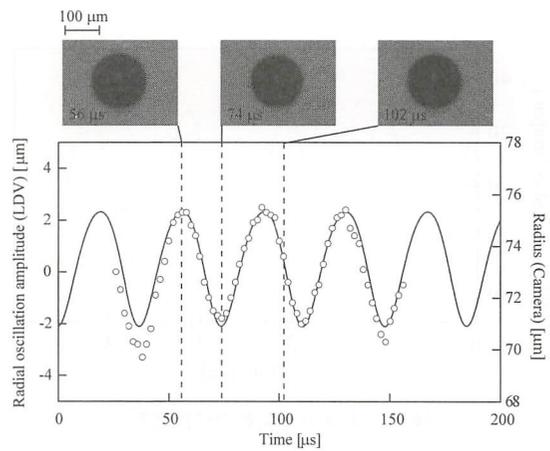


図 7 気泡半径の時間変化

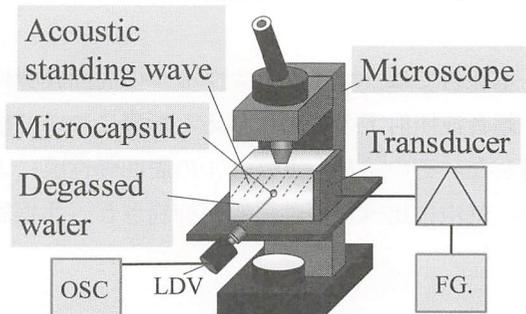


図 8 カプセル振動観測系

顕微鏡視野下のセルを水で満たし、超音波定在波を発生して単一カプセルを捕捉した。捕捉したカプセルの振動を顕微鏡とLDVで観測した。図9は捕捉したカプセルの顕微鏡画像の一例であり、LDVのビームを照射するとその散乱光が確認できた。図10はLDVによって観測されたカプセル振動の時間波形の一例であり、駆動周波数は970 kHz、カプセルの直径は30  $\mu\text{m}$ である。カプセルの振動は同条件における周囲膜を持たない自由気泡の振動に比べて1桁以上小さく、従来の光散乱観や高速度カメラを用いた観測手法では困難な非常に小さい振幅30 nmのカプセル振動を観測することに成功した。

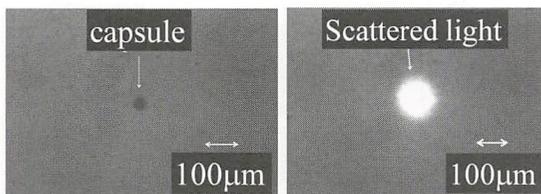


図9 (左) 捕捉カプセルの顕微鏡像 (右) レーザ照射時の様子

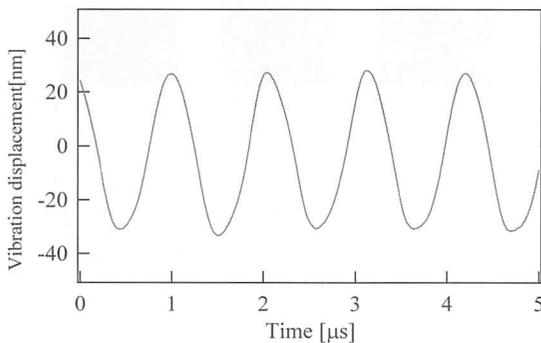


図10 カプセル振動の時間波形

[今後の研究の方向, 課題]

本報告では、マイクロカプセルの周囲膜弾性が超音波照射下の振動に与える影響について検討した。その結果、カプセルの周囲弾性膜により、気泡に比べて振動振幅が抑制され、共振周

波数が上昇することが定性的に明らかになった。今後カプセル膜厚、粒径を考慮に入れた定量的評価を行う予定である。

[成果の発表, 論文等]

1. D. Koyama et al.: "Vibration of a single microcapsule with a hard plastic shell in an acoustic standing wave field," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., Vol. 58, No. 4, pp. 737-743 (2011)
2. H. Kotera et al.: "Measurement of a single microcapsule vibration in an acoustic standing wave field," Proc. 2010 IEEE International Ultrasonic Symposium, pp. 1708-1711 (2010)
3. H. Kotera et al.: "A simultaneous observation system for microbubble vibration in an acoustic field by using a high-speed camera and an LDV," Proc. 20th International Congress on Acoustics, p. 793, (2010)
4. D. Koyama et al.: "Measurement of a microcapsule vibration having a hard plastic shell in an acoustic standing wave," Proc. 20th International Congress on Acoustics, p. 159 (2010)
5. 田畑拓他: 定在波音場中における生分解性カプセルの捕捉と振動測定, 日本音響学会 2011 春季研究発表会講演論文集, pp. 1491-1492 (2011)
6. 吉川泰甫他: レーザドップラ振動計を用いた壁面付着気泡の音響共振特性の測定, 電子情報通信学会技術研究報告. US, 超音波 110 (366), pp. 1-6 (2011)
7. H. Kotera et al.: "Optical observation of biodegradable microcapsules under ultrasound irradiation," 第31回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, pp. 399-400 (2010)
8. T. Yoshikawa et al.: "Observation of a vibrating bubble attached to wall in ultrasonic field by using a laser Doppler vibrometer," 第31回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, pp. 11-12 (2010)
9. 吉田憲司他: レーザドップラ振動計を用いた生分解性マイクロカプセルの振動計測, 日本音響学会 2010 秋季研究発表会講演論文集, pp. 1193-1194 (2010)
10. 小寺宏典他: 超音波駆動された単一マイクロカプセルの振動変位の測定, 電子情報通信学会技術研究報告. US, 超音波 110 (10), pp. 19-24 (2010)

# テーラーメイド医療を実現する染色体ファイバ FISH 解析のための マイクロチップの開発

Development of a High-Throughput Fiber-FISH Microchip for Tailor-Made Medicine

2001008



研究代表者

香川大学 工学部  
知能機械システム工学科

准教授

鈴木 孝 明

## [研究の目的]

遺伝子検査は、ウイルス、細菌検査などの感染症を中心に急速に広まり、ヒト遺伝子検査についても白血病を代表とする血液疾患を中心に利用されている。遺伝子検査法においては、従来の核染色法 (nucISH: Nuclear In Situ Hybridization) から核酸増幅や増感法への移行と平行して、サンプルの微量化・検査の高感度化のニーズが高まっている。

本研究では、従来の nucISH による遺伝子検査の時間短縮と検査精度の向上、サンプルの少量化を主な目的として、1) 伸張染色体の区画化・少量化、2) プロブ DNA 拡散の効率化、3) FISH 効率の向上などの技術的課題を解決することによって、従来の nucISH より短い検査時間、高い分解能、多数サンプルの同時観察に対する有効性を検証した。

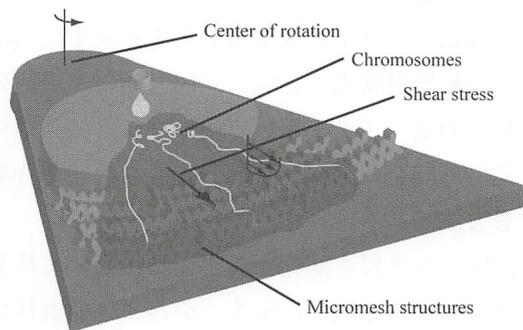
## [研究の内容, 成果]

### 1. 染色体伸張固定の原理

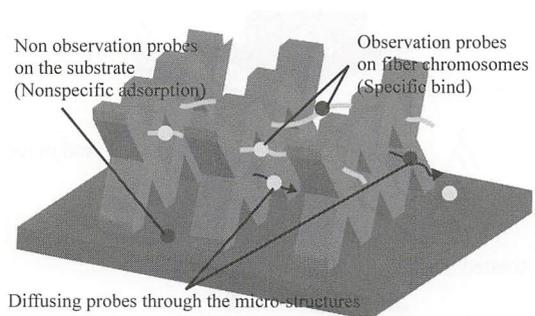
染色体の伸張固定原理の概念図を図1に示す。染色体の伸張にはデバイス回転時の遠心力によって生じる流れ場中のせん断力を利用し、染色体の固定には基板への物理吸着を利用する。図は、デバイスの円形部分を分割した概念図で、実際のデバイスは円形である。円形デバイスの中心が回転中心となり、回転中心に隣接する部

位に滴下台が複数個並び、さらにその周りにマイクロメッシュ構造が同心円状に配置されている。滴下台上に染色体懸濁液を滴下した後に懸濁液が一部自然乾燥することで染色体の一部が基板に吸着、固定される。次に基板を回転させることで遠心力が発生する。遠心力によって基板の表面と気液の界面の間に流れ場が発生し、流れ場中のせん断力により染色体はランダムに伸張される。

染色体が伸張される際、染色体は遠心回転時



(a) Chromosomes stretched by the centrifugal force



(b) Fiber suspension of chromosomes on micro-bridges

図1 高速 FISH マイクロデバイスの概念図

のせん断力により伸張されるため、デバイスの形状を円形とすることで染色体は回転中心から放射状に効率よく均等に伸張される。また、伸張された染色体は、構造が何もない平滑基板上では、網目状にランダムに重なり合うように伸張されてしまい観察対象である染色体が他の染色体によって隠れてしまうため観察が困難である。一方で、本デバイスは、同心円状に配置されたマイクロメッシュ構造上面の谷部分に伸張された染色体の束が固定されるため、規則的・均等に配置できる。本研究では、これを区画化と呼び、その区画化特性を評価した。

また、染色体の特定部位の観察については、蛍光 DNA プローブを用いた蛍光 in situ ハイブリダイゼーション (FISH 法) が一般的である。本研究では、FISH 解析の時間短縮を目的として、ハイブリダイゼーション時間に対するプロローブ結合能を評価した。

## 2. 同心円マイクロメッシュ構造の作製

本研究で用いる固定マスク付き回転傾斜露光法は、図2に示すように、微細なパターンを設けた回転マスク上にレジストを直接塗布し裏面から回転傾斜露光する際に、同じ傾斜角で固定された固定マスクを用いて回転マスクに入射する光の方向を一部に制限し、複雑な構造を作製する方法である。

固定マスク付き回転傾斜露光法によって作製したデバイスを図3に示す。デバイスの直径は15 mm であり中心付近には滴下台が4つある。

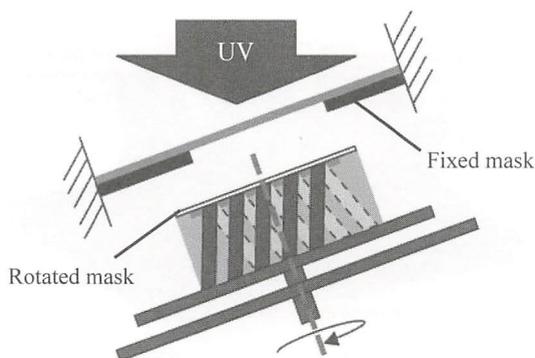


図2 固定マスク付き回転傾斜露光の原理

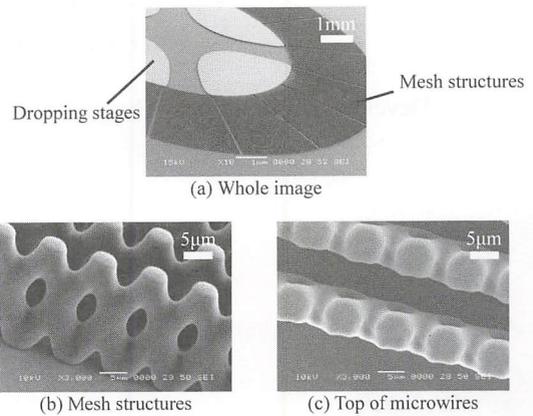


図3 作製したマイクロデバイスのSEM像

滴下台を複数設けることで一度に複数種のサンプルを同時に伸張することが可能となる。滴下台の周りには同心円状にメッシュ構造があり、このメッシュ構造に基板の回転により伸張された染色体が懸架・固定される。

## 3. ヒト染色体伸張実験

デバイス構造の有用性を検証するため、flat, wall, mesh (提案デバイス) の3種類の構造を用意し、染色体の伸張形状の比較検討を行った。flat デバイスの表面はマイクロ構造が無い平滑なガラスであるためほぼ平面である。wall デバイスは、幅  $5\ \mu\text{m}$ 、高さ  $25\ \mu\text{m}$  の同心円状の壁面構造を有しており、壁の間隔は  $10\ \mu\text{m}$  である。mesh デバイスは、幅  $5\ \mu\text{m}$ 、高さ  $25\ \mu\text{m}$  の網目状構造の壁面が同心円状を有しており、壁面の間隔は  $10\ \mu\text{m}$  である。

実験は、まずはじめに、デバイスを UV オゾンクリーナーで20分間  $\text{O}_2$  アッシングし、デバイス表面の洗浄を行う。次に、flat デバイスではデバイス中心、他の2種のデバイスでは滴下台に HeLa 細胞の細胞核を懸濁したサンプルを  $0.5\ \mu\text{l}$  滴下し、自然乾燥により染色体の一部をデバイス表面に吸着させ、溶解液によりタンパク質を溶解させた後にスピコートによりデバイスを回転数  $5000\ \text{rpm}$  で回転させる。その後、染色体全長を観察する場合には、染色が容易な YOPRO-1 による染色処理を行った後に蛍光顕微鏡によって基板上的染色体を観察する。

また、染色体の FISH 染色効率の評価については、DNA プローブに MYC/CEN-8 FISH プローブミックス (DAKO) を使用し、染色体全長の染色液として DNA プローブとの蛍光スペクトルの重複を避けるために DAPI を使用した。

撮影した染色体の形状評価としては、伸張染色体が規則的・均等に配置されたことを示す区画化の指標として、染色体の束であるバンド同士の間隔、バンドの傾き、蛍光強度 (染色体の束の大きさ) の変化について評価した。これらの指標のばらつきが少ないほど、その後の特定部位の観察が容易であることを示す。

染色体の伸張の様子を図 4 に示す。図より基板中心から 2 mm ほど離れた滴下台に白色の塊を確認でき、染色体は滴下台に適度な自然乾燥により部分的に吸着固定されていることが分かる。また滴下台からデバイスの円周方向に向かって緑色の帯が確認できる。このことより染色体がデバイスの外周方向に向かって伸張されていることが分かる。特に、本デバイスは 4 つの滴下台を設けているが、各滴下台から別々のサンプルが互いに重なることなく、同時に伸張可能であり、単一デバイスを用いたマルチスクリーニングが可能であることが分かる。

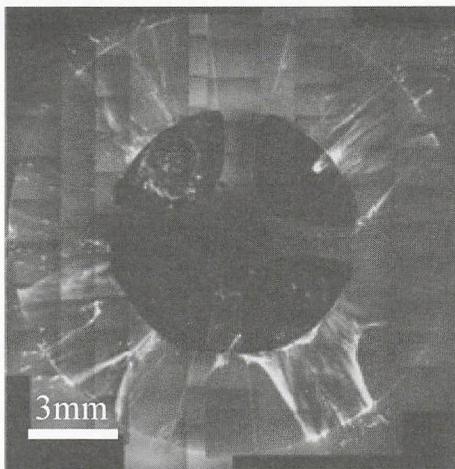


図 4 伸張された染色体像

次に、撮影した局所画像からデバイスの形状に対する染色体バンドの間隔を求め、そのばら

つきである分散度を求めた結果を図 5 に示す。グラフの縦軸が伸張染色体バンドの間隔の分散で、横軸がデバイスの表面形状である。図より、mesh の時に最も分散の値が小さいことが分かり、mesh デバイスは平滑な flat デバイスと比べ、ばらつきを 97.7% 減少させることができた。染色体バンドが等間隔に伸張されている理由としては、mesh 構造上部の V 字の谷部分が等間隔に並んでいるためであると考えられる。

次に mesh デバイスについて、伸張染色体バンドに含まれる染色体数と滴下時の染色体懸濁液の初期染色体濃度 (サンプル濃度) の関係性を評価するために、サンプル濃度による伸張染色体バンドの蛍光強度変化を測定した。測定条件として、サンプル濃度を 2.5%~10% の 4 段階に分けて、各濃度につきメッシュ構造のデバイス 3 枚ずつ、デバイス 1 枚につき 5 箇所観察した。結果を図 6 に示す。図の縦軸は伸張染色体の蛍光強度を表し、横軸は滴下時のサンプル濃度である。図より、濃度が 5% のときに蛍光

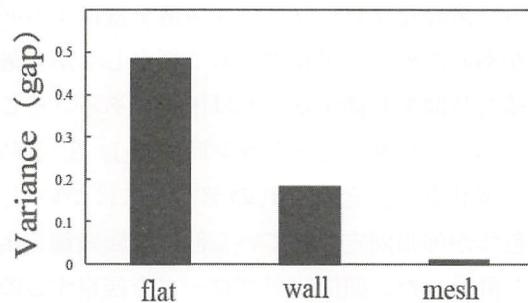


図 5 染色体バンドの間隔の分散

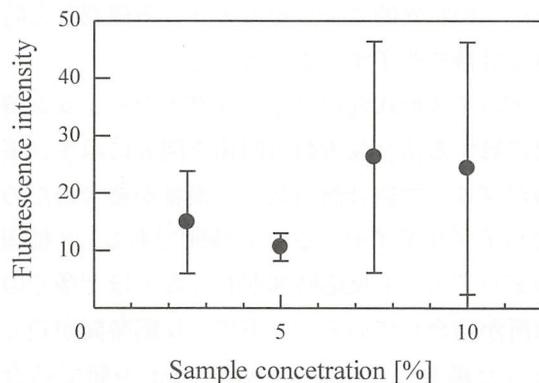


図 6 DNA バンドの蛍光強度

強度のばらつきが最も低く、かつ、各谷構造上に懸架された染色体数が均等であることが分かる。サンプル濃度と平均蛍光強度には、強い相関は見られないが、濃度の上昇と共に、平均蛍光強度も上がる傾向にある。

以上の実験結果から、mesh デバイスは、flat や wall デバイスよりも、染色体バンドが一定の間隔・角度で、かつほぼ同量の染色体数で伸張されており、伸張染色体の区画化が向上し、伸張固定後の染色、および、観察が容易になることが分かった。

次に、mesh デバイス上で伸張染色体を FISH 解析し、蛍光顕微鏡で取得した複数の蛍光像をマージした画像を図7に示す。図中の白色の蛍光がプローブである。プローブが直線状に連なっていることから伸張染色体の特定の部位にプローブが結合していることが分かる。ここで、3種類のデバイスのDNAプローブと伸張染色体との結合にかかる時間を評価した。結合評価においては、ハイブリダイゼーション後のプローブを観察する前に、特異的結合をしなかった余分なプローブミックス液を洗浄する必要があるため、リアルタイムで観察しながら最短結合時間を評価することは困難である。そこで、ハイブリダイゼーション時間を1, 3, 5時間と変化させ、それぞれのデバイスについて、染色体が伸張固定されている部位を顕微鏡を走査し計数した。顕微鏡でプローブを観察する際に、デバイス全体にわたって観察することは、領域が広いと非常に困難であることから、プローブの特異的結合点を最大5カ所確認した時点で計数を終了することとした。

デバイス形状別のハイブリダイゼーション時間に対する結合箇所数の関係を図8に示す。縦軸がプローブ結合箇所数で、横軸が結合のためのハイブリダイゼーション時間である。3種類のデバイスとも反応時間が長くなるほど多くの箇所が結合している。一方で、反応時間が短くなった場合には mesh, wall, flat の順で結合箇所数が少なくなってくる。このことから、

mesh デバイスが短時間で多くの箇所にプローブが結合していることが分かり、計測した範囲内では、mesh デバイスはハイブリダイゼーション時間が1時間で結合箇所を確認できたことから、flat デバイスの5倍程度の早さで特異的結合を観察できるといえる。flat デバイスは、伸張染色体がデバイス表面に密着し、かつ染色体が複雑に重なり合って伸張されるのに対して、mesh デバイスや wall デバイスでは、染色体がつり橋状に液中に懸架されるため、染色体の構造自由度が高く、プローブとの結合が容易になったと考えられる。また、wall と mesh デバイスの比較では、wall デバイスでは mesh デバイスに比べて伸張染色体バンドにばらつきが大きいことから、プローブ結合部位が多数の非結合部位の染色体で覆われたり、プローブの拡散



図7 伸張染色体の FISH 像

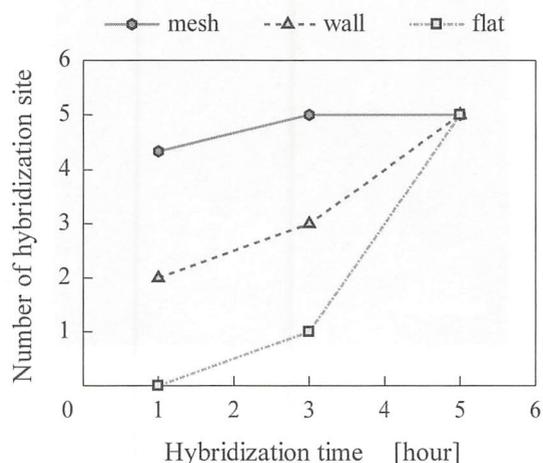


図8 染色体の FISH 染色効率

を壁構造が妨げたりするために、プローブ結合時間が長くなると考えられる。以上より、提案したデバイスが、特定部位の観察に用いられる FISH 解析において、観察を定量的かつ高速にできることが分かった。

#### [今後の研究の方向, 課題]

本研究では、遺伝子検査において用いられる染色体特定部位の高速解析を目的として、染色体の伸張制御性、複数サンプル同時操作を簡便に行うデバイスを提案した。研究の結果より、作製したデバイスは、臨床診断を初めとする遺伝子検査において、特定項目の高速遺伝子解析に有効であることが分かった。今後は、ターゲットとなる特定遺伝子を選定し、デバイスの有効性を個別に検証すると共に、検査のさらなるシステム化、高速化を目的として、細胞の固定から、染色体の抽出、伸張、懸架、解析までをワンチップ上で実現する方法の検討を行う。

#### [成果の発表, 論文等]

##### 論文

- (1) 平丸大介, 鈴木博之, 神野伊策, 小寺秀俊, 鈴木孝明: 多重マスク回転傾斜露光法による3次元複雑マイクロ構造の作製, 日本 AEM 学会誌, Vol. 18, No. 4, pp. 377-382. (2010)
- (2) 鈴木孝明: 単一マスク回転傾斜露光技術の応用展開, (解説論文), 電子材料 (工業調査会), 「特集 - 応用分野を拡大するマイクロマシン/MEMS 技術」, pp. 28-33, 2010年7月号. (2010)
- (3) 鈴木孝明: アセンブリフリー回転傾斜露光法を用いた細胞アレイの作製とその応用, (解説論文), エ

レクトロニクス実装学会誌, Vol. 13, No. 3, pp. 194-199. (2010)

##### 国際会議

- (1) H. Suzuki, D. Hiramaru, K. Terao, H. Takao, F. Oohira, H. Kotera, and T. Suzuki: A High-Throughput FISH Microchip for Clinical Genetics, Proceedings of The 14th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences [MicroTAS2010], pp. 702-704, Groningen, Netherlands. (2010. 10. 3-7)

##### 国内学会

- (1) 鈴木博之, 平丸大介, 寺尾京平, 高尾英邦, 大平文和, 小寺秀俊, 鈴木孝明: 同心円マイクロメッシュ構造を用いた高速染色体解析デバイスの開発, 第27回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, pp. 522-527, くびきメッセ (島根県松江市). (2010. 10. 14-15)
- (2) 高崎翔一, 寺尾京平, 高尾英邦, 下川房男, 大平文和, 鈴木孝明: 単一細胞操作デバイスにおける流路幅の影響に関する研究, 日本機械学会 情報・知能・精密機器部門講演会 [IIP2011], pp. 181-183, 東京電機大学 (東京都). (2011. 3. 22-23)

##### 招待講演

- (1) 鈴木孝明: マイクロデバイスを用いた細胞・染色体解析技術, 若手医工連携研究者のネットワーク形成と独創的生体医工学研究テーマの設定のための講演会, 徳島大学ソシオテクノサイエンス研究部 (徳島大学工学部). (2011. 1. 14)
- (2) 鈴木孝明: マイクロ・ナノ加工技術とその応用, 将来加工技術第136委員会 第11回研究会 (合同), 日本学術振興会 将来加工技術第136委員会 (学士会館: 東京都千代田区). (2010. 11. 19)
- (3) 鈴木孝明: 同心円マイクロメッシュ構造を用いた高速染色体解析デバイス, 第1回先端ナノバイオフォーラム, 兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 (姫路キャスパホール, 兵庫県姫路市). (2010. 11. 15)

## 人間と機械のリズムの調和に関する基礎研究

A basic research on harmonious interaction between man and machine

2001009



研究代表者	独立行政法人理化学研究所	研究員	竹市博臣
共同研究者	九州大学 芸術工学研究院	教授	中島祥好

### [研究の目的]

リズムは、「ひきこみ」という言葉にも示されるように、ものの動きや情報の流れにおける調和の基本である。人間においては音楽・言語といったコミュニケーションの基盤、機械においては動作と制御の基本であろう。リズムを持った刺激に対して、人間の心と脳は鋭敏に反応し、脳波・脳磁場に現れるような形でもリズムを生みだすが、脳内のリズム情報処理に関する基礎研究は限られている。本研究では、心理学的な錯覚を応用したリズム刺激聴取時の脳波・脳磁場を分析することにより、リズム情報の時空間的脳内表現を、脳活動の計測と数理工学的手法を組み合わせて解明する。

### [研究の内容, 成果]

リズムを持つ刺激に対する脳の定常反応 (Galambos et al., 1981) に関する研究は少なくないが、刺激によって得られる入力リズムの規則性と人間にとっての知覚リズムの規則性の調和が、脳活動では、どこでどのようなタイミングで表現されているのかを明らかにした研究はない。本研究では、単純な(要素的な)リズム刺激によって引き起こされる錯覚現象を用いることで、物理的なリズムと知覚されるリズムを分離し、それぞれに対応する脳活動を観測することを試みた。

本研究では、実験参加者に対して、隣接する3音で定義される2つの空虚時間 T1 (第一音から第二音までの無音区間) および T2 (第二音から第三音までの無音区間) を刺激として呈示した。実験参加者が、T1 と T2 が等しい時間間隔と知覚されるか、等しくない時間間隔と知覚されるかを判断するという課題を行っている場合、および、刺激を受動的に聴取している場合の脳波・脳磁場加算平均波形を解析の対象とし、リズムパターンの要素である3音が、等しい間隔からなる等リズムと知覚されるとききの脳活動と、不等リズムと知覚されるとききの脳活動がどのような関係にあるのかを分析した。

この、隣接する3音で定義される2つの空虚時間という刺激は、「時間同化錯覚」と呼ばれる錯覚を引き起こすことが、長年の精神物理学的研究により知られている (Nakajima, ten Hoopen, and van der Wilk, 1991; Miyauchi and Nakajima, 2005; ten Hoopen et al., 2006)。すなわち、 $-80 \leq T1 - T2 \leq 50$  [ms] なる関係が満たされる場合は、 $T1 \neq T2$  であってもほとんどの場合  $T1 = T2$  と知覚される。とくに、 $T1 < T2$  においては、あたかも T2 が時間的に縮小したかのような速いリズムが知覚され、この現象は「時間縮小錯覚」とよばれる。そこで、物理的にはさまざまな、多くの場合  $T1 \neq T2$  となる T1 および T2 の組み合わせから、主観的には  $T1 = T2$  と等リズムに知覚されるパターン、および主観的にも  $T1 \neq T2$  と不等リズム

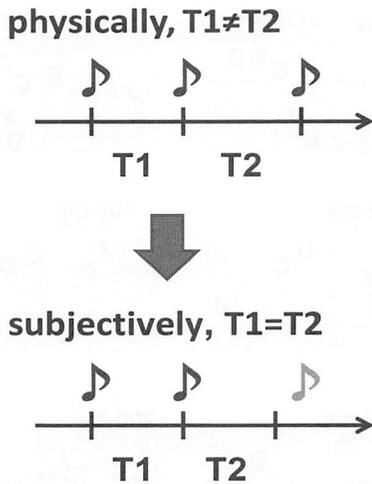


図1 刺激の模式図

に知覚されるパターンをつくることのできる(図1)。

Mitsudo et al. (2009) は、この錯覚に着目して3音からなるパターンを刺激として呈示し、実験参加者が刺激を聴取判断または単純聴取する際の脳波計測を行った。T1を80, 120, 160, 200, 240, 280, 320 [ms] の7段階に変え、T2を200 [ms] に固定し、他いくつかのダミーパターンを含めた。その結果、刺激に対して複数の誘発反応 (event-related potential, ERP) が得られたが、なかでも刺激パターン全体が呈示された直後に、SNCT (slow negative component) とよばれる緩徐成分が右前頭部より記録された。SNCTは、実験参加者が刺激が等リズムかどうかを判断する場合には得られたが、受動的に単純聴取する場合には得られなかった。また、判断する場合でも、不等リズムと判断する場合の方が、等リズムと判断する場合に比べて大きな振幅が得られた。さらに、Mitsudo et al. (2010) は、同様に T1=120, 200, 280 [ms], T2=200 [ms] に条件をしぼって、実験参加者が刺激を聴取判断または単純聴取する際の脳磁場計測を行った。本研究では、これら既存のデータに同じ計測条件で追加計測されたデータを合わせて分析の対象とした。

【従来のアプローチ - 脳活動の頭皮上分布の違いの比較】

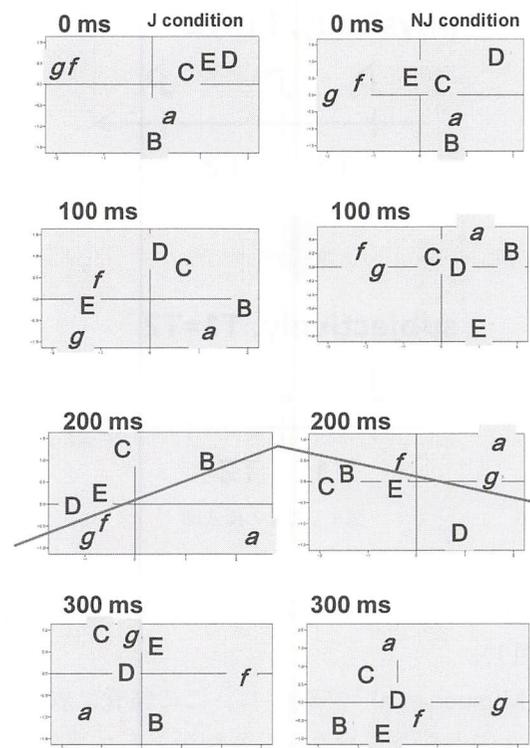
等リズム判断と不等リズム判断がおおむね拮抗する  $T1=280$  [ms] の波形について、実験参加者ごとに、等リズムと判断された場合の脳波の選択的加算平均波形および不等リズムと判断された場合の脳波の選択的加算平均波形を計算し、まずそのそれぞれについて各時点における記録電位間の標準得点を求めた。これは、各時点における脳活動の頭皮上分布を求めることに相当する。続いて、判断が分かれる波形どうし、およびすべての波形どうしのそれぞれについて、ユークリッド距離の自乗和を求め、前者の後者に対する比を「分離度」と定義した。もし等リズムと判断される場合と不等リズムと判断される場合で頭皮上分布に違いがないとすれば、この比は単純に距離を求めたペアの数の比となるので、およそ0.5に近い値となるはずである。他方もし等リズムと判断される場合と不等リズムと判断される場合で頭皮上分布に違いがあれば、違いに応じて0.5より大きな値をとるはずである。分離度を時間の関数として求めると、第二音呈示後から増大の傾向を示し、第三音呈示150 [ms] 後に最大値0.53をとる。Mitsudo et al. (2009) で報告されたSNCT同様に、第三音呈示後に高原状態となった。同様のタイムコースはバチャタリヤ距離と呼ばれる情報量を、等リズムと判断された場合の選択的加算平均波形と不等リズムと判断された場合の選択的加算平均波形の間で計算しても、脳波データ・脳磁場データについて、等リズムかどうかを判断する場合の加算平均波形と受動的に単純聴取する場合の加算平均波形の間で計算しても得られる。これらの分析から、刺激呈示直後のボタン押し反応をする前の段階で、等リズムと判断される場合と不等リズムと判断される場合で脳活動が異なること、換言すれば、等リズムと不等リズムの判断は比較的「初期・低次の」認知的情報処理に基づいて行われていることが示唆される。

しかし、こうした分析にはいくつかの限界が

ある。まず、実験参加者の等リズム・不等リズムの判断に関するデータがなければ選択的加算平均を行うことができないので、こうした分析はできない。実験参加者にリズム判断に関する課題を課すことが不可欠である。他方、リズムに関する情報処理は、日常においては明確な判断をしなくても自動的に行われるものであり、日常的に行われる自動的な情報処理の解明には困難を伴う。工学的な応用においても、有用なのはリズム判断そのものではなく、リズムを持った刺激を扱いながら他の何かを行っているとき（たとえば、組み立て流れ作業をしているとき）のリズム知覚の解明であろう。また、波形を時系列上で直接比較する方法は、対象とする刺激のリズムパターンが異なる場合には直接相互に比較することができないので、等リズム・不等リズムの脳内表現がどのようなになっているのかを明らかにすることはできない。

**【本研究で開発したアプローチ - 相関行列の距離に多次元尺度構成法を適用する】**

そこで、第二音 (T1) が呈示された後 400 [ms] の区間について、100 [ms] ずつの窓を設け、そのそれぞれの窓において、判断条件および単純聴取条件のそれぞれについて、T1 の値つまり刺激の時間パターンごとに脳波の加算平均波形の電極間の相関行列を求め、その相関行列間のユークリッド距離を、心理学的な多次元尺度構成法を用いて視覚化した。その結果を図 2 に示す。第二音 (T1) 呈示後 200 [ms] 経過すなわち第三音 (T2) 呈示直後の 100 [ms] の窓においてのみ、主に等リズムと判断されるパターンと主に不等リズムと判断されるパターンの明瞭な分離が認められた。注目すべきなのは、この結果が判断条件 (左側) のみならず、単純聴取条件 (右側) でも認められたということである。このことから、等リズムと不等リズムの判断は比較的「初期・低次の」認知的情報処理に基づいて自動的に行われていることが示唆される。等リズムか不等リズムかという判断



a~f は T1 を示し、a: 80, B: 120, C: 160, D: 200, E: 240, f: 280, g: 320 [ms] である。a, f, g の小文字で示されている刺激パターンは主に不等リズムと、B, C, D, E の大文字で示されている刺激パターンは主に等リズムと知覚される。左側の J condition は判断条件の結果、右側の NJ condition は単純聴取条件の結果である。布置の左肩の数字は相関行列計算窓の起点の、第二音 (T1) 呈示後の経過時間を表す。

図 2 相関行列の多次元尺度構成法の結果

が刺激呈示直後の 100 [ms] 以内に行われているという結果は、Nakajima et al. (2004) の処理時間仮説とも合致するものである。処理時間仮説では、知覚される空虚時間の長さは、物理的な空虚時間の長さ  $t$  に付加的な処理時間  $\alpha$  を加えた  $t+\alpha$  でおおむね説明できるとされており、精神物理学的研究から  $\alpha$  は 80 [ms] もしくはそれより短いと推定されている。

相関行列の間の距離からその表現を推定する方法には、以下のような特長がある。まず、脳波記録チャンネル間の共変動を捉えながらその位相ないしは時間パターンにとらわれず、リズムパターンの関係を比較することができる。また、相関行列は主成分分析を施すことで、簡単に情報の圧縮を行うことができる。さらに、脳波・脳磁図の見方として、コヒーレンス・位相同期等に比べて単純であるということ

が指摘できる。

#### [今後の研究の方向, 課題]

相関行列の距離に多次元尺度構成法を適用するというアプローチをとることにより, 実験参加者に明示的なリズム判断を求めることなく, そのリズムがどのように知覚されているのかを明らかにすることができる。今後, さまざまな場面でのリズム知覚が調和的であるのかどうかを調べる技術として有効であろうと思われる。また, このアプローチは, 脳波・脳磁図に限らずさまざまな時系列データに適用可能であり, それら時系列データの間関係を明らかにするのに非常に有用なツールである。今後言語音・演奏音など, さまざまなリズムを包含する時系列データに本手法を適用することでも, 人間にとって調和的なリズムの工学的研究を進展させてゆきたいと考えている。

今後の課題として, 相関行列が作る空間に関する数理的分析があげられる。今回相関行列の距離を求めるのに単純な自乗和(ユークリッド距離)を用いているが, これが最適な方法といえるかどうか, さらに検討を要する課題である。

#### [引用文献]

1. Galambos, R., Makeig, S., Talmachoff, P. J.: A 40-Hz auditory potential recorded from the human scalp. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 78, 2643-2647 (1981)
2. ten Hoopen, G., Sasaki, T., Nakajima, Y., Remijn, G., Massier, B., Rhebergen, K. S., and Holleman, W.: Time-shrinking and categorical temporal ratio

perception: evidence for a 1:1 temporal category. *Music Perception*, 24, 1-22 (2006)

3. Mitsudo, T., Nakajima, Y., Remijn, G. B., Takeichi, H., Goto, Y., and Tobimatsu, S.: Electrophysiological evidence of auditory temporal perception related to the assimilation between two neighboring time intervals. *NeuroQuantology*, 7, 114-127 (2009)
4. Mitsudo, T., Nakajima, Y., Uehara, T., Nagaike, A., Remijn, G. B., Takeichi, H., Goto, Y., and Tobimatsu, S.: The neural mechanism of auditory temporal assimilation. *Proceedings of the Auditory Research Meeting, Acoustical Society of Japan*, 40, 365-366 (2010)
5. Miyauchi, R. and Nakajima, Y.: Bilateral assimilation of two neighboring empty time intervals. *Music Perception*, 22, 411-424 (2005)
6. Nakajima, Y., ten Hoopen, G., Sasaki, T., Yamamoto, K., Kadota, M., Simons, M., and Suetomi, D.: Time-shrinking: the process of unilateral temporal assimilation. *Perception*, 33, 1061-1079 (2004)
7. Nakajima, Y., ten Hoopen, G., and van der Wilk, R.: A new illusion of time perception. *Music Perception*, 8, 431-448 (1991)

#### [成果の発表, 論文等]

1. Nakajima, Y. and Takeichi, H.: Explicit and implicit temporal judgments visualized by similarities in electrophysiological signal subspaces. *Proceedings of the Auditory Research Meeting, Acoustical Society of Japan* 40, 795-799 (2010)
2. Takeichi, H., Nakajima, Y., Mitsudo, T., and Tobimatsu, S.: Processing and representing temporal patterns in the brain: Classifier analysis and scaling. to be presented at *13th International Rhythm Perception and Production Workshop*, Leipzig. (2011.7)
3. Nakajima, Y. and Takeichi, H.: Human Processing of short temporal intervals as revealed by an ERP waveform analysis. Manuscript in preparation.

# 物体検出のための周波数スペクトルマーカに関する研究と開発

## Development of Frequency Spectrum Marker for Object Detection

2001010



研究代表者 山梨大学大学院 医学工学総合研究部 助教 豊浦正広

### [研究の目的]

画像マーカをカメラで観測することで、これを貼った物体の位置・姿勢を知ることができる。ロボットなどの機械は、カメラを通して自身と世界の位置関係を理解する。機械に検出しやすいマーカができると、機械は人間世界をより詳しく理解できるようになる。

従来の画像マーカは、観測画像のぶれに弱いという欠点があった。ロボットが移動しながら周囲を観測するような状況においては、この欠点は致命的となる。我々は周波数スペクトルに特徴を持つマーカを提案することで、この欠点を克服する。提案するマーカは観測画像のぶれに頑健であり、GPUを用いて高速に抽出することができる。

### [研究の内容, 成果]

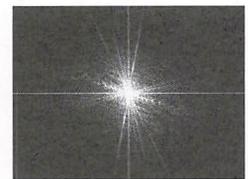
#### 1 動きぶれと焦点ぼけによる高周波成分抑制

従来の画像マーカである ARToolKit のマーカや QR コードは、高周波成分であるエッジでパターンを表現する。このため、動きぶれや焦点ぼけがあるときには、観測画像の高周波成分が抑制され、画像マーカをうまく検出することができなかった。

動きぶれはカメラの露光中にカメラと撮影対象物体の相対位置が変わることによって生じる。カメラ自体が動く場合や、撮影対象物体が動く



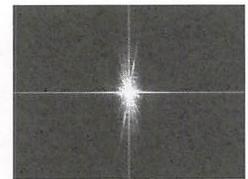
(a) 原画像



(b) (a) の周波数スペクトル



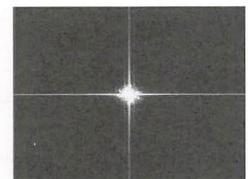
(c) 動きぶれを含む画像



(d) (c) の周波数スペクトル



(e) 焦点ぼけを含む画像



(f) (e) の周波数スペクトル

図1 動きぶれや焦点ぼけによる周波数スペクトルの変化

場合がこれに当たる。図1(a)に示す観測画像があるとき、図1(b)に示すような周波数スペクトルが得られる。これに対して、横方向の動きぶれが起こると、図1(c)に示すような画像が得られる。垂直方向のエッジで高周波成分が失われ、図1(d)に示す周波数スペクトルでは、横軸方向に高周波な成分が失われていることがわかる。

一方で、焦点ぼけはカメラの焦点位置とカメラから撮影対象物体までの距離が異なるときに

起こる。焦点ぼけの大きさは、焦点距離から撮影対象物体が離れるほどに大きくなる。図1(a)に示した観測画像に対して焦点ぼけが起こると、図1(e)に示すような画像が得られる。全方向のエッジで高周波成分が失われ、図1(f)に示す周波数スペクトルでは、全方向に高周波な成分が失われていることがわかる。

動きぶれや焦点ぼけが生じると、観測画像の高周波成分が抑制されることになる。たとえば、拡張現実感実現のためには、移動環境で撮影を行うことが多く、動きぶれを生じさせないことは難しい。また、撮影対象が複数あり、それらとカメラまでの距離が異なる場合には、両方の撮影対象物体に焦点を合わせることはできない。従来の画像マーカは、高周波成分であるエッジでパターンを表現するために、動きぶれや焦点ぼけのある観測画像上でマーカの位置・姿勢の推定をすることが難しいことがあった。

## 2 モノスペクトルマーカの設計

我々は、図2(a)に示すように色が単一の低周波で変化するマーカを設計した。これをモノスペクトルマーカと呼ぶ。単一の低周波成分しか持たないマーカは、動きぶれや焦点ぼけなどによる観測画像の高周波抑制の影響を受けにくい。単一の低周波で構成されることを特徴として観測画像上を探索すれば、マーカ領域を検出することができる。

### 2.1 色の決定

#### (1) 色相 $H$ の設計

図2(d)に示すように、ある  $H$  の値を、マーカの四隅の色として定義する。本研究では、黄色 ( $H=60$ ) をこの色とする。 $H$  の値を手掛かりのひとつとしてマーカの四隅を検出するので、マーカ以外の領域の色としてあまり現れない色が望ましい。仮に現れたとしても、単一の低周波でないような領域でなければ四隅としては検出されないの、あまり問題とはならない。

また、青周辺の色は明度  $V$  が低く観測され

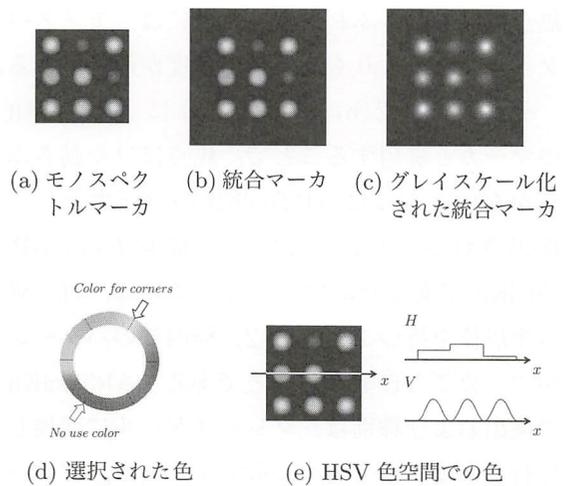


図2 モノスペクトルマーカの設計

やすく、明度を手掛かりとする検出が難しいので、使用しないことにする。他の色を四隅以外の色として用いる。

色の並びをパターンとしてマーカを識別するので、それぞれの色が区別可能なように、 $H$  の値が観測画像からでも識別可能となるように色を選択した。本稿では、実験的に求めた識別可能な色として  $H=60n$  ( $n=0, 2, 3, 5$ ) となる4色を採用した。

#### (2) 彩度 $S$ の設計

彩度  $S$  は、それぞれの色で最大となるように設定する。

#### (3) 明度 $V$ の設計

明度  $V$  は、図2(e)に示すように単一の低周波で変化するように設計する。マーカ検出のときには、 $V$  が単一の低周波で変化することを利用することができる。

### 2.2 ARToolKit のマーカとの併用

マーカの位置は、低周波成分で構成される領域の中で、極大値を取る位置によって定義することになる。低周波信号で極大値を取る位置を検出する精度は、高周波成分であるエッジ位置を検出する精度に比べて劣る。たとえば、ARToolKit のマーカでは、高周波成分であるコーナーによってマーカの位置を定義しており、

焦点ぼけや動きぶれがないときには、モノスペクトルマーカよりも高い検出精度が期待できる。

そこで、図 2(b) に示すように ARToolKit のマーカと併用することで、焦点ぼけや動きぶれがないときには ARToolKit のマーカとして検出されるようにすることを提案する。ARToolKit であるためのマーカの条件は、(1) 黒の矩形枠を持つことと、(2) 枠内部のパターンがマーカごとに異なることである。ARToolKit の検出および識別は、グレースケールに変換して行われる。図 2(b) に示すマーカは、グレースケールに変換すると図 2(c) に示すように見え、ARToolKit のマーカであるための 2 つの条件を満たす。

### 3 実験

実験では、図 2(b) に示したモノスペクトルマーカと ARToolKit のマーカを併用するものを観測した。実験には Logicool 社製ウェブカメラ Qcam S7500 を用い、解像度 640×480、フレームレート 15 fps で撮影を行った。処理端末は、CPU は Intel Core 2 Duo 2.66 GHz、GPU は Nvidia GeForce GTX295 896 MB を搭載したものをを用いた。

実験ではまず、カメラを動かしながら観測画像列を獲得した。このとき、動きを小さくし、かつ、焦点をマーカに合った状態で撮影することで、動きぶれや焦点ぼけがほとんどない観測画像列となるようにした。この画像列に対して、動きぶれと焦点ぼけを人工的に付加した。

それぞれの画像列に対する実験結果を図 3 と図 4 に示す。図 3(a) と図 4(a) は、動きぶれと焦点ぼけをそれぞれ付加した画像の例である。元の観測画像列で ARToolKit によって検出されたマーカ中心位置の座標を正解として、それぞれの生成画像列に対して検出されたマーカ中心位置の座標との誤差を調べた。

図 3(c) は、動きぶれがある画像列に対して、ARToolKit のマーカとして中心位置を検出した結果である。横軸がフレーム番号、縦軸が正

解からの誤差である。ただし、マーカを検出することができなかったフレームでの誤差は、正の無限大としてグラフを作成している。いくつかのフレームに対して、マーカを抽出することができなかったことがわかる。誤差の平均は 27.8、分散は 320.0 であった。対して、図 3(d) は、提案するモノスペクトルマーカとして位置を検出した結果である。ただしこのとき、ARToolKit によって検出される位置・姿勢は利用していない。すべてのフレームでマーカの位置を検出することができ、ARToolKit のマーカとして検出した位置よりも誤差も小さいことがわかる。誤差の平均は 18.5、分散は 90.0 であった。動きぶれがあるときには、動きと垂直な方向のエッジが検出しにくくなり、結果として ARToolKit のマーカとして検出した位置は精度が悪くなる。また、原理的には動きぶれの影響を受けないはずのモノスペクトルマーカにも誤差が生じており、2.2 で説明したように ARToolKit と併用することが必要であることも確かめられた。図 3(b) は、モノスペクトルマーカによって検出したマーカ位置に合わせてティーポットを重畳表示した画像である。マーカ位置・姿勢が正しく推定されていることがわかる。

図 4(c) は、焦点ぼけがある画像列に対して、ARToolKit のマーカとして位置を検出した結果である。すべてのフレームに対して、マーカを抽出することができたものの、誤差は高いところで安定した。誤差の平均は 42.6、分散は 12.4 であった。対して、図 4(d) は、提案するモノスペクトルマーカとして位置を検出した結果である。このとき、動きぶれのときと同様に、ARToolKit によって検出される位置・姿勢は利用していない。すべてのフレームでマーカの位置を検出することができ、ARToolKit のマーカとして検出した位置よりも誤差も小さいことがわかる。誤差の平均は 18.3、分散は 85.2 であった。焦点ぼけがあるときには、すべての方向のエッジが検出しにくくなり、ARToolKit

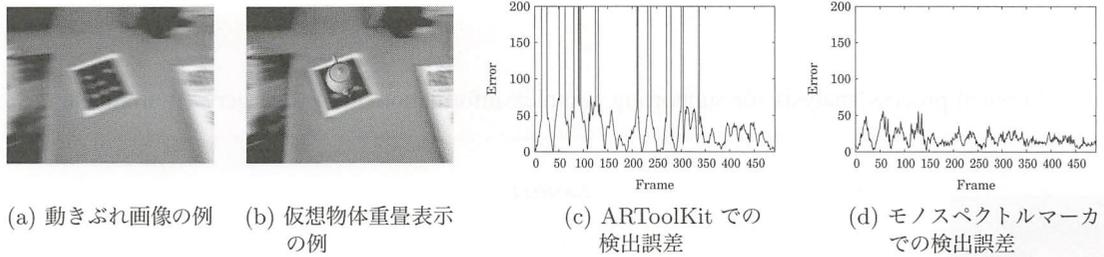


図3 動きぶれを含む画像列に対するマーカ位置推定結果

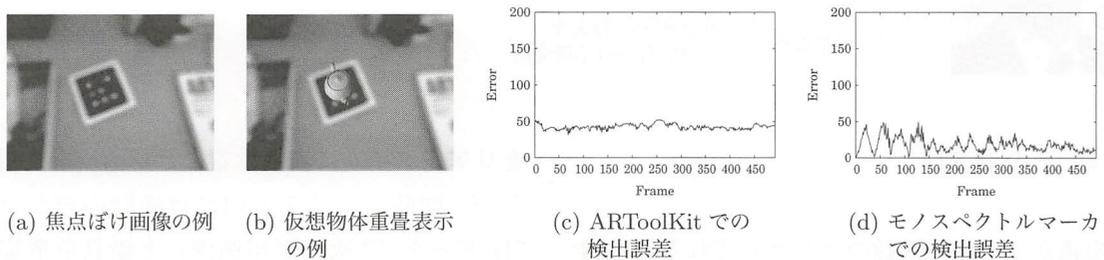


図4 焦点ぼけを含む画像列に対するマーカ位置推定結果

のマーカは実際よりも遠くに見える効果があった。このため、誤差は全体的に大きくなった。モノスペクトルマーカでは、動きぶれの場合と同様に高い精度で検出できていることが確かめられた。

図4(b)は、モノスペクトルマーカによって検出したマーカ位置に合わせてティーポットを重畳表示した画像である。焦点ぼけがある画像に対しても、マーカ位置・姿勢が正しく推定されていることがわかる。

実験では、毎秒11フレーム以上で処理が実現し、ほぼ実時間で処理できることが確かめられた。この処理速度は、GPUの性能向上や専用チップを利用することによって、さらに向上する可能性がある。

#### [今後の研究の方向、課題]

今後の課題として、モノスペクトルマーカ抽

出の信頼度の計算を検討することを挙げる。2.2において、ARToolKitのマーカと併用することを提案し、実験においてもモノスペクトルマーカとARToolKitのマーカの両方の性質を持つマーカを利用した。しかし、どちらの推定結果を利用するかを抽出の信頼度によって選択する手法については、まだ実現していない。どれほどの動きぶれや焦点ぼけによって、どれほどARToolKitのマーカの推定精度が低下するのか、モノスペクトルマーカの推定結果がどの程度で優位になるのかを調べる必要がある。信頼度が適切に計算できれば、両方のマーカの性質を生かしたマーカの実用が可能になる。

#### [成果の発表、論文等]

1. 有賀治人, 豊浦正広, 茅暁陽: “動きぶれや焦点ぼけがある画像からでも抽出できる拡張現実マーカの実現.” 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU) (2011)

## 高密度情報誘導手術環境を支援する手術工程解析法の開発

Surgical process analysis for supporting complex information-guided surgery environment

2001011



研究代表者	千葉大学大学院 工学研究科	特任准教授	中村 亮 一
共同研究者	東京女子医科大学 先端生命医科学研究所	特任准教授	鈴木 孝 司

### [研究の目的]

複雑かつ並列に複数のタスクの流れる作業環境において、その作業の効率を最適化し、最小のコストで効用を最大化するためには、作業の要素解析と工程管理により、それぞれの作業ステージを最適化することが重要である。本研究では、この技術を複雑化する外科医療の管理体制に適用し、医療の品質向上（効用・効率・安全の向上）を達成するための手術工程解析技術の創成を目的とする。品質管理・省力化のための機械情報工学的技術をシステムと人間の調和的技術に昇華して医療に導入し、過酷な外科医療環境によりよい業務環境と安全で効果の高い治療結果をもたらすことを目指す。具体的には

- [1] 術野内作業から手術の工程を推測するナビゲーションベースの情報分析システム
- [2] 術野外の人員・器材の動体から手術の工程を推測する画像計測ベースの情報分析システム

の構築を目標とし、その基礎的要素技術の研究を行った。

### [研究の内容・成果]

#### 1. 手術ナビゲーション情報を用いた手術工程分析<sup>[1-4]</sup>

手術ナビゲーションを用いた手術では、ナビゲーションの体内地図と術者の持つ術具の位置関係

をリアルタイムに表示することで治療を支援するが、同時にシステム内には術野のデジタル3Dデータ（3次元医用画像）と術具位置姿勢データ（手術開始時からその時点まで）が蓄積されている。これらはすなわち術者がそれまでに術野のどこで作業を行ってきたかの記録となるため、治療ステージによって作業位置が変化する手術の場合、このデータを分析することで治療の進捗状況と経過時間を把握することができる。本研究ではこの情報を用いた術野内での作業イベントの自動記録・分析法について研究を行った。

#### 1.1 ナビゲーションログによる作業進捗計測と終了時刻予想

本研究では手術ナビゲーションシステムを併用した術中MRI誘導下脳腫瘍摘出術を対象術式とし、脳腫瘍を摘出する作業の進捗把握、そして摘出作業が終わり、脳腫瘍が摘出される時刻の予測を行った。一般的な脳腫瘍摘出術の術式では脳腫瘍を周囲の正常な組織から剥がす様に剥離と止血作業を進め、腫瘍を取り出す。ゆえに術具先端の位置座標ログデータは画像上の腫瘍表面を中心に分布している。この特性より、進捗解析アルゴリズムをFig.1のように定義した。

Step1ではMRI画像群から脳腫瘍領域を閾値処理等を用いてセグメンテーションし、エッジ検出により脳腫瘍表面データ： $S(x, y, z)$ を定義する。また、腫瘍近傍のログのみを解析対

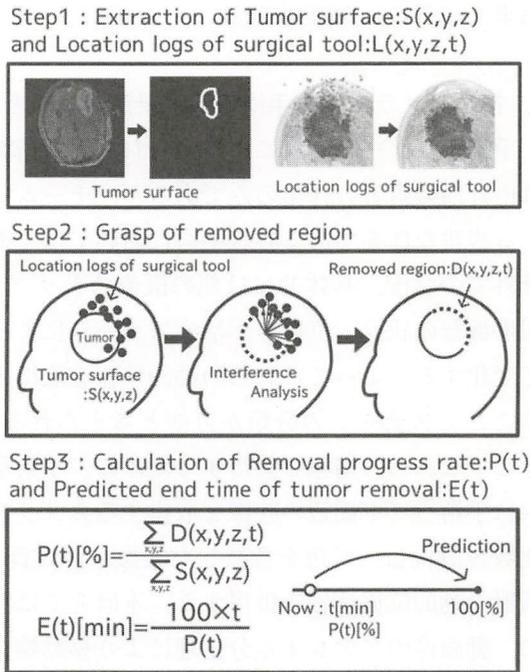


Fig. 1 Process progress analysis algorithm

象とするため、領域設定により術具位置ログデータ： $L(x, y, z, t)$  を抽出した。Step2では脳腫瘍表面と術具位置ログデータの干渉解析を行い、摘出作業が完了した腫瘍表面領域： $D(x, y, z, t)$  を定義する。術具位置ログデータは主に腫瘍表面の外側に分布していることから、術具位置ログデータと腫瘍の重心を繋ぐ直線と干渉した脳腫瘍表面領域を作業の終了した領域とした。Step3では摘出進捗度、腫瘍摘出予測時刻を算出した。摘出進捗度は腫瘍領域全体に対する作業終了領域の割合から算出した。腫瘍摘出予測時刻は摘出作業全体としては摘出進捗度はおおよそ等速に増加すると仮定し、現在の摘出進捗度と作業時間から、摘出進捗度が100%に到達するまでにかかる時間を予測し、時刻を求めた。解析アルゴリズムを実装したシステムを試作し、東京女子医科大学病院インテリジェント手術室における術中MRI誘導下脳腫瘍摘出術4例より得られたデータを用いて評価を行った (Fig. 2)。

摘出進捗度評価、腫瘍摘出時刻予測を行った結果の1例を Fig. 3 に示す。Fig. 3: (a)の摘出進捗度評価では、腫瘍の摘出作業の進捗を自動

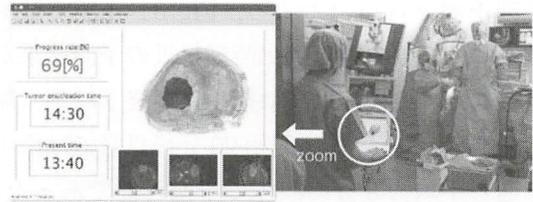
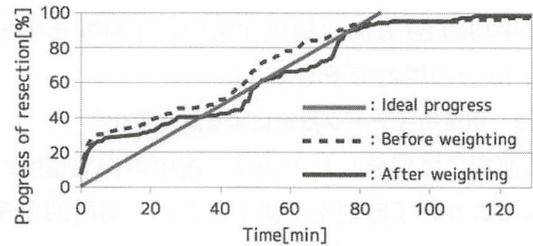
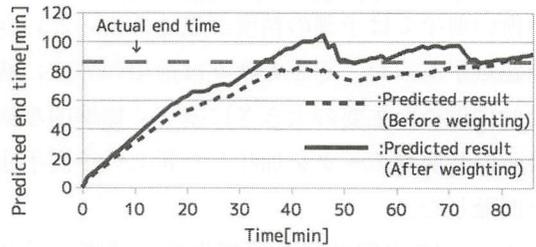


Fig. 2 Overview of process progress analysis system



(a) Progress of tumor resection



(b) Prediction of end time of resection

Fig. 3 Example of analysis results

かつ定量的に把握できた。また、本予測アルゴリズムは摘出進捗の増加が一定であるという仮定に基づいているが、摘出進捗の変化量は作業の経過に伴って小さくなる傾向が見られた。そこで摘出進捗が一定速度で変化するように腫瘍の深浅情報を用いて腫瘍データの重みづけ（深部ほど単位表面積あたりの進捗増加量を多くする）をしたところ (Fig. 4)、本予測アルゴリズムにおける理想的な進捗変化に近づいた。この重みづけした腫瘍表面データを用いて腫瘍摘出

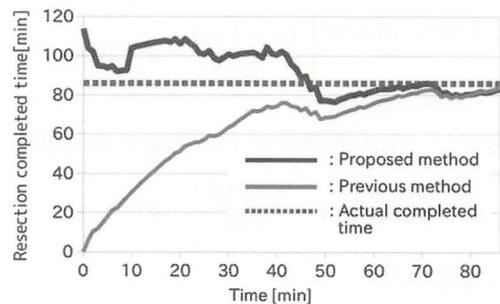


Fig. 4 Example of analysis results with estimated mean incremental speed of progress

時刻予測を行ったところ、Fig. 3: (b) では中盤以降、実際の腫瘍摘出時刻付近の予測結果が得られた。この症例では摘出作業終了時刻（開始 86 分後）を、摘出開始 20 分後以降では術中を通じ平均約 8 分の誤差で予測可能であった。解析した 4 症例のうち、ナビゲーションデータの記録精度・量が十分であった 3 症例においては平均約 89 分間の摘出作業の終了時刻を平均約 15 分の誤差で予測できた。

### 1.2 標準術式データ推定による高精度化<sup>[5]</sup>

前項にて開発した手法は、術中の作業速度のみにより終了時刻を予測するため、局所的な速度変化に多く依存して予測結果が変化するほか、手術の前半では予測の精度が見込めないという問題点があった。そこで我々は前項の方法に統計的に求めた主要の大きさに基づく標準的な摘出所要時間のデータを加味した新しい予測手法を開発した。

まず、17 症例の脳腫瘍摘出術の腫瘍サイズと摘出所要時間のデータの主成分解析により、腫瘍サイズに基づく推定平均摘出所用時間を統計的に求め、これらから摘出進捗速度  $V_e$  [%/min] を求めた。この速度と術中の瞬間摘出進捗速度

$$vi(t)[\%/min]=\begin{cases} \frac{p(t)}{t} & (t < 30) \\ \frac{p(t)-p(t-30)}{30} & (t > 30) \end{cases}$$

を元に、終了時刻予測に用いる摘出進捗推測速度を

$$V(t)[\%/min]=\begin{cases} V_e & (t < 10) \\ \frac{V_e + Vi(t)}{2} & (t > 10) \end{cases}$$

と適宜し、摘出進捗度が  $r$  に到達する時刻を

$$E(t, r)[min]=t + \frac{r - P(t)}{V(t)} \quad (5)$$

として求めた。

結果例を Fig. 4 に示す。先の手法に比較し、摘出術前半からより精度の高い終了時刻予測が

出来ていることが確認された。

### 2. 複数カメラによる手術室人動計測・解析<sup>[6,7]</sup>

手術ナビゲーションにより得られる手術情報は術野内の術者の作業のみであるが、チームによる複雑な作業である外科手術においては、術野外での状況、具体的には他の医療スタッフ・医療機器の状況・位置等が治療ステージによって変化する。よってこれらの動的情報を取得することでステージの分類が可能と考えられる。そこでこれらの情報を獲得するために、手術室内に手術ベッド周辺の映像を取得するカメラを複数台設置し、死角を低減した映像から人員・機器の動的な位置情報を獲得する。本研究では特に、動画像のステレオ差分処理により移動物体の自動抽出とラベリングを行う手法について研究を行った。

まず手術室に設置された任意の 2 台のカメラの事前のキャリブレーション情報から内部パラメータと 2 カメラ相対位置情報を取得する。次に動体がない状態で各カメラにて取得した画像から、手術室と同系色の手術着を着用した動体を区別するためにパラメータを適した値に設定した背景画像を構築する。この背景画像情報を元に、背景差分処理により動体の検出を行い、検出した動体の特徴点を抽出する。複数動体の区別および特徴点計測エラー除去のために、特徴点を中心とした検索範囲内に前フレームの特徴点を検索し、前フレームの動体の特徴点との連続性を評価し、同一の動体と識別された特徴点データをつなぎ、各カメラの 2 次元動線を取得する。2 カメラから得られた 2 次元動線を 2 カメラ相対位置情報を元に三角測量法により統合し、3 次元動線を算出する。

本手法では手術室に設置された複数のカメラから自由にステレオカメラ 3 次元計測環境を構築することが出来るため、適宜計測用カメラを切り替える・並列計測を行うことにより、死角や複数動体の重なりによるオクルージョンを低減した 3 次元計測が可能である。

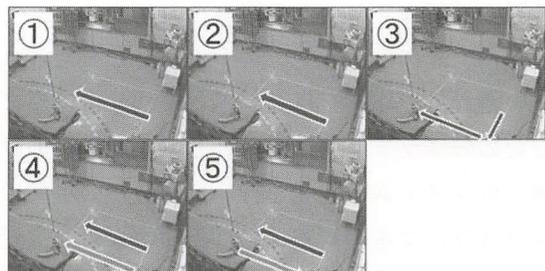


Fig. 5 Experiment walking pattern

本システムが実際の手術室において3次元動線取得可能か評価する。被験者4人に対し、手術室の床やドレープと同系色の手術着、靴カバーを着用した被験者が手術室を歩行する様子を2台のカメラで同時に記録し、動体検出を行い、3次元動線を算出した。実験は以下の5種類の歩行を行った (Fig. 5)。

実験①：1人が直線2mの歩行。

実験②：実験①に屈伸運動を合わせた歩行。

実験③：奥に背景となった被験者がいる場面において、被験者1人が直線1m-90°方向転換-直線1mの歩行。

実験④：2人が同方向に直線2mの歩行。

実験⑤：2人が逆方向に直線2mの歩行。

評価実験結果の一例を以下に示す。入力画像から環境と同系色の手術着を着用した動体である人物の検出が可能であった。2次元動線・3次元動線の取得結果の一例として実験③ (Fig. 6)、および実験④ (Fig. 7) の結果を以下に示す。

5種類の歩行全ての2次元動線・3次元動線において動線の直線性が見られた。Fig. 6-aより、指示した方向転換の動線も取得可能であった。またFig. 7-aより、被験者2人を識別した動線取得が確認できたが、歩行開始時・歩行終了時において一方の被験者のデータ数が他方の被験者に比べて少なかった。Fig. 6-bより、方向転換時の様子が確認できたが、グラフの直交性には差異がみられた。Fig. 7-bより、同距離(2m)を歩行した被験者2人の歩行距離に違いが見られた。また、Fig. 7より、複数人の計測の場合、人の重なりによるオクルージョンに

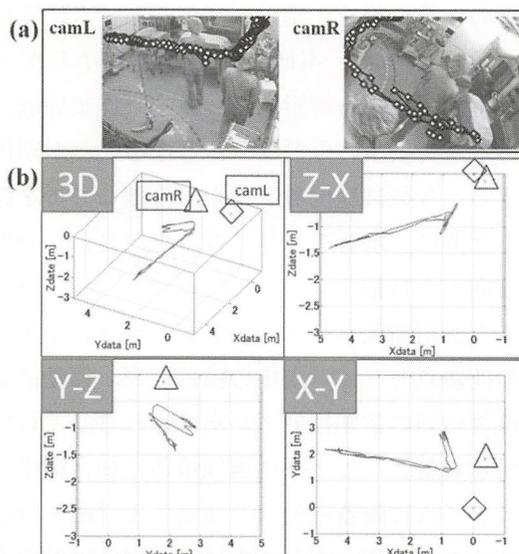


Fig. 6 Trail analyzing result of 2D/3D model (-1-)

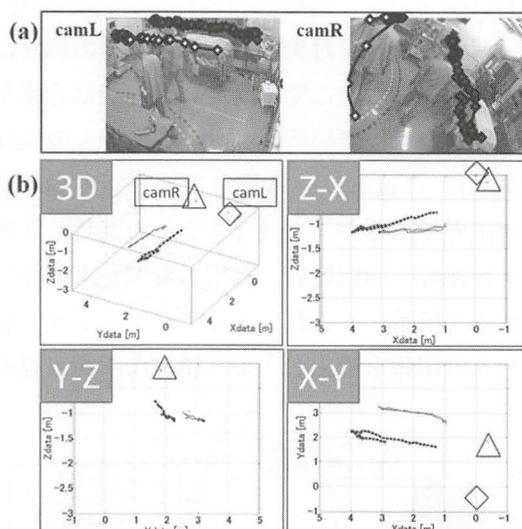


Fig. 7 Trail analyzing result of 2D/3D model (-2-)

より、歩行時の全データの取得は困難であった。また3次元の直交性に差異がみられた。

#### [今後の研究の方向, 課題]

手術ナビゲーション情報を利用することにより、手術環境への影響を最小限に抑え、脳腫瘍の摘出進行を自動かつ定量的に解析することができた。術式の誘導装置として利用されている手術ナビゲーションシステムが、手術工程解析においても有用である可能性が示唆された。手術ナビゲーションシステムを併用した術式では

術者の作業情報を正確かつリアルタイムに獲得できることから、本研究で提案したナビゲーション情報による解析法が、術中の作業評価における解析要素の重要な1つとなることが期待できる。今後は症例数を増やし詳細な分析を深めると共に、解析アルゴリズムを改良し、分析精度向上を目指す。

また医用画像ベースのナビゲーションシステムの問題点として、術中の臓器変形・移動による位置情報の信頼性低下があげられる。これに対する対策として、医用画像情報に加え術中リアルタイムに臓器運動等を補償する計測・分析システムが必須となる。本研究課題では対象を脳腫瘍外科としていたためこれら変形・移動の影響は少ないが、胸腹部の外科において心臓・肺・消化器などを対象とした場合にその影響は無視できない。そこで本研究課題内では心臓を対象にした低侵襲局所運動計測システムの試作も試みた (Fig. 8) [8]。現在2次元平行移動の計測が限界であるが、よりシステムを深化し3次元平行運動、回転運動、変形の計測が可能なシステムを構築し、これによりナビゲーションシステムの情報を補正し、より正確な手術工程の

計測が可能なシステムの構築を目指す。

またナビゲーションシステムではとらえられない術野外の作業を自動記録し工程分析に繋げるためのプラットフォームとして手術室内の動線分析システムの開発を行い、複数台の小型単眼カメラによる手術室における複数人の3次元動線分析を実現し、人員・機材の動線を自動的に記録・推定・提示することが可能となった。今後は検出の精度と信頼性の向上と共に、より多くのカメラを用いてオクルージョンや死角を回避した計測システムの構築と、計測動線から工程を推測する分析システムの開発を行う。

[成果の発表, 論文等]

1. 相沢知明, 中村亮一, 村垣善浩, 丸山隆志, 田中雅彦, 伊関洋: 手術ナビゲーション情報を利用したMRI誘導下脳腫瘍摘出術の進捗工程解析法, 日本コンピュータ外科学会誌, 13(1): 25-32. (2011)
2. Tomoaki Aizawa, Ryoichi Nakamura, Yoshihiro Muragaki, Takashi Maruyama, Masahiko Tanaka, Hiroshi Iseki: Process progress analysis method using surgical navigation information in glioma surgery, The 6th Asian Conference on Computer Aided Surgery, Busan, Korea, Nov. 26-27. (2010)
3. Ryoichi Nakamura, Tomoaki Aizawa, Yoshihiro Muragaki, Takashi Maruyama, Masahiko Tanaka, Hiroshi Iseki: Intraoperative analysis of task progress and performance of glioma surgery using navigation information, 24th International Congress on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2010), Geneva, Switzerland, June 23-26, 2010, Int J of CARS, 5(suppl 1): S405-6. (2010)
4. 相沢知明, 中村亮一, 村垣善浩, 丸山隆志, 田中雅彦, 伊関洋: 術具・腫瘍干渉情報に基づく脳腫瘍摘出術の進捗工程解析, 日本コンピュータ外科学会誌, 12(3): 430-431. (2010)
5. Tomoaki Aizawa, Ryoichi Nakamura, Takashi Maruyama, Yoshihiro Muragaki, Hiroshi Iseki, Method to estimate the end time of brain tumor resection by using surgical navigation information, 25th International Congress on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2011), Berlin, Germany, June 22-25, 2011, Int J of CARS, 6 (suppl 1): S141-2. (2011)
6. 中村亮一, 大澤千晃, 鈴木孝司, 佐藤生馬: 複数カメラを用いたステレオ計測による手術室内人員動

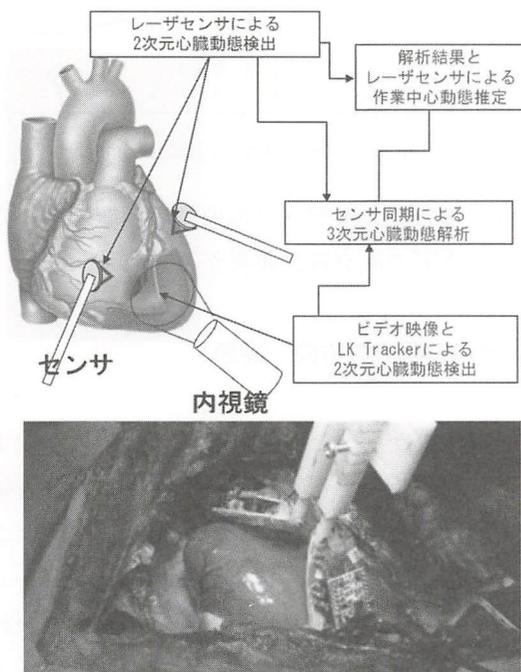


Fig. 8 Organ motion measurement with optical sensor

線分析に関する基礎的研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011 (ROBOMECH 2011), 岡山, 5月26-28日, 2011, 抄録集 p180/ 論文集 2P1-C07 (CDROM)

7. 大澤千晃, 中村亮一, 佐藤生馬, 単眼 CCD カメラ情報の連結による手術室内人員動線分析システムの開発, 第50回日本生体医工学会大会, 東京, 4

月29日-5月1日, 2011, 生体医工学 49 (Supple 1): 171. (2011)

8. 萩原大輔, 中村亮一, 佐藤生馬, 重症心不全治療用心筋シート移植ロボットのための心運動計測システムの開発, 第50回日本生体医工学会大会, 東京, 4月29日-5月1日, 2011, 生体医工学 49 (Supple 1): 90. (2011)



役員名簿

## 検診を対象とした眼底病変の自動検出システムの開発

Development of automated detection system for retinal lesions on mass screening

2001012



研究代表者

滋賀県立大学 工学部  
電子システム工学科

准教授

畑 中 裕 司

### [研究の目的]

人間ドックにおいて眼底検査は選択的検査から必須検査に移行している。また、平成20年度より施行された特定健康診査・保健指導において、眼底検査は選択的検査となった。このような医療の背景により、今後は眼底検査の実施件数が飛躍的に増加することが予想されるが、眼科医の人数が検査件数の増加率ほどに増えることはない。特定健診では、眼底検査を眼底撮影による画像読影で実施することが多く、さらに眼科医以外の医師が読影することが多い。したがって、眼科医ほどの高い診断精度を期待できない。そこで、眼底画像をコンピュータで定量的に解析し、その情報を医師に提供することによって、読影精度を高水準に安定させることを採取的な研究の目的として、筆者は眼底画像から病変を自動検出するシステムの開発を進めている。

眼底画像の読影により、高血圧性網膜症や糖尿病網膜症などの診断が可能である。この他、緑内障の診断も可能であるが、緑内障は眼部に限定された疾患であるため、本研究では全身に影響する疾患を対象とした。ただし、上記の二つの疾患の全ての診断所見は多数存在し、全てを自動検出することは現時点では困難である。そこで、本研究では高血圧性網膜症と糖尿病網膜症の主な診断所見である細動脈狭窄と出血を自動検出するシステムの構築

を試みた。

### [研究の内容、成果]

#### 1. 細動脈狭窄の自動検出

研究期間内に細動脈狭窄を診断した画像データベースを構築することが困難であったため、本研究ではその要素技術の確立を目指した。

細動脈狭窄は、眼底を並走する動脈 (Artery) と静脈 (Vein) の口径比 (A/V 比) で診断されており、A/V 比が小さくなるほどに細動脈狭窄が進行していると考えられている。したがって、最初に主要な血管を、筆者らがこれまでに開発したブラックトップハット変換と二重リングフィルタを組み合わせた手法で自動抽出した。

次に、自動抽出した血管領域から分岐点と交差点を自動検出し、分岐点と交差点を除去することによって、血管を枝セグメントに分割した。ここで、分岐点は血管が Y 字型、交差点は十字字型になることから、自動抽出した血管を細線化処理によって骨組みの構造にして、Y 字型の部位と十字字型の部位をパターンマッチングによって検出した。

そして、血管の枝セグメントを動脈と静脈に分類した。眼底画像上で静脈は動脈よりも濃く写ることから、本研究では画像の赤、青、緑の画素値、カラー画像の各成分におけるコントラスト、および血管の自動抽出に用いたブラック

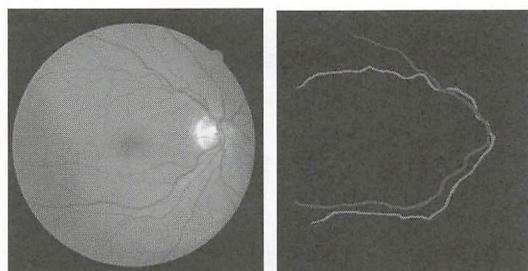
トップハット変換と二重リングフィルタの出力値を特徴量として、線形判別分析を用いて判別関数を求め、動脈と静脈を分類した。

そして、視神経乳頭を自動抽出して、視神経乳頭から周辺方向に血管を追跡して、動脈と静脈を認識した。ここで、視神経乳頭は血管やその他の視神経層よりも明るく写ることから、p タイル法による閾値処理を用いた。

最後に、筆者らがこれまでに開発した手法を用いて、血管の口径計測を行った。なお、A/V 比を計測する範囲は、本研究では乳頭縁より1乳頭径の範囲とて、並走する動脈と静脈の枝セグメントの各々の口径の平均値を求め、平均値の比を A/V 比として定義した。

研究開発した手法を、Web で公開されている眼底画像データベースである DRIVE を用いて評価した。DRIVE の画像の大きさは、584×565 画素である。DRIVE には学習用と評価用の画像が各々 20 枚あるが、本研究では評価用の 20 枚を用いた。

最初に、動静脈の認識性能を評価したとき、本手法では 85% の動静脈を正しく認識できた。図 1 に認識結果の例を示す。



(a)原画像

(b)分類結果

図1 動脈と静脈の自動認識

次に、DRIVE の画像から手動で A/V 比を計測し、本手法による計測結果との誤差を調べた。そのときの平均誤差(画素)と標準偏差は  $0.07 \pm 0.06$  (SD) であったことより、大凡の A/V 比を測定できたといえる。

## 2. 出血の自動検出

出血の検出については筆者らが以前より研究開発してきたが、誤検出の多い問題点が残っていたため、本研究ではその改善を行った。誤検出領域のことを偽陽性候補という。

出血は血管と同じく、眼底画像上では茶褐色に写るため、血管と同じ二重リングフィルタによって一次検出した。この段階で、p タイル法を用いて視神経乳頭を検出しておく。そして、二重リングフィルタによって検出された領域で、かつ視神経乳頭と接する領域は血管である可能性が高いので、除去した。そして、出血の大きさの範囲を定義しておき、その範囲に当てはまらない領域を除去することによって、出血の候補領域を絞り込んだ。

次に、問題となっている偽陽性候補の削除を行う。本研究では統計的特徴量を用いた多変量解析によって偽陽性候補を削除した。解析に用いた特徴量は、extrema、同時生起行列から求められる 14 種類、差分統計量から求められる 4 種類、ランレングス行列から求められる 5 種類を縦方向と横方向を別々に求めた計 10 種類、正規化濃度ヒストグラムのテクスチャ特徴から求められる 3 種類の合計 32 種類の特徴量を、カラー画像の赤と緑成分の画素値に対して求めた。すなわち、求める特徴量は 64 種類である。青成分の画素値を用いなかった理由は、青成分では出血と背景のコントラストが小さいため、特徴量を算出しても、偽陽性候補の削除に寄与しないからである。特徴量の算出時には、出血候補を囲む最小の矩形領域を求め、矩形内の画素値を用いた。これらの 64 種類の特徴量を用いて、出血と偽陽性候補を分類することによって、偽陽性候補の削除を行うが、最初にルールベース法を用いて 64 種類の各特徴量の外れ値を分類処理から除外した。残った出血候補と偽陽性候補を、多変量解析の分野で知られる手法で分類した。検討した分類手法は、マハラノビス距離による判別法、ニューラルネットワーク、そしてサポートベクタマシンである。多変量解

析では、特徴量が多くなりすぎると判別性能が低下してしまうヒューズの現象があるため、実際の眼底画像を用いて実験を行いながら、最適な特徴量を選択した。その結果、マハラノビス距離による判別器とニューラルネットワークによる判別器では30種類の特徴量を選択したときが最適であり、サポートベクタマシンでは21種類の特徴量を選択したときが最適であった。

以上に述べた手法を用いて、71枚の眼底画像を用いて出血の検出実験を行った。その結果、出血を含む眼底画像の83%を正しく出血を含むと認識し（感度83%）、正常の画像の67%を正しく正常であると認識した（特異度67%）。

### 3. 全体のシステム構成

本節では1と2で開発したアルゴリズムを含めて開発したシステムについて述べる。本システムは眼底カメラ内の画像を一時保管する領域を監視し、眼底撮影されると開発したシステムが起動するようにした。眼底撮影によって画像が生成されると、図2のようなその画像の患者情報を入力するウィンドウを起動する。患者情報を入力し終わると自動的に画像解析を開始し、図3のように解析結果を表示する。既に解析済みの画像を閲覧する場合は、図4のような患者検索ウィンドウを起動して、目的とする患者を検索することが可能である。

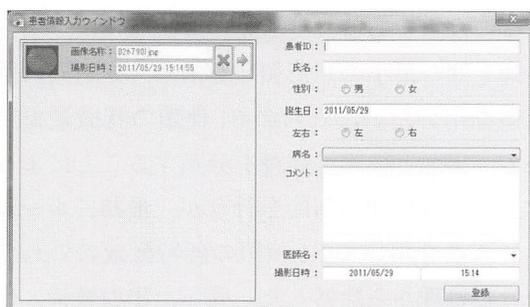


図2 患者情報入力ウィンドウ

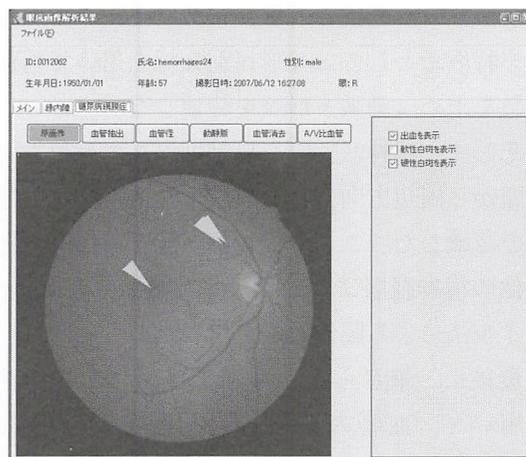


図3 解析結果の表示（出血の検出結果）

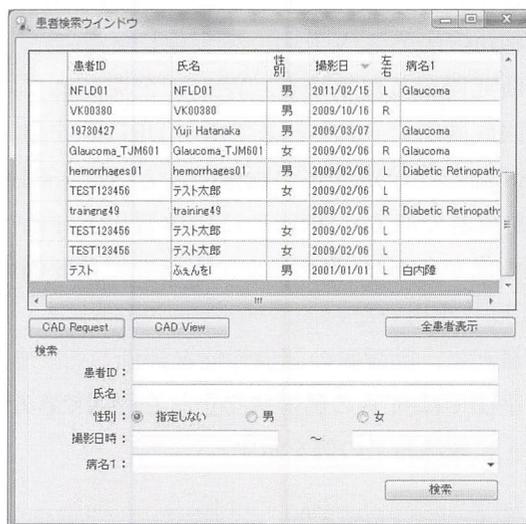


図4 患者検索ウィンドウ

#### 【今後の研究の方向、課題】

本研究では、細動脈狭窄の自動検出のためのA/V比の自動計測手法と、出血の自動検出アルゴリズムを開発した。そして、図2、図3および図3のようなグラフィカル・ユーザ・インタフェース（GUI）を並行して開発することによる眼底画像を読影支援するソフトウェアの試作までを実施した。しかしながら、同一施設で撮影した高血圧性網膜症と糖尿病網膜症の症例を収集できておらず、臨床現場での評価実験を実施するに至っていない。今後は研究協力して頂ける医療施設を探し、臨床評価を行う予定で

ある。また、本研究で開発した GUI は緑内障にも対応しており、緑内障のための画像解析アルゴリズムも搭載させる予定である。

[成果の発表, 論文等]

- 1) 石田隆行, 桂川茂彦, 藤田広志 (監修): 医用画像ハンドブック (第9編, 第3章, 眼底検査, 畑中裕司・分担執筆), オーム社, pp.1343-1348 (2010)
- 2) 畑中裕司, 村松千左子, 原武史, 藤田広志: 眼底画像における血管交叉部と交叉現象の検出, 医用画像情報学会・平成22年度秋季 (第158回) 大会, 講演日 (2010.10.9)
- 3) 水上篤貴, 村松千左子, 畑中裕司, 原武史, 藤田

広志: 眼底画像における細動脈狭窄評価のための主幹動静脈の自動検出および分類法, 平成22年度日本生体医工学会東海支部大会講演論文集, p.56 (2010)

- 4) Yuji Hatanaka, Chisako Muramatsu, Takeshi Hara, and Hiroshi Fujita: Automated detection of arteriovenous crossing phenomenon on retinal images, 2010 International Conference on Future Computer, Control and Communication, Vol. II, pp. 340-343 (2010)
- 5) 水上篤貴, 村松千左子, 畑中裕司, 原武史, 藤田広志: 眼底画像における主幹動静脈の自動選択法に関する研究, 第30回日本医用画像工学会大会講演論文集 (CD-ROM 掲載予定), 発表予定 (2011.8.5)

## 最適設計 LED 照明による血行の明瞭化と定量化

### Clarification of the Blood Circulation by Optimally Designed LED Illuminant

2001013



研究代表者 千葉大学 フロンティアメディカル工学 教授 羽石 秀 昭  
 研究開発センター

#### [研究の目的]

小腸などの管腔臓器における切除と再建手術の際、切除範囲の正確な健全性の判定が重要となる。この判定は、目視下における疾患領域の把握や血流の走行を判定材料とする臓器の色の違いに基づいて行われるが、識別部位の色の違いはわずかにしか現れないため、医師の経験と感覚に大きく左右される。そのため、目視診断に対する支援技術の開発が求められている。

そこで本研究では、照明光のスペクトルの最適化により注目部位の明瞭化を目指す。この際用いる光源としてLED(Light Emitting Diode)を想定する。近年様々な分光特性をもつLEDが開発されつつあり、また、コンパクト性、耐久性の点でも優れている。手術室にもLED光源を導入する動きがあり[1]、色温度の調節機能もあるが、前述の目的に対して最適化されたパラメータ設定が行えるわけではない。また研究分野では、従来のハロゲンランプと白色LED光源間の演色性評価[2]などはあるが、積極的に診断や治療を支援するまでの最適化は行われていない。

本研究では、まず様々な血行状態のブタ小腸の分光反射率を取得し、この結果と様々なLED光源の発光スペクトルデータを基に、最適なLED光源をシミュレーションにより設計し、最適光源の効果を色差によって予測する。

#### [研究の内容, 成果]

#### 1. 方法

分光特性が既知な数種類のLED光源の重みづけ組み合わせにより目的関数を最大にする最適光源を設計する。Fig. 1に最適化の流れを示す。まず、各LED光源 $E_n(\lambda)$ ,  $n=1, \dots, N$ に対して重み $0 \leq k_n \leq 1, n=1, \dots, N$ を与え、式(1)により合成して光源 $E_{op}(\lambda)$ を作成する。ここで、 $N$ はLED光源の種類数とする。

$$E_{op}(\lambda) = \sum_{n=1}^N k_n E_n(\lambda) \tag{1}$$

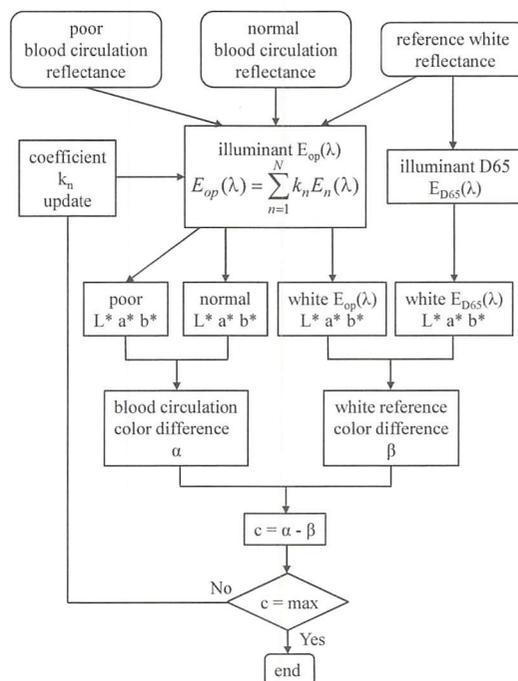


Fig.1 Flow chart of illumination optimization

ただし、 $E_n(\lambda)$ ,  $n=1, \dots, N$  はそれぞれピーク波長のエネルギーで正規化された特性とする。重み  $k_n$  を最適に設定し、最適光源  $E_{op}(\lambda)$  を設計する。

作成した光源の分光放射輝度を  $E_{op}(\lambda)$ 、観察対象の分光反射率を  $R(\lambda)$  とすれば、観察される色光はこれらの分光積  $E_{op}(\lambda)R(\lambda)$  で表される。これに対し、人は分光特性の異なる3種類の光受光器で色を知覚する。この知覚される色は三刺激値と呼ばれる。三刺激値は、色知覚の均等性が十分でないため、さらに CIE の均等色空間 CIELAB に変換する。

血行正常時と不良時の血色の違いを強調する光源が良いと考えられるため、血行正常時と不良時の CIELAB 空間上の色差 [3] を大きくするという条件を光源  $E_{op}(\lambda)$  に与えることとする。つまり、光源  $E_{op}(\lambda)$  下における、血行が正常時の分光反射率から算出した測色値  $L_n^*$ ,  $a_n^*$ ,  $b_n^*$  と、血行が不良時の分光反射率から算出した測色値  $L_p^*$ ,  $a_p^*$ ,  $b_p^*$  を利用して、式 (2) に基づき算出した色差  $\alpha$  が大きくなる光源を好ましいと考える。

$$a(E_{op}(\lambda)) = [(L_n^* - L_p^*)^2 + (a_n^* - a_p^*)^2 + (b_n^* - b_p^*)^2]^{1/2} \quad (2)$$

一方、従来、手術は無影灯の白色光源下でなされてきたことから、光源の色が白色光源から大きくずれるのは慣れの観点から好ましくない。これらを考慮し、作成した光源  $E_{op}(\lambda)$  下において完全拡散物体である白色板を観察したときの色が、従来の白色光源下の色になるべく近くなる光源が好ましいとする条件を追加する。具体的には D65 光源を従来光源として扱い、白色板の光源  $E_{op}(\lambda)$  下における測色値  $L_{w,op}^*$ ,  $a_{w,op}^*$ ,  $b_{w,op}^*$  と D65 光源下における測色値  $L_{w,D65}^*$ ,  $a_{w,D65}^*$ ,  $b_{w,D65}^*$  から、式 (2) と同様に、それぞれの差の2乗和の平方根によって算出した色差  $\beta$  が小さい光源を好ましいと考える [4]。

以上2つの観点に基づき、血行正常時と不良

時の色差  $\alpha$  を最大かつ、白色板色差  $\beta$  を最小とするため

$$c(E_{op}(\lambda)) = \alpha(E_{op}(\lambda)) - \beta(E_{op}(\lambda)) \quad (3)$$

を目的関数として、 $c$  が最大となるように Nelder-Mead の simplex 法 [4] を用いて係数  $k_n$  を最適化し最適光源を作成する。

## 2. 実験および考察

ブタ小腸を対象に臓器の分光反射率データの収集を行い、事前に想定した仮想 LED 光源と実測 LED 光源の特性を利用して最適光源を設計した。また、最適光源の効果の評価には、算出した色差を利用した。

### 2.1. データ収集

ブタ小腸を対象に臓器の分光反射率データの収集を実施した。分光反射率測定は Ocean Optics 社製の小型分光器 USB2000 を用いて行った。測定にあたっては国際照明委員会 (CIE) の推奨する幾何学的条件 [5] に基づき、対象物体に対してハロゲンランプを斜め 45° に、プローブを垂直方向に固定した。さらに、小腸とプローブ先端の距離は 10 mm となるように固定した。Fig. 2 にプローブと光源の外観図を示す。

ブタ小腸を固定し、ある注目点について、近傍の腸間膜血流が正常な「normal」、一部の血

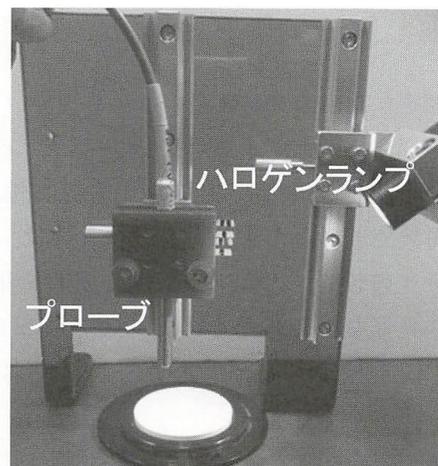


Fig. 2 External view of a probe and an illuminant

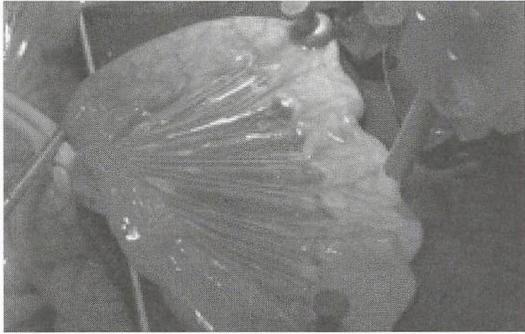


Fig.3 Intestine measured by a spectral photodetector. Blood flow is blocked at left in the picture

流を遮断した「level 1」、遮断開始から4分後の「level 2」、さらに遮断した「level 3」の4つの血行状態につき10~50回測定した。血行状態「level 1」の分光反射率測定環境をFig.3に示す。

その結果、ヘモグロビンの吸収特性[7]に基づき、長波長側で各遮断レベルによる分光反射率波形の大きな変化を確認した。分光反射率結果をFig.4に示す。

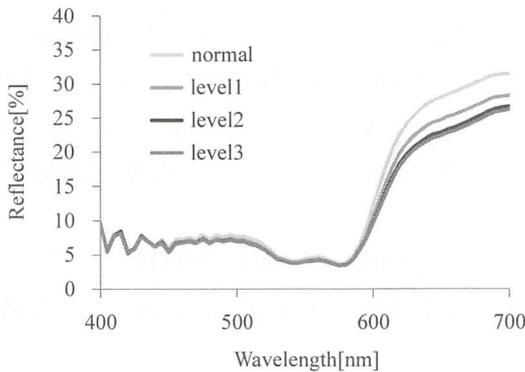


Fig.4 Spectral reflectance of a small intestine

## 2.2. 想定するLEDの特性

LED光源の設計は2つのケースについて行った。ひとつは市販のLEDの分光特性を適当な関数で近似したもの、もうひとつは、3種類の分光特性をもつ実在のLED照明を用い、その発光量を調節したものである。以下では、前者を仮想LED、後者を実在LEDと呼ぶことにする。

仮想LED光源データは、実在するLED光源を参考に、ピーク波長が465, 525,

590, 605, 650 nmの6種類のLED光源波形をガウス関数で作成した。仮想LED光源波形をFig.5に示す。

実測LED光源データは、イマック社製のLED装置IHRGB-120-MIXを実測したものである。ピーク波長が468, 520, 636 nmで発光色が青, 緑, 赤の3種類の強度変更が可能なLED光源である。分光放射輝度計を用いてスペクトルをそれぞれ測定し、さらに各光源の最大強度を1となるように正規化を行った。この波形をFig.6に示す。

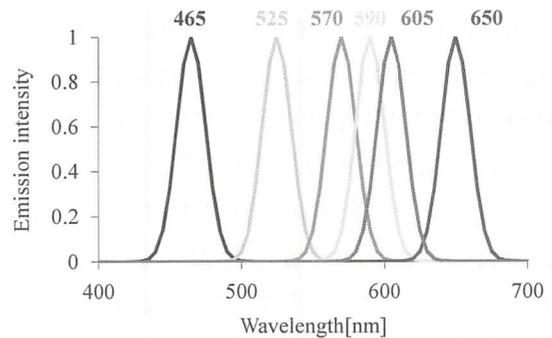


Fig.5 Intensity of the hypothetical LED illuminants

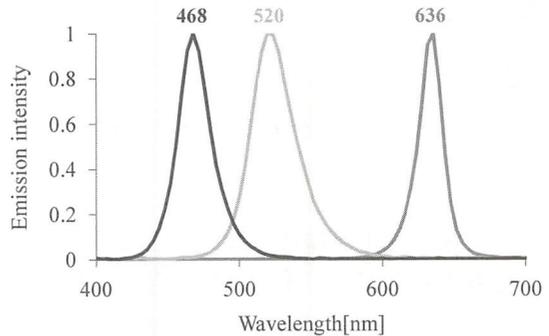


Fig.6 Measured intensity of the commercial LED

## 2.3. 評価法

作成した最適光源下の血色の違いを、式(1)から算出した色差から評価した。比較のために、D65光源下の場合の色差も算出した。

## 2.4. 結果

Fig.7に仮想LED光源のスペクトル形状を破線で、また算出された最適光源のスペクトルを実線で示す。さらにFig.8に実測LED光源における結果をFig.7と同様に示す。血行状態

によらず最適光源波形は同様の結果を得た。また、白色板の色差は0.1以下となりカラーパッチからも白色性を保持していることを確認した。仮想LED光源では、分光反射率の差が小さい波長を強調するLED光源の係数が0となった。また、仮想LED光源と実測LED光源のどちらにおいても、長波長側にピーク波長を持つLED光源の係数が最大値となった。

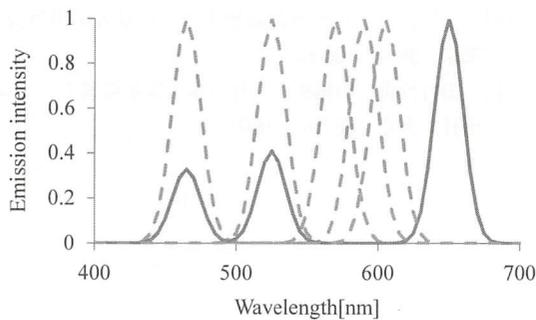


Fig. 7 Spectral intensity of the optimal combination of hypothetical LEDs

次に、D65光源および2種類の最適光源下での、小腸の各遮断レベルの色差をTable 1に示す。一般に人間は色差3以上で色の違いを知覚可能と考えられている。最適光源下では、色差3に近い値をもつD65光源よりも大きい色差を得た。

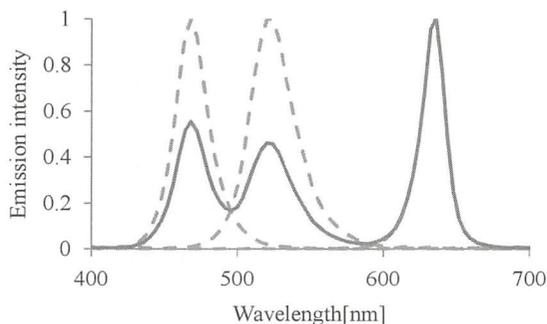


Fig. 8 Spectral intensity of the optimally weighted commercial RGB LEDs

Table 1 Color differences between normal and hemostatic small intestines under D65 and two optimal illuminants

Level	D65	Hypothetical LED	Commercial LED
1	3.0	4.3	3.9
2	4.7	6.9	6.3
3	5.2	7.8	7.1

## 2.5. 考察

仮想LED光源による最適光源は、実測LED光源よりも大きな色差を得た。ピーク波長650 nmの仮想LED光源は、ピーク波長636 nmの実測LED光源よりも大きな半値幅を持ち長波長側にピーク波長があるため、小腸の分光反射率の長波長側の違いをより強調したためと考えられる。実測LED光源の種類数を増加させることにより、実測LED光源による最適光源でさらなる明瞭化が可能と考えられる。

## 3. 結論

様々な血行状態のブタ小腸の分光反射率を取得し、この情報と仮想LED光源と実測LED光源を利用してLED光源の最適化を試みた。色差算出結果から、最適光源により、通常光源よりも大きい色差が生じ、明瞭化効果が期待できることを確認した。

### [今後の研究の方向, 課題]

今回の研究で最適化手法を確立することができたが、最適パラメータの決定のためには、サンプルが不十分である。そこで、臓器の分光反射率データの増加、光源データの拡充の後、あらためて最適化を行う。この際、ブタだけでなく、ヒトを対象としたデータ収集も必要である。さらに、マルチバンドカメラを用いて臓器の分光反射率画像を収集し、照明を替えたときの見えの変化もシミュレーションし、空間情報も含めて最適照明の効果を検証する。

また、今後の研究開発構想として、外科医の術中診断支援のみならず、インテリジェント手術照明をカメラ撮影と連動させることで、対象物の色強調の他に、赤外光の利用やカメラとの組み合わせによる不可視情報の可視化や色の定量評価などを考えている。

[成果の発表, 論文等]

- [1] 村井希名：最適 LED 光源設計による血行の明瞭化のための基礎検討，2011 年情報フォトンクス研究会関東学生発表会，O1-4，慶応大学，(2011.3.3)
- [2] 村井希名，川平洋，羽石秀昭：最適 LED 光源設計による血行の明瞭化のための基礎検討，日本写真学会年次大会予稿集，pp.136-137，千葉大学，(2011.5)
- [3] 村井希名，川平洋，羽石秀昭：血行の明瞭化のための LED 光源設計，日本医用画像工学会年次大会，OP9-3，国際医療福祉大学，(2011.8)

[参考文献]

- [1] 奥村幸康：特開 2008-258169
- [2] C. Li, M. Strabl, S. Rauchenzauner, et al: Eva-

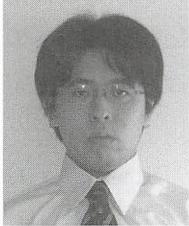
luation of LED illumination for dental instruments. Lighting Research and Technology 41: 89-97. (2009)

- [3] 大田登：色彩工学，電機大学出版社，東京，127-133 (1993)
- [4] 羽石秀昭，山田智子，津村徳道，et al：ファイバースコープ内視鏡の光源分光特性の最適設計，光学第 27 巻第 3 号：164-171. (1998)
- [5] W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolsky: Numerical Recipes in C, 技術評論社，東京，295-299 (2006)
- [6] 三宅洋一：分光画像処理入門，東京大学出版会，東京，39-42 (2006)
- [7] 田村俊世，山越憲一，村上肇：医用機器 I，コロナ社，東京，83-86 (2006)

# ブレイン・マシン・インタフェースの制御パフォーマンスに基づく 神経接続技術の性能評価

Evaluation of neural implants by the performance of a Brain-Machine Interface device

2001014



研究代表者 東京大学大学院 情報理工学系研究科 助教 深山 理

## [研究の目的]

本研究では、ラットの運動中枢を対象とした Brain-Machine Interface (BMI) において、安定した神経活動の計測を実現する神経電極の開発を目指し、その設計条件の検討を行った。BMI は脳・神経系と外部機器との間で直接的な情報の入出力を目指した研究であり、身体障害者に対して意思表示および身体機能の代替装置を与えうる技術として注目されている。特に侵襲的手法を用いて運動出力を推定するタイプは Chapin ら [1] を皮切りとして 21 世紀に入り盛んに研究が行われてきた。

多くの侵襲型 BMI では、神経に対する電気生理学での手法に倣い、発火 (action potential) の頻度を特徴量として用い、神経信号の計測に用いる電極も、これを意図した設計になっている。これは、得られた BMI を生理学的知見と照らし合わせ、計測領域毎に含まれる情報を活用する上で有効なアプローチである。

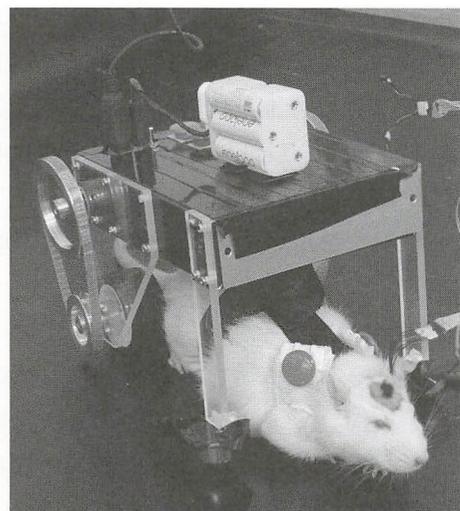
一方、BMI に目的を特化した場合、神経信号の計測は必ずしも電気生理学に基づく手法に限られる必要はなく、「現実に運動出力型 BMI を精度よく制御できること」を規範として設計することも可能である。本研究では、このような視点から新たな神経電極を検討し、これまでに開発を進めてきたラット搭載型 BMI “RatCar” を実験基盤として、その有用性を探った。

## [研究の内容・成果]

### 1. “RatCar” システム

“RatCar” システムは、図 1 に示すようにラットを搭載 (車体下部に懸架) した状態で移動可能な BMI である。これは、BMI の信号源 (ラット) と制御対象 (車体) とが一体となって移動する点で特徴的であり、車体の動作をラットの感覚神経系に自然な形でフィードバックし、ラットに車体が自らの身体であるかのように錯覚させることを目指したものである。

同システムは、この車体本体の他に神経信号計測のための電極、アンプ、A/D ボードによって信号を取り込み処理を行うコンピュータ



ラット成獣 1 匹を車体下部に懸架し、ラット運動中枢より得られた神経信号パターンに基づいて駆動される<sup>3)</sup>。

図 1 RatCar 車体

から構成される。ここでは、まず本研究の基盤となる神経電極の埋込、信号の増幅とコンピュータへの取得、歩行動作の推定、そして車体の駆動について紹介する。

### 1.1 神経電極の埋込

神経電極の中枢神経系への埋込手術は、東京大学動物実験委員会の定めるガイドラインに準拠し、isoflurane ガス麻酔下において行った。ラットをstereotaxic 脳定位装置に固定し、頭皮の切開、頭蓋骨の切削を経て、ラット大脳 atlas map [2] において同定された大脳皮質一次運動野を主な目標として電極の埋込を行った(図2)。



図2 神経電極の大脳運動皮質への刺入

### 1.2 信号の増幅・取得

神経電極の計測には Multichannel Systems 社製神経信号増幅装置 FA-64 (頭部コネクタ直後に配置されるヘッドアンプ MPA-8I を含む) を増幅率 5,000 倍、通過帯域 500-3,000 Hz として用いた。以上により電位振幅 0.1~1.0 V 程度に増幅された信号が得られ、A/D 変換ユニット (Incite Technology 社製 USBDUX-FAST および National Instruments 社 (NI 社) 製 PCI-6254) を用いてコンピュータへの取り込みを行った。

### 1.3 歩行動作推定

“RatCar” システムでは、歩行動作、神経信号の特徴量として、ともに何らかの多次元量がオンラインで与えられるものを一般的に取り扱う。歩行動作に対応する  $x(t)$  を内部状態、神経信号に対応する  $y(t)$  を出力として持つような状態空間モデル

$$x(t+1) = Fx(t) + G\zeta(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Hx(t) + \eta(t) \quad (2)$$

を考えると、神経電極によって計測された神経情報  $y_t$  から、内部状態である歩行状態  $x_t$  を推定する問題に帰着され、例えば Kalman filter のアルゴリズムを応用した場合には最小分散推定の形で求めることができる。

このような枠組みにおいて、内部状態  $x(t)$  として 100 ms 毎の歩行速度 [m/s]、出力  $y(t)$  として神経細胞毎の発火頻度を用いた場合、例えば図3のような推定結果が得られている。歩行速度の推定値と実測値の間には大きな誤差があるが、歩行の有無や速度の大小傾向が推定された。

### 1.4 外部機器制御

車輪型駆動デバイスの制御は、左右両輪の同相成分によって前後進を行い、逆相成分によって車体の回転を行った。車輪の駆動は、NI 社製 D/A 変換ボード、Maxon 社製モータドライバ DEC 24/3 を介してコンピュータに接続された同社製ブラシレス DC モータを採用した。

## 2. 神経電極の検討

### 2.1 従来型電極の現状と改良

開発した神経電極には2つのシステムがあり、1つは金属材料 (SUS, W 等) を絶縁物 (Teflon, Parylene-C) によって被覆し、100-500  $\mu\text{m}$  の間隔で配置したものである。作成プロセスが比較的簡便で、大脳運動野の広域から一括して信

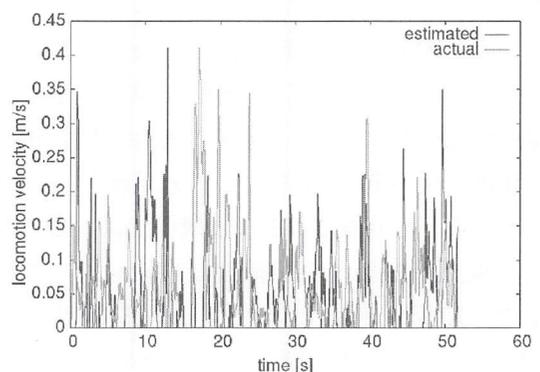
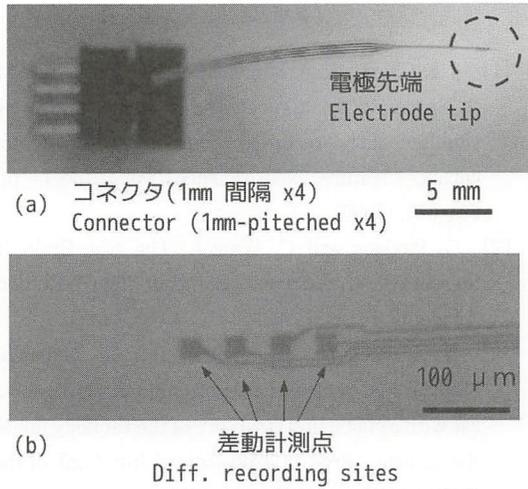


図3 ラット歩行速度の神経信号による推定および実測値



厚さ  $10\mu\text{m}$  の Parylene-C を 2 枚貼り合わせ、内部に金配線を挟み込んだ構造。

図 4 パリレン柔軟電極の一例

号を計測することが出来たが、電極本体の直径が太く硬いために侵襲製が大きく、電極刺入時の出欠を誘発しやすいといった欠点があった。なお、計測点の金属露出面積は  $1,000\mu\text{m}^2$  程度であり、電極周囲にある複数の神経細胞・軸索に由来する電気的活動が混在して記録された。

もう一方は、上記の金属電極の皮膜に用いられていた Parylene-C を MEMS 加工技術によって電極構造物そのものとして利用したものである。金配線を厚さ  $5\mu\text{m}$  の Parylene-C 層で挟み込み、計測点においてのみ表面に露出する柔軟な構造とし、生体適合性の改善を図った(図 4)。計測点は  $25\mu\text{m}$  または  $50\mu\text{m}$  角の正方形とし、これら 4 つを (1)  $75\mu\text{m}$  角の正方形頂点に配置したタイプと (2)  $50\mu\text{m}$  間隔で 1 列に配置したタイプの 2 種類を作成した。これらの電極においても上記の広域多点電極と同様に、複数の神経細胞に由来する発火が混在して導出された。

## 2.2 4 極 + 対極三角配置電極

本研究では新たに、計測点の周囲でより広範囲の神経活動を一括して計測することを狙い、図 5 のように  $50\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$  の三角形状の計測点を 4 点配置し、さらに  $50\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$  の対極を有するタイプの開発を行った。計測点を刺入方向に対して先端に集約し、電極構造物と

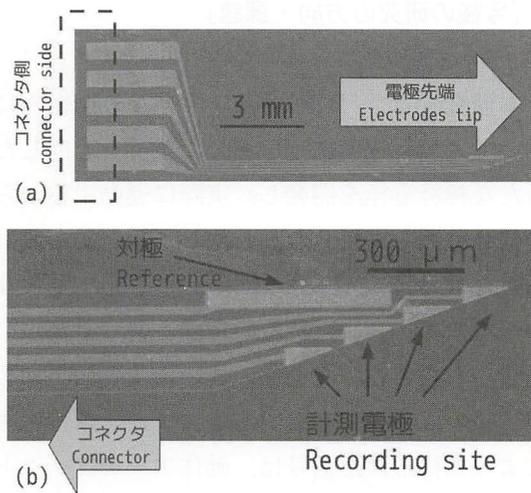


図 5 4 計測点に大型対極三角配置電極

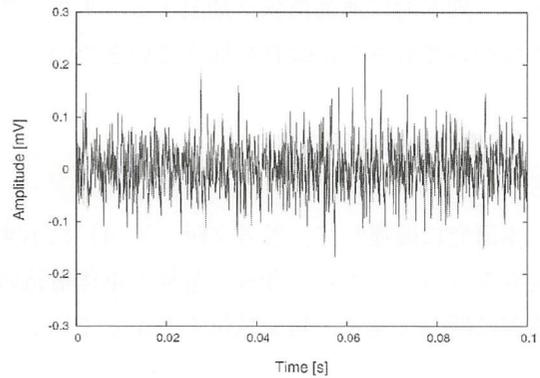


図 6 大脳運動皮質から計測された神経信号の例

の摩擦によるダメージを受けていない神経細胞を計測しやすくした他、直近に大型の対極板を配置することによって計測ノイズの軽減を試みた。

図 6 に、歩行動作を含む区間において中枢神経系(運動皮質)から計測された信号の例を示す。複数の神経細胞に由来するスパイク状の波形が入り交じって記録されている。

改良した従来型電極および 4 極 + 対極三角配置電極を用い 8 例の埋込を行い、“RatCar”システムの枠組みにおいて歩行推定を行った結果、うち 6 例では少なくとも術後 1 週間に亘って推定に耐えうる信号の計測が可能であった。また、従来型電極に比べ 4 極 + 対極三角配置電極ではラット体動時の動作アーチファクトが低減される傾向が見られた。

[今後の研究の方向・課題]

本研究では，“RatCar”システムの枠組みにおいて，歩行速度推定に適した設計を志向した新たな神経電極を開発し，実際に運動中枢からの信号計測を実現した。しかし，統一的な設計指針を定める定量的な結果を得るには至らなかったため，今後，例数の増強と共に計測点の面積，形状といった条件の違いによる結果の相違について検討が必要である。また，新型電極によって得られた信号は，動作アーチファクトが低減する一方，従来型以上に複数の神経からの信号が混在する傾向にあった。これらの信号から，効率的に運動情報を抽出するアルゴリズムについてもさらに改良を加えていきたい。

[成果の発表・論文等]

本研究に関連して，参考文献 [3, 4] に示す発表を行った。さらに今後，電極と車体構造の改善に関して発表・論文執筆を予定している。

[参考文献]

- [1] J. K. Chapin, K. A. Moxon, R. S. Markowitz, and M. A. Nicolelis: “Realtime control of a robot arm using simultaneously recorded neurons in the motor cortex,” *Nature Neuroscience*, vol. 2, no. 7, pp. 664-670 (1999)
- [2] G. Paxinos and C. Watson, *The Rat Brain in Stereotaxic Coordinates*, Compact Third Edition, Academic Press (1997)
- [3] O. Fukayama, T. Suzuki, and K. Mabuchi, “RatCar: A vehicular neuro-robotic platform for a rat with a sustaining structure of the rat body under the vehicle,” *Proc. of 32nd Annual Intl. Conf. of the IEEE EMBS*, pp. 4168-4171 (2010)
- [4] O. Fukayama, H. Otsuka, R. Hashimoto, T. Suzuki, and K. Mabuchi, “Study on rat’s locomotion assisted by a vehicular neuro-robotic device ‘RatCar’ with exoskeletal robotic limbs controlled by neural signals,” 第 50 回日本生体医工学学会大会, ES1-1-1 (2011)

## 人に優しいロボットのための触覚センシングデバイス

## Tactile Sensing Devices for Human Friendly Robots

2001017



研究代表者

京都工芸繊維大学  
大学院工学科学研究科

准教授

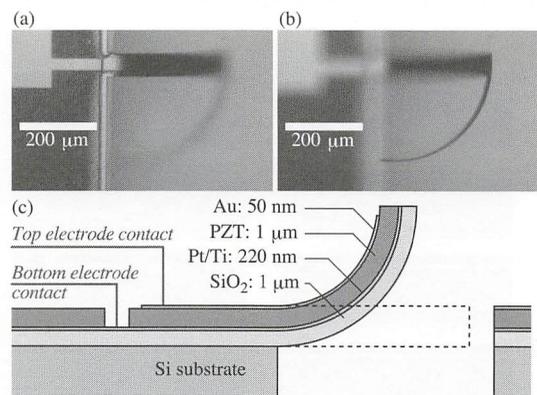
山下 馨

## [研究の目的]

介護ロボットによる人体の把持・抱きかかえや、医療現場における触診の代替デバイス、あるいは遠隔手術用のマニピュレータからの触覚情報の取得・呈示などの分野で、高度な触覚をもつロボットが求められている。このようなロボットは人間と触れ合い、人間にサービスを提供し、また人間の健康・生命を守るという重要な場面で工学的に非常に繊細な感覚が要求される。本研究では、このようなロボットに繊細な触覚を提供するための触覚センサを開発することを目標とし、特に単一の素子で多軸触覚（圧感覚と滑り感覚）の検知を可能とすることにより、人間の皮膚感覚と同等以上の触覚を有するセンシングデバイスの実現を目指す。

MEMS (Microelectromechanical Systems) 技術を用いて形成したシリコンマイクロ構造体やポリマ構造体を利用し、多軸触覚を得るためのセンサが近年盛んに研究されているが、力を検知するセンシング手段としては、歪みゲージや静電容量変化等の静的な手法が用いられている。このため、単一の素子では原理的に一方向の力情報しか検知できず、複数の素子を組み合わせることで信号処理を行うことにより多軸情報を得ている。本研究では、単一素子により多軸触覚情報を得るために素子を振動させ、力印加による共振周波数変化を指標として触覚を検知する。力の印加方向により共振周波数変化率が異なる複

数の振動モードを用いることにより、単一の素子によるベクトル触覚検知を目指し、センサ素子の作製と多軸検知特性の解析を行う。



(a) 顕微鏡写真（基板に焦点）、(b) 顕微鏡写真（先端部に焦点）、(c) 構造の断面模式図。

図1 圧電カンチレバー型力覚センサ

## [研究の内容, 成果]

## 1. センサの作製

図1に作製したセンサ素子の写真と断面構造の模式図を示す。素子は湾曲した片持ち梁形状を呈し、基板から反り上がった構造としている。図1(a)は基板部分に焦点を合わせた写真で、先端方向では焦点がずれており紙面垂直方向へ向かって湾曲していることが分かる。図1(b)は先端部分に焦点を合わせており、90°湾曲して反り上がった先端部分がさらに90°右へ湾曲している構造が確認できる。根元部分の断面構造を図1(c)に示す。シリコン熱酸化膜 (SiO<sub>2</sub>)

上に、圧電体 PZT ( $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ ) を用いたキャパシタを形成している。

図 2 に本センサ構造の作製プロセスの概略を示す。(a) 両面熱酸化したシリコンウェハを用いる。(b) 表面に下部電極の Pt/Ti 薄膜を形成する。(c) 下部電極上にゾル・ゲル法により PZT 薄膜を形成する。(d) 上部電極として Au 薄膜を形成する。(e) Au 薄膜を上部電極の形状にエッチングする。(f) PZT 薄膜をカンチレバー形状にエッチングする。(g) 下部電極 Pt/Ti 薄膜をカンチレバー形状にエッチングする。(h) シリコン熱酸化膜をカンチレバー形状にエッチングする。(i) 裏面の熱酸化膜をエッチングして窓を開ける。(j) 窓を通して裏面から基板シリコンを垂直にエッチングする。



図 2 マイクロカンチレバーセンサの作製工程

本工程で図 2(j) の状態になったカンチレバーは  $\text{SiO}_2$  膜が持つ圧縮応力により基板上方へ反り上がり、自動的に図 1(c) の形状を取る。ここでカンチレバーは基板面内で L 字型の形状としているため、二方向に反り上がった結果図 1(a), (b) の写真に示す三次元形状をとる。カンチレバーの幅は  $50 \mu\text{m}$ 、長さは  $400 \mu\text{m} + 400 \mu\text{m}$  である。予備実験で各層の発生応力を算定し、曲率半径  $255 \mu\text{m}$  となるよう積層構造を調整して、長さ  $400 \mu\text{m}$  で湾曲角度  $90^\circ$  となるよう設計している。

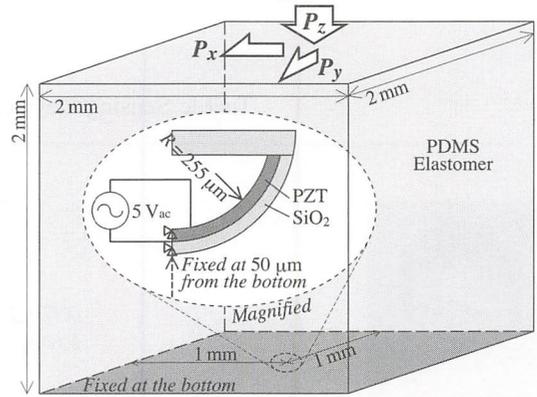
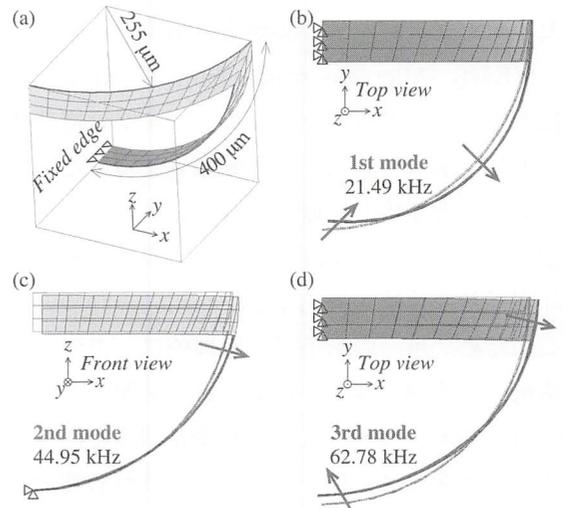


図 3 多軸感度解析用モデルの模式図

## 2. 多軸感度の解析

図 1 のセンサによる多軸触覚感度について有限要素法により解析を行った。図 3 に解析モデルの模式図を示す。カンチレバーセンサを、人間の皮膚を模したエラストマで被覆している。表面に印加された荷重  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  によりエラストマ自身に変形し、変形したエラストマからカンチレバーが応力を受けた状態でのカンチレバーセンサの共振周波数変化を解析する。センサの圧電体キャパシタに  $5 \text{ V}$  の交流電圧を印加した状態での自励振動の共振点シフトについて、有限要素法解析ソフト ANSYS Academic Teaching Introductory を用いて周波数応答解



(a) 構造の鳥瞰図。(b) 1 次振動モード。(c) 2 次振動モード。(d) 3 次振動モード。

図 4 圧電カンチレバーセンサの立体構造図

析を行った。

3方向の荷重を独立に検知するために、3つの異なる振動モードを設計した。図4に各振動モードの模式図を示す。1次モードでは主に先端部分が、2次モードでは主に根元部分が振動し、3次モードでは両方が振動している。これら各モードについて、エラストマ表面への印加荷重に対する共振周波数の変化を図5に示す。ここで共振周波数変化率  $F$  は、無荷重時の共振周波数  $f_0$  と荷重時の共振周波数  $f'$  を用いて  $F = (f' - f_0) / f_0$  と定義している。図5(a)~(c)は  $x, y, z$  方向それぞれの一軸荷重に対する共振周波数の変化率を表している。各モードとも荷重に対してほぼ直線的に共振周波数が変化していることが分かる。図5(d)は、 $x, y, z$  方向の一軸荷重印加時の共振周波数変化の和と三軸同時印加時の共振周波数変化を同一グラフ上に示している。両者はほぼ重なっており、荷重に対する共振周波数変化率が重ね合わせできることを示している。図5の特性において非線形性は最大6%以下であった。よって、印加荷重ベクトル  $\mathbf{P} = (P_x, P_y, P_z)^t$  と共振周波数変化率ベ

クトル  $\mathbf{F} = (F_1, F_2, F_3)^t$  の関係を、行列  $\mathbf{A}$  を用いて近似的に

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}\mathbf{F} \quad (1)$$

と表すことができる。このときの行列  $\mathbf{A}$  の各成分を表1に示す。

表1 印加荷重に対する共振周波数変化率の係数 [ $10^{-6}\text{kPa}^{-1}$ ]

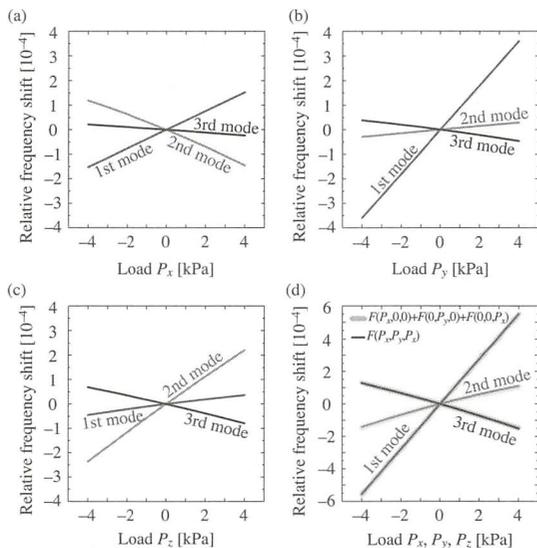
$\frac{\partial F}{\partial P}$	$\frac{\partial F}{\partial P_x}$	$\frac{\partial F}{\partial P_y}$	$\frac{\partial F}{\partial P_z}$
$\frac{\partial F_1}{\partial P}$	$a_{1x}=38.1$	$a_{1y}=89.9$	$a_{1z}=10.2$
$\frac{\partial F_2}{\partial P}$	$a_{2x}=-33.1$	$a_{2y}=7.4$	$a_{2z}=57.2$
$\frac{\partial F_3}{\partial P}$	$a_{3x}=-5.6$	$a_{3y}=-10.6$	$a_{3z}=-18.5$

### 3. 単一センサ素子での荷重ベクトル推定

センサデバイスとして、観測された周波数変化率  $\mathbf{F}$  から触覚ベクトルであるエラストマ表面の印加荷重  $\mathbf{P}$  を求めるには、式(1)のシステムを逆に解いて

$$\mathbf{F} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{P} \quad (2)$$

から計算することができる。ただし、式(1)のシステムは近似的な線形性に基づくに過ぎないので、システムの行列  $\mathbf{A}$  が誤差を含み、式(2)による逆推定結果には最大で行列  $\mathbf{A}$  の条件数倍の誤差が生じることになる。そこで今回は、誤差を含む第一段階の推定結果のうち、測定荷重範囲最大となる荷重点での推定結果を検量線用のデータとし、Transfinite mappingの手法を用いて推定結果を改良した。印加荷重  $\pm 4$  kPa の範囲内での荷重推定結果を図6に示す。 $x, y, z$  各方向成分  $-4, -2, 0, 2, 4$  kPa における荷重印加時の共振周波数変化率から逆推定を行った結果を丸印で示している。推定誤差の分布を強調するため、誤差を10倍に誇張して描いている。4 kPa という荷重は、人間が腕をまわして成人を抱え上げる際の荷重に相当する。本推定結果では最大誤差が43 Paであり、測定範囲フルスケール4 kPa に対して1.1%以下の誤差で推定することができた。



(a)  $x$  方向一軸荷重印加時  $F(P_x, 0, 0)$ 。(b)  $y$  方向一軸荷重印加時  $F(0, P_y, 0)$ 。(c)  $z$  方向一軸荷重印加時  $F(0, 0, P_z)$ 。(d) 各一軸荷重印加時の周波数変化率の和 (淡色太曲線)  $F(P_x, 0, 0) + F(0, P_y, 0) + F(0, 0, P_z)$  および三軸荷重印加時の共振周波数変化率 (濃色細曲線)  $F(P_x, P_y, P_z)$ 。

図5 各振動モードにおける荷重時印加時の共振周波数変化率

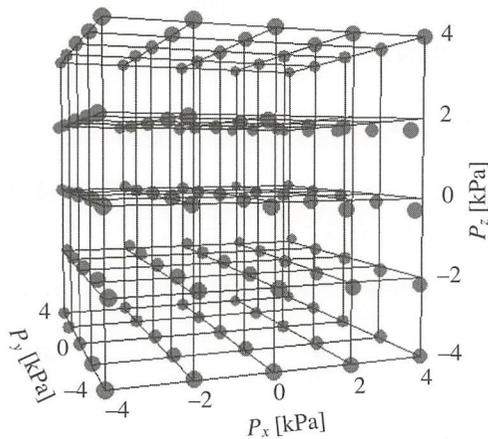


図6  $P_x, P_y, P_z = -4, -2, 0, 2, 4$  kPaの格子点上的の印加荷重に対して推定結果の荷重ベクトルを丸印で表している。推定誤差の分布を分かり易くするため誤差を10倍に誇張している。

図6 共振周波数変化率からの印加荷重の推定結果

#### [今後の研究の方向, 課題]

本研究により、三次元方向に感度を持つ圧電共振カンチレバー型力覚センサの作製プロセスと、単一素子でのベクトル触覚計測の基本技術を確立することができた。現状ではまだセンサとしての感度が低く、また比較的非線形性が大きいため、触覚荷重推定において信号処理技術の比重が大きくなっている。今後はより高感度に触覚を検知でき、かつ応答の非線形性を低減できるセンサ構造を追究してゆきたい。

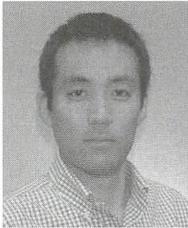
#### [成果の発表, 論文等]

- [1] 西本喬則:「圧電共振カンチレバー型センサによる三軸ベクトル触覚推定」, 電子情報通信学会関西支部学生会第16回研究発表講演会, 堺市, 3月1日(2011), C-1.
- [2] 古川和弥:「3軸ベクトル触覚計測用圧電カンチレバー型マイクロセンサの作製」, 電子情報通信学会関西支部学生会第16回研究発表講演会, 堺市, 3月1日(2011), C-4.
- [3] Y. Yang, K. Yamashita, T. Nishimoto, K. Furukawa and M. Noda: "Fabrication and Axial Analysis of Vibratory Piezoelectric Cantilever Sensor for Three-axial Tactile Sensing", The 2011 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK 2011), PC-16, Suita, Japan, May 19-20 (2011), 130-131.
- [4] K. Yamashita, Y. Yang, T. Nishimoto, K. Furukawa and M. Noda: "Vector tactile sensing by a single sensor element of vibratory microcantilever based on multimode resonant frequency shift", Eurosensors XXV, Athens, Greece, Sep. 4-7 (2011), accepted.
- [5] K. Yamashita, Y. Yang, T. Nishimoto, K. Furukawa and M. Noda: "Piezoelectric Vibratory-Cantilever Force Sensors and Axial Sensitivity Analysis for Individual Triaxial Tactile Sensing", IEEE Sensors 2011, Limerick, Ireland, Oct. 28-31 (2011), accepted.

# 慣性運動誘発度に基づく大腿義足の慣性適合性評価

Evaluation Method of Inertia Property of Trans-femoral Prosthesis based on  
Degree of Inertia-induced Motion

2001018



研究代表者	香川大学 工学部	准教授	和田 隆 広
共同研究者	富山大学大学院 理工学研究部	講 師	関 本 昌 紘

## 1. はじめに

大腿義足装着者のさらなる ADL (Activity of Daily Living) 向上のため、スムーズな義足遊脚期歩行の実現が課題となっている。より歩きやすい義足を実現するためには、熟練の義足装着者や義肢装具士が感じ取る微妙な義足の調整や歩行の差を客観的、他覚的に捉える必要がある。

義足歩行において、慣性特性や歩行速度の変化によって歩きやすさが変化することは経験的に知られている。そこで本研究では義足の慣性特性に着目し、様々な症状、義足歩行スキルなどを慣性誘発度運動との関連で捉える手法について検討を行うことを目的とする。この手法を確立することにより、大腿義足が個人に対して適合しているかを評価することにつながると考えられる。

そこで本研究では、義足慣性特性を変化させることで意図的に歩きやすさを変え、大腿義足の慣性特性が遊脚期歩行の歩きやすさに及ぼす影響を調べる。まず三次元動作解析装置を用いて、慣性特性や歩行速度を変化させた義足歩行を計測する。その計測により得られた関節パワーなどの評価指標と主観評価の関係を調査した。

一方我々は先行研究[1]にて義足の慣性特性の効果的利用の観点から適合性評価するため、

慣性誘発度メジャーを評価指標として導入している。本指標は、義足の慣性特性の有効活用度(慣性誘発度)を表している。本研究ではこの慣性誘発度をスキル評価に利用できると考えた。そこで本研究では、義足の慣性特性を変化させ、その際の義足使用者の使用歴に伴う慣性誘発度メジャーおよび、主観評価等を調査し、義足歩行スキルと慣性誘発度との関係を調査した。

## 2. 慣性誘発度メジャー

### 2.1 遊脚期歩行のモデル化

慣性誘発度メジャーを計算するため遊脚期歩行を Fig.1 のようにモデル化した。リンク 1 は健常肢で膝関節は無視し、足関節を回転軸としたものである。リンク 2 は義足側の大腿部で、リンク 3 は義足の下腿部と足部を合わせたものである。リンク 0 は体幹で自由度はないが、下肢以外の重量が垂直に下肢にかかっている。このような多関節系の運動方程式は式 (1) で表わされる。

$$H(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \frac{1}{2}\dot{H}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + S(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

ここで  $H(\mathbf{q}) = [h_{ij}]$  は慣性行列、 $\mathbf{q} \in R^n$  は関節角度ベクトル、 $S(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  は遠心、コリオリ力を表す歪対称行列、 $\mathbf{g}(\mathbf{q})$  は重力項を表すベクトル、 $\boldsymbol{\tau}$  は関節トルクベクトルである。

## 2.2 慣性誘発度メジャー

式 (1) のダイナミクスに支配された運動の、慣性誘発運動への近さを評価することを考える。与えられた2点  $\mathbf{q}(a) = \mathbf{q}_a$ ,  $\mathbf{q}(b) = \mathbf{q}_b$  間を結ぶ曲線  $q(t)$  に対して、その曲線の長さを式 (2) で定義する。

$$L = \int_a^b \sqrt{\sum_{i,j=1}^n h_{ij}(\mathbf{q}) \dot{q}_i(t) \dot{q}_j(t)} dt \quad (2)$$

ここで、 $h_{ij}$  は式 (1) における慣性行列の各要素である。式 (2) での値が最小になるものはリーマン距離と呼ばれる。このときの軌道 (測地線) の方程式は式 (1) において、関節トルク、重力を無視したものとなる。つまり、力学的には2姿勢間の多関節系の慣性誘発運動に対応する。よって、式 (2) の値がリーマン距離から離れている時、その運動は慣性運動から遠いと解釈できる。つまり、運動中のある2区間を式 (2) により計測し、その値をリーマン距離と比較することにより、多関節系の慣性誘発運動への近さを定量的に評価できる。

そこで、慣性誘発運動の度合い (慣性誘発度) を計測する指標として、慣性誘発度メジャーを式 (3) で定義する。

$$\Delta R = \frac{L - R_d}{R_d} \quad (3)$$

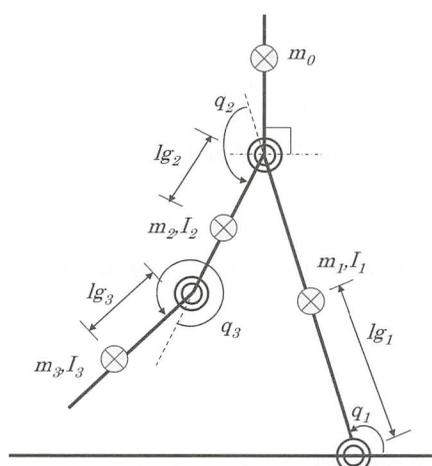


Fig.1 義足歩行の4リンクモデル

ここで、 $L$  は2姿勢間の式 (1) による長さ (実際の運動を計測したもの)、 $R_d$  はリーマン距離を表す。

## 3. 実験1: 熟練者による実験

### 3.1 実験方法

実験には、膝継手に3R95 (Otto Bock 製) を使用し、足部IC40 (Otto Bock 製) 及びソケットは実験参加者が日常的に扱っているものを使用した。実験参加者は45歳の男性で日常的に義足を使用している。義足の慣性特性は錘 (0.14 kgf) の取り付け位置を変えて装着することにより変化させる (Fig.2)。錘は膝関節から最遠点 (足関節) に付けた場合を100%として定義し、0%, 48%, 100%, 錘無し (None) の4条件で変化させた。歩行速度は実験参加者の主観によりFast, Normal, Slowの3条件に変化させた。錘位置4条件、歩行速度3条件の計12条件で各5試行、全60試行の計測を行った。

また、VAS (Visual Analog Scale) を用いて1試行ごとに主観評価を行った。VASでは歩きやすいを100、歩きにくいを0、普通を50とし、0以下、100以上の点を付けた場合も、そのまま得点として採用した。計測には、三次元動作解析装置VICON (Oxford Metrics 社製) を計測周波数100 Hzで使用した。マーカーを右第五MP関節、右外果、右膝関節、義肢足部前方、後方、膝継手関節軸、両大腿骨頭に付け、Diff Gait (臨床歩行分析研究会) により関節モーメントやパワーの値を求めた。

### 3.2 実験結果

#### 3.2.1 主観評価

Fig.3に歩きやすさの主観評価の平均値を示す。FastはNormal, Slowに比べて主観評価が低い。また、錘位置では48%で最も主観評価が高い。

二元配置分散分析の結果、歩行速度 (F

(2,47) = 88.919,  $p < 0.001$ ) と 錘位置 ( $F(3,47) = 11.319, p < 0.001$ ) の主効果が有意であり, 交互作用は有意傾向が確認された ( $F(6,47) = 2.190, p = 0.061$ )。さらに, 一元配置分散分析によって歩行速度の単純主効果が有意であることを確認し ( $F(2,56) = 52.919, p < 0.001$ ), Bonferroni 法による多重比較を行うと, Fast-Normal 間 ( $p < 0.001$ ), Fast-Slow 間 ( $p < 0.001$ ) に有意差が見られた。ついで, 歩行速度別に錘位置を要因とする一元配置分散分析を行った結果, Fast 条件 ( $F(3,16) = 5.373, p = 0.009$ ) と Normal 条件 ( $F(3,15) = 6.422, p = 0.005$ ) にて錘位置の主効果が有意であった。多重比較を行うと, Fast の 48%-100% 間 ( $p = 0.011$ ), また Normal の 48%-100% 間 ( $p = 0.003$ ) に有意差が見られた。

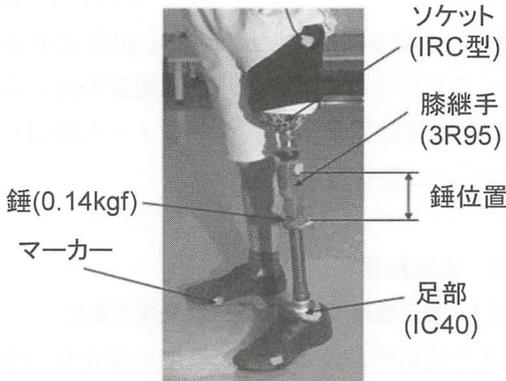


Fig. 2 実験で用いた義足と錘取り付け位置

### 3.2.2 遊脚末期の制御

我々は先行研究にて義足の運動を義足遊脚末期に能動的に制御していることを示唆する結果を得ている [1]。そこで, 義足遊脚末期に出現する健常肢足関節のモーメントおよびパワーのピークに着目した。そこで, 歩行条件の影響が顕著に現れる足関節パワーのピークについて解析を行う。Fig. 4 に主観評価の高い 2 試行と低い 2 試行の遊脚期における足関節パワーの変化を示す。主観評価の高い試行では足関節パワーのピークの値が小さく, ピークが現れるタイミングが遅いといえる。

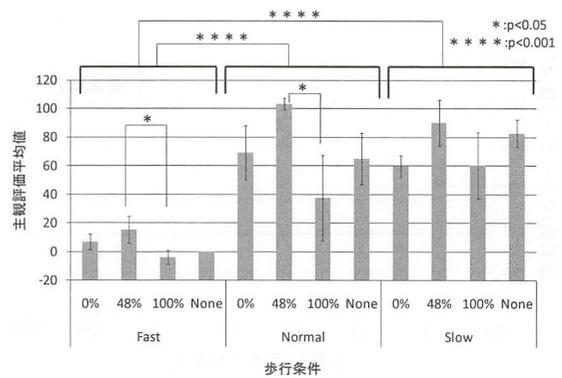


Fig. 3 主観評価の比較

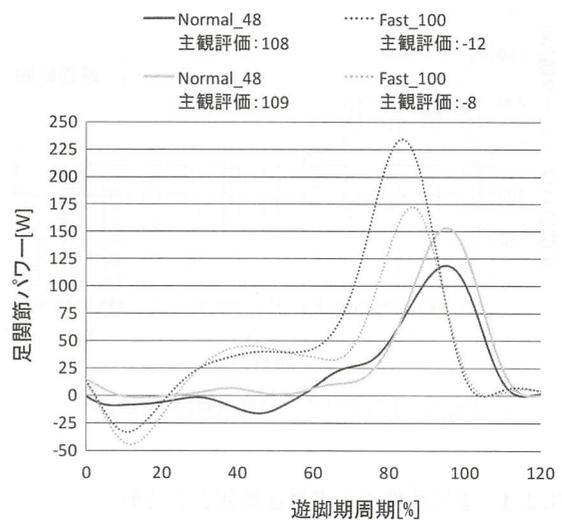


Fig. 4 遊脚期の足関節パワーの変化

### 3.2.3 主観評価と足関節パワーのピーク値

Fig. 5 に主観評価と足関節パワーのピーク値の関係を示す。主観評価が高くなるほど足関節パワーのピーク値は小さくなり, ある範囲に収束しているように見受けられる。そこで, 主観評価が 75 以上の 24 試行について足関節パワーピーク値の平均値と標準偏差を求め, 平均値  $\pm$  標準偏差を最適範囲とする。Fig. 5 に示すとおり, 主観評価の高い場合においては, 足関節パワーピーク値が, ほぼ最適範囲内に収まっていることがわかる。この結果は, 足関節パワーピーク値の大きい歩行では足関節への過大な負荷により主観評価が低くなったと考えられ, 足関節パワーピーク値がある程度の主観評価と対応すると考えられる。

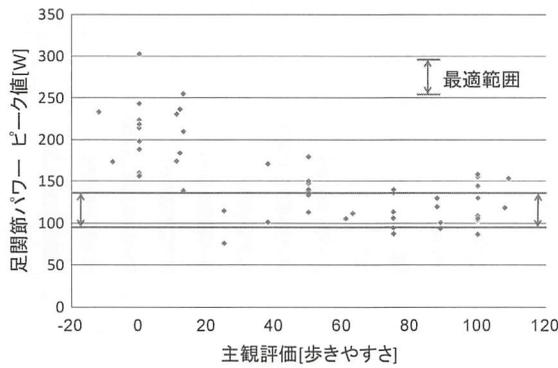


Fig. 5 主観評価と足関節パワーのピーク値

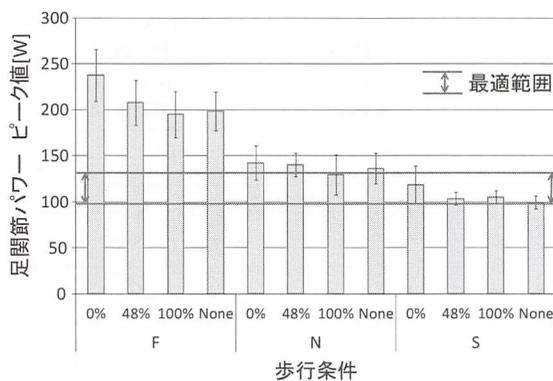


Fig. 6 歩行条件ごとの最適範囲との比較

### 3.2.4 歩行条件ごとの最適範囲との比較

Fig. 6 に歩行条件ごとの足関節パワーピーク値と足関節パワーピーク最適範囲を示す。歩行速度別では Normal および Slow において最適範囲に近い値が得られた。錘位置別では、主観評価の高い 48% にて最適値に近いものの、主観評価の低い 100% でも最適範囲に近い値が得られた。

## 4. 実験 2：非熟練者による実験

### 4.1 実験方法

実験参加者は義足使用非熟練者の男性で、義足を使用し始めてから 5ヶ月目、8ヶ月目、1年3ヶ月目の 3 回実験を行った。膝継手は 3R106 (Otto Bock 製)、足部は IC40 (Otto Bock 製)、ソケットは参加者が日常的に扱っているものを使用した。歩行中の関節角度算出のため、矢状面に垂直に設置したデジタルカメラ Exilim

EX-FH20 (CASIO) にて歩行の様子をサンプリング周波数 210 Hz で撮影した。なおカラーマーカーを義足側の大転子、両足の膝関節、外果、MP 関節に張り付け義足歩行を撮影した。また各試行終了時に、歩きやすさの主観評価を VAS を用いて行った。

### 4.2 実験条件

義足の慣性特性は 0.14 kgf の錘の位置を変え義足に装着することにより、以下の 4 条件に変化した。つまり、① 錘無し、② 0% 条件、③ Best 条件、④ 100% 条件である。Best 条件は各実験日において実験参加者がもっとも好む錘位置である。なお各実験日における Best 条件の錘位置は、膝関節から計測した錘位置を下腿長で正規化し、最遠点 (足関節) に付けた場合を 100% とした場合に、実験 1、2 回目が 52%、3 回目が 42% であった。実験 1 回目は通常歩行で各条件を 3 試行、2 回目は通常歩行で 5 試行、3 回目は通常歩行 (メトロノーム使用) で 5 試行の計測を行った。

### 4.3 実験結果

#### 4.3.1 義足使用歴による慣性誘発度の変化

義足使用歴による慣性誘発度の変化を調査する。遊脚期を文献 [2] に基づいて、以下の 3 つのフェーズに分けて評価する。つまり、遊脚期の始まりから遊脚側の足関節と立脚側の足関節が重なるまでを Phase 1、足関節が重なってから遊脚側の脚の下腿が垂直になるまでを Phase 2、遊脚側の脚の下腿が垂直になってから遊脚期の終わりまでを Phase 3 とする。

Fig. 7 に一例として、錘位置の Best 条件での慣性誘発度メジャーと義足使用歴の関係を示す。遊脚期の Phase 2 と Phase 3 の値に注目すると、使用歴 5ヶ月と比べて 8ヶ月、1年3ヶ月は慣性誘発度メジャーの値が小さくなり、ばらつきも小さくなっていることがわかる。

#### 4.3.2 関節角度による歩容の変化

Fig. 8 に錘位置 Best 条件における遊脚期の

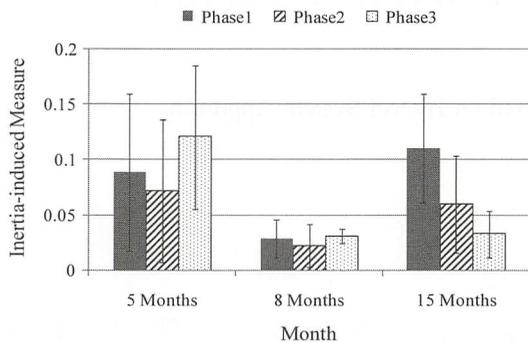


Fig. 7 義足使用歴による慣性誘発度メジャーの推移 (Best 条件)

義足側の膝関節角度  $q_3$  (Fig. 1 参照) の変化を示す。使用歴 5ヶ月, 8ヶ月に比べ 1年 3ヶ月は義足の膝関節がより大きく屈曲していることがわかる。それに伴い, 膝関節が伸展するタイミングが遅くなっている。

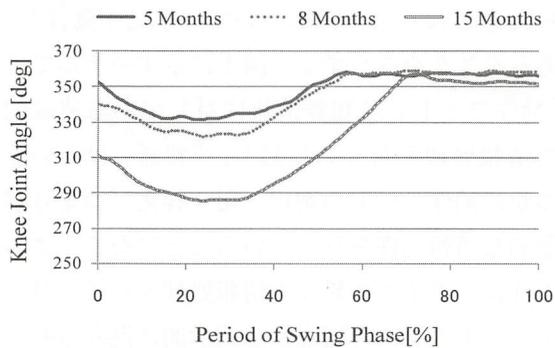


Fig. 8 義足膝関節の時系列変化 (Best 条件)

## 5. ま と め

大体義足の慣性特性を変化させることで, 歩きやすさが大きく変化することが示された。また主観評価の高低が, 健常側の足関節パワーに現れる可能性が示唆された。さらに義足歩行慣性誘発度の観点から義足歩行スキルの特徴付けを試みた。その結果, 義足スキル向上に伴い慣性誘発度メジャーの値が遊脚期の Phase 2 と

Phase 3 において小さくなる傾向がみられた。以上の結果は, 慣性誘発度によって義足歩行スキルが定量化できる可能性を示唆するものである。

今後の課題は, 慣性誘発度メジャーによるスキル同定手法の確立と, その結果の, リハビリテーション手法への応用である。その際, 慣性特性適合性の評価がキーとなると考えられる。

### [参考文献]

- [1] Wada, T., et al., "Evaluation of Inertia Matching of Trans-Femoral Prosthesis based on Riemannian Distance", Proc. of IEEE/ICME Int. Conference on Complex Medical Engineering, pp. 244-249, 2010
- [2] ゲッツ・ノイマン・キルステン: 観察による歩行分析, 医学書院, 2005

### [成果の発表, 論文等]

- 1) Takeuchi, T., Wada, T., Awakihara, K., and Sekimoto, M., "Analysis of Walking Skill with Trans-Femoral Prosthesis based on Inertia-Induced Measure", Proceedings of IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering, pp. 641-646, May, Harbin, China, 2011
- 2) Harada, R., Ozaki, M., Awakihara, K., Takeuchi, T., and Wada, T., "Effects of Inertial Properties of Trans-femoral Prosthesis on Stair Ascent", Proceedings of The 13th Japan and Korea Joint Ergonomics Symposium, pp. 378-380, May, Tokyo, Japan, 2011
- 3) 秋山友祐, 粟木原香, 竹内豊計, 和田隆広, 山本澄子, "大腿義足の慣性特性が歩きやすさに及ぼす影響", 日本文学工学学会中国四国支部大会, (2010)
- 4) 粟木原香, 竹内豊計, 関本昌紘, 秋山友祐, 和田隆広, "慣性誘発度に基づく義足歩行スキルの解析", 計測自動制御学会四国支部講演会, (2010)
- 5) 尾崎光利, 粟木原香, 尾崎龍一, 竹内豊計, 和田隆広, "大腿義足慣性特性が階段歩行に及ぼす影響", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門講演会, CD-ROM (2011)

## ハイブリッドシステム論が拓く人間機械学の新展開

### Innovation of Human-machine System based on Hybrid System Approach

1091901



研究代表者 名古屋大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻 教授 鈴木 達也  
 共同研究者 名古屋大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻 博士研究員 奥田 裕之

#### [研究の目的]

人間の行動は通常、「認知」「判断」「動作」の各フェーズから構成され、これらの各フェーズが人間と機械の間で複合的なインタラクションを有する高次人間機械系に対する設計論の必要性が高まっている。申請者らのグループはこれまで、判断が主に離散的かつ事象駆動的な数理表現で、また動作が連続的かつ時間駆動的な数理表現でモデル化できる点に着目し、連続・離散ハイブリッドシステム理論に基づいた判断・動作系の統一的モデル化手法を提案した。一方、高次人間機械系においては、人間と機械が同一の判断特性を有することが不可欠であり、この判断特性の整合性に適切な動作アシストが加わってはじめて親和性の高い人間機械系が実現できる。本研究では、このような人間機械系を「判断特性共有型人間機械系」と呼ぶこととし、高次人間機械系における重要な設計原理と位置づける。本研究では、ハイブリッドシステムモデルに基づいた行動モデリングに関する最新の成果をこの設計原理と融合することで、革新的な高次人間機械系の設計論を創出することを目的とする。

#### [研究の内容, 成果]

図1に、研究者らが提案する高次モーションモデルの概略を示す。図1において、「認知」

は「知覚(情報の取捨選択, 加工)」を、「判断」は「動作の選択(動作モード間の遷移)」を、また、「動作モード」は脳内で生成されるプリミティブな動作を表しており、いくつかの異なるモードがあると仮定する。最終的には、脳から出力される指令に基づいて、手足が動作し、あるタスクを遂行する。図1に示すモデルでは、「動作モード」は知覚情報に対してある連続的な情報処理を行うのに対し、「判断」は、いくつかの動作モードの選択・切り替え、つまり離散的な情報処理を行っていることになる。このように、タイプの異なる情報処理をハイブリッドダイナミクスの観点から明示的に混在させている点が従来のモデルと比べた場合のこのモデルの大きな特徴である。

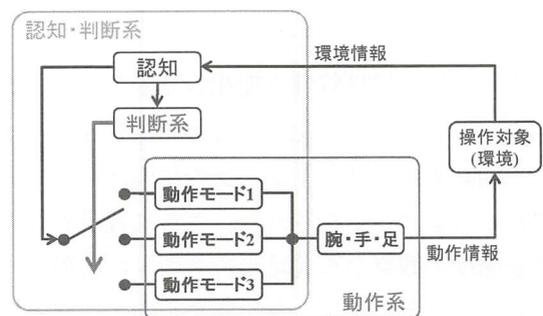


図1 ハイブリッドシステムとしての人間行動

#### [確率重み付き ARX モデルの提案] 【目標1】

一方で、人間の行動に着目すると、同様の状況であっても、時として異なる振る舞いを見ることが観察される。これは認知した情報を基

にした判断にばらつきがあることに起因すると考えられる。このようなばらつきを確率的に捉えるため、本研究では確率重み付き ARX モデル（以下、Probability weighted ARX モデル）を提案し、判断のばらつきの確率的表現を含んだ人間行動のハイブリッドシステム表現として用いる。PrARX モデルは、線形なダイナミクスを表現する ARX モデル（Auto Regressive eXogenous モデル）を複数用意し、それらが確率的に切り換えられるとの仮定に基づいて、その確率重み付き和（期待値）が出力される、としたモデルであり、下記のように記述される。

$$y(k) = \sum_{i=1}^s P_i(k) \theta_i^T \phi(k) + e(k) \quad (1)$$

ここで  $y(k)$  は出力であり、 $P_i(k)$  は時刻  $k$  における出力が、 $i$  番目の ARX モデルから出力される確率を表しており、これはソフトマックス関数に基づいて以下の式に従って計算される。

$$P_{i(k)} = \frac{\exp(\eta_i^T \phi(k))}{\sum_{j=1}^s \exp(\eta_j^T \phi(k))} \quad (2)$$

$$\eta_s^T = 0 \quad (3)$$

式 (1)～(3) における  $\mathbf{q}$ 、 $\mathbf{h}$  はそれぞれ線形ダイナミクス、および判断特性に関連するパラメータである。また、 $\mathbf{f}$  は入力と出力の再帰項から構成された拡大回帰ベクトルである。

本モデル中のパラメータ  $\mathbf{q}$ 、 $\mathbf{h}$  は、取得された行動データに基づいて、下記の誤差関数を最小化することで推定される。

$$\epsilon = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^T(k) e(k) \quad (4)$$

$$e(k) = y(k) - \sum_{i=2}^s P_i(k) \theta_i^T \phi(k) \quad (5)$$

この誤差最適化は非線形計画問題となることから、様々な初期値から再急降下法を用いて最適化を行うことで、疑似最適なパラメータの推定値を得ることができる。

本モデルは一連の複雑な振る舞いを複数の単純な線形モデル（モード）に分割して表現できることから、物理的に理解のしやすい構造の単

純さを持ちつつ、モード数に応じてモデル化精度を向上できる。さらに、ソフトマックス関数のパラメータ  $\mathbf{h}$  に注目することで、動作モードがどのような基準で切り替えられているかを類推しつつ、その確率的なばらつきをエントロピーを用いて評価することが可能である。エントロピー  $H$  は、たとえば下記のように計算できる。

$$H = - \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^s P_i(k) \log P_i(k) \quad (6)$$

このエントロピーが大きいほど、モードに関する不確定性が大きく、同じ状況であっても動作モードが曖昧になることを示している。本研究ではこの提案モデルを用い、二つの発展研究を行った。

#### [運転中の注意力散漫状態の推定] 【目標 2】

本研究では PrARX モデルを用いて、運転行動中の覚醒時と眠気時におけるドライバモデルを作成し、運転行動の変化と、それに対応したそのモデルパラメータや特徴量の違いを観察し、これらの関連を考察した。また、生体情報を用いてその妥当性について評価した。図 2 に行動の観測に用いたドライビングシミュレータ（以下 DS）の運転席左後方からの眺めを示す。

通常時の運転行動と、眠気時の運転行動のデータを観測するため、複数の被験者に、10 分間、それぞれの状態で DS にて走行してもらった。この時観測されたデータの一例を図 3、

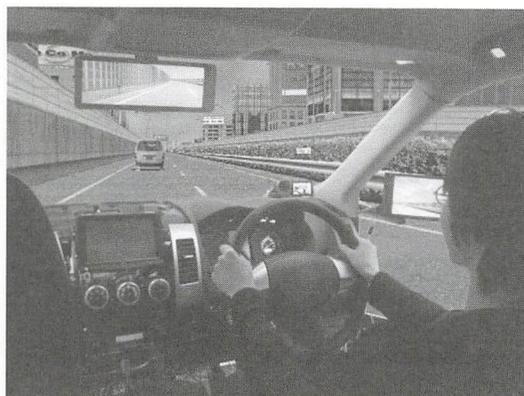


図 2 ドライビングシミュレータ

図4にそれぞれ示す。図には上から順に前方車との車間距離、相対速度、ペダル操作量、横方向の変位、ステアリング操作量、計測した脳波のスペクトログラムが示されている。このように観測された行動データに着目すると、眠気時にはステアリング操作量に若干のふらつきが確認できるものの、大きな差異は見いだせなかった。そこで、本研究で提案したPrARXモデル(2モードとした)を用い、これらの行動データをモデル化する。本研究では、縦方向(自動車の前後方向)と横方向(自動車の左右方向)の二つの方向について、独立に運転行動モデルを同定し、行動解析を行った。横方向のモデルについて、同定した結果を図5、図6に示す。

図の横軸は車線中央からの横位置、縦軸はステアリング操作量であり、各データ点はモードの確率に従って色づけされている。赤い点はモード1である確率が高い点、青い点はモード

2である確率が高い点、紫の点はこれらの確率が曖昧である点を表している。これらのモードは、ステアリングの分布を見ると、それぞれ直線時とカーブ時のモードに対応することが分かる。また眠気時の分布は覚醒時に比べて各モードの広がりが大きくなっており、二つのモードの間の紫の点、すなわち判断が曖昧になっている点が多いことが読み取れる。各データ点のモード所属の曖昧さを評価するため、これらのデータに関して式(6)に従い、被験者Aのデータ4本、被験者Bのデータ3本についてエントロピーを計算した結果を表1に示す。表中のデータ番号欄には、その時の被験者の主観的な眠気の状態を併記した。眠気が強い時にはエントロピーの値が増加することがわかる。これは眠気により、同じ状況にあっても画一的な判断ができず、判断が曖昧になり、確率的にばらついていることが原因と考えられ、PrARXモデルのエントロピーを介して眠気状態の弁別可能性が示された。

一方で、表1には走行時に同時に計測した脳

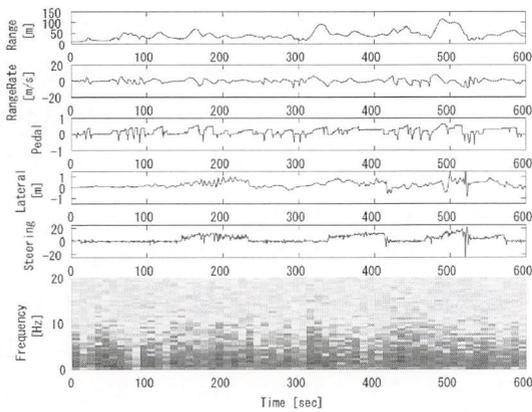


図3 観測された行動情報と脳波情報(通常時)

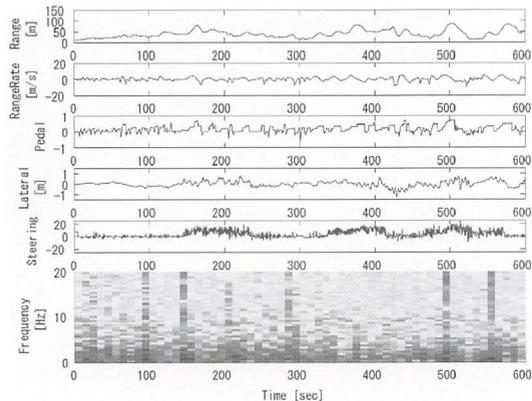


図4 観測された行動情報と脳波情報(眠気時)

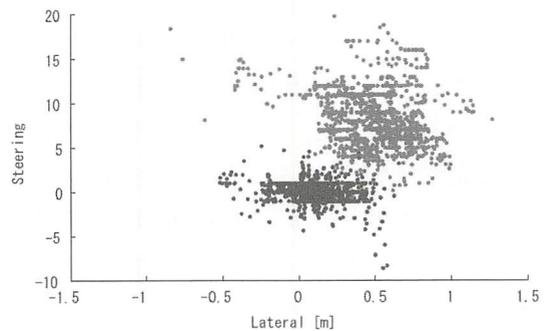


図5 モデル化結果(通常時)

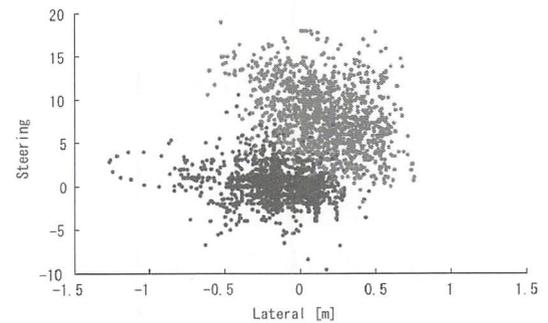


図6 モデル化結果(眠気時)

表1 脳波中の $\alpha$ 波含有率とPrARXモデルによる判断のエントロピー

被験者	データ番号	$\alpha$ 波含有率 [%]	エントロピー
A	1 (通常)	9.90	110.0
	2 (通常)	9.87	89.6
	3 (眠気)	14.01	209.9
	4 (眠気)	15.36	207.8
B	1 (通常)	14.24	109.4
	2 (通常)	16.10	97.2
	3 (眠気)	21.47	178.7

波中の $\alpha$ 波含有率を示しているが、一般に眠気と相関が見られることが示されている $\alpha$ 波含有率とエントロピーの間には相関が見られた。このことから、エントロピーによる評価の有効性が生体信号計測の観点からも示されたと言える。

以上のことから、人間の行動の判断・操作を、連続系と離散系の混在したハイブリッドシステムモデルの同定論に立脚して行動データから抽出することで、運転中のドライバの判断を数理モデル化した。その際、人間が持つ判断の曖昧さを定量的に評価する指標としてエントロピーを導入し、眠気状態を対象として判断の曖昧さとモデルから計算されたエントロピーとの関連を示した。また、脳情報を客観的に観測することで、脳神経学的な観点からの眠気指標を観測し、エントロピーと比較することで、提案するハイブリッドシステムモデルを通じた眠気状態評価手法のエビデンスが確認できた。

#### [今後の研究の方向、課題]

今後は被験者数のさらなる増加、想定タスクの多様化等が重要な課題となる。

#### [成果の発表、論文等]

- (1) 奥田, 伊神, 三上, 田崎, 鈴木: “確率重み付き ARX モデルに基づく追従行動モデルを用いたモデル予測型ブレーキアシストシステムの提案”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2A1-E05, pp.1-4, 2010, 旭川
- (2) 勝, 高橋, 奥田, 鈴木: “筋電位に基づく確率的意図推定を組み込んだ協調搬送システムの実現”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2A1-D03, pp.1-4, 2010, 旭川
- (3) K. Mikami, H. Okuda, S. Taguchi, Y. Tazaki, T. Suzuki: “Model Predictive Assisting Control of Vehicle Following Task Based on Driver Model,” 2010 IEEE Multi-conference on Systems and Control, WeC06.2, pp.890-895, 2010, Yokohama, Japan
- (4) R. Terada, H. Okuda, T. Suzuki, K. Isaji, N. Tsuru: “Multi-Scale Driving Behavior Modeling Using Hierarchical PWARX Model,” 13th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems, WA4.5, pp.1638-1644, Madeira, Portugal (2010)
- (5) 張, 奥田, 鈴木: “ハイブリッド動的モデルによる遠隔操作型軸挿入作業の模倣学習”, 平成 22 年電気学会産業応用部門大会, Y-77, p.1, 芝浦工業大学, 東京 (2010)
- (6) 奥田, 鈴木: “ハイブリッドシステムとして捉える人間行動モデル”, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2010, 2G4-2, pp.1-4, 京都【優秀論文賞受賞】(2010)
- (7) 伊神, 鈴木, 田崎, 奥田: “確率重み付き ARX モデルを用いたハイブリッドシステムの逐次的パラメータ推定”, 第 48 回離散事象システム研究会, pp.13-18, 名古屋 (2010)
- (8) 鈴木, 奥田: “ハイブリッド動的システムモデルに基づく運転行動の解析・モデル化・支援”, 電子情報通信学会誌, Vol.94, No.4, pp.282-287 (2011) (解説記事)
- (9) 松島, 奥田, 鈴木: “確率重みを持つ複数 ARX モデルによる運転行動のモデル化と注意力散漫状態の推定”, 計測自動制御学会第 11 回制御部門大会, 163-3-4, pp.1-4, 沖縄 (2011)

## 国際交流報告の抄録一覧

〔派遣〕

- ◆ 2010 American Control Conference (2002001) ..... 123  
 石 戸 優美子      京都大学大学院 情報学研究科 博士後期課程3年
- ◆ 2010 International Symposium on Nonlinear Theory and  
 its Applications (NOLTA 2010) (2002003) ..... 123  
 田 村 宏 樹      宮崎大学 工学部 電気電子工学科 准教授
- ◆ International Conference on Computer, Electrical, and Systems Science,  
 and Engineering (2002101) ..... 124  
 石 橋 孝 昭      熊本高等専門学校 情報通信エレクトロニクス工学科 准教授
- ◆ The 44th Annual 2010 IEEE International Carnahan Conference on  
 Security Technology (ICCST) (2002102) ..... 124  
 高            岩      東京工業大学 総合理工学研究科 博士課程3年
- ◆ The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots  
 and Systems (IROS 2010) (2002104) ..... 125  
 小 柳 健 一      富山県立大学 工学部 知能デザイン工学科 准教授
- ◆ The 2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem) (2002107) ..... 125  
 平 野 義 明      大阪大学 産業科学研究所 特任研究員 (大阪大学客員准教授)
- ◆ BIOSIGNALS 2011  
 (International Conference on Bio-inspired Systems and Signal Processing) (2002108) ..... 126  
 松 浦 康 之      福井大学 産学官連携本部 研究機関研究員
- ◆ ANNIE Conferences 2010 (ANNIE: Artificial Neural Networks in Engineering) (2002109) ..... 126  
 大 島            真      琉球大学大学院 理工学研究科 博士後期課程
- ◆ The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP' 11 (2012001) ..... 127  
 Tran Xuan Bo      豊橋技術科学大学大学院 工学研究科 博士後期課程3年生
- ◆ Collaborative Conference on 3D & Materials Research (3DMR) (2012003) ..... 127  
 古 海 誓 一      独立行政法人 物質・材料研究機構 主幹研究員

- ◆ The 7th International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications (2012004) ..... 128

森 田 実 山口大学 工学部 理工学研究科 助教

〔特別招聘〕

- ◆ 3rd INCF Congress of Neuroinformatics : Neuroinformatics2010 及び Neuro2010 (2003001) ..... 128

甘 利 俊 一 独立行政法人理化学研究所 脳科学総合研究センター 特別顧問

- ◆ International Conference on Auditory-Visual Speech Processing 2010 (AVSP2010) (2003101) ..... 129

積 山 薫 熊本大学 文学部 総合人間学科 教授

## 〔派 遣〕

派遣研究者	京都大学大学院 情報学研究所 博士後期課程3年 石戸 優美子	2002001
研究集会名 出張期間 開催場所	2010 American Control Conference 平成22年6月22日～平成20年7月5日 アメリカ合衆国 メリーランド州 ボルチモア市	
発表論文	A New Framework for Robust Stability Analysis of Nonlinear Feedback Systems (非線形フィードバックシステムのロバスト安定性解析のための新しい数理的枠組み)	

## 概 要：

当国際会議は、機械、電気、航空、化学プロセス分野など制御工学全般およびその関連分野を対象とする大規模な国際会議であり、制御工学の分野においてアメリカ最大、世界有数の規模を有する。今年度は約1200件の発表があり、理論上、実用上の観点から重要な多くの成果が報告された。

申請者は当派遣において、国際会議に参加し、申請者の研究成果である「制御対象と制御器が通信路を介して連結されるネットワーク化制御系におけるロバスト安定性解析のための新たな数理的枠組み」を提案することにより、近年のネットワーク化社会における人間と機械の調和を促進することを目的とした。

申請者の本研究成果発表により、近年ますます重要性を増す「通信ネットワークを介した遠隔制御システム」や「ON/OFF アクチュエータなどの安価で簡易な機器を含む制御系」に対して高信頼の制御性能を達成する実用的な制御系設計のための基礎理論が提示された。これは実用・理論上の両面から意義深い成果であったと言える。また申請者は、会議場に近接する The Johns Hopkins University において、ネットワーク化制御系の分野において活発に研究を行っている Tarraf 博士と、本研究成果のさらなる応用について議論を行い、共同研究を進めた。会議および大学訪問により、制御工学の分野における日本を中心とした人的ネットワークの形成にも貢献した。

これらの活動を通じて、申請者は本渡航において「人間と機械の調和の促進」という目的に対し、制御工学の分野から成果を上げた。

## 〔派 遣〕

派遣研究者	宮崎大学 工学部 電気電子工学科 准教授 田村 宏樹	2002003
研究集会名 出張期間 開催場所	2010 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2010) 平成22年9月3日～平成22年9月10日 ポーランド共和国 クラフク市	
発表論文	Support Vector Machine with Online Unsupervised Learning Method And its Application to s-EMG Recognition Problems (教師なしオンライン学習法を有する SVM と表面筋電位識別問題への応用)	

## 概 要：

本会議は、非線形理論とその応用に関する研究の世界有数の国際会議である。本会議では、非線形回路、カオス、ニューラルネットワーク、制御、ロボット、時系列解析など非線形理論の応用分野の最先端の研究発表会の場を提供し、また同分野の若手研究者の育成にも力を入れている。また、本会議では、多くの現実世界に存在する非線形問題を解決するための基礎的研究から実際の応用研究の発表が同時に行われているため、色々な視点からの意見交換・情報交換ができるのが特徴である。さらに、生体情報処理、脳情報処理などの医学の分野に近いテーマも非線形問題の領域に含み、大変幅広い研究発表を一度に聞くことができる数少ない国際会議となっている。

本会議で得られた成果として、カオスや生体の情報処理過程を模倣したアルゴリズムと今までの非線形理論の研究で扱われてきた手法を組合せることで予想以上に応用分野に改善をもたらす可能性があるという知見を得たことである。これらの研究発表は組合せ最適化問題を対象とした研究が多かったが、私が研究対象としている制御や生体信号の解析の分野へも応用が可能であると感じた。また、私自身の発表では研究の進め方について指摘を受けたので、その指摘を今後の研究に生かしたいと考えている。

参考データとして今回の開催では、21カ国の国から研究者が参加し、特別セッションの72編の論文を含む162編の論文の研究発表と4件の招待講演が行われ、活気のある会議であった。

〔派遣〕

派遣研究者	熊本高等専門学校 情報通信エレクトロニクス工学科 准教授 石橋 孝昭	2002101
研究集会名 出張期間 開催場所	International Conference on Computer, Electrical, and Systems Science, and Engineering 平成 22 年 11 月 22 日～平成 22 年 11 月 28 日 イタリア共和国 ベニス市	
発表論文	Blind Source Separation for Convolved Mixture Signals Based on Properties of Acoustic Transfer Function in Real Environments (実環境下の音響伝達関数の特性に基づく畳込み混合信号のブライント信号分離)	

概要：

人間と機械のコミュニケーションにおいて、ユーザーに負担が無く、高速に情報伝達できるインターフェースは音声であると考えられている。その観点から、申請者は音声認識システムや認識の前処理である雑音除去や音源分離の研究を実施している。この研究テーマのもとで、立石科学技術振興財団の助成を受けて実施された「時々刻々と変動する音環境下での音源分離」の研究成果の一部を纏めるとともに国際的に情報発信することが、本国際会議に参加した第一の目的である。また、第二の目的は、現在の申請者の研究成果を、音響信号処理だけでなく、制御や故障診断、さらには生体信号処理の分野への拡張を目指しており、それらの分野に関する世界の研究動向を調査し、今後の研究における新たな知見を得ることである。

本国際会議で申請者は、実環境での音響伝達関数の特性を調べ、その結果に基づいて周波数領域の独立成分分析を利用した音源分離法を報告した。特に、実環境下で収録される音響信号の周波数特性や空間的エイリアシングについて調査した結果は、多くの研究者から好評であった。また、セッション終了後にも、音響信号処理の研究者や制御に関する分野の研究者らとフリーディスカッションを行うことができた。その議論の中で、申請者の研究の利点や、欠点に対する改善方法を見出すことができた。さらに、他分野への応用についても確認することができた。以上のことから、研究成果の報告だけでなく、今後の研究の発展性についても確認することができ、本国際会議への参加は効果の高いものであった。

〔派遣〕

派遣研究者	東京工業大学 総合理工学研究科 博士課程 3 年 高 岩	2002102
研究集会名 出張期間 開催場所	The 44th Annual 2010 IEEE International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST) 平成 22 年 10 月 5 日～平成 22 年 10 月 9 日 アメリカ合衆国 カリフォルニア州 サンノゼ市	
発表論文	Active Zoom Cameras Control System using Stereo Parallax	

概要：

今まで開発されたロボットは人間のような視覚処理ができなく、人間の目の基本機能がまだ実現されていない。今回の国際会議に参加することによって、以下の四つの目的を実現しました。

- 1 人間の目の追従機能は工学で実現したことを強調しました。
- 2 人間の目の視力よりさらに上の鷹の目のメカニズムと人間の視覚処理の統合によって、遠距離の追従を実現したことを報告しました。
- 3 ステレオ視差を制御することによって、視標のスケールが制御できますので、人間の目の幅轉運動の応用範囲を遠距離まで拡大して、さまざまな分野に応用する可能性を広げました。
- 4 生理学の構造と工学の結合することによって、今後人間のような追従及び認識ができるロボットが作れる可能性を示しました。

自分の学業に対して、三つの成果を得られました。

- 1 国際学会の発表に参加して、自分の研究成果をアピールできました。
- 2 同じ分野の研究者たちと交流ができますが、沢山アドバイスをもらえたので、今後の研究が効率的に進めます。
- 3 IEEE の論文を発表することによって、2011 年 3 月に卒業できます。

## 〔派遣〕

派遣研究者	富山県立大学 工学部 知能デザイン工学科 准教授 小柳 健一	2002104
研究集会名 出張期間 開催場所	The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010) 平成 22 年 10 月 18 日～平成 22 年 10 月 22 日 台湾 台北市	
発表論文	Novel and Safe Linear Actuator using ER Gel (電気粘性ゲルを用いた新規で安全な直動アクチュエータ)	

## 概要：

例えば、バーチャルリアリティ技術における次の大きな技術革新は力触覚提示技術であろう。また、日本を含め先進諸国は社会の高齢化が進んでおり、わが国でも介護者の負担軽減を行う技術の実用化が急務となっている。これら今後広まるであろう技術において、アクチュエータのような暴走につながる要素の本質的な安全設計は非常に重要であり、実用化に不可欠である。

発表した論文は、機能性材料である ER ゲル（電気粘性ゲル）を用いた新規な構造を持ったアクチュエータに関するものである。これは人間共存型機械に応用することを念頭に開発した、極めて安全性の高いアクチュエータである。しかし、ER ゲルは新しい材料であるため、メカトロニクス要素への応用開発はほとんどされておらず、世界的に見ても研究機関も少ない。そこで、この論文を発表し本研究のアクチュエータを広めることは、本質安全な人間共存型機械の開発促進につながると考えた。

参加した国際会議 IROS2010 は、ロボットに関する最も権威ある国際会議の一つであり、参加聴講者も多く、論文の引用も多い。そのため、この国際会議で論文を発表したことで、本研究のアクチュエータを世界中に広めることにつながった。本研究のアクチュエータや、その開発コンセプトが広まることで、人間と機械の調和や人間共存型機械普及の大問題の一つである「本質的な安全の確保に基づいた設計」が解決に近づくこと期待される。また、このような大きな国際会議で発表し質疑応答を経ることで、より具体的な使用先の確認や将来のユーザー側からの意見を吸収することができた。これは申請者の研究においても大きな効果である。

## 〔派遣〕

派遣研究者	大阪大学 産業科学研究所 特任研究員（大阪大学客員准教授） 平野 義明	2002107
研究集会名 出張期間 開催場所	The 2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem) 平成 22 年 12 月 14 日～平成 22 年 12 月 22 日 アメリカ合衆国 ハワイ州 ホノルル市	
発表論文	Noise-induced entrainment and stochastic resonance based on the device of cytochrome c and lambda DNA binary system (シトクロム c と・DNA を用いた確率共鳴素子の創製)	

## 概要：

本国際会議への出席の目的と意義を以下に記述する。一つ目は、発表のシンポジウムのセッションが多岐に渡っており、一つの会議で内容の異なる 5 編の研究論文を発表することができる点にある。発表予定の研究内容は、① DNA とタンパク質から成るデバイスの作製と電気伝導特性の評価 3 件、② 色素含有 LB 膜の構造評価を 2 件で、実際に会議のシンポジウムセッションの研究分野と良い合致があった。

二つ目は、本会議で日本人以外のアジア、アメリカ、ヨーロッパ等の研究者と議論できる絶好のチャンスである。議論を通して研究の更なる進展、新しいアイデアの発掘、共同研究への展開等に繋ぐことが出来る可能性がある。

三つ目は、私自身の研究分野の内容に加えて、有機合成化学、無機合成化学、生化学、高分子化学等の他分野のシンポジウムも開催される。異分野の研究者との交流を深めて、それらの研究内容を聴講し、私自身の研究の視野の幅を意識的に広げることも意義があると考えている。

最後に、発表予定の 5 つの研究の応用への展開は、人と情報を繋ぐヒューマンインターフェイス素子の創製を見据えており、貴財団の趣意『人間と機械の調和の促進』ともよく対応する内容である。

得られた成果/効果は、① DNA とタンパク質から成るデバイスの作製と電気伝導特性の評価 3 件の研究は、人間の脳機能の一つを模倣し、分子でニューラルネットワークの構築を目指している内容である。現時点では、二端子での信号処理実験の結果に留まっており、今後、多端子での類似の実験を行えば、斬新な結果が得られる可能性があるコメントを貰った。また、DNA では無く、糖鎖が短くほぼ単糖でペプチドも単純なクラゲムチンを用いてはどうか、と共同研究の芽の可能性を得た。② 色素含有 LB 膜の構造評価を 2 件については、現在、使用している有機合成色素は、メロシアンインのみであるため、その他のシアニン、ポルフィリン、フタロシアンイン等も用いて、電子基底状態と電子励起状態の相関を検討すれば、研究が更に発展すると、聴衆からコメントを頂き、有意義な討論となった。

〔派遣〕

派遣研究者	福井大学 産学官連携本部 研究機関研究員 松浦 康之	2002108
研究集会名	BIOSIGNALS 2011 (International Conference on Bio-inspired Systems and Signal Processing)	
出張期間	平成 23 年 1 月 25 日～平成 23 年 1 月 31 日	
開催場所	イタリア共和国 ローマ市	
発表論文	A Study of Stochastic Resonance as a Mathematical Model of Electrogastrogram (確率共鳴による胃電図の数理モデルの構築)	

概要：

近年、胃電図や PET などの計測機械の開発・計測技術の向上によって、胃腸運動の推定や脳内部における活動の研究が行われるようになった。しかし、まだこれらの研究は、緒についたばかりで、研究報告例は非常に少ない。

また、胃電図を用いた研究は、多様な疾患を対象とした臨床応用を目指した研究が主であり、健常者を対象として測定した胃電図の発生機序のモデル化の例は少ない。健常者の正常な胃電図の高精度モデル化を行うことで、胃電図を定量的に評価することが可能となり、機器や映像、音楽を媒体としたヒューマンインターフェースが人に与える影響を評価するシステム構築の一助になりうる。

さらに、胃電図は胃の電気活動を簡便に測定できる信号であるため、ヒューマンインターフェース評価に留まらず、疾病診断や健康管理、労務管理など広範な応用が期待される。そのため、本研究成果を BIOSIGNAL2011 で発表することで、胃電図の広範な利用・応用促進につながる。

参加者からは、胃の電気活動を簡便に測定できる胃電図に注目を得られた。また、提案した数理モデルも既存の評価手法とは異なり、新たな視点による評価であるため、多くの参加者が訪れた。ポスターセッションでは、胃電図の将来性や発表した胃電図の数理モデルの今後の展開、応用可能性について活発な議論を行った。さらに、ポスターセッションの時間外においても、本研究発表について、活発な議論を行った。その結果、内外の研究者に胃電図と胃電図の活用方法の一つを提案することができた。今後、本研究分野の促進並びに、胃電図の広範な利用・応用促進につながると考えている。

〔派遣〕

派遣研究者	琉球大学大学院 理工学研究科 博士後期課程 大島 真	2002109
研究集会名	ANNIE Conferences 2010 (ANNIE : Artificial Neural Networks in Engineering)	
出張期間	平成 22 年 10 月 30 日～平成 22 年 11 月 3 日	
開催場所	アメリカ合衆国 ミズーリ州 セントルイス市	
発表論文	Competitive Coevolutionary Algorithm with Electric Charge Model for the Tsumego Game (電荷モデルを利用した競合共進化アルゴリズムによる詰碁の解獲得)	

概要：

国際会議への参加における一番の目的は、国際的な研究者の方々に自身の研究方針を理解してもらうこと、及び自身の研究の位置付け・意義を確認することにあつた。

自身の研究目標は、人間が持つ思考方法の特徴を導出することにある。特に囲碁を対象としており、囲碁問題と対峙した人間はどのように解を獲得していくか、そのプロセスを導き出そうとしている。囲碁はルール構成の単純さと展開の複雑さとを併せ持っていることから、複雑系の様子を良く体現するものと捉えており、それを通じて得られる実験結果はタスクオリエンティッド以上の要素を含むという期待を持っている。

しかし、実際にプレゼンテーション・意見交換を行ったところ、人工知能の研究者の間でも、囲碁に関しては殆ど馴染みが無いことが伺えた。存在こそ認知されているものの、そのルールまで理解している人はごく少数で、アジアを離れると、更にその数は減少し、囲碁に対する興味も薄いという所感を得た。

囲碁に関しては、そのような状況なので、一度のプレゼンテーション程度では、囲碁を通じて人間の思考プロセスを掴むという狙いに同調して頂くには、根拠、説得力が弱く、現在の研究内容では中々に難しいことを感じ得た。まずは、囲碁とその特異な振る舞いありきではなく、囲碁が人間の思考プロセスを解明することに対して特別に意義を持つ物であるのならば、その要素を詳細に明示していく必要性を痛感した。

この度の国際会議では、他の研究者と意見交換を行い、コネクションを持てたので、今後も標準的な視点から自身の研究方針に対して評価を頂くことができる。まずは囲碁を研究する意義を改めてクリアにするよう、臨んでいく所存である。

## 〔派遣〕

派遣研究者	豊橋技術科学大学大学院 工学研究科 博士後期課程3年生 Tran Xuan Bo	2012001
研究集会名 出張期間 開催場所	The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP' 11 平成23年5月17日～平成23年5月23日 フィンランド共和国 タンペレ市	
発表論文	Modeling of dynamic friction behaviors of fluid power actuators (フルードパワーアクチュエータの動的摩擦挙動のモデリング)	

## 概要：

本国際会議は、フルードパワー（油圧、水圧、空気圧）を利用する機器・システムに関する学術・技術の最新の成果を報告する最大級の国際会議であり、この会議で研究発表することは世界の研究者に自分の研究を知ってもらい、意見をもらう最良の機会である。フルードパワーシステムで最終的に機械的動力を取り出すアクチュエータの摩擦挙動は、そのシステムの動作性能に大きな影響を及ぼすため、設計段階で動作の予測が精度良くできれば、コントローラ的设计・チューニングなどに極めて有効である。本国際会議で発表した「フルードパワーアクチュエータの動的摩擦挙動の数学モデル」は、従来一部しか調べられていなかったフルードパワーアクチュエータの摩擦の動的挙動を実験により調べ、明らかにするとともに、その挙動を良好に表す数学モデルを提示したものである。提案した数学モデルは、LuGre モデルという良く知られているモデルに新たな改良を加えたもので、特にしゅう動状態にあるときの摩擦の動的挙動が非常によく再現できるという特長を有している。発表時には3名の聴講者と座長から相次いで質問を受け、それなりに関心を持ってもらったものと受け止めている。また、他の多くの研究発表を聴講して世界の研究の潮流を知ることができたと同時に、外国や日本の研究者とも面識を持つことができ、非常に有意義な機会であった。

## 〔派遣〕

派遣研究者	独立行政法人 物質・材料研究機構 主幹研究員 古海 誓一	2012003
研究集会名 出張期間 開催場所	Collaborative Conference on 3D & Materials Research (3DMR) 平成23年6月27日～平成23年7月1日 大韓民国 済州特別自治道 (済州島)	
発表論文	Organic Photonic Crystals for Laser Applications	

## 概要：

今回講演を行った「Collaborative Conference on 3D & Materials Research (3DMR)」は、3次元に関するディスプレイおよび材料科学に関する国際会議である。主催は Kwangwoon University で、Springer と Materials Research Society (MRS) が共催であった。今回は韓国・済州島の Ramada Plaza Jeju Hotel で開催された。参加者は100名程度であり比較的小ぢまりとしていたが、日本、韓国、中国といったアジア諸国のみならず、アメリカ、ドイツやイギリスといったヨーロッパ諸国、さらには南アフリカからの研究者も参加していて、文字通り『国際会議』という雰囲気であった。

口頭講演は、研究者の専門分野によってディスプレイと材料科学の2つ会場が用意されていた。私を含め参加者のほとんどが招待講演であり、30分間の口頭発表を行った。私は材料科学の講演会場で聴講していたが、有機材料、高分子材料、無機材料、半導体材料、生体材料等の多種多様な材料を使った研究が発表されていて、活発な討論が行われていた。著名な海外研究者も講演されていて、プレゼンテーションのまとめ方はとてもわかりやすく、私にとって今でも脳裏にやきついている程、印象的であった。今後のプレゼンテーションの参考になった。

本国際会議は参加者が多すぎず、多くの研究者と交流ができたことが良かったと思う。特に、私にとって、共同研究を締結しているアイルランドの研究者と直接会って、ディスカッションできたことが良かった。さらに、他の国内外研究者と初めて意見交換をすることもでき、とても有意義な国際会議であった。

〔派遣〕

派遣研究者	山口大学 工学部 理工学研究科 助教 森田 実	2012004
研究集会名 出張期間 開催場所	The 7th International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications 平成 23 年 5 月 6 日～平成 23 年 5 月 12 日 アルジェリア民主人民共和国 ティバサ市	
発表論文	Study on Measuring Method of Thrombolyses for Wire Type Stirrer (血栓溶解用ワイヤ型攪拌器の診断方法に関する研究)	

概要：

本研究は日本、アメリカ、欧州を初めとする先進国において死亡原因の上位に挙げられる血栓症の治療／診断に関するものであるため、人間の生体と治療デバイスである機械の調和が重要である。今回の研究結果はその治療デバイスを用いた診断方法の提案である。本国際会議は信号処理の学会であり、特に生体信号処理等の応用研究に関する発表が多く寄せられ、信号処理理論、応用の観点から多くの発表が寄せられた。

本研究は生体信号処理に関する研究であるが、申請者は機械設計を専門としているため、分野の違う今回の会議での多くの研究者との討論は非常に大きな意味があったと考えている。申請者の研究している治療デバイスはデバイス周囲の血液の流れを計測することで治療状況を判断するものである。しかしながら、生体内の流れは一定ではなく複雑に変化するため、デバイスの境界条件は常に変化する。本計測手法はこの境界条件の変化も敏感に計測してしまうため、境界条件の影響と治療状況の影響を分離する必要がある。申請者の本研究発表によりこれらの影響を分離する基礎理論が提示された。これはその他の生体計測分野に応用することもできる大きな成果であったと言える。また、申請者は会場に近接するアルジェリアの National Polytechnic School 大学へ訪問し組込みシステム分野において活発に活動されている Omar Stihi 先生、信号処理分野において活躍されている Mourad Adnane 先生と研究室間の交流を行うことで、今後の研究教育活動の為に情報収集及び共同研究に繋がる活発な議論ができたと考えている。本助成事業による国際会議への参加と大学訪問により、アルジェリアは勿論フランス、イギリスなど欧州の研究者やカナダ、オーストラリアなど様々な国の研究者と議論や交流を行うことで国際的なネットワークの形成に貢献した。

〔特別招聘〕

招聘者	独立行政法人理化学研究所 脳科学総合研究センター 特別顧問 甘利 俊一	2003001
研究集会名 開催期間 開催場所	3rd INCF Congress of Neuroinformatics : Neuroinformatics 2010 及び Neuro 2010 平成 22 年 8 月 28 日～平成 22 年 9 月 2 日 兵庫県神戸市中央区 神戸国際会議場	
被招聘者	David Van Essen, Edison Professor of Neurobiology and Department Head, Washington University School of Medicine	

概要：

この度開催された、INCF Congress (Neuro 2010 と共催) は、Neuroinformatics (NI) 研究の盛んな米国・ヨーロッパを離れてアジアにおいて初めて日本で開かれたもので、アジア地域に於ける NI 研究の啓蒙と普及を狙っております。北米神経科学学会 (Society for Neuroscience) の前会長で脳・神経科学において著名な実績を上げ、NI の発展と普及に尽力されている David Van Essen 教授を招聘して開催出来た事は、日本がアジア地域に於いて先導的役割を果たした、非常に意義深いことであります。

尚、INCF Congress 3 日目の午後には INCF 日本ノード主催の特別シンポジウムを開催し、David Van Essen 教授に“An informatics perspective on cerebral cortical connectivity and function”と題した基調講演をお願い出来たこと、また、INCF Congress に引続いて開催された Neuro 2010 では、大会初日の午前中に INCF Co-hosting Symposium “Hierarchical data-oriented neuroscience”を開催した事は、欧米に遅れを取っている我が国はもとより、アジア地域における研究者へ NI の理解と活用を促す有意義な機会となり、人間と機械の調和の促進を目指す脳・神経科学分野の研究発展を促す絶好の場であったと確信しております。

INCF Congress には 19ヶ国から 227 名 (内日本国内から 118 名) の参加があり、活発な討議が行なわれました。また、Neuro 2010 で開催した INCF Co-hosting Symposium は、大会初日の早朝開催にも拘わらず 150 名程の参加が有りました。

この度の会議に参加された多くの方々から、非常に有意義で良い会議であったとの好評をいただきました。

## 【特別招聘】

招 聘 者	熊本大学 文学部 総合人間学科 教授 積山 薫	2003101
研究集会名	International Conference on Auditory-Visual Speech Processing 2010 (AVSP 2010) (国際視聴覚音声処理会議 2010)	
開催期間	平成 22 年 9 月 30 日～平成 22 年 10 月 3 日	
開催場所	神奈川県足柄下郡箱根町 箱根プリンスホテル	
被 招 聘 者	Gergely Csibra, Professor, Cognitive Development Center, Central European University	

## 概 要：

当国際会議は、視覚的音声情報（読唇情報）が人間の音声知覚や機械による音声認識などに与えるシナジー効果を対象とし、世界中の心理学・工学・脳科学など多分野の音声処理研究者が参加している。

Gergely Csibra 教授は、乳児発達心理学・認知発達神経科学分野の研究者で、特に、目に見えない心の働きを言葉を話さない乳児から客観的に測定するため、独創的かつ厳密な方法で研究を展開しており、またそれに有用なアイトラッカーによる視線追跡、近赤外分光法（Near Infrared Spec-troscopy, NIRS）、事象関連電位（Event-Related Potentials, ERP）など、常に最先端の方法論を採用している。

当会議で教授がおこなった乳児の認知能力に関する講演では、乳児の対象物についての学習能力は「コミュニケーション場面」であれば高く、そうでなければ本来の能力が発揮されないことが示された。「コミュニケーション場面」とは、大人が乳児に微笑みかける、声のトーンを乳児向けにするなどの振る舞いで問題を提示する実験条件であり、ニュートラルな表情・声で問題を提示する「非コミュニケーション場面」と区別される。このように伝達意図手がかり（ostensive cues）が学習に影響を与えることは新しい視点であり、また、その手がかりが顔の表情だけでなく声のトーン（乳児向け音声）でも認知されることは、大変有用な知見であった。

Csibra 教授を当会議に招聘することにより、教授の独創的な視点や最先端の工学機器を用いた研究方法について学ぶという当初の目的だけではなく、コミュニケーションをとらえるための従来よりも広い観点を得、また学際的な共同研究の可能性が多数討議されるなど、会議開催者が期待した以上の成果を得ることができた。

- 
- 平成 22 年度活動報告
  - 平成 23 年度助成報告
  - 受領者投稿
  - 研究室訪問
  - 第 22 回 (平成 23 年度) 研究助成課題一覧
  - 第 21 回 (平成 22 年度後期) 国際交流助成課題一覧
  - 第 22 回 (平成 23 年度前期) 国際交流助成課題一覧
  - 平成 23 年度研究助成課題の紹介
  - 平成 24 年度助成候補募集案内

平成 22 年度活動報告

(1) 主要業務日程

平成 22 年 4 月 1 日	平成 22 年度後期国際交流助成の申請応募受付開始
5 月 14 日	第 45 回臨時理事会開催 (新評議員の選任)
5 月 18 日	第 21 回 (平成 22 年度) 助成金贈呈式
	第 1 回立石賞授賞式及び懇親交流会開催
6 月 15 日	第 46 回理事会, 第 45 回評議員会開催 ・平成 21 年度事業報告および決済報告の承認 ・平成 23 年度助成課題募集方法の承認
6 月 30 日	平成 22 年度後期国際交流助成課題の申請締切
7 月 1 日	公益財団法人へ移行登記
8 月 1 日	平成 23 年度助成課題募集のための公募案内発送 財団ホームページでの募集案内開始
8 月 28 日	平成 22 年度夏季選考委員会開催 ・平成 22 年度後期国際交流助成課題候補の選考
9 月 1 日	平成 23 年度研究助成課題の申請応募受付開始
9 月 6 日	第 2 回・3 回理事会・第 1 回評議員会 ・平成 22 年度 (4~6 月) 事業報告と決算報告承認 ・平成 22 年度 (7~3 月) 事業計画と予算承認 ・新理事, 理事長, 常務理事の決定
9 月 30 日	助成研究成果集第 19 号発行
10 月 1 日	平成 23 年度前期国際交流助成の申請応募受付開始
10 月 31 日	平成 23 年度研究助成課題の申請締切 (165 件受付)
12 月 31 日	平成 23 年度前期国際交流助成の申請締切 (30 件受付)
平成 23 年 1 月 16 日	各選考委員による応募課題の書面審査完了
1 月 28 日	第 23 回選考委員会開催 ・平成 23 年度研究助成課題候補の選考 ・平成 23 年度前期国際交流助成課題候補の選考
3 月 9 日	第 5 回理事会・第 2 回評議員会開催 ・平成 23 年度事業計画及び収支予算案の承認 ・平成 23 年度助成課題の承認

(2) 会計報告

収支計算書

(自 平成 22 年 7 月 1 日 至 平成 23 年 3 月 31 日)

(単位: 千円)

I 事業活動収支の部	
1. 事業活動収入	
基本財産運用収入	36,750
特定資産運用益	11,244
寄附金収入	0
雑収入	13
2. 事業活動支出	
事業費支出	16,981
管理費支出	7,420
事業活動収支差額	24,401
II 投資活動収支の部	
1. 投資活動収入	
助成事業引当金取崩収入	0
2. 投資活動支出	
助成事業引当金積立支出	30,000
投資活動収支差額	-30,000
III 財務活動収支の部	
1. 財務活動収入	0
2. 財務活動支出	0
財務活動収支差額	0
当期収支差額	-6,394
前期繰越収支差額	35,096
次期繰り越し収支差額	28,701

貸借対応表

(平成 23 年 3 月 31 日)

(単位: 千円)

I 資産の部	
1. 流動資産	
現金	254
普通預金	34,841
有価証券	0
2. 固定資産	
(1) 基本財産	
有価証券	6,137,250
(2) 特定資産	
事業運営資産	1,100,000
事業積立資産	100,000
(3) その他の固定資産	150
資産合計	7,366,101
II 負債の部	
1. 流動負債	0
2. 固定負債	0
負債合計	0
III 正味財産の部	
1. 指定正味財産	7,337,250
寄附金	1,100,000
寄附株式	6,137,250
事業積立資産	100,000
2. 一般正味財産	28,851
正味財産合計	7,366,101

### 平成 23 年度助成報告

本年は、第 22 回目の助成となる平成 23 年度助成課題に対し、平成 23 年 5 月 17 日、第 22 回助成金贈呈式の開催を予定していたが、東北地方の大震災で贈呈式のみを中止し、助成金振込は実施した。

研究助成	22 件	5,394 万円
国際交流助成（前期）	3 件	62 万円
合計		5,456 万円

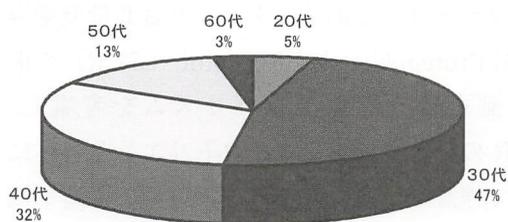
なお、後期国際交流助成、国際会議支援助成は平成 23 年 10 月に実施する。

この結果、財団設立以来の助成事業は、研究助成 470 件、交際交流助成 222 件、立石賞 2 件、助成総額約 11 億 9,002 万円となった。

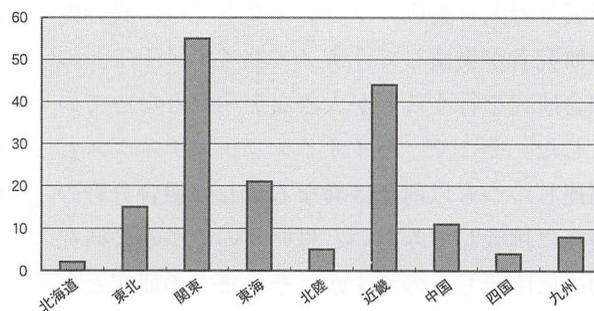
● 平成 23 年度助成の応募状況

(1) 研究助成（平成 23 年度）

① 年令別

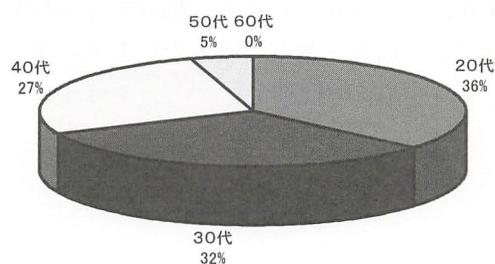


② 地域別

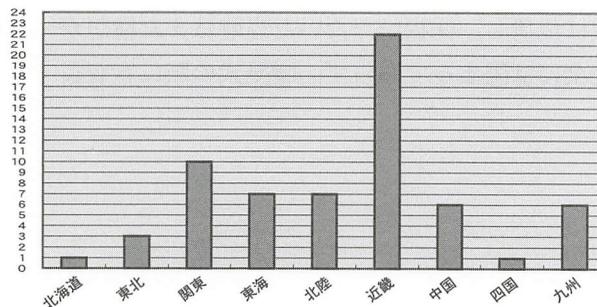


(2) 国際交流助成（平成 22 年度後期～平成 23 年度前期）

① 年令別



② 地域別



受領者投稿

山口大学大学院 技術経営研究科 准教授 石野 洋子

(第16回受領者)

2004年5月に、私は広島大学に特任教員として赴任しました。私の主な研究分野はバイオインフォマティクスで、ポストドク時代には、塩基多型 (SNP) のデータベース設計や、質量分析によるプロテオームデータの解析など、主にゲノムやタンパク質の配列データ解析に基づく仕事をしていました。しかし、私が広島大学で所属することになった科学技術振興調整費/新興分野人材養成のプロジェクトでは、異分野の研究者が集積して「ナノ・バイオ・IT」の融合研究を行うことが大きなテーマとなりました。そこで、バイオインフォマティクスと関連しつつも以前とは異なる新しい融合分野の研究に挑戦してみたいと思い、いくつかの研究助成に応募したのですが、それまでの研究と方向性が異なるためか、なかなか助成金の獲得には至りませんでした。

研究の方向性を思い悩んでいた頃、“新しいことへの挑戦”を応援すると謳っていた立石科学技術振興財団による助成金公募を見つけて応募したところ、「創薬に向けた学習機能を持つ量子生命科学シミュレータの研究」というテーマで採択していただくことが出来ました。この研究は、計算化学、バイオ、情報工学の融合領域に位置し、採択いただいた当時はまだ構想が完全には固まっておらず、贈呈式の際に審査員

やオムロン株式会社の研究者の方々から励ましと同時に厳しい意見をいただきながらのスタートでした。

研究途中には色々な困難がありましたが、最終的に、創薬の重要なターゲットタンパク質ファミリーであるGタンパク質共役型受容体 (G-Protein Coupled Receptor: GPCR) の構造予測を行う計算アルゴリズムを考案し、GPCRのひとつであるロイコトリエン受容体に対して検証を行ったところ、活性型の構造予測が可能であることを示すことができました。そして、この業績で、2009年11月に韓国の釜山で開催された *BioInfo 2009, CBI and KSBSB Joint Conference* にて Outstanding Poster Awardを受賞することもできました。

そして、山口大学へ移った現在も、さらに構造予測の精度や効率を上げるために研究を継続しています。現在所属している山口大学大学院技術経営研究科では、研究に加え、社会人学生を対象にした技術経営の教育にも携わっているのですが、今後も新しいことに挑戦する気持ちを忘れずに、研究・教育に励みたいと思います。



## 受領者投稿

## 人道的地雷除去技術研究に対する柔軟で親身のご支援の有り難さ

東京大学大学院 工学系研究科 教授 廣瀬 明

(第16回受領者)

助成いただきました研究は「複素ニューラルネットワークに基づくプラスチック地雷探知システムの開発研究」と題し、実用化を視野においた新たな地雷可視化レーダ・システムの基礎的部分を開発しようとするものです。当研究室では、現在もこの研究をさらに進展させておりますが、その根幹部分の開始を支えてくださった貴財団に深く感謝いたします。この研究は、構築するシステムの基礎評価のために、カンボジアにてフィールド実験を行うことも含んでいました。通常の大学運営費等の資金では、実施日程や内容が流動的なフィールド実験の実施は難しく、ご支援は大変有り難いことでした。

贈呈式後の懇談会の際、オムロンの元気な若手研究者の方々とお話させていただくことができ、さまざまな角度からこのテーマに対するご意見をいただいて大変有り難く感じたことをよく覚えています。また、理事の皆様は、カンボジアでのフィールド実験をより有意義なものにするため、先方のどのような組織にコンタクトして実験を計画していったらよいかご相談しましたところ、親身に具体的にご指導くださいました。オムロンは地雷除去を進める非政府組織(NGO)の支援にも長い実績をお持ちで、その考え方をうかがうこともできました。

その後、いただいた助成によってプロトタイプ・システムを構築し、東京で予備実験と改良を繰り返しました。東京大学技術移転組織(東大TLO)の仲介で、人道目的の地雷除去支援の会(JAHDS)のご協力の下、現地のカンボジア地雷除去センター(CMAC)と連絡を取りながらフィールド実験計画を立ててゆきました。JAHDSは、オムロンも長年支援を続けて

きたNGOで、ご縁を感じるとともに心強く思いました。

2007年3月にカンボジアにてCMACの皆さんの協力を得ながら、プロトタイプ・システムの可視

化性能評価と、ユーザとしての使用感の調査を行いました。ラテライト土質で降雨直後の多水分状況でも良好な地雷領域可視化性能をもつことが確認され、まずは安堵しました。使用感についても好評で、このような適応的可視化は新鮮で、あらたな情報を地雷除去者に与えるものであるとの評価をいただきました。従来の金属探知機ではブザー音が耳からのみ、物理情報を与えます。それに対する慣れのため、やはり音による指示が望ましいとする声を事前には聞いていました。しかしこの実験では視覚情報、しかもある程度自動判断が入った情報にも、重要な意味があることに確信を得ました。人間と機械の調和を目指す貴財団の方向性にも合致しているものと考えております。今後の真の実用化への問題点が、レーダ計測にかかる時間であることも確認しました。これは東京での予備実験でも感じていたことでした。当時のシステムは機械的な高周波スイッチを多用したため、計測時間が長くかかっていたのです。現在、この弱点を克服する第2世代のシステムを構築中です。

このように特殊な実験内容にもかかわらず研究を展開してこられたのも、ひとえに貴財団のご支援のおかげです。



## 研究室訪問

金沢大学 理工研究域 機械工学系

渡辺哲陽 准教授 訪問記

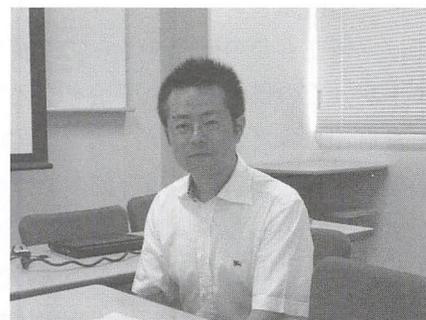
(第16回受領者)

7月21日、臼井支朗選考委員（理化学研究所脳科学総合研究センターチームリーダー）と川路茂保評議員（熊本大学名誉教授）にご同行いただき、金沢大学理工研究域の渡辺哲陽准教授を訪問させていただきました。

各地に大雨をもたらした台風6号が日本の東海上に遠ざかり、混乱が心配された交通網も正常運行に戻り、当初予定通り古都金沢に赴きました。市の中心部から東に向かい、兼六園を横切りさらに郊外に車を走らせていきました。坂を上りきると、山あいから大きく整然と拓けた金沢大学角間（かくま）キャンパスの研究棟が我々を迎えてくれました。その右奥に渡辺先生の研究室は位置していました。

○ まずは、先生の研究室をご紹介下さい。

人間・機械創造研究室（Human Machine Innovation Lab.）で、塑性加工や材料加工・応用などの材料工学分野、さらにはスキーロボットなどのスポーツ工学分野、そしてロボット工学分野の研究に取り組んでいます。研究スタッフとして米山猛教授と香川博之講師と私の3人が、これらの分野の研究課題に個別に取り組むとともに、3人共同で医療・福祉工学分野、特に脳外科手術用マニピュレータの研究にも取り組んでいます。



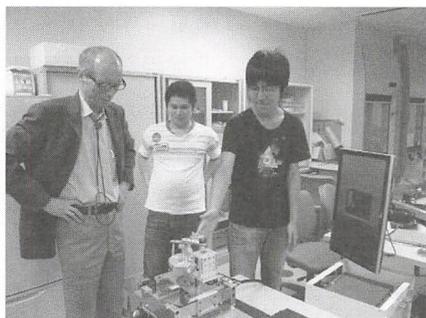
渡辺哲陽 准教授

○ 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。

私の専門はロボット工学で、特にロボットハンドの研究を長くやってきました。人間の手に近い構造を持つロボットハンドを目標に、人の手のような物体把持・操作ができるロボットシステムの開発に取り組んでいます。

特に最近一番注力しているのが、剛性可変な皮膚です。物体は皮膚が柔らかいと把持しやすく、硬いと操作しやすい。柔らかいと接触面積が広くなり、摩擦力が大きくなるために持ちやすくなるのですが、逆に細かい操作が難しくなる。そこで、剛性（硬さ）を変えることにより、把持安定性と物体操作性を両立させる構造の指先を試作しています。

原理的には、ゴムでできた人工皮膚内の空気圧の変化を利用して柔らかさを変えることにより、小型軽量で、可逆であり、応答速度が速く、ヒステリシスがないという指先です。この指先を使った実験により、一定の把持力において、柔らかい皮膚は硬い皮膚の約1.6倍の外力が作用しても、物体を把持できることが確認できました。また、硬い皮膚の方が少ない回転数でペットボトルのふたを開けることができることも確認しています。ただ操作性については、現時点では定量的に示せたわけではないので、今後定量的な解析を進めて行きたいと思っています。



脳外科手術用マニピュレータの説明を受ける  
臼井支朗選考委員

また物体を望みの形状に変形する物体整形作業ハンドを試作しています。過去の経験で、ロボットが物体の把持に失敗すると暴走してしまうことがよくありました。失敗を許容し、動的に変化する物体との相互作用の結果を利用して、失敗を繰り返しながら徐々に物体を望みの形状に整形するロボットハンド、つまり、各指が個別のシステムとして動作しながらも、全体の指令によって協調動作するものです。

現在は餅のような柔らかい、言い換えると“弾性と塑性の

中間の変形特性を持つ”物体を、粘性係数を計算して変形量を推定しながら、目標の形状に変形させる実験を行っています。ハードルはまだまだ高いですが、将来的には「金沢の伝統的な和菓子を作れる」ロボットを目指しています。

○ 医療・福祉工学分野にも取り組んでおられるとのことですが。

先述の脳外科手術用マニピュレータの開発と間欠跛行（かんけつはこう）における病因判別にも取り組んでいます。脳外科手術用マニピュレータについては、先端の把持力、摩擦力、屈曲力を操作側にフィードバックしています。後ほど試作機を実際に操作して見ていただきます。

もう一つのテーマ対象である間欠跛行とは、歩行などで下肢に負荷をかけると、次第に下肢の疼痛・しびれ・冷えを感じ、一時休息することにより症状が軽減し、再び歩行が可能になる症状です。原因として、神経性と血管性があるのですが、それを歩行モーション解析、特に足が接地した時の膝関節角度による判別を試みています。

○ 立石財団の助成テーマは、その後どのように進みましたでしょうか？

御財団からは、山口大学に在職中の2005年度に「マイクロマニピュレーション時の人の情報処理メカニズムの解明」というテーマで助成していただきました。このテーマにおいては、振動を用いた凝着力緩和について様々な知見が得られ、その後科研費（H18-19年度 科学研究費補助金：18760194）にも採択され、振動による凝着力緩和を利用した微細操作システムを開発しました（Cutting Edge Robotics 2010, pp. 199-214, 2010-9）。

その後金沢大学に異動したこともあって、研究・実験環境が変わり、残念ながら継続が困難になりました。しかしながら、当時の考え方やノウハウ、さらには反省が、現在のロボットハンドの研究や歩行モーション解析につながっています。

○ 研究成果は、どのような分野で活用され、社会や人類にどんな貢献をするのでしょうか？

当初は小型電子部品や半導体の組み付け作業などに応用することを狙っていました。さらにマイクロからナノ、ピコと小型化していき、最終的には一つの分子、原子レベルの制御に活用することです。その方向性は、先述のように研究・実験環境の制約で断念していますが、その制約が解ければ、是非チャレンジしてみたいと考えています。

もう一つは、今取り組んでいるような医療分野への応用です。テレオペレーション（遠隔手術）を実現しようとする、フィードバック情報のタイムディレイをどう克服するかといった難しい問題を解決しなければなりません。いずれはそのようなことにも取り組みたいと思っています。

○ 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。

研究者への助成を今後も続けて下さい。特に若手研究者への助成を継続していただき、その育成に寄与していただければと思っています。



研究室の皆さんと  
右に渡辺哲陽先生、白井文朗選考委員  
左に田中敏文常務理事

#### あとがき

渡辺先生からは、取り組んでいるテーマが盛りだくさんなこともあり、この報告書には書き切れないほどの技術的内容を分かりやすく説明していただきました。また「金沢の伝統的な和菓子を作れる」ロボットという発想に古都の風土を感じました。

さらに、ロボットやマニピュレータのデモをしていただいた杉山敬史さんと田中和也さん（いずれも修士課程1回生）はじめ研究室の皆さんからは、真面目な中にも自由闊達な雰囲気が伝わってきました。

短時間ではありましたが、歴史息づく加賀百万石の都で、明日の日本を背負う研究と研究者に触れて、台風一過のような晴れ晴れとした気分になることができました。

渡辺先生と研究室の益々のご活躍、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）

第22回(平成23年度)助成課題一覧

[研究助成]

(五十音順)

申請者氏名・所属機関・職名	申請課題名
内山 剛 名古屋大学大学院 工学研究科 准教授	超高感度 MI センサを用いた非接触携帯型脳波計の開発
大脇 大 東北大学大学院 工学研究科 電気・通信工学専攻 助教	柔軟な足裏の変形から生み出される感覚情報処理メカニズムの解明
河合 俊和 大阪工業大学 工学部 ロボット工学科 准教授	触診機能搭載型オーダーメイド手術支援マニピュレータの開発
後藤 雄治 大分大学 工学部 機械・エネルギーシステム 工学科 准教授	経鼻胃管挿入時における管先端位置の電磁モニタリング法の開発
小林 祐一 東京農工大学大学院 工学研究院 先端電気電子部門 特任准教授	柔軟に状態空間を変更可能な行動計画法による複数ロボットの協調行動の創発
佐々木 誠 岩手大学 工学部 機械システム工学科 助教	人の心と体に配慮した新しい生活支援技術の開発
塩田 達俊 長岡技術科学大学 工学部電気系 准教授	3次元スペクトル解析と3次元動画顕微鏡の一括計測の実現
下ノ村 和弘 立命館大学 理工学部 ロボティクス学科 准教授	近赤外画像計測による睡眠中の非拘束眼球運動検出
神 隆 大阪大学 免疫学フロンティア研究センター 特任教授	新規光造影剤を用いた早期乳がんの非侵襲近赤外蛍光検出法の開発
杉本 雅則 東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻 准教授	モバイル環境での頑健な超音波モーションキャプチャシステムの開発
田熊 隆史 大阪工業大学 工学部 電気電子システム工学科 講師	空気圧人工筋の受動性を利用した頑健な外力・姿勢変化推定機構の開発
中川 智皓 大阪府立大学大学院 工学研究科 機械系専攻 機械工学分野 助教	人間との親和性を有するパーソナルモビリティの運動制御
長縄 明大 秋田大学大学院 工学資源学研究科 機械工学専攻 准教授	小腸内圧計測制御装置の開発

## 第22回(平成23年度)助成課題一覧

〔研究助成〕

(五十音順)

申請者氏名・所属機関・職名	申請課題名
野田 堅太郎 東京大学大学院 情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻 特任助教	液体フィルタを用いたすべり計測触覚センサに関する研究
平井 慎一 立命館大学 理工学部 ロボティクス学科 教授	帯状物体のマニピュレーションに関する研究
平井 宏明 大阪大学大学院 基礎工学研究科 機能創成専攻 講師	筋シナジーに基づく運動支援インタフェースの開発
間所 洋和 秋田県立大学 システム科学技術学部 機械知能システム学科 助教	移動ロボットによる教師なし学習に基づく一般物体認識の研究
宮崎 剛 神奈川工科大学 情報学部 情報工学科 助教	読唇技能保持者をモデル化した機械読唇のための特徴的口形検出方法に関する研究
矢入 郁子 上智大学 理工学部 情報理工学科 准教授	快適な車いす利用に向けた乗心地指標化のためのパーソナルセンシング・動的測量技術
柳原 大 東京大学大学院 情報学環 准教授	障害物回避歩行における肢運動の適応制御に関わる小脳機能の解明
河本 浩明 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 知能機能システム専攻 助教	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
橋本 守 大阪大学 基礎工学研究科 准教授	カソードルミネッセンス顕微鏡による細胞中の高空間分解能蛋白質イメージング

研究助成件数 22件 合計 5,394万円

第21回 (平成22年度後期) 助成課題一覧

〔国際交流 (派遣)〕

(五十音順)

申請者氏名・所属機関・職名	派遣先研究集会／主催者名
石橋 孝昭 熊本高等専門学校 情報通信エレクトロニクス工学科 准教授	International Conference on Computer, Electrical, and Systems Science, and Engineering 主催：World Academy of Science, Engineering and Technology
高 岩 東京工業大学 物理情報システム専攻 張研究室 博士課程	The 44th Annual 2010 IEEE International Carnahan Conference on Security Technology 主催：IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, USA；IEEE Lexington Section, USA；IEEE Ottawa Section, Canada；Chung Shan Institute of Science, Taiwan, ROC；National Centr
小柳 健一 富山県立大学 工学部 准教授	The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010) 主催：IEEE, IEEE RAS, IEEE IES, RSJ, SICE (共同主催)
平野 義明 大阪大学 産業科学研究所 特任研究員	The 2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem) 主催：The Canadian Society for Chemistry (Host society) Professor Howard Alper, (University of Ottawa, Chair of the Congress) Professor Peter Stang, (University of Utah, Congres)
松浦 康之 名古屋大学大学院 情報科学研究科 情報システム学専攻 博士研究員	BIOSIGNALS 2011 (International Conference on Bio-inspired Systems and Signal Processing) 主催：INSTICC (The Institute for Systems and Technologies of Information, Control and Communicatio)
大島 真 琉球大学大学院 理工学研究科 総合知能工学専攻 博士後期課程	ANNIE (Artificial Neural Networks in Engineering) Conferences 2010 主催：Dr. Cihan H. Dagli

〔国際交流 (特別招聘)〕

申請者氏名・所属機関・職名	派遣先研究集会／主催者名
積山 薫 熊本大学 文学部 総合人間学科 教授	国際視聴覚音声処理会議 2010 【英文】 International Conference on Auditory-Visual Speech Processing 2010 (AVSP2010) CSIBRA, Gergely 所属・職名：Central European University, Cognitive Development Center・Professor 基調講演 【和文】 乳児期におけるコミュニケーション意図の認知 【英文】 Recognition of communicativ

〔国際交流 (一般招聘)〕

なし

助成件数 7件 合計 143万円

## 第22回(平成23年度前期)助成課題一覧

〔国際交流(派遣)〕

(五十音順)

申請者氏名・所属機関・職名	派遣先研究集会／主催者名
Tran Xuan Bo 豊橋技術科学大学 工学研究科 博士後期課程	The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'11 国際会議等の主催者名: Department of Intelligent Hydraulics and Automation, Tampere University of Technology
古海 誓一 独立行政法人 物質・材料研究機構 光材料センター 主幹研究員	Collaborative Conference on 3D & Materials Research (3DMR) 主催者名: Kwangwoon University, Springer, Materials Research Society (MRS)
森田 実 山口大学 工学部 理工学研究科 助教	The 7th International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications 主催者名: Organized by the Ecole Nationale Polytechnique

〔国際交流(特別招聘)〕 なし

〔国際交流(一般招聘)〕 なし

助成件数 3件 助成額総額 合計62万円

平成 23 年度研究助成課題の紹介

掲載順は、助成課題一覧〔研究助成〕の掲載順

第22回 助成金贈呈  
研究助成課題の紹介  
(財)立石科学技術振興財団

超高度MIセンサを用いた非接触携帯型脳波計の開発 (研究期間:1年0ヶ月)  
名古屋大学大学院工学研究科電子情報システム専攻  
准教授・内山 剛

**【脳波計測器】**  
従来:頭皮の表面電位(電極の設置が煩雑)  
本研究:頭皮電位変化にともなう磁気変動の計測

○ 喫煙前後の後頭部(頭皮から5mm距離)の磁気センサ(MIセンサ)信号の変化(図1) ⇨ 電極測定での信号の変化(図2)  
○ 1cm厚の細胞組織を用いた生体計測でも表面電位(E)と磁気センサ信号(M)の関係を確認(図3)

**【非接触携帯型脳波計プロトタイプ機の開発】**  
1) 超高度MIセンサの最適化  
2) 生活環境下での微小磁界計測技術の確立  
3) マルチチャンネル用電子回路の開発  
4) 非接触携帯型脳波計の試作および信号処理技術の開発

人間に親和性の高い脳波計の開発

柔軟な足裏の変形から生み出される感覚情報処理メカニズムの解明(1年間)  
東北大学 電気通信研究所  
助教 大庭 大

**【柔軟足「Bionic foot」の開発】**

- ヒトの皮膚構造に着目
- 異なる硬さの2層構造
- 時間応答の異なるセンサを多数(10の2乗オーダー)埋め込む

**【感覚情報処理アルゴリズムの構築】**

- 接触状態(点, 線, 面接触)
- 床反力中心(CoP), 床反力ベクトル
- 滑り, 滑りの予知, 地面の摩擦

開発する「Bionic foot」

柔軟な身体に立脚した「ソフト・コンティニュームロボティクス」技術の創出

触診機能搭載型オーダーメイド  
手術支援マニピュレータの開発(1年間)  
大阪工業大学 工学部 ロボット工学科 准教授 河合 俊和

**【手術支援ロボットへの力覚付与】**  
術具先端に歪ゲージ: ○簡便 ×減菌対応  
ダイレクトドライブ駆動: ○高精度 ×大型化

Stepping motor  
Encoder  
Object (Step out)

トルク  
Rotary speed  
DRIVE → SENSE  
Rating  
Overlap (Step out)

ステップングモータが過負荷で空回りする脱調現象に注目  
計測モード(高速回転域, 脱調)と駆動モード(低速回転域)  
計測から駆動 → ○簡便, ○減菌, ○小型  
脱調ステップ角 → △高精度(おおよそで良い)

**【計測モードで脱調内臓器の硬さ推定】**  
モータの作用力F/接触部の面積A=応力σ  
脱調時の変位量δ/元の長さl=ひずみε  
⇒ 応力-ひずみ曲線を作成しヤング率を推定

**【実験装置を試作して評価】**  
術具アームの機構系と作用力印加の制御系を試作  
動物実験で推定値と材料試験機値の差異を検討

ステップングモータ脱調による臓器ヤング率推定手法の開発

経鼻胃管挿入時における管先端位置の  
電磁モニタリング法の開発(1年間)  
大分大学 工学部 機械・エネルギーシステム工学科 准教授 後藤 雄治

**【経鼻胃管の誤挿入の診断法】**

現在

- X線撮影法 → 被爆
- 聴診法 → 誤認
- PH法 → 閉塞

**電磁モニタリング法の開発**

- 磁界センサ付き経鼻胃管の開発
- 磁界発生装置の開発
- 臨床実験による評価

管先端部に磁界センサを設置し、体外から磁界を印加させ、管先端部が非接触でモニターできる非破壊診断システム

Fig. 本提案検査手法による検査概要

柔軟に状態空間を変更可能な行動計画法による  
複数ロボットの協調行動の創発(1年間)  
東京農工大学 大学院工学研究科 先端電気電子部門  
特任准教授 小林 祐一

従来のロボット協調行動の学習法:

- ロボットの役割を固定一柔軟性に欠ける
- 学習に膨大な試行錯誤が必要(強化学習)
- 人・他ロボットなど他者の振舞いの変化 → 学習に悪影響, 再学習が必要

状態空間を変更可能な行動計画法による協調行動生成の提案:

- 「自分だけが動くモード」
- 「モードの切替」を利用した行動計画
- 「ボール位置の軌道を計画」「自己位置の軌道を計画」etc.
- 「注目する状態変数を切り替えた動作計画」

自分の役割を自律的・動的に判断可能  
少ない試行錯誤で効率的に学習  
他者の振舞いに応じた行動生成一人との協調にも応用可能

人の心と体に配慮した新しい生活支援技術の開発(2年間)  
岩手大学 工学部 機械システム工学科  
助教 佐々木 誠

**【人と調和、適合する生活支援機器の設計開発】**  
従来法: 身体的負荷, 身体的特性, 機械的効率など, 力学的指標を用いた設計開発  
疑問: ①身体的負荷を最小に設計された機器が, 使用者の心理面, 精神面にどのような影響を与えるのか?  
②精神的負荷を最小に設計された機器が, どのような形状となり, どの程度の身体的負荷を使用者に要求するのか?

本研究: 人と機械の適合性の善し悪しから, 使用者の半数以上が上肢痛や手根管症候群などの2次的障害を経験する「手動車いす」を具体的な研究対象とする。

阻害される成果

- 最新の虚数処理技術による身体的負荷と精神的負荷の分離, 抽出手法の確立
- 身体的負荷と精神的負荷を評価限度とした車いす形状の最適化

車いす形状や走行負荷を自由に制御可能な車いすシミュレータ上で計測実験

3次元筋骨格モデルによる体内内負荷の解析

唾液バイオマーカーによる生体ストレス反応の分析

「どこからどこ」に配慮した生活支援機器(機械システム)の新しい設計手法の確立

3次元スペクトル解析と3次元動画顕微鏡の一括計測の実現(研究期間:1年)  
長岡技術科学大学工学部電気系  
准教授・塩田 達俊

物体や生体の内部構造と材料分析を同時にかつ高速に非接触計測できる計測器が医療・製薬検査などの分野から必要とされている。

3次元形状  
3次元スペクトル

5次元(3次元+2次元)イメージ

レーザードットで高精度計測 CCD撮像機

本課題は、従来の100倍の速度(画像取得時間100マイクロ秒)で、1mm空間分解能の3次元画像を取得し、同時に分光分解能0.1nm以下のスペクトルを表示できる計測器を開発する。さらに、プラスチックの光学素子を用いて、重量を15kg以下の軽量化を実現する。

平成 23 年度研究助成課題の紹介

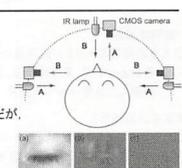
**近赤外画像計測による睡眠中の非拘束眼球運動検出（1年間）**  
 立命館大学 理工学部 ロボティクス学科  
 准教授 下ノ村 和弘

**【非拘束睡眠状態評価の必要性】**  
 ・従来の睡眠ポリグラフ検査：多数の電極装着、高拘束  
 ・非拘束、簡便化→在宅での日常的な睡眠状態評価  
 による、睡眠関連疾患の早期発見、治療の経過評価

**【睡眠中の非拘束眼球運動検出は困難】**  
 正確、詳細な睡眠状態評価には眼球運動検出が必要だが、  
 ① 極めて局所的な計測が必要  
 ② 睡眠中は眼を閉じるため、眼珠が露出しない  
 ③ 睡眠中に顔の向きが徐々に変化し得る

**【本申請で開発する睡眠時非拘束眼球運動計測システム】**  
 ● 近赤外照明、小型カメラを被験者頭部周囲に設置し、画像計測により眼球運動を検出  
 ● 閉眼時の眼球運動を、顔表面の動きとして画像により検出  
 ● 撮像、照明方向を最適化するため、照度差ステレオ法により顔部の向きを推定

**【本申請期間中の目標】**  
 睡眠ポリグラフ検査で用いられる眼球運動計測法（EOG）との一致率95%以上



**新規光造影剤を用いた早期乳がんの優襲近赤外蛍光検出法の開発（1年間）**  
 理化学研究所 生命システム研究センター ナノバイオロブ研究チーム  
 チームリーダー 神 隆

**【金クラスター新規光造影剤の開発】**  
 従来：発光効率、安定性が劣る（有機系色素）  
 毒性がある（量子ドット）  
 本研究：金クラスターをアルブミン蛋白質で被覆  
 → 輝度が高い（量子収率8%）  
 → 生理的緩衝液中で安定、毒性なし

**【近赤外領域における非侵襲蛍光イメージングシステムの開発】**  
 ○ 生体の光学窓（700-1300nm）における蛍光特性の評価  
 ○ 金クラスター造影剤のin vivo光学特性の評価  
 ○ 近赤外励起、蛍光検出系による高感度光イメージングシステムの開発

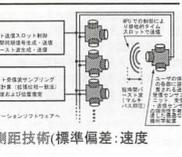
**近赤外蛍光イメージングによる超早期乳がんの検出**



**モバイル環境での頑健な超音波モーションキャプチャシステムの開発（2年間）**  
 東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻  
 准教授 杉本 雅則

**従来（市販）のモーションキャプチャシステム**  
 ・光学式/磁気式：精度は高いが非常に高価  
 ・装置を環境に固定：モバイルではない、  
 → 安価な超音波方式で実現したい。しかし、  
 (1)測距精度 (2)センサの指向性 (3)複数送信波の干渉 (4)マルチパス (5)気流や外乱の影響、が問題。そこで、  
 ・著者が構築した世界最高性能の高速・高精度測距技術（標準偏差：速度1mm/s、距離0.5mm）の利用→問題(1)を解決  
 a.センサの幾何学的配置最適化による送受信ユニットの設計→問題(2)を解決  
 b.受信データ処理の高速化による排他的送受信スロットの実現→(3)を解決  
 c.マルチパスの判定と送信パケット長の最小化→(4)の影響を削減  
 d.現象のモデル化による最大影響要因への対策→(5)の影響を削減

**世界初の完全モバイルで実用性能を持つ  
 超音波モーションキャプチャシステムの実現**



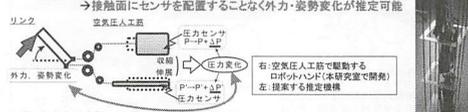
**空気圧人工筋の受動性を利用した頑健な外力・姿勢変化推定機構の開発（研究期間：1年）**  
 大阪工業大学 工学部 電気電子システム工学科  
 講師 田熊 隆史

**【介護・リハビリ・パワーアシストロボットの要素技術】**  
 対象者・対象物に接触した際の力の大きさ・姿勢変化を計測する頑健なセンシング技術の需要

従来：接触点、姿勢変化箇所にセンサ配置→接触力等による破損の可能性  
 提案手法：空気圧人工筋の圧力を計測して力の大きさ・姿勢変化を推定→頑健な計測システム

**【提案する推定機構】**  
 空気圧アクチュエータ：外力によって伸縮、内圧変化  
 →内圧を計測することで外力、指姿勢が推定可能  
 （内圧と外力、姿勢に関する単純な線形モデルの導出）  
 →接触面にセンサを配置することなく外力・姿勢変化が推定可能

右：空気圧人工筋で駆動するロボットが本研究室で開発  
 左：提案する推定機構



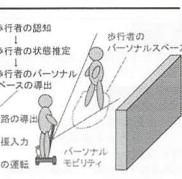
**人間との親和性を有するパーソナルモビリティの運動制御（1年間）**  
 大阪府立大学 大学院工学研究科 機械系専攻 機械工学分野  
 助教 中川 智皓

**【背景】**  
 環境保全、高齢社会、移動権確保への対応  
 歩行の延長となる  
 小型のパーソナルモビリティの需要

**【本研究】**  
 歩行者にとっても、車両操縦者にとっても  
 安全で快適な移動を成すパーソナルモビリティの  
 運転支援システムを構築する。

**【研究のポイント】**  
 ① 周囲の歩行者が、パーソナルモビリティに対して、できるだけ不快感を感じないような単調な移動経路・方法を導出。→**パーソナルスペースの概念を利用**。  
 ② 車両操縦者を誘導する運転支援を構築。→**楕圓反力の利用**。

**人間にとっての快適性を考慮した運転支援システムの構築**



**小腸内圧計測制御装置の開発（1年間）**  
 秋田大学大学院工学資源学研究所機械工学専攻  
 教授・長縄 明大

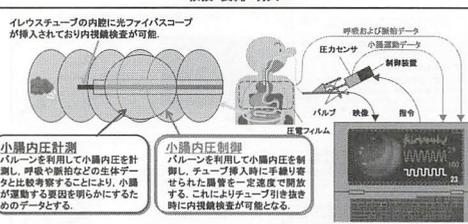
イレウスチューブの内腔に光ファイバコープが入り込んでおり内視鏡検査が可能。

**小腸内圧計測**  
 ガルファンを用いて小腸内圧を計測し、呼吸や脈拍などの生体データと比較観察することにより、小腸が運動する原因を明らかにするためのデータとする。

**小腸内圧制御**  
 バルーンを利用して小腸内圧を制御し、チューブ挿入時に手指操作せられた腸管を一定速度で開放する。これによりチューブ引き抜き時に内視鏡検査が可能となる。

これまでの装置では内視鏡画像のみが取得できていたが、運動データと内視鏡画像を同時に取得できる装置は開発されていない。本研究で開発する装置は、イレウスチューブに用いた改良を加え、臨床試験も行います。

映像と運動データを同時に取得  
 ↓  
 治療の判定や新しい治療方針の決定、運動生理データなどを医師に提供。



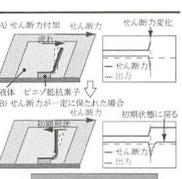
**液体フィルタを用いたすべり計測触覚センサに関する研究（研究期間：1年）**  
 東京大学情報理工学系研究科知能機械情報学専攻  
 特任助教 野田 聖太郎

**【研究背景】**  
 (A) せん断力付加 せん断変形 せん断力変化  
 (B) せん断力が一定に保たれた場合 初期状態に戻る

**【研究目的】**  
 一 ロボットハンドに加わるすべりを計測するための、液体フィルタ構造を持つ触覚センサの実現

**【研究計画】**  
 一 微小流路中に生じる流れの可視化  
 一 微小流路の変形によって生じる流れの解析  
 一 液体粘性と触覚センサの計測特性の関係の計測  
 ⇒ すべりを計測する触覚センサ構造を設計・試作

**手先のすべりを計測するセンサを実現**



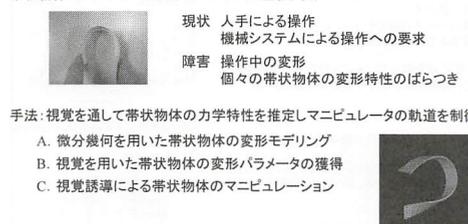
**帯状物体のマニピュレーションに関する研究（1年間）**  
 立命館大学 理工学部 ロボティクス学科  
 教授 平井 慎一

**帯状物体** フラットケーブル、フレキシブル基板、紙、シート

**現状** 人手による操作  
**機械システムによる操作への要求**  
 障害 操作中の変形  
 個々の帯状物体の変形特性のばらつき

**手法**：視覚を通して帯状物体の力学特性を推定しマニピュレータの軌道を制御

A. 微分幾何を用いた帯状物体の変形モデリング  
 B. 視覚を用いた帯状物体の変形パラメータの獲得  
 C. 視覚誘導による帯状物体のマニピュレーション



平成 23 年度研究助成課題の紹介

### 筋シナジーに基づく運動支援インタフェースの開発(1年間)

大阪大学 大学院 基礎工学研究科 機械創成専攻  
講師 平井 宏明

冗長筋骨格系を有する人およびロボットの運動制御や運動支援を筋シナジーの共通概念で解釈し、その抽出・予測結果をもとに「人と機械の調和」を図る知的インタフェースを構築する。

筋群活動のバランス評価に基づき、身体運動を力学的に支援することで、ユーザの運動学習の促進を図る装置型ロボットシステムの開発

筋シナジーの概念  
運動制御・学習支援  
人と機械の調和  
ロボットの運動制御

申請者らの技術  
ロボット制御システム  
ロボット制御システム  
ロボット制御システム  
ロボット制御システム

### 移動ロボットによる教師なし学習に基づく一般物体認識の研究(1年間)

秋田県立大学 システム科学技術学部 機械知能システム学科  
助教・間所 洋和

【一般物体認識】  
◇大量の画像データから識別器の形成一機械学習  
{教師あり学習:高認識精度, 教示負荷大  
教師なし学習:カテゴリ発見, 教示負荷小}

【提案手法の特徴】  
◇カテゴリマップの生成と自動ラベリング  
{自己組織化マップの位相写像特性  
適用共鳴理論の逐次学習(ラベル生成)}

【実環境でのフィールドテスト】  
◇視覚機能に特化したロボットの試作  
◇ロボットの身体性→物体の多様な見え方

全方位カメラ+CCDカメラ×2  
ロボットの記憶空間  
カメラユニット  
制御ユニット  
カテゴリマップ  
試作ロボット外観  
テスト走行環境

人間とロボットの高度なインタラクション及び調和の実現

### 読書技能保持者をモデル化した機械読書のための特微的口形検出方法に関する研究(研究期間:1年間)

神奈川工科大学 情報学部 情報工学科  
准教授 宮崎 剛

読書障害者支援  
音声認識補完  
読書支援  
読書環境下でのコミュニケーション  
アニメーションの口形変化問題  
読者トレーニング  
発表  
口形順序  
コマンド入力

【読書技法】(読書技能保持者)  
読者モデル化  
読書技能保持者が読書の際に行っている技法をモデル化  
読者モデルを計算機上で実現  
口形検出率:75%(現在)  
目標90%以上  
特微的口形検出

発話者  
読者  
読書技能保持者  
発話時の口形変化  
厚本? 口形と音の関係・規則  
読書時モデル化  
読書時モデル化  
読書時モデル化

### 快適な車いす利用に向けた乗心地指標化のためのパーソナルセンシング・動的測量技術(1年間)

上智大学 理工学部 情報理工学科 准教授 矢入 郁子

【車いす移動の快適性向上】  
従来:低ストレスの車いす、低バリアの道路を別々に開発  
本研究:これら双方を簡易なセンサと高精度位置情報を用いて同時に「ユーザの主観的な乗心地」の観点から評価、本当に使いやすい車いす・通りやすい道路実現のための指標を確立

【乗心地指標化に向けたデータ収集・分析のための研究基盤の構築】  
・車いすユーザの走行時の主観を定量化するパーソナルセンシング技術  
・進天頂衝量みちびきの信号と走行時の衝撃・振動の解析にもとづいた、車いすユーザの視点からの道路の動的測量技術  
・収集したデータや分析結果をオンライン地図にわかりやすく表示

高齢者になったら誰もが安全・安心に乗れる車いす社会をめざして

### 障害物回避歩行における肢運動の適応制御に関わる小脳機能の解明(研究期間:1年間)

東京大学 大学院総合文化研究科・生命環境科学系  
准教授 柳原 大

研究の背景  
1. 現代社会においては、リアフリーが推進されているが、未だ不整地や段差など歩行に難儀しなければならない場所は多い。  
2. 高齢化に伴って歩行能力も低下している。  
3. 歩行中、脳が予測した歩行状態と実際の状態とを比較して、必要に応じて歩行の修正を行う。この修正には、どこから歩行を修正し、どのように修正するかを動的・空間的に検出された歩行状態の予測と一致させる必要がある。歩行の適応制御には小脳機能が、特に重要な役割を果たしている。

研究の目的  
本研究では、歩行中の歩行状態と実際の歩行状態との不一致を、神経生理学的手法を用いて検出することを目指す。

本研究の特色と将来像  
本研究における目的は、歩行中の歩行状態と実際の歩行状態との不一致を、神経生理学的手法を用いて検出することを目指す。本研究は、歩行中の歩行状態と実際の歩行状態との不一致を、神経生理学的手法を用いて検出することを目指す。

### 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(2年間)

筑波大学大学院システム情報工学科  
助教 河本 浩明

目的  
片麻痺患者を対象に、装着型ロボットを活用し、装着者の健側歩容に応じた歩行補助を実現する歩行支援システムの開発を目的とする。

目標・技術的課題  
目標:患側動作を空間的・時間的に健側と対称動作となるアシストを実現する。  
技術的課題:  
・健側の運動情報に基き、患側に健側動作を再生する自律制御系の構築  
・患側の運動意思にも基づいた動作支援を実現する随意制御系の構築  
・各制御系の有用性を評価するための、定量的アシスト手法の開発

特色・独自のポイント  
・装着者の健側の様々な歩容に応じて患側の運動支援を行う点  
・運動意思を推定し、装着者自身が患側を動かそうとする意識を継続しながら動作支援を行う点

### カソードルミネッセンス顕微鏡による細胞中の高空間分解能蛋白質イメージング(研究期間:2年0ヶ月)

大阪大学基礎工学研究科  
准教授 橋本 守

【背景】  
細胞内の蛋白質分布を知る事が生命機能や病気の理解に繋がる  
蛋白質のサイズはおよそ10 nmなので、10 nmの空間分解能をもつ顕微鏡が欲しい  
従来、電子顕微鏡は10 nm以下の空間分解能を有するが、蛋白質種を見分ける事はできなかった

【手法】  
標的蛋白質に、免疫染色で量子ドットを修飾  
電子顕微鏡を用いて観察し、各量子ドットからの発光(カソードルミネッセンス)スペクトルの違いから蛋白質種を見分ける

カソードルミネッセンスを用いた細胞イメージング技術を確立する

量子ドットからのカソードルミネッセンススペクトル(量子ドットの種類によって発光スペクトルが異なる)

電子線照射による発光を計測し蛋白質分布のイメージングを行なう

# 公益財団法人 立石科学技術振興財団

## 平成 24 年度 研究助成 (A, B) 候補 募集案内

(財)立石科学技術振興財団においては、下記の通り平成 24 年度の研究助成 (A), (B) の候補募集を行いますので、お知らせいたします。(さらに詳細については募集要項をご覧ください)

### 記

#### (1) 助成対象

##### 研究助成

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する。

「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。エレクトロニクス及び情報工学の分野で、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 (A) 助成金	1 件 250 万円以下	20 件程度
研究 (B) 助成金	1 件 500 万円以下	2 件程度

なお、研究助成 (B) については、審査の結果採択無しの場合もあります。

#### (3) 応募資格

- ① 日本国内に居住する研究者であれば、個人またはグループを問いません。
- ② 類似内容で現在、他の財団等から既に助成を受けているか、或いは受ける予定になっている方は、ご遠慮下さい。

#### (4) 募集期間と助成対象期間および助成金交付時期

募 集 期 間：平成 23 年 9 月 1 日～平成 23 年 10 月 31 日 (郵便局消印有効)

助 成 対 象 期 間：研究助成 (A) 平成 24 年 4 月 1 日～原則 1 年

研究助成 (B) 平成 24 年 4 月 1 日～原則 2 年

助成金交付時期：平成 24 年 5 月の予定

#### (5) 申請書類請求および問合せ先

当財団の所定様式 (なるべくホームページからのダウンロードをご利用下さい) に記入して応募して下さい。

〒 600-8234 京都市下京区塩小路通堀川東入南不動堂町 801 番地

公益財団法人 立石科学技術振興財団 事務局

TEL (075) 365-4771 FAX (075) 365-3697

E-mail : tateisi-f@omron.com

募集要項、申請書類に関しては当財団ホームページをご覧ください。

URL : <http://www.tateisi-f.org/>

## 公益財団法人 立石科学技術振興財団 平成 24 年度前期 国際交流助成候補 募集案内

（財団法人立石科学技術振興財団においては、下記の通り平成 24 年度前期の国際交流助成の候補募集を行いますので、お知らせいたします。（さらに詳細については募集要項をご覧ください）

### 記

#### （1）助成対象

国際交流助成（派遣と招聘）

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う研究者の海外派遣または外国人研究者の招聘。派遣は応募者本人に、招聘は被招聘者に助成する。

「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。エレクトロニクス及び情報工学の分野で、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助成を歓迎します。ことに、当財団から研究助成を受けた方の成果発表のための渡航、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（派遣と招聘）	派遣	1 件	40 万円以下	} 平成 24 年度助成件数 合計 10 件程度
	特別招聘	1 件	50 万円以下	
	一般招聘	1 件	30 万円以下	

#### （3）応募資格

- ① 派遣の応募は、日本国内に居住する研究者であれば、国籍・所属機関を問いません。
- ② 招聘の応募は、日本で開催される学会・研究集会の関係者であれば、国籍・所属機関・団体または個人のいかなを問いません。
- ③ 類似内容で現在、他の財団等から既に助成を受けているか、または受ける予定になっている個人またはグループは、ご遠慮下さい。

#### （4）募集期間と助成対象期間および助成金交付時期

募集期間：平成 23 年 10 月 1 日～平成 23 年 12 月 31 日（郵便局消印有効）

助成対象期間：平成 24 年 4 月 1 日～平成 24 年 9 月 30 日です。

助成金交付時期：平成 24 年 4 月の予定

#### （5）その他

渡航期間が助成対象期間をまたがる場合、募集期間内に被招聘者が確定しないなどの場合には事務局にご相談ください。

#### （6）申請書類請求および問合せ先

当財団の所定様式（なるべくホームページからのダウンロードをご利用下さい）に記入して応募して下さい。

〒 600-8234 京都市下京区塩小路通堀川東入南不動堂町 801 番地

公益財団法人 立石科学技術振興財団 事務局

TEL (075) 365-4771 FAX (075) 365-3697

E-mail : tateisi-f@omron.com

募集要項、申請書類に関しては当財団ホームページをご覧ください。

URL : <http://www.tateisi-f.org/>

# 公益財団法人 立石科学技術振興財団

## 平成 24 年度後期 国際交流助成候補 募集案内

(財)立石科学技術振興財団においては、下記の通り平成 24 年度後期の国際交流助成の候補募集を行いますので、お知らせいたします。(さらに詳細については募集要項をご覧ください)

### 記

#### (1) 助成対象

国際交流助成 (派遣と招聘)

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う研究者の海外派遣または外国人研究者の招聘。派遣は応募者本人に、招聘は被招聘者に助成する。

「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。エレクトロニクス及び情報工学の分野で、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助成を歓迎します。ことに、当財団から研究助成を受けた方の成果発表のための渡航、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 (派遣と招聘)	派遣	1 件	40 万円以下	} 平成 24 年度助成件数 合計 10 件程度
	特別招聘	1 件	50 万円以下	
	一般招聘	1 件	30 万円以下	

#### (3) 応募資格

- ① 派遣の応募は、日本国内に居住する研究者であれば、国籍・所属機関を問いません。
- ② 招聘の応募は、日本で開催される学会・研究集会の関係者であれば、国籍・所属機関・団体または個人のいかんを問いません。
- ③ 類似内容で現在、他の財団等から既に助成を受けているか、または受ける予定になっている個人またはグループは、ご遠慮下さい。

#### (4) 募集期間と助成対象期間および助成金交付時期

募 集 期 間：平成 24 年 4 月 1 日～平成 24 年 6 月 30 日 (郵便局消印有効)

助成対象期間：平成 24 年 10 月 1 日～平成 25 年 3 月 31 日です。

助成金交付時期：平成 24 年 10 月の予定

#### (5) その他

渡航期間が助成対象期間をまたがる場合、募集期間内に被招聘者が確定しないなどの場合には事務局にご相談ください。

#### (6) 申請書類請求および問合せ先

当財団の所定様式 (なるべくホームページからのダウンロードをご利用下さい) に記入して応募して下さい。

〒 600-8234 京都市下京区塩小路通堀川東入南不動堂町 801 番地

公益財団法人 立石科学技術振興財団 事務局

TEL (075) 365-4771 FAX (075) 365-3697

E-mail : tateisi-f@omron.com

募集要項、申請書類に関しては当財団ホームページをご覧ください。

URL : <http://www.tateisi-f.org/>

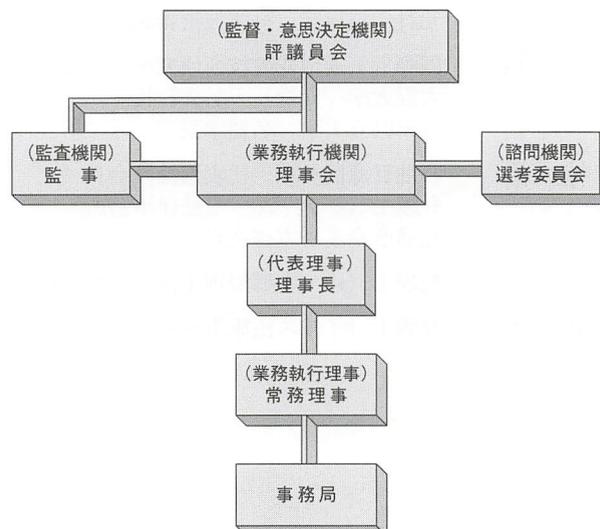
---

■ 財団の概要

■ 評議員・役員

## 財 団 の 概 要

- 名 称 公益財団法人 立石科学技術振興財団  
(英文名 Tateisi Science and Technology Foundation)
- 所 在 地 〒 600 - 8234 京都市下京区塩小路通堀川東入南不動堂町 801 番地  
TEL. (075) 361 - 4771 FAX. (075) 365 - 3697  
<http://www.tateisi-f.org/>
- 理 事 長 立石 信雄
- 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、技術革新と人間重視の両面から真に最適な社会環境の実現に寄与することを目的とする。
- 事業内容 エレクトロニクス及び情報工学の分野で、人間と機械の調和を促進するための研究に関する活動を支援する事業内容
  1. 研究への助成  
(研究A助成 20 件程度/年, 250 万円以下/件)  
(研究B助成 2 件程度/年, 500 万円以下/件)
  2. 国際交流への助成  
(研究者の海外派遣及び外国人研究者の招聘  
10 件程度/年, 派遣 40 万円以下/件, 招聘 50 万円以下/件)
  3. 研究成果に対する顕彰  
(立石賞 功績賞 2 件程度/隔年, 副賞 500 万円/件)  
(立石賞 特別賞 2 件程度/隔年, 副賞 500 万円/件)
  4. 研究成果の普及  
(成果集の発行 1 回/年)
  5. その他、本財団の目的を達成するために必要な事業
- 基本財産 オムロン株式会社株券 2,625,000 株
- 特定資産 現金 11 億円
- 財団の組織





## 編 集 後 記

本助成研究成果集は、当財団の助成研究成果普及事業の一環として毎年秋に継続発行して、助成研究者の皆様、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400ヶ所に拝送させていただいておりますが、今号で第20号を数えるに至りました。これもひとえに皆様のご支援の賜と感謝いたしております。

本助成研究成果集では、第21回（平成22年度）助成研究課題を中心にこの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第21回（平成22年度）に助成いたしました成果報告の抄録を収録しております。

ご寄稿いただきました川路評議員様、投稿文をお寄せいただきました山口大学大学院 技術経営研究科 石野 洋子 准教授、東京大学大学院 工学系研究科 廣瀬 明 教授、事務局取材に快く応じていただきました金沢大学 理工研究域 機械工学系 渡辺 哲陽 准教授の各位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御礼申し上げます。

本号がお手元に届くころ、平成24年度の助成候補の募集期間になっていますので、当財団ホームページをご覧くださいと思います。また、国際交流助成については前期と後期の2回に助成期間を分けて募集いたしておりますので合わせてご覧くださいと思います。

当財団の活動ならびに本誌に関する皆様のご意見などお待ちしております。

公益財団法人 立石科学技術振興財団 事 務 局

公益財団法人 立石科学技術振興財団  
Tateisi Science and Technology Foundation  
助成研究成果集 第20号  
平成23年9月(2011)

発行 公益財団法人 立石科学技術振興財団  
〒600-8234 京都市下京区塩小路通掘川東入南不動堂801番地  
TEL (075) 365-4771 FAX (075) 365-3697  
E-mail : tateisi-f@omron.com  
URL : <http://www.tateisi-f.org/>

印刷 明文舎印刷株式会社  
〒601-8316 京都市南区吉祥院池ノ内町10  
TEL (075) 681-2741

(本紙の一部又は全文の掲載を希望される時は、財団と研究代表者の許可を得てください。)