

「情報環境と人」研究領域 領域活動・評価報告書
—平成21年度採択研究課題—

研究総括 石田 亨

1. 研究領域の概要

本研究領域は、人とのインタラクションが本質的な知的機能の先端研究を行い、その成果を情報環境で共有可能なサービスの形で提供し、さらに研究領域内外の他のサービスとのネットワーキングにより複合的な知能を形成していくことを目指すものである。具体的には、人とのインタラクションが本質となる、ユビキタスコンピューティング、アンビエントインテリジェンス、知能ロボット、コミュニケーションやグループ行動支援などを実現するための知的機能の先端研究、ユーザビリティテスト、エスノグラフィ、統計分析など、利用現場における知的機能の評価研究、さらに研究成果を社会に提供するためのサービスコンピューティングを用いた知的機能のネットワーキング研究を対象とする。

2. 中間評価対象の研究課題・研究者名

件数：4件(うち、通常型4件)

※研究課題名、研究者名は別紙一覧表参照

3. 研究実施期間

平成21年10月～平成25年3月(※平成27年3月終了予定)

4. 中間評価の手続き

研究者の研究報告書を基に、評価会(研究成果報告会および領域会議等)での発表・質疑応答、領域アドバイザーの意見などを参考に、下記の流れで研究総括が評価を行った。

(中間評価の流れ)

平成24年12月 研究成果報告会開催

平成25年2月 研究総括による中間評価

平成25年2月 被評価者への結果通知、研究計画見直し

5. 中間評価項目

(1)研究の進捗状況と今後の見込み

(2)研究成果の現状と今後の見込み

(3)戦略目標に向けての貢献、成果の社会的インパクトの見通し

6. 研究結果(中間評価)

研究内容は普段から議論し了解しているが、研究成果の見せ方、論文発表の有り方については、戦略が弱いと感じている。自由に研究することと外形的な成果を整えることの双方がなければ世界で活躍することはできない。今後、折に触れ指導して行きたい。

本中間報告では、特に学生との共著論文や受賞については、さきがけ研究者の成果と自負できるものに限って掲載するよう指導している。今後2年間で、それぞれの研究目標を明確にし、世界で戦えるインパクトのある成果となるよう戦略的な研究を求めたい。

1. 尾形 哲也研究者「長期インタラクション創発を可能とする知能化空間の設計論」

ロボットによる実世界への適応学習、コミュニケーション学習において、大規模な神経回路モデルを利用した試みであり、理論あるいは研究室実験を通じた明確な知見が生まれることを期待していた。

実際、大型の神経回路モデルを用いた、言語やコミュニケーションに関する研究でよい成果をあげている。

しかし、研究が実ロボットを用いた実験にシフトしたためか、焦点が曖昧になってきているように感じられる。実ロボットがこの研究でどういう役割を持つのかを明確にする必要がある。研究の枠組みを見直し、当初の目的を達成していただきたい。

2. 梶本 裕之研究者「触覚の時空間認知メカニズムの解明に基づく実世界情報提示」

コンパクトな装置で運動感覚を呈示するという観点から運動錯覚現象の一種であるハンガー反射(圧迫

による頭部回旋現象)に着目、生起条件を世界で初めて明らかにすると共に、ハンガー反射と同様の頭部姿勢異常の疾患として知られる痙性斜頸への応用を行っている。

作成された装具は患者の頭部回旋を抑制できることが明らかとなり、従来知られていた外科的手法に比べ患者の負担が少ない手法として、現在5つの医学部及び大学付属病院による治験を開始している。さらに運動錯覚現象を身体各部で生起させるために、手掌部全体を覆う触覚提示装置の開発、腱受容器の電気刺激による運動錯覚の生起に成功している。こうした試みは、従来ロボットの遠隔操縦などの分野に限定されてきた運動感覚呈示を、より低コストに、より日常的な環境で、しかも身体全体に対して可能とするものであり、今後中枢性運動機能障害への対症療法やリハビリテーションなど、現代社会における喫緊の社会的課題への幅広い展開が期待される。

3. 辻 俊明 研究者「力覚信号処理技術に基づくリハビリ支援ネットワーク名」

リハビリ支援ロボットが患者の状態を測るツールとして有効であることに着目した研究である。

訓練中のセンサ情報を有効利用する新たなサービスの創出を目指し、人に接する機構の構築、その安全技術、患者の状態を推定する力覚信号処理技術など、力強く技術開発を進めている。提案の力覚信号処理により患者の運動能力・体調を定量化できることが既に示されており、概ね当初の計画通りに進んでいる。情報技術と力覚信号処理技術の導入によって、労働力の代替という枠組みを超えた新たなリハビリ支援ロボットの方向性を示している点が評価できる。しかし、ネットワークに繋ぎデータベースを自動生成する方法、大規模化したデータを処理する方法など、解決すべき課題は残されている。今後は、ネットワークを介した情報獲得と構造化の研究を進めて欲しい。

4. 長谷川晶一研究者「作業プロセスの環境非依存化による作業集合知の形成」

作業の計測や記録を集積して集合知とすることで、作業と結果の改善や支援、作業内容の検討や討議の支援などにつなげることを期待していた。これまでのところ、知識を統合するために、知識記述の視点の統一が必要なことに着目して研究を行なっている。作業手順に実行環境を与えることによる知識獲得支援手法と、感覚提示による記述獲得支援手法を提案し、必要なシミュレーション技術、計測提示技術の開発を行っている。

未だ道半ばであり、知識獲得への応用や有効性を評価が行えるような段階には至っていない。人工知能という、長谷川研究者にとって新規な分野に果敢に挑戦しているが、人工知能技術で何が可能かという検討が十分でないように思われる。研究成果や以下の受賞リストにあるように、物理シミュレーションでは最優秀論文を発表する力を有するのであるから、人工知能研究者と真摯に建設的な議論を行い、新規で有用な技術を開発し、成果を還元することを期待したい。

7. 評価者

研究総括 石田 亨 京都大学 大学院情報学研究科・教授

領域アドバイザー(五十音順。所属、役職は平成25年3月末現在)

五十嵐 健夫	東京大学大学院情報理工学系研究科・教授
井佐原 均	豊橋技術科学大学情報メディア基盤センター・教授
石黒 浩	大阪大学大学院基礎工学研究科・教授
片桐 恭弘	公立はこだて未来大学 副学長・教授
葛岡 英明	筑波大学大学院システム情報工学研究科・教授
竹林 洋一	静岡大学創造科学技術大学院・教授
塚本 昌彦	神戸大学大学院工学研究科・教授
中小路 久美代	(株)SRA 先端技術研究所・所長
橋田 浩一	産業技術総合研究所 知能システム研究部門・上席研究員
美濃 導彦	京都大学学術情報メディアセンター・教授
森川 博之	東京大学先端科学技術研究センター・教授
山田 敬嗣	NEC C&C イノベーション推進本部・本部長

(参考)

件数はいずれも、平成25年3月末現在。

(1)外部発表件数

	国 内	国 際	計
論 文	1	15	16
口 頭	67	38	105
その他	8	0	8
合 計	76	53	129

(2)特許出願件数

国 内	国 際	計
3	0	1

(3)受賞等

尾形 哲也研究者

Best paper award (Robotics), SII2011(2011.12)

梶本 裕之研究者

1. Best Presentation Award, EuroHaptics2010(2010.7)
2. インタラクティブ発表賞 インタラクション 2011(2011.3)
3. Best Paper Award , Augmented Human2011(2011.3)
4. Best Poster Award, ISVRI2011(2011.3)
5. 第 12 回計測自動制御学会 優秀講演賞(2011.12)
6. Best Paper Award (1st), Augmented Human2012(2012.3)

長谷川 晶一研究者

Best Papers Awards AH'12 Conference (2012.3)

(4)招待講演

国内 3 件 (尾形哲也研究者 3件)

国際 4 件 (尾形哲也研究者 3件、辻 俊明研究者 1件)

別紙

「情報環境と人」領域 中間評価実施 研究課題名および研究者氏名

研究者氏名 (参加形態)	研究課題名 (研究実施場所)	現職(平成25年3月末現在) (応募時所属)	研究費(3年間) (百万円)
尾形 哲也 (兼任)	長期インタラクション創発を可能とする知能化空間の設計論 (早稲田大学)	早稲田大学基幹理工学部 教授 (京都大学大学院情報学研究科 准教授)	55
梶本 裕之 (兼任)	触覚の時空間認知メカニズムの 解明に基づく実世界情報提示 (電気通信大学)	電気通信大学情報理工学部 准教授 (電気通信大学電気通信学部 准教授)	38
辻 俊明 (兼任)	力覚信号処理技術に基づきリハ ビリ支援ネットワーク (埼玉大学)	埼玉大学工学部電気電子 システム工学科 准教授 (埼玉大学工学部電気電子 システム工学科 助教)	47
長谷川晶一 (兼任)	作業プロセスの環境非依存化に よる作業集合知の形成 (東京工業大学)	東京工業大学 精密工学研究所 知能化工学部門 准教授 (電気通信大学電気通信学部知能 機械工学科 准教授)	18

研 究 報 告 書

「長期インタラクション創発を可能とする知能化空間の設計論」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成21年10月～平成27年3月

研 究 者: 尾形 哲也

1. 研究のねらい

本研究課題では、人間とそれを取り巻くシステムが相互適応を繰り返すことで、そのインタラクション形態を多様かつ長期的に展開することが可能な、知能化空間の設計論を提案することを目的としている。これを実現するため、3つの研究項目を挙げて取り組む。

第一の研究では、多数センサより得られる実環境データを力学モデルにより動的に構造化する手法に取り組む。第二の研究では、言語を力学モデルで表現することで実環境モデルと統合し、さらにそのスケーラビリティの拡張を通して従来の確率モデルと融合する手法を検討する。この手法により拡大しがちな記号情報を、実世界の制約の下で扱う枠組みを得る。第三の研究では、これらの研究で得られた成果を基に、人間と機械システムの発達コミュニケーションに関する研究を行う。ここでは非明示的情報、明示的情報の両者を介した相互適応系を力学系の視点から解析することで、インタラクション創発の原理と設計論を得ることを目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究で主眼となっている実世界と情報世界の接続を目指す上で、特に力学系の視点からのアプローチをとり、最終的に記号系、確率系との融合を目指す。ここで力学系をモデル化する際に、再帰結合型神経回路網モデル Recurrent Neural Network (RNN)を利用している。特に研究ではさきがけの支援を得て構築した大型の並列計算機を用い、RNN の時定数を変更して多階層構造を与え、深く学習させる(Deep Learning)内部表現を獲得できる Multiple Timescale Recurrent Neural Network (MTRNN)をを実世界学習に応用した。

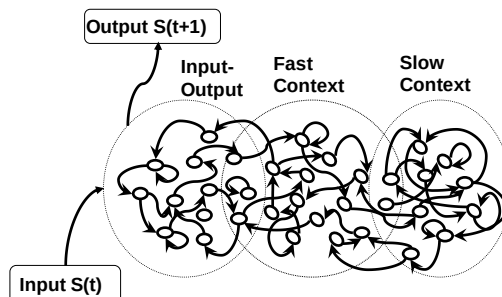


図 1 Multiple Timescale Recurrent Neural Network (MTRNN)

現時点で研究計画に合わせ大きく3つの研究成果をあげている。以下にその概要を示す。

(2) 詳細

1. 能動知覚による身体・環境理解と道具使用モデル

本研究の最終目的は、ロボットが人間との協調の際に利用する、多様な物体理解や道具識別を、神経心理学における道具身体化の概念を導入することで実現することにある。道具身体化とは、人もしくはサルが道具使用時に道具を自己身体の一部として知覚する現象である。本研究では、再帰結合神経回路モデルにより素手のロボット身体を一旦学習し、これにパラメータとなるニューロン群を付加することで道具機能を獲得させた。

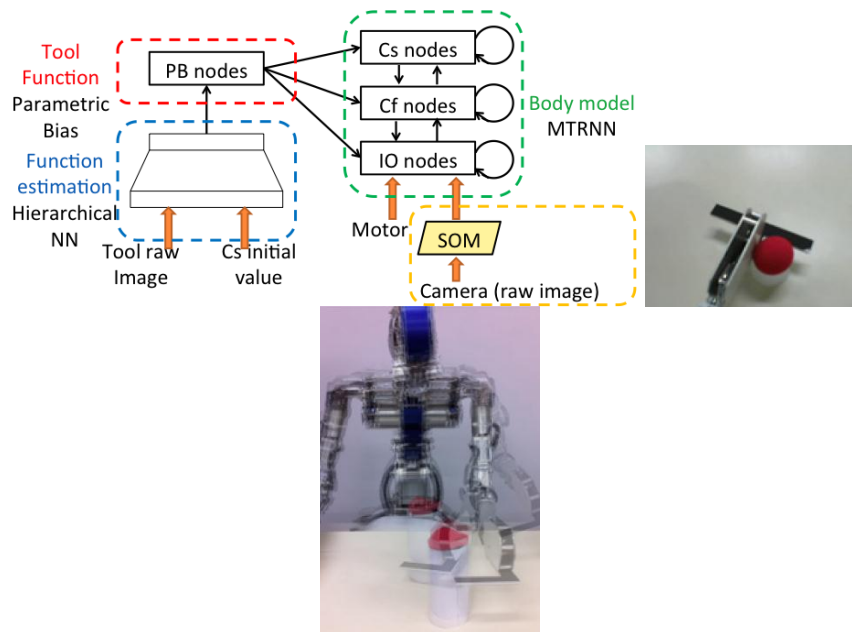


図2 提案モデルの概要

図3 入力目標状態と生成動作の例

さががけの支援により改造を施した柔軟関節を有する人間型ロボット、アクトロイドを用い、未知道具を含む複数道具で卓上物体操作を学習させた結果、パラメータニューロンに素手の身体機能を拡張する形で道具機能表現が獲得されること、さらにこの表現から未知道具の機能推論が可能となることが示された。本研究の成果の一部は、IEEE Trans. on Autonomous Mental Development に掲載されている。

2. 神経回路モデルを利用した言語と運動の変換モデル

本研究の最終的な目的は、実世界に接地した言語を学習によってロボットに獲得させることである。その第一歩として、神経回路網モデル Multiple Timescale Recurrent Neural Network (MTRNN) を用いて、モータ時系列からなる動作パターンと文字系列からなる文の相互連想器を小型ロボットに学習させるモデルを構築した。このモデルは生画像、関節角度、単語綴り、文法等に応じた複数の RNN を接続しており、さががけ支援による大型計算機に実装された。実験では複数動作と、それを表現する 2, 3 単語の文を複数用意し選択学習させた。

実験の結果、MTRNN は動作の構造を文章との対応を全て自己組織的に獲得し、未学習パターンについても、制限はあるものの動作と文の相互連想が可能となることが確認された。この成果の一部は、Neural Network 誌に掲載されている。

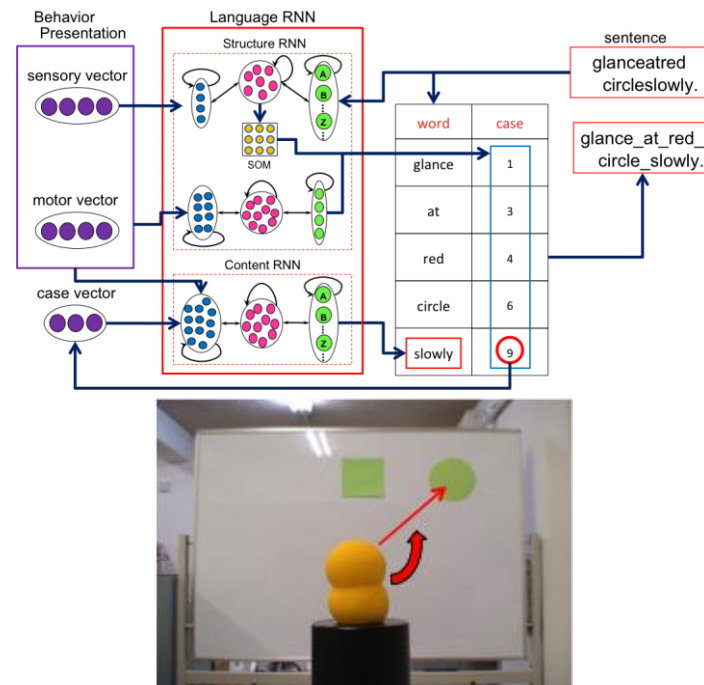
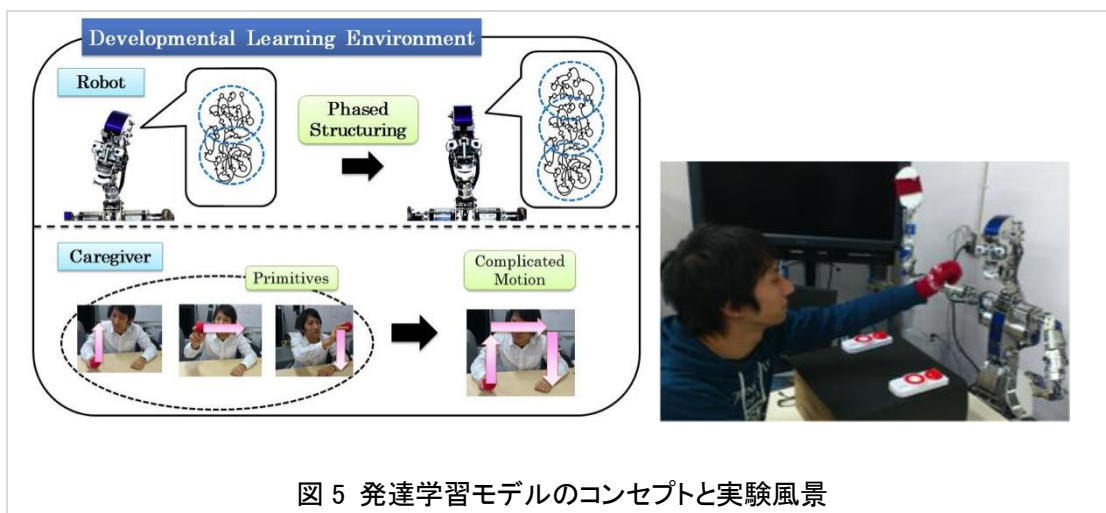


図 4 運動と言語の学習モデルと実験風景

3. 発達のインタラクションと動作学習

本研究では人間とロボットの長期的にコミュニケーションを実現する為の基本コンセプトとして発達と相互適応に着目し、ロボット側の学習モデルの段階的構造化と、人間のインタラクションスタイルの変化に着目したインタラクションを検討している。これまでに、養育者と幼児のモーショニーズ(単純かつ誇張された行為)とその複雑化の現象、さらに神経回路モデルの段階的構造化を組み合わせた基礎実験を行った。

アクトロイドを利用した模倣学習実験の結果、学習初期にモーショニーズを行いつつ神経回路を段階的に構造化させることで、未知動作への汎化性能の向上と、内部獲得表現に動作プリミティブが獲得される事が確認された。



3. 今後の展開

今後は各研究事項の更なる拡充と最終的な統合を行っていく。

第一の項目である、ロボットの身体動作、環境理解については特に現在扱っているアクトロイド(soft robot)の特性である、ダイナミックな動作の生成や各種道具の利用に挑戦していく。特に現在は、音響信号からのダンスの生成や、描画等の行為に着目しており、人間動作の観察等も含めた検討を行っている。

第二の項目である言語と運動の学習に関しては、これまでの理論研究の枠組みを重視しつつも少しずつ実際のインタラクションに応用可能な仕組みを検討する。具体的に、理論面では特にカオスを利用した確率モデルとの結合、組み合わせの可能性(compositionality)等に着目し、モデルの理論的な充実を計る。応用面では力学モデルでの言語利用があくまで記号モデルの近似であるという点を考慮し、現在のモデルの限界点を明らかにしていきながら、特に幼児の一語期、二語期で利用される言語形態を検討していく。

第三の項目である発達インタラクションでは、現在トップダウン的に行っている発達プロセスの自己組織的な記述について検討を行い、より自然な長期インタラクションについて検討していく。さらに上記の2つの項目(ダイナミックな動作や道具利用、及び一語期、二語期の言語形態)を統合していく。

また神経回路モデルの機能拡充も重要な課題である。本研究で利用している階層型の RNN (MTRNN)は、近年大きな成果をあげている Deep Learning のコンセプトを、力学系に発展させたものであり、Deep Learning で有効と確認されている Hessian free モデル、autoencoder、dropout 等の各種の学習手法は、MTRNN の学習においても有効であると期待される。現在予備実験を進めながら検討を行っているところである。

4. 自己評価

本研究では、人間とロボットに代表される知能システムが長期間に渡ってコミュニケーションをとるための、基礎モデルと設計論の構築を目的としている。

方法論として、ロボット自身の身体、環境理解のモデル、また運動と言語の統合のモデル等を研究してきた。その結果、当初の予想より深い形で各種問題の理論的な理解と問題点の明

確化を行う事ができ、それらの成果をいくつかの海外論文誌で発表することができた。

また理論をコンピュータ内のシミュレーションのみで検討するのではなく、十分な環境センシング能力と多自由度を有する実際の人間型ロボットに実装し、道具の使用に関する学習や発達インタラクションに関する基礎実験を行う段階まで達する事ができた。

しかしながら異動に伴う実験環境移設の事情等もあり、当初計画では24年度迄に構築予定だった、インタラクションフィールド実験システムの構築には至らなかった。現在、小型ロボットNAOによるモデルの実装や、ロボット用OSであるRT-Middleware等の活用を行いながら、今後、有効に活用可能な実験システム構築を進めている。

以上を統括すると、学術研究としての成果は予想以上に上がったと考えられる。また最終的に目的としているフィールド実験を行う為の準備も本年度中にほぼ整うと考えられる。今後、最後の2年間でさらなる成果をあげていく。

5. 研究総括の見解

ロボットによる実世界への適応学習、コミュニケーション学習において、大規模な神経回路モデルを利用した試みであり、理論あるいは研究室実験を通じた明確な知見が生まれることを期待していた。実際、大型の神経回路モデルを用いた、言語やコミュニケーションに関する研究でよい成果をあげている。

しかし、研究が実ロボットを用いた実験にシフトしたためか、焦点が曖昧になってきているように感じられる。実ロボットがこの研究でどういう役割を持つのかを明確にする必要がある。研究の枠組みを見直し、当初の目的を達成していただきたい。

6. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. S. Nishide, J. Tani, T. Takahashi, H. G. Okuno, and T. Ogata: Tool-Body Assimilation of Humanoid Robot using Neuro-Dynamical System, IEEE Trans. on Autonomous Mental Development, Vol.4, Issue:2 (june 2012) pp.139-149, 2012. doi:10.1109/TAMD.2011.2177660
2. K. Kodaka, T. Ogata, H. Ohta and S. Sugano: Exploring Movable Space using Rhythmical Active Touch in Disordered Obstacle Environment, Proc. of IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2011), pp.485-490, Dec. 20-22, 2011, Kyoto, Japan.
3. H. Awano, S. Nishide, H. Arie, J. Tani, H. G. Okuno, T. Ogata: Use of a Sparse Structure to Improve Learning Performance of Recurrent Neural Networks, Proceeding of 18th International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (ICONIP 2011), Part III, pp.323-331, Lecture Notes in Computer Science 7064, Springer-Verlag, Shanghai, Nov. 13-17, 2011. doi:10.1007/978-3-642-24965-5_36
4. Y. Zhang, T. Ogata, S. Nishide, T. Takahashi, and H. G. Okuno, "Classification of Known and Unknown Environmental Sounds based on Self-organized Space using Recurrent Neural Network," Advanced Robotics, Special Issue on Dynamical System Involving

Symbol Processing, Vol.25, No.17, pp. 2127–2141 (2011).

5. W. Hinoshita, H. Arie, J. Tani, H. G. Okuno, and T. Ogata: Emergence of Hierarchical Structure mirroring Linguistic Composition in a Recurrent Neural Network, Neural Networks, Vol.24, No.4, pp.311–320, Jan. 12. 2011. (doi:10.1016/j.neunet.2010.12.006)
6. T. Ogata, S. Nishide, H. Kozima, K. Komatani, and H. G. Okuno: Inter-modality Mapping in Robot with Recurrent Neural Network, Pattern Recognition Letters 31, pp.1560–1569, 8 June 2010. (doi:10.1016/j.patrec.2010.05.002)
7. 日下航, 尾形哲也, 小嶋秀樹, 高橋徹, 奥乃博: RNN を備えた2体のロボット間における身体性に基づいた動的コミュニケーションの創発, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 4 (ロボティックサイエンス論文特集号), pp. 532–543, May, 2010.

(2)特許出願

研究期間累積件数: 0 件

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

招待講演

1. 神経力学モデルによる認知ロボティクスの試み, 発達原理の科学と発達障害の理解に向けて日本ロボット学会ロボティック・サイエンス研究会, 京都大学東京オフィス, 2011 年 7 月 4 日.
2. Constructivist Approach to Human-Robot Interaction from Dynamical Systems Perspective, The Third Tsinghua-Kyoto Symposium on Intelligent Technologies and Information Management for Knowledge Society, 21th Mar. 2011.
3. Toward to HRI based on Neuro-dynamical System, JST-NSF Workshop on HRI (2011), USA, 30th Nov. 2010.
4. 神経力学系予測モデルによるロボット身体拡張認知への試み, ロボット工学セミナー 第 59 回シンポジウム, 人に拡張身体感をもたらすロボティクスの実現に向けて, 名古屋大学 VBL セミナールーム, 2010 年 9 月 21 日.
5. 長期インタラクション創発を可能とする知能化空間の設計論, 情報処理学会創立 50 年記念全国大会, JST さきがけセッション, 2010 年 3 月 11 日.
6. Model of Tool-Body Assimilation based on Neuro-Dynamical System, JSPS-DFG Round Table on 'Cooperative Technology in future: Cognitive Technical Systems', Organizers: Prof. A. Iriki, Prof. Y. Kuniyoshi, Prof. M. Buss, Prof. Ritter, 9th Feb. 2010.

受賞

1. Best paper award (Robotics), SII2011, 2011

研究報告書

「触覚の時空間認知メカニズムの解明に基づく実世界情報提示」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成21年10月～平成27年3月

研究者: 梶本 裕之

1. 研究のねらい

現代は情報爆発の時代であると言われる。実際我々は1000年前の人に比べてはるかに過大な情報を浴び、行動を選択することを求められ続けている。この傾向は今後さらに拡大する以外なく、爆発的に増加を続ける情報への対処は人にとって最も重要な課題の一つであるといえる。

「検索技術」とは、こうした情報過多の事態を解決する一側面であると言える。自分の望んでいる目的に最適化された情報選択を可能とする。言い換えれば検索技術とは、情報の「認識」を補助する手段である。一方で検索技術とペアになるのが「インタフェース技術」である。インタフェース技術は「認識」と「運動」を繋ぐ。例えば直感的と主張されるインタフェースの大半は結局「運動を引き出す」ものである。

本研究はこうしたインタフェース技術の本質に立ち返り、運動を誘発、ないし運動感覚を改変することで、実世界と最短に結ばれたインタフェースを実現することを目的とする。これまでのインタフェース技術も認識・運動間の時間を短縮することを目的としてきた。これに対して本研究はさらに一歩進め、「認識せずとも運動を生じてしまう反射的現象」によって情報から運動までの距離を最短化する。さらに本研究では、運動自体もユーザ自身にとっては感覚として認識するだけのものであるという気づきに基づき、実際には運動させずに運動を感覚として呈示する手法を提案する。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では現在までに人間に運動感覚を簡便かつ強力に呈示する手法の提案・実証・応用を行なっている。運動感覚呈示技術はロボットの遠隔操縦やVR環境の構築などの分野で発展してきたが大掛かりな装置を必要とするため応用用途も限定されていた。錯覚現象を用いることで装置を簡略化する試みも数多く、現在の触覚研究の一大潮流となっているものの十分な錯誤量を得られるものではなかった。

これに対して本研究ではまず運動錯覚現象の一種であるハンガー反射現象に着目した。本現象は皮膚の圧迫のみで明瞭な外力を錯誤する現象である。この現象の生起条件を明らかにするとともに、ハンガー反射と同様の頭部姿勢に関する疾患として知られる痙性斜頸（頸部ジストニア）への応用を行った。従来知られていた脳深部刺激等の手法に比べて圧倒的に患者の負担が少ない手法として、現在複数の医療機関による正式な医療治験の段階に入っている。

この現象は皮膚感覚によって運動感覚を強力に生起する例といえるため、身体の他の部位においても同様の現象が生じるかどうかを検討した。その結果、指先、前腕への皮膚感覚呈示による運動感覚を発見した。しかしこれらの錯誤は度重なる最適化の努力にもかかわらず、やはり従来のクロスモーダル(感覚間相互作用)現象で見られるように高々感覚量の10%程度を変化させるにとどまり、応用用途は限定されたと考えられた。こうした知見からひとつの仮説として、ハンガー反射の運動部位である首が元々感覚手がかりが少ない部位であることが錯誤量の多さの決め手となっていることが示唆された。つまり強い運動感覚の生起のためには感覚間相互作用を一種の多数決の仕組みと考える必要があるということである。例えば皮膚感覚による運動感覚の錯誤では、指先のごく一部への感覚呈示ではなく大面積の呈示が決め手となる可能性がある。この考えから手掌部全体を覆う皮膚感覚提示装置を世界で初めて開発した。

ここまで述べた運動感覚呈示は一貫して他の感覚による錯誤を用いたものであるが、ひるがえってもし運動感覚呈示に直接寄与する感覚器(力覚受容器)を刺激する手段があるならそれもコンパクトな運動感覚呈示という当初の目的にかなう。この考えから力覚受容器の直接的刺激の可能性を探るため、腱への電気刺激による力覚呈示を考案、実現した。腱電気刺激によって腱器官の受容器が活動すること自体は知られていたが、この際に運動する錯覚が生じることを明らかにした。

以上のように本研究は運動感覚を簡便かつ強力に呈示する手法の提案と、その社会的応用の両輪で進められた。運動感覚の関係する他の重大な疾病への適用やリハビリテーション応用等、今後さらなる発展が期待される。

(2) 詳細

1. ハンガー反射現象の痙性斜頸への応用

まずハンガー反射には「ツボ」とも言うべき適した圧迫部位が側頭部前方に存在することが明らかとなった。このことから神経学的な証拠は得られていないものの、次のような順番で生じている現象であると考えられた。第一に皮膚が圧迫を受ける。第二に皮膚圧迫を外力によるものと知覚し、その外力をキャンセルして頭部姿勢を安定化させようとする運動が生じる。ただしこの運動は完全に無意識でありユーザが知覚することはない。第三に生じた運動を観察したユーザが、外力によって回されたと解釈する。つまりハンガー反射とは、常に身体を安定化させようとするフィードバックループを利用した擬似運動呈示であると言える。

ハンガー反射現象の医療応用も進めている。ハンガー反射と同様の頭部姿勢に関する疾患として痙性斜頸(頸部ジストニア)が知られている。これもまたハンガー反射と同様に原因不明の疾患であり、従来はボツリヌス毒の注射による運動の抑制や脳深部刺激によって症状を抑える手法が取られてきたが患者への負担が極めて大きかった。これに対して、患者にハンガーをかぶせて症状とは逆向きのハンガー反射を生じさせると疾患が劇的に緩和することがわかった。例えば痙性斜頸の患者は常に強い肩こりの状態であるが、ハンガー反射によって肩の筋肉の力も抜けることや、さらに1ヶ月程度一日一時間の装着を続けるとハンガーを外しても症状が緩和することが明らかとなった(図 1)。

本研究に関しては現在複数の医療機関による正式な医療治験の段階に入っており、ハンガーに替わる装具の開発を行なっている。また痙性斜頸の頭部回転方向は左右とは限らな

いため、前後方向等の回旋への対応も進めている。さらに症状の定量評価に関して、これまでは医療機関においては目視による姿勢計測が行われ患者と医師に多大な時間的負担を必要としていたものを、身体姿勢のモーションキャプチャ技術を用いて簡便な症状スコアリングシステムを構築、運用を開始する段階である(図 2)。



図 1 痙性斜頸患者へのハンガー反射の適用。(左)適用前の症状、(左中)ハンガー装着時、(中)装具の形成、(右中)装具装着時、(右)使用 1 ヶ月後

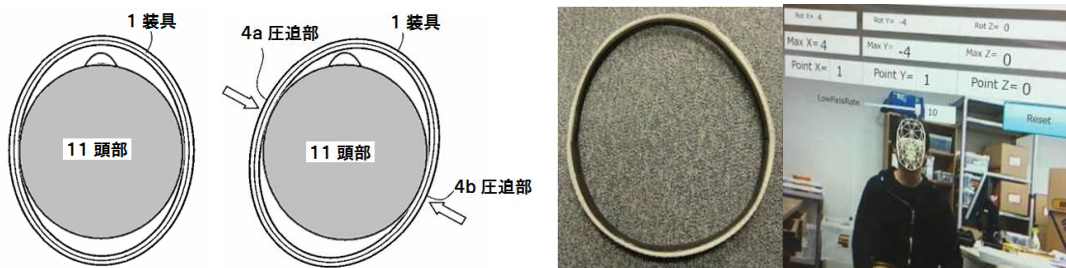


図 2 プラスチック製装具と症状スコアリングシステム

2. 皮膚感覚による運動感呈示

これらの試行は共にある程度成功したものの、生じる運動感覚は微弱であり、高々10%程度のものではあった。この数値は科学論文としては成立するものの実用性の点でインパクトのある結果とはいえない。

この試みから、逆になぜハンガー反射が例外的に強力な運動錯誤を生じるのかを再度検討したところ、実は首という部位の特殊性に起因すると思われた。首は姿勢に関する感覚手がかりが少ない。例えば腕の姿勢は視覚で理解できるが自身の首の姿勢を同様に理解することは難しい。また首の運動に対応する筋肉の数は非常に多く、筋紡錘等による各筋肉の状態のフィードバックによって首の姿勢を逆算することも簡単ではない。実際、すでに述べた痙性斜頸という疾患の存在自体が首の姿勢知覚の曖昧さをよく示している(患者は自分の姿勢を理解しておらず、今首が曲がっているかどうかを正確に回答することができない)。また例えば頭部搭載ディスプレイ(HMD)を装着して外界の視覚が変化するような状況では首の姿勢が大幅に変化し、しかもユーザはそれに気づかないことがよく観察される。つまりハンガー反射が強力な運動錯誤を生じる背景には、関与している感覚が元々少ないことがあり、そのため皮膚圧迫だけによって感覚間の「多数決」に勝ってしまったということが推測される。

逆に言えば、運動感覚という非常に多数の感覚の総合で決定されるクロスモーダル感覚においては、一つの感覚によって生じさせる錯覚には限界があり、多数の感覚を呈示することによって「感覚間の多数決に勝つ」という戦略が有効であると考えられる。ただし従来の運動感覚呈示はすでに述べたように大型、煩雑になるため避ける必要がある(図 3)。

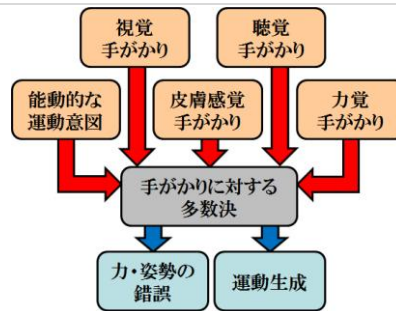


図 3 多感覚手がかりによる運動感覚の生成

そこで本研究では、皮膚感覚をなるべく大面積に呈示するための手掌部全体への触覚呈示装置を作成した。従来の触覚呈示装置はそのほとんどが指先への触覚呈示に過ぎなかったが、電気刺激を用いることで世界で初めて指先から掌までを 1500 点余りの刺激点で刺激するシステムが完成した(図 4 左)。今後はこの豊富な触覚手がかりによって運動感覚を生成する。

また本研究ではさらに、身体全体への触覚呈示の試みとして関節部への触覚呈示を試みた。関節部位での皮膚感覚は自己姿勢を知覚する手がかりとして重要であることが知られている。このためそこに皮膚感覚を与えることによって効率的に運動感覚を生成しうると考えられる。現在までのところ、単独では運動感覚の錯誤までは生じないものの一種の達成感は大に感じられること、および与える振動を変化させることであたかも自身の身体の材質が変化したように(例えば鉄で出来た関節を持っているかのように)感じられることが明らかとなった(図 4 中右)。これは例えばロボットの遠隔操縦において、人をロボット側に近づける試みとなると考えられる。また次項で述べるように他の運動感覚呈示手段との併用が有効と考えられる。

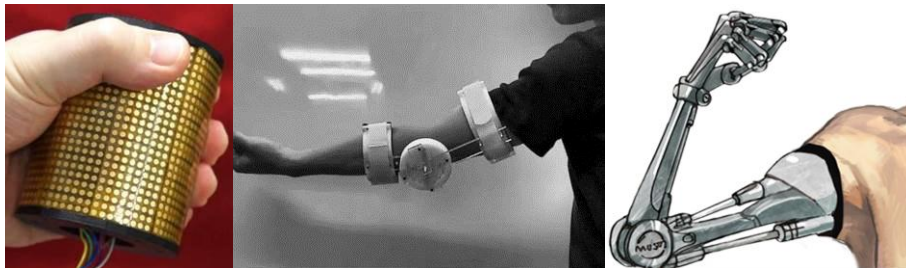


図 4 (左)電気触覚を用いた手掌部全体への触覚呈示 (中、右) 関節部への触覚呈示による運動感覚および身体感覚改変

3. 腱電気刺激による運動感覚呈示

これまでの研究は、運動感覚という複合的な感覚を、狭義の力覚(力覚専用の受容器による感覚)以外で生成させるという試みであった。これは従来の力覚呈示がロボットアームなどの大型の装置を必要とし、用途が極めて限定されてしまうという問題に対処するためであった。

一方で、もし狭義の力覚を簡便な方法で提示できるなら、力覚呈示をあえて避ける必要はなくなる。ここで我々は、感覚呈示の基本原理に立ち返った。視覚や聴覚のディスプレイはすべて、実際の物理刺激を再現すること無く、受容器にとって必要十分な刺激を抽出して刺激

している。例えば視覚における三原色(R、G、B)は網膜の錐体細胞の種類に対応している。こうした受容器への着目は、刺激手段を現実的なレベルに簡略化することに役立つことが分かる。これに対して現在の力覚提示手法は、例えば手で触る対象の物理的振る舞いをそのまま再現するために機械的駆動を行なっている。つまり感覚受容器への必要十分な刺激という観点を持たず、世界をそのまま再現しようとしているといえる。

以上の考察に基づき、力覚における感覚受容器への直接的刺激を考案した。従来から腱への振動刺激によって筋紡錘が活動し運動錯覚を生じるという現象は知られていたが、ここでは小型化等の理由から電気刺激を用い、腱に存在するゴルジ腱器官を刺激することによって運動錯覚を生起するかどうかを検証した(図 5)。その結果確かに人によっては強力な運動錯覚を生じること、ただし3割程度の被験者では外力錯覚が生じるものの運動の錯覚には至らないことが分かった。後者の結果については今回の刺激対象が力覚を担当する三種の受容器のうちの一種類のみであるために、やはり感覚間の多数決に勝って運動の錯覚を生じるに至らなかったのではないかと考えられる。今後例えば前述の関節への皮膚感覚呈示等と組み合わせることによって、より完全な運動感覚呈示の実現を目指す。



図 5 腱電気刺激による運動錯覚の生成。(左) 刺激部位 (右) 右腕刺激時の姿勢錯誤を左腕で示したもの。

以上のように本研究は運動感覚を小型軽量の装置で強力に呈示する手法を提案し、同時にそれによって初めて可能となった社会的応用を行なってきた。

3. 今後の展開

今後は主に研究テーマを2つに絞る。第一にハンガー反射現象の痙性斜頸への医療応用の実現である。ただし痙性斜頸はジストニアと呼ばれる運動障害の一部であるため、今後より幅広い運動障害(例えばパーキンソン病が含まれる)に簡便な触覚呈示による運動錯覚現象が適用できるか、また触覚呈示にこだわらず、簡便なインターフェースが適用できるかを常に試したいと考えている。第二に力覚受容器への直接的な刺激による運動感覚呈示手法の確立である。力覚呈示手法は基本的に80年代からロボット技術の一部として扱われ原理的には変わっていないが、本提案は運動呈示を初めて運動「感覚」呈示に置き換えるものとなる。

4. 自己評価

研究開始当初、本研究の目的はタイトルにある通り触覚を用いた情報提示手段の最適化というものであった。皮膚を介した情報提示を最も効率良く行なうというものであり、例えば触覚を通じて人間が理解できる情報量が何 bit/秒であるか、というような研究を想定していた。しか

し当初から指摘されていた通り、単純な情報入力経路としての触覚はやはり情報量的には効率が悪く、筋の悪い研究目標だったと思われる。

一方で触覚を介してなぜか人が動いてしまうというハンガー反射現象を起点として考えると、冒頭にも述べたように「望ましい運動を起こすためのインタフェース」という観点が見え、またその点では触覚という研究ツールを持っていることは強みであると思われた。この転換は本研究課題である程度苦しんだ中で生まれたものであるもので、今後具体的な社会的価値を生むところまで持って行きたいと強く感じている。以上により総合的な自己評価としては、3 年のトライ & エラーでようやく道筋が見えてきた段階であると考えている。また特にこの 3 年間で運動疾患に関する外科医療の最先端を担う医師と多数関係を築くことが出来たことを今後に活かしたいと考えている。

5. 研究総括の見解

コンパクトな装置で運動感覚を呈示するという観点から運動錯覚現象の一種であるハンガー反射(圧迫による頭部回旋現象)に着目、生起条件を世界で初めて明らかにすると共に、ハンガー反射と同様の頭部姿勢異常の疾患として知られる痙性斜頸への応用を行っている。作成された装具は患者の頭部回旋を抑制できることが明らかとなり、従来知られていた外科的手法に比べ患者の負担が少ない手法として、現在5つの医学部及び大学付属病院による治験を開始している。さらに運動錯覚現象を身体各部で生起させるために、手掌部全体を覆う触覚提示装置の開発、腱受容器の電気刺激による運動錯覚の生起に成功している。こうした試みは、従来ロボットの遠隔操縦などの分野に限定されてきた運動感覚呈示を、より低コストに、より日常的な環境で、しかも身体全体に対して可能とするものであり、今後中枢性運動機能障害への対症療法やリハビリテーションなど、現代社会における喫緊の社会的課題への幅広い展開が期待される。これらの成果により学会で受賞のほか、25 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞の内定を受けるなど、社会の認知度も向上してきている。

6. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. H. Kajimoto: Electro-tactile Display with Real-time Impedance Feedback. Published in EuroHaptics'10 Proceedings of the 2010 international conference on Haptics – generating and perceiving tangible sensations: Part I, Lecture Notes in Computer Science 6191, Springer-Verlag, pp. 285-291, 2010.
2. H. Kajimoto: Electro-tactile Display with Real-time Impedance Feedback using Pulse Width Modulation. IEEE Transactions on Haptics, vol.5, no.2, pp.184-188, 2012.
3. H. Kajimoto: Design of Cylindrical Whole-hand Haptic Interface using Electrocutaneous Display. Published in EuroHaptics'12 Proceedings of the 2012 international conference on Haptics – perception, devices, mobility, and communication – Volume Part II, Lecture Notes in Computer Science 7283, Springer-Verlag, pp. 67-72, 2012.
4. H. Kajimoto: Immobile Haptic Interface Using Tendon Electrical Stimulation. Published in Proceedings of 9th International Conference on Advances in Computer Entertainment, Lecture Notes in Computer Science 7624, Springer-Verlag, pp. 513-516, 2012.

(2)特許出願

研究期間累積件数: 2 件

1. 特願 2010-130532: 電気刺激装置及び電気刺激方法, 梶本
発明者: 梶本 裕之
発明の名称: 電気刺激装置及び電気刺激方法
出願人: 電気通信大学
出願日: 2010/06/07
出願番号: 2010-130532
2. 特開 2011-147749, 特願 2010-047789: 装具, 旭, 佐藤, 梶本
発明者: 旭 雄士、佐藤 未知、梶本 裕之
発明の名称: 装具
出願人: 富山大学、電気通信大学
出願日: 2010/3/4
出願番号: 2010-047789 (P2010-047789)

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

主要な学会発表(査読付き国際学会プロシーディング)

1. M. Sato, R. Matsue, Y. Hashimoto, H. Kajimoto: Development of a Head Rotation Interface by Using Hanger Reflex. In Proceedings of the 18th International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (IEEE RO-MAN), pp.534-538, 2009.
2. T. Hachisu, S. Oshima, Y. Hashimoto, H. Kajimoto: Haptic Illusion of Elasticity by Tactile Suppression during Motor Activity. In Proceeding of IEEE Haptics Symposium, pp.55-58, 2010.
3. T. Hachisu, G. Cirio, M. Marchal, A. Lécuyer, H. Kajimoto: Pseudo-Haptic Feedback Augmented with Visual and Tactile Vibrations. In Proceedings of IEEE International Symposium on VR Innovation (ISVRI), pp.327-328, 2011.
4. H. Kajimoto: Enlarged Electro-tactile Display with Repeated Structure. In Proceedings of IEEE World Haptics Conference (WHC), pp.575-579, 2011.
5. T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima, H. Kajimoto: HaCHISick: Simulating Haptic Sensation on Tablet PC for Musical Instruments Application. In Proceedings of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST), pp.73-74, 2011.
6. T. Hachisu, G. Cirio, M. Marchal, A. Lécuyer, H. Kajimoto: Virtual Chromatic Percussions Simulated by Pseudo-Haptic and Vibrotactile Feedback. In Proceedings of ACM International Conference on Advances on Computer Entertainment Technology (ACE), 5pages, 2011.
7. H. Okabe, S. Fukushima, M. Sato, H. Kajimoto: Fingertip Slip Illusion with an Electrocutaneous Display. In Proceedings of the 21st International Conference on Artificial Reality and Telexistence, 5pages, 2011.
8. Y. Kuniyasu, Michi Sato, Shogo Fukushima, Hiroyuki Kajimoto: Transmission of Forearm Motion by Tangential Deformation of the Skin. In Proceedings of the 3rd Augmented

- Human International Conference, 4pages, 2012.
9. M. Yokoyama, T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima, H. Kajimoto: Control of Ridge by Using Visuotactile Cross-Modal Phenomenon. In Proceedings of the 2012 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces (ITS), pp.335-338, 2012.
 10. H. Okabe, T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima, and H. Kajimoto: Quantitative Evaluation of an Illusion of Fingertip Motion. In Proceedings of the 2012 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces (ITS), pp.327-330, 2012.
 11. Y. Kurihara, T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima, H. Kajimoto: Virtual Alteration of Body Material by Periodic Vibrotactile Feedback. In Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference 2013, 4 pages (to appear in March)
 12. H. Kajimoto: Illusion of Motion Induced by Tendon Electrical Stimulation. In Proceedings of IEEE World Haptics Conference 2013, 4 pages (to appear in April)
 13. Y. Kurihara, T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima, H. Kajimoto: Periodic Tactile Feedback for Accelerator Pedal Control. In Proceedings of IEEE World Haptics Conference 2013, 6 pages (to appear in April)

受賞

1. Best Presentation Award, 2010/7/10, H. Kajimoto, "Electro-tactile Display with Real-time Impedance Feedback", EuroHaptics2010
2. インタラクティブ発表賞, 2011/3/13, 吉川, 蜂須, 福嶋, 古川, 梶本:ベクション場による歩行誘導手法の提案, インタラクション 2011
3. Best Paper Award, 2011/3/14, M. Furukawa, H. Yoshikawa, T. Hachisu, S. Fukushima, H. Kajimoto, "'Vection Field" for Pedestrian Traffic Control", Augmented Human2011.
4. Best Poster Award, 2011/3/20, T. Hachisu, G. Cirio, M. Marchal, A. Lécuyer, H. Kajimoto, "Pseudo-Haptic Feedback Augmented with Visual and Tactile Vibrations", ISVRI2011.
5. 優秀講演賞, 2011/12/25, 梶本:電気触覚ディスプレイを用いた円筒形マスタハンドの設計, 第12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, 2011.
6. Best Paper Award (1st), 2012/3/10, Y. Kuniyasu, M. Sato, S. Fukushima, H. Kajimoto, "Transmission of Forearm Motion by Tangential Deformation of the Skin," Augmented Human2012.

研究報告書

「力覚信号処理技術に基づくリハビリ支援ネットワーク」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成21年10月～平成27年3月

研究者: 辻 俊明

1. 研究のねらい

本研究課題ではリハビリ支援機器をインターネットに接続し、リハビリ動作の応答値をサーバにデータベースとして記録するシステムを開発する。本システムでは運動データに力覚信号処理を施すことにより療法士と患者の情報を抽出し、再利用可能なライブラリとして保存・管理を行う。そして各患者の状態改善や事故に関するデータを収集し、そのデータに基づいてライブラリに保存された各リハビリ動作の効果とリスクを数値化、提示することにより、個々の症例に合ったリハビリ動作の自律的再生や統計に基づく精緻な効果・リスク評価を実現する。換言すると、力覚信号処理技術を媒体として実世界における知的機能(リハビリ装置)と情報環境(ネットワークサーバ)を組み合わせることで、個人の特性に合わせた高度なサービスを提供し、リハビリ支援ロボットの新たな設計指針を確立することを目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究ではリハビリ支援機器をインターネットに接続し、リハビリ動作の応答値をサーバにデータベースとして記録するシステムを開発する。そしてそのデータを有効利用することにより新たなリハビリ支援機器のサービスを創出することを目指す。これまでにその基礎として、4点の技術を開発している。

1. 四肢の筋骨格に分布する筋の張力推定技術とその可視化
 2. 安全安心な運動療法のための耐故障力計測技術
 3. 多次元関節可動域試験システム
 4. 患者の状態によって運動の介助・誘導を段階的に調整する剛性制御系
- その詳細を以下に述べる。

(2) 詳細

1. 四肢の筋骨格に分布する筋の張力推定技術とその可視化

ロボットによるリハビリは運動中の定量的なデータの取得が容易になることを利点とする。また、得られたデータに信号処理を施し、リハビリに必要な情報を抽出することが可能となる。その最も基本的な一例として、運動療法実施時の力センサの応答から上腕部の3対6筋の張力分布を推定し、CGにより可視化、表示するプログラムを開発した。力センサのデータから筋の張力や長さといった情報を抽出することにより、特定の筋を対象としたリハビリや筋ごとの情報に基づいて障害を分類することなどが可能になる。また、目に見えない力の情報をリアルタイムで可視化して表示することにより、患者と療法

士が能率的に筋の状態を把握しながらトレーニングすることが可能となる。本課題の成果は展示会において医療福祉を含めた複数の分野から高い評価を得ており、産学連携のプロジェクトが今後立ち上がる予定である。また、国内外複数の会議において成果が発表されており、学術面においても評価が高い。



図 1 上肢 3 対 6 筋の張力推定と可視化

2. 安全安心な運動療法のための耐故障力計測技術

力情報を常に検知しながら患者に適切な力を与えるようフィードバックする力制御は運動療法を効果的かつ安全に遂行する上で不可欠な技術である。しかし力センサの故障に起因する事故の可能性が運動療法の安全性を著しく損なう可能性があり、未だに力センサの耐故障計測技術は確立されていないため、これを開発した。合計 9 つの冗長なひずみ計測チャンネルを持つ、6 軸力覚センサを開発し、冗長自由度を持つセンサ応答値ベクトルが 6 次元の超平面上に拘束される特性に着目した故障検知手法を提案した。本手法の拡張で故障センサの出力値推定を行うことにより、故障時にも正しいセンサ応答値を推定し出力することが可能となった。また、故障時の誤差は 10% 以内に納まることが実験的に確認された。本成果はリハビリ支援ロボットの安全性を確保する基盤となる技術であるため、特許出願している。そのほか、本分野のトップカンファレンスの一つである *International Conference on Intelligent Robots and Systems* に複数発表されている。

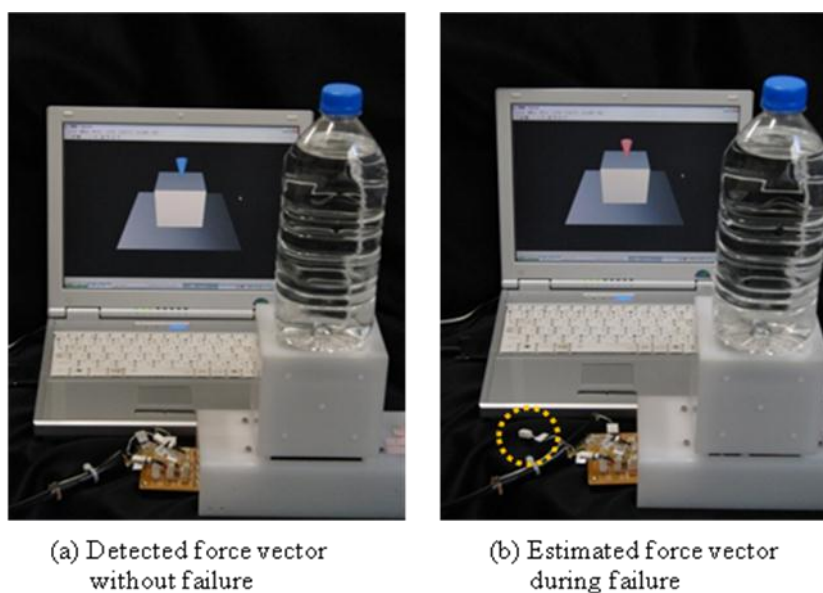


図 2 正常時と断線時の外力計測結果の比較

3. 多次元関節可動域試験システム

ロボットを導入することにより定量的な評価が容易になる施術の一例として、上肢用リハビリ支援ロボットを利用した関節可動域測定の方法を提案した。時系列で保存された手先の位置情報から情報圧縮された可動域のデータを抽出する方法を示した。従来は関節角などの一次元のデータで可動域を記録していたが、本来人の四肢の可動域は空間的分布を持つものである。健常者を被験者とする実験により、関節毎に試験を行う従来の手法よりも詳細なデータが得られることが確認された。それに対して試験の時間は短く、従来の方法との差は見られなかった。また、抵抗運動可動域試験の手法を新たに提案した。本提案法を実装した試験によりロボットを用いた可動域試験はその空間的分布を得るのに適していることが示された。また、可動域の分布のみならず、どの方位に力が多く出せるかを調べられることが確認された。換言すれば、空間内での人の上肢の運動能力を運動学、力学の両面から評価することが可能となった。本成果は今後国際会議および論文誌にて発表の予定である。

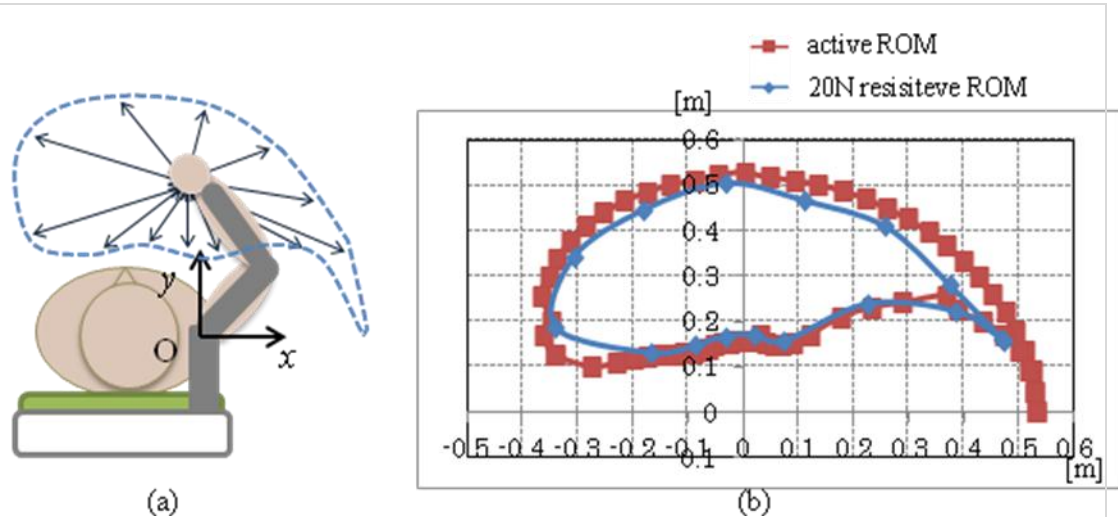
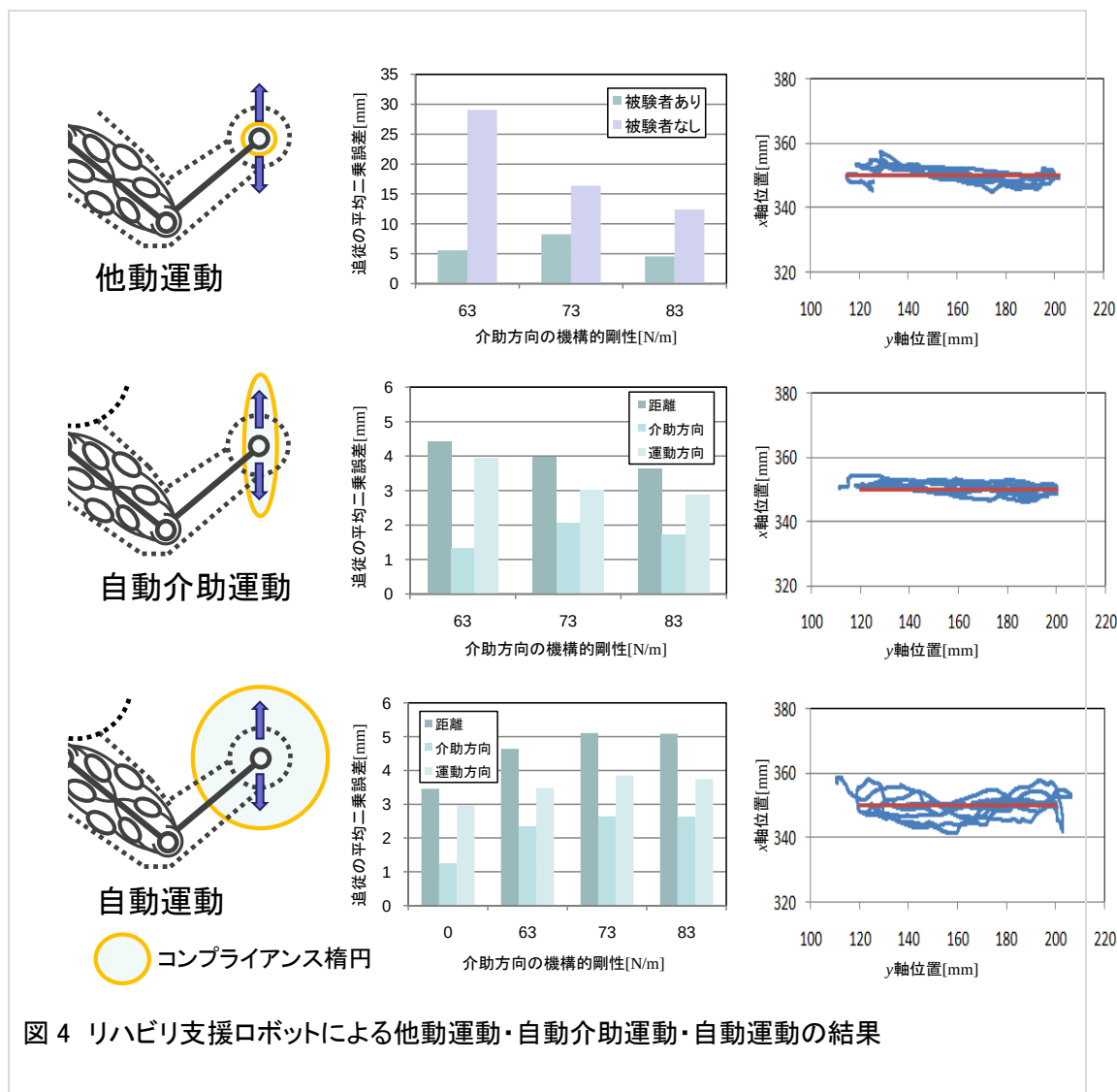


図 3 多次元関節可動域試験の模式図と自動運動・抵抗運動可動域の計測

4. 患者の状態によって運動の介助・誘導を段階的に調整する剛性制御系

運動療法では患者の持つ障害の度合いによって他動運動、自動介助運動、自動運動、自動抵抗運動と異なるメニューで訓練する。他動運動から、より自律性の高い運動である自動介助運動、自動運動へと徐々に移行するためには療法士によるアシスト動作を段階的に弱める必要がある。ロボットを用いた場合には定量的な評価に基づき、アシストの度合いを制御で調整することが可能になると考えられる。そこで、剛性制御のパラメータを陽に調整し、ロボットによるアシスト動作の度合いを段階的に設定するためのリハビリ支援システムを開発した。自律性の低い運動では患者の動きを拘束するために制御剛性を高く設定し、自律性の高い運動では逆に制御剛性を低く設定するのが望ましい。また、自律介助運動のように指向性を持った介助を行うためには剛性楕円の設定が必要であることが明らかになった。本成果は原著論文として *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* に掲載されたほか、国内会議、国際会議で複数発表されており、既に国内外から高い評価を得ている。



3. 今後の展開

これまで3年の研究期間で力覚信号処理技術と力覚に基づくリハビリ支援の制御技術を開発したことでトレーニング中に被験者の状態を同時に調べる事が可能となっている。残りの研究期間では、統計的処理により複数の被験者の情報からリハビリに資する情報を抽出する手法を開発する。そして、集められた運動療法のデータから新たな付加価値を生み出す技術確立し、その方法論をまとめる予定である。

4. 自己評価

これまで独自に開発してきた力覚信号処理の基礎技術をリハビリ支援ロボットというアプリケーションに実装することにより、過去に類を見ないリハビリ支援の新しいサービスが可能になることが確認された。現時点では順調に計画が進んでいるが、未だリハビリ支援ロボットをネットワークで繋ぐ利点を明確に示す成果が得られていないため、残りの期間で目標の達成を目指す。

5. 研究総括の見解

リハビリ支援ロボットが患者の状態を測るツールとして有効であることに着目した研究である。訓練中のセンサ情報を有効利用する新たなサービスの創出を目指し、人に接する機構の構築、その安全技術、患者の状態を推定する力覚信号処理技術など、力強く技術開発を進めている。提案の力覚信号処理により患者の運動能力・体調を定量化できることが既に示されており、概ね当初の計画通りに進んでいる。情報技術と力覚信号処理技術の導入によって、労働力の代替という枠組みを超えた新たなリハビリ支援ロボットの方向性を示している点が評価できる。しかし、ネットワークに繋ぎデータベースを自動生成する方法、大規模化したデータを処理する方法など、解決すべき課題は残されている。今後は、ネットワークを介した情報獲得と構造化の研究を進めて欲しい。

6. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. M. Kamibayashi, S. Sakaino, T. Tsuji: "Evaluation Indices of Stiffness Control for Its Performance Comparison," *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 8, Issue 1, 2013. (in press)
2. T. Tsuji, R. Hanyu: "Fault Tolerance Measurement Using a Six-Axis Force/Torque Sensing System with Redundancy," *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2010)*, 2010, pp.1890-1895.
3. N. Kurita, S. Sakaino, T. Tsuji: "Whole-Body Force Sensation by Force Sensor with End-Effector of Arbitrary Shape," *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2012)*, 2012.
4. T. Tsuji, T. Yokoo, S. Sakaino: "High bandwidth attitude control based on musculoskeletal system with biarticular muscles," *Proc. The 38th Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON'12)*, 2012.

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 1 件

発 明 者: 辻俊明、羽生良輔

発明の名称: 外力検出インタフェースの故障検知方法

出 願 人: 埼玉大学

出 願 日: 2010/6/9

出 願 番 号: 特願 2010-131795

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

主要な学会発表

1. 辻 俊明, 大西 公平: "筋骨格アクチュエータに基づくモーションコントロール," 電気学会誌, 2012, Vol. 132, No. 9, pp. 606-609. (解説記事)

2. T. Yokoo, T. Tsuji, S. Sakaino, S. Abe: "Development of a Physical Therapy Robot for Rehabilitation Databases," *Proc. IEEE Workshop on Advanced Motion Control (AMC2012)*, 2012.
3. 横尾知典・辻 俊明:"二関節筋を持つ空気圧人工筋駆動ロボットアームにおける先端剛性制御法", 電気学会産業計測制御研究会, IIC-11-019, 2011.
4. 横尾知典・辻 俊明・境野 翔・阿部 茂:"2 関節筋を持つ空気圧人工筋駆動リハビリ支援ロボットによる抵抗運動のための力制御", 電気学会産業応用部門大会, 2011.
5. 辻俊明・横尾知典:"2 関節駆動メカニズムに基づく角度剛性制御", 日本ロボット学会学術講演会, 3P1-4, 2012.
6. 山田充・横尾知典・境野 翔・辻 俊明・金子裕良:"速度情報に基づくりハビリ支援ロボットの評価指標", 電気学会産業計測制御研究会, IIC-12-157, 2012.
7. 辻 俊明・横尾知典:"角度剛性および姿勢の制御における多関節筋の意義", 平成 24 年電気学会全国大会シンポジウム, 2012.
8. 辻 俊明:"生体機構に学ぶ筋骨格の運動制御", 日本生理学会シンポジウム, 2012.
9. 辻俊明・横尾知典:"上肢リハビリ支援ロボットによる関節可動域のデータベース化", ロボティクス・メカトロニクス講演会'2012, 1A2-N09, 2012.

研 究 報 告 書

「作業プロセスの環境非依存化による作業集合知の形成」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成21年10月～平成27年3月

研 究 者: 長谷川 晶一

1. 研究のねらい

人の知識は、その人の身体と身体が置かれた環境において機能する。また一方で、人は知識を記号にして他者に伝える事ができる。以下、身体と環境において機能する形式の知識を身体知、他者に伝えることのできる言葉、図絵、映像、音声、ジェスチャ等の表現を記号と記す。

記号の意味は流通によりある程度個人を越えて伝わるようになるが、身体知から記号への変換と記号から身体知への変換は異なる人の中で行われる。このため記号を提示しても身体知が伝わるとは限らない。本研究は、身体知の集合知を可能にするために、身体知と記号の変換方法を一致させることを目的とする。

2. 研究成果

(1) 概要

身体知と記号の変換を、個人を超えて一致させるための手法として、次の2つの手法を提案し、手法の有効性を示すために、それぞれ記号化支援システムを試作している。

1. 物理シミュレーションによる記号化支援では、作業手順を不足なく同一視点で記述することを支援するため、手順に従って動作するバーチャルロボットと、バーチャルロボットが作業を行うバーチャルリアリティ環境を構築し、作業を可視化することで、記号の意味が確認できるようにする。

2. 感覚提示による記号化支援では、運動を計測し意識しやすい感覚に提示することで、身体運動を個人毎の感覚の違いを越えて、記号に変換することを支援する。

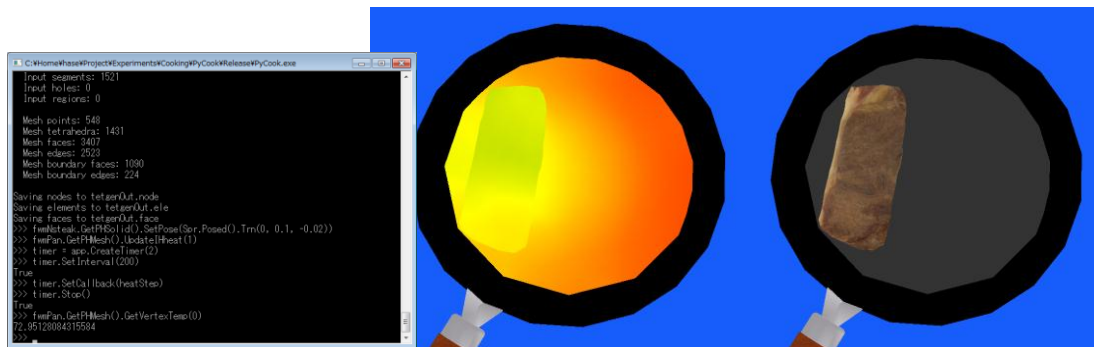
(2) 詳細

1. 作業の物理シミュレーションによる記号化支援

人はそれぞれの方法で身体知を記号化してしまう。また、人の意識は上手く作業できているときには身体知の存在に気づかず、上手く行かなくなって初めて問題点と対応策に気づき、記号化できる。このため、記号化を行う記述者が、作業に必要な身体知をすべて記号化できるとは限らない。また、記号の受容者が記号を身体知に変換できるとは限らない。

記述者が、料理学校の教師のように、記号を身体知に変換して作業行う受容者を観察できる状況では、記述者は記号の不足や問題点に気づくことができる。このため同一の受容者による作業を観察できれば、記述者に依らず、同一の受容者が受容可能な記号を記述できると考えられる。また、受容者が不器用で事前知識を持たなければ、多くの人が変換可能な記号を記述できる可能性がある。

本研究では、同一の受容者と受容者が作業するための同一の作業環境を用意するために、物理シミュレーションによる作業環境と、その中で記号に基づいて作業を行うロボットを計算機上に用意する。具体的には、作業として料理を取り上げ、動力学、熱伝達、食材の変化、映像・音響提示が可能な料理シミュレータを作業環境として作成している。また作業を行う同一の他者として、シミュレーション環境内で、プログラムに基づいて作



スクリプトによる操作に基づく料理のシミュレーションと可視化

業を行う仕組みを構築している。

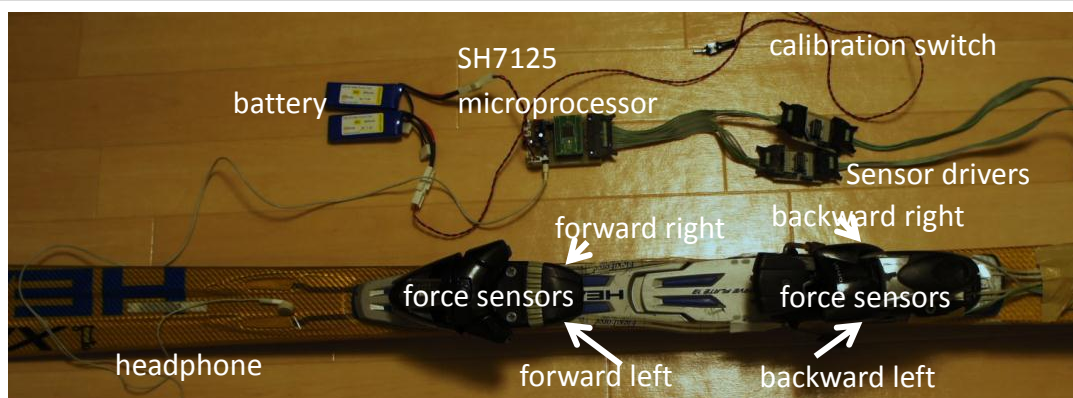
動力学シミュレータと物体内・物体間の熱伝達を有限要素法によるリアルタイムシミュレーションにより実現した。有限要素法は様々な用途で用いられているが、剛体運動と熱伝達を錬成し実時間シミュレーションするものは世界初であり、特に変化する接触に応じた熱伝達計算を実時間で行う点に新規性がある。国内会議[主要な学会発表 1]で発表したほか、論文投稿を準備している。

また、物理シミュレータを Python インタプリタで操作できるようにし、Python スクリプトにより食材の投入や反転操作が可能なシミュレーション環境を作成した。また加熱による食材変化をコンピュータグラフィックスにより可視化した。

2. 感覚提示による記号化支援

身体を用いた巧みな作業は技と呼ばれる。技の言語化が技の習得に効果的だと知られているが、技に必要な身体運動と身体感覚に気づくことができないとうまく言語化できない。言語化と運動を繰り返したり、それらに基づいた指導を受けたりすることで、身体運動と身体感覚に気づく事ができるようになってはじめて達人の言が理解できるようになり、そうなれば比較的すみやかに技を身につけられる事が多い。

本研究では、技に必要な身体運動を計測して意識しやすい感覚に提示する。これにより、身体運動を直接記号化できる。この記号を基点に技を記号化することで、記号と身体知の変換方法を一致させる。具体的には技としてスキーマのターンを取り上げ、スキーマターンで重要なスキーマへの加重をリアルタイムに可聴化する。加重を計測し可聴化するデバイスを作成した。



作成した加重可聴化デバイス

SAJ2 級程度のスキーヤー2 名がデバイスを用いて可聴化しながらショートターンをしたところ、1 名が大きな体勢の崩れが生じる数ターン前に原因があることに気づきこれを指摘し、もう1 名がすぐに同意し、同じ経験をしたことを報告した。これらの成果を Augmented Human International Conference で発表[論文発表 1]し 3rd Best Paper Award[受賞 1]を受賞した。

3. 今後の展開

A. 作業の物理シミュレーションによる記号化支援

まず、シミュレーションによる記号化支援の有効性を確認する。その後、シミュレーションの範囲の拡大と手順記述手法を検討し記述を容易にする。

(1) 記号化支援システムのプロトタイプ作成

ステーキなど焼き操作が重要な料理について、提案手法による記号化が可能か評価する。この段階では、料理をシミュレーションには Python によるプログラミングが必要となるので、研究者が間に入って記号化を助ける。具体的には、記述者の指示に従って研究者が Python プログラムを書き、シミュレーション過程と結果を記述者に見せ、記述者の指示に従ってプログラムを修正するという手順を繰り返す。

また、熱伝達と加熱による食材変化の可視化について、実測値との比較を行い正確なシミュレーションとする。これによりシミュレーションに依る焼き操作の再現ができるようになる。

(2) シミュレーション範囲の拡大

焼き操作時の油脂や汁による熱伝達や、煮操作などを再現するための流体シミュレーション手法を提案する。液体表面だけをモデルとして持ち、流体の操作が可能になるような簡易高速流体シミュレーション手法の確立を目指す。

(3) 手順記述手法の検討

シミュレーションにより作業を再現するためには、手順の記述に基づいてシミュレータ内で作業が行われる必要がある。プログラムとして手順を記述することで再現が可能になるが、プログラムの記述にはスキルと慣れが必要であり、身体知を持つ記述者がプログラムを記述できるとは限らない。また記述に手間が掛かり過ぎては実用性に欠ける。ビジュアルプログラミング、オブジェクト指向、オントロジー等、プログラミング研究、知識獲得・記述研究を参考にしつつ、容易に手早く料理の手順を記述できるようにするため

の方法を検討する。

B. 感覚提示による記号化支援

直感的な感覚提示により、計測に基づいた記号化が自然になされる可能性が示唆されたので、スキー指導の場で可聴化システムを利用し、どのような記号化がなされるか観察したい。また運動は、スキーの斜面、コースどり、身体の姿勢・速度、意図するターン等の環境に依存するので、ある記号化が行われた際の環境を分析・記録する。GPSと6軸コンパス（地磁気・加速度計）を記録し、身体の動力学モデルと制御器の最適化問題を解くことで、身体運動、関節トルク、制御指令を求め、これと記号（発言）を関連付けて整理したい。

4. 自己評価

研究開始当初、不勉強や錯誤が多くあったため、何をどうすれば良いかわからない状態が続いてしまった。異分野の研究を始めたいと強く思っていたが準備不足だった。

物理シミュレーションは多くのことを教えてくれるが、知能を作る研究に物理シミュレーションが活かされていないと思い、何とか研究を始めたかった。当時、何をどう勉強し、何を研究すれば思いと繋がるのか分からなかったが、それが分かってきた点は良かった。研究内容は定まったので今後成果に繋がる研究を進めたい。

5. 研究総括の見解

作業の計測や記録を集積して集合知とすることで、作業と結果の改善や支援、作業内容の検討や討議の支援などにつなげることを期待していた。これまでのところ、知識を統合するために、知識記述の視点の統一が必要なことに着目して研究を行なっている。作業手順に実行環境を与えることによる知識獲得支援手法と、感覚提示による記述獲得支援手法を提案し、必要なシミュレーション技術、計測提示技術の開発を行っている。

未だ道半ばであり、知識獲得への応用や有効性を評価が行えるような段階には至っていない。人工知能という、長谷川研究者にとって新規な分野に果敢に挑戦しているが、人工知能技術で何が可能かという検討が十分でないように思われる。以下の研究成果と受賞リストにあるように、物理シミュレーションでは最優秀論文を発表する力を有するのであるから、人工知能研究者と真摯に建設的な議論を行い、新規で有用な技術を開発し、成果を還元することを期待したい。

6. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Shoichi Hasegawa, Seiichiro Ishijima, Fumihiko Kato, Hironori Mitake, Makoto Sato : 'Realtime sonification of the center of gravity for skiing', AH '12 Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference , 2012.(フルペーパー査読国際会議口頭発表)

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 0件

(‘Realtime sonification of the center of gravity for skiing’を米国特許商標庁に仮出願したが、先行特許との差分が小さく権利化による利益が少ないと判断し、出願を中止した)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

主要な学会発表

1. 加藤史洋, 長谷川晶一: 料理シミュレータのための有限要素法による熱伝導シミュレータ, 日本バーチャルリアリティ学会大会(VRSJAC), 32C-5, 2011. (査読なし)
2. 長谷川 晶一, 石島 誠一郎, 加藤 史洋, 三武 裕玄, 佐藤 誠: スキーのための加重のリアルタイム可聴化, エンタテインメントコンピューティング 2012 ワークショップ (査読なし)
3. 長谷川 晶一, 三武 裕玄, 田崎勇一 動作行動開発のための物理エンジン
Springhead: 日本ロボット学会誌 Vol.30, No.9, pp.19-25, 2012. (解説記事)

受 賞

1. AH'12, the third Augmented Human International Conference
Best Papers Awards (3rd), Shoichi Hasegawa, Seiichiro Ishijima, Fumihiko Kato, Hironori Mitake and Makoto Sato, “Realtime Sonification of Center of Gravity for Skiing”
(2012/03/08)