

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

ヒューマンインタフェース技術は情報の「認識(入力)」と我々の「運動(出力)」をよりスムーズに接続するための技術であるが、情報認識のためのディスプレイ技術が主に視聴覚において長足の進歩を遂げる一方で、我々の運動出力は長い間キーボードやマウスの操作に限定されてきた。しかし近年、身体運動計測技術が安価に入手可能となったことに伴い、全身運動を用いたヒューマンインタフェースが一般用途に普及しつつある。こうしたインタフェースはビデオゲーム、遠隔操縦、スポーツ等における運動教示、リハビリテーション等多岐にわたる応用が考えられるが、運動した際に本来感じるべき運動感覚の呈示が必要となる。

従来の運動感覚提示は主にロボット技術の援用によって行われており、典型的にはユーザがロボットマニピュレータの末端を把持するものであった。大型化、高コスト化は避けられず、遠隔医療のような限定された場面でしか利用できなかった。また錯覚現象による擬似的な力覚提示を利用する試みはいくつか存在したが、微かな力を感じる程度であり、力覚提示手段として一般的に利用できる強度を持った現象ではなかった。

これに対して本研究はまずハンガー反射と名づけた皮膚圧迫によって生じる頭部回旋運動現象を利用する。本現象は軽い皮膚圧迫で強い主観的な回旋力を生じる。この現象の機序を解明し身体全体へ適用、全身の運動を誘発する手段として確立する。さらに関節部への触覚提示によって身体姿勢を誤認させる手法、筋骨格内の深部感覚受容器に対する刺激によって擬似的な運動を生起させる手法も検討し、小型軽量の装置による運動感覚提示のスタンダードを築く。

2. 研究成果

(1) 概要

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認する現象である。この現象の生起条件は頭部の特定部位に圧迫が加わることであったが、最終的には皮膚の剪断(横ずれ)方向に加わった歪が外力と誤認され、これに従う形で運動が生じている現象であることが明らかとなった。

この機序に基づき、身体の他の部位でも同様の現象が生じるかを確認し、手首、足首、胴のいずれの部位においても同様の現象が強く生じることが明らかとなった。

本現象は主観的には強い外力によって姿勢を矯正されるものであるため、一種の矯正具としての応用が可能と考えられた。そこで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への応用を行った。本疾患は従来、ボツリヌス毒注射、脳深部刺激等の高コストな対症療法しか存在しなかったが、これらに比べて圧倒的に患者の負担が少ない手法

となる可能性が高い。現在複数医療機関による治験を行っている。

運動に関する錯覚現象としては他に触覚や視覚によって引き起こされるものが知られているが、こうした従来のクロスモーダル(感覚間相互作用)現象で見られた錯覚は感覚量の高々10%程度を変化させるにとどまり、応用用途は限定されると考えられた。しかしハンガー反射はこうした従来の手法に比べて圧倒的に強い抗いがたい錯覚を生じた。この原因の一つとして、皮膚の剪断変形が広範囲な皮膚に効率的に刺激を与えるものであることが考えられた。つまり運動に関する感覚は非常に多くの手がかり(皮膚感覚、深部感覚、視覚等)の複合によって生じているため、強い錯覚の生起のためには一種の「多数決」に勝つ必要がある。従来の皮膚感覚による運動感覚の錯誤の多くは指先のごく一部への感覚呈示を行ってきたが、単純な大面積化が強い錯覚生成の決め手となる可能性がある。この考えに基づき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。また身体の各関節付近の皮膚刺激を行い、擬似的な運動感覚として誤認させる手法を開発した。

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、運動感覚呈示に直接寄与する深部感覚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。この考えから腱への電気刺激による力覚呈示を実現し、明瞭な運動錯覚を生じることを初めて示した。

(2) 詳細

1. ハンガー反射現象の解明と臨床応用

ハンガー反射は頭部をハンガーで挟むことで特定部位を圧迫すると頭部が付随に回旋してしまう錯覚現象である。本現象は他の力覚に関するどの錯覚現象よりも強力な錯誤を生じるため、小型軽量の力覚提示を実現する突破口となる可能性がある。本研究期間の前半において本現象の生起条件は頭部の特定部位に圧迫(垂直方向の力)が加わることであったと考えていたが、同様の圧迫を身体の他の部位に与えても類似の現象が生じないという問題があった。これに対して皮膚の剪断(横ずれ)方向に歪を加える装置を作成すると、従来の頭部回旋が生じていた圧迫部位以外の部位を刺激してもハンガー反射が安定して生じることが確認された。すなわち、ハンガー反射においては皮膚の剪断変形がもっとも重要であり、これが外力と誤認され、従う形で運動が生じている現象であることが明らかとなった(図1)。また頭部が前後に長い楕円形状であることが、ハンガー等を装着した際に一定方向の皮膚変形を生じやすいという幾何学的な問題であることが明らかとなった。



図1 (左) ハンガー反射の機序 (右) 剪断変形を生じさせる装置
この解明された機序に基づき、身体の他の部位でも同様の現象が生起することを確認した

[受賞3]。特に手首、足首、胴はいずれも頭部と同様断面は楕円形であり、ハンガー様の装具を装着して皮膚変形を生じやすい。これらのいずれの部位においても同様の現象が強く生じることを見出し、さらに力覚提示として汎用化するため、装着後に皮膚変形を調整する機構を作成した(図 2)。

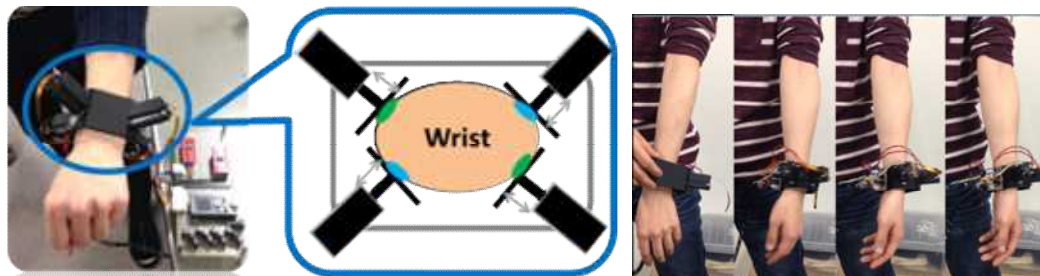


図 2 前腕用力覚呈示装置

ハンガー反射現象の医療応用も進めた。ハンガー反射と同様の頭部姿勢の異常に関する疾患として痙性斜頸が知られている。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精神的、経済的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緩和することが判明した(図 3)。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であり、この治験を実現するためにハンガーに替わる装具の開発を行なった[特許1、4] (図 4左)。また症状の定量評価に関してこれまで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した(図 4)。



図 3 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

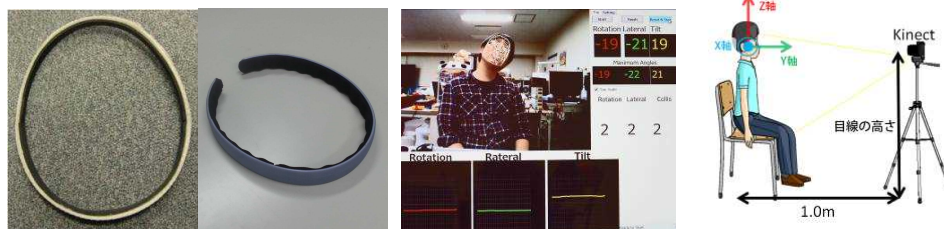


図 4 (左) プラスチック製装具、アルミ製装具 (右) 症状スコアリングシステム

2. 皮膚感覚による運動感呈示

皮膚感覚提示によって運動に関する感覚(位置感覚、力覚)を生起する錯覚現象は従来も

知られてきたが、ハンガー反射のように抗いがたい力を錯覚させる現象は他に知られていなかった。この原因の一つとして、皮膚の剪断変形が広範囲な皮膚に効率的に刺激を与えるものであることが考えられた。従来の皮膚感覚による運動感覚の錯誤の多くは指先のごく一部への感覚呈示を行ってきたが、単純な大面積化が強い錯誤生成の決め手となる可能性がある。この考えに基づき、大面積の触覚提示を実現する手法として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。電気刺激の採用により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しうるシステムが完成した[論文 1、2、3、受賞 1、2](図 5 左)。また身体の各関節付近の皮膚に振動刺激を行うことで、擬似的な運動感覚として誤認させる手法を開発した(図 5 中右)。本手法は自己の姿勢に関する錯覚を生じるだけでなく、例えばロボットの関節を想起させる振動を用いることで身体が変容する体験を生み出す装置となった[受賞 4、5]。



図 5 (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

以上までに述べた運動感覚呈示は皮膚感覚による錯誤を用いたものであるが、運動感覚に直接寄与する深部感覚器を刺激する手段があるなら最も効率のよい提示手段となりうる。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、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ことを検証した(図 6)[論文 4、5]。その結果強力な運動錯覚を生じうること、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判明した。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。



図 6 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、一部

は医療応用に進展し、また運動感覚を生じさせる触覚提示という分野を開拓した。

3. 今後の展開

(1) ハンガー反射の脳内プロセスの解明

本研究では、ハンガー反射について生起条件が明らかとなり、「皮膚せん断変形の外力としての誤認」が力覚の生起および回旋運動の生起に繋がっている点までを明らかにした。しかし次のような疑問は未解明である。第一に誤認された外力によってなぜ自発的な回旋運動が生じるのか(これは外力に「対抗」する向きに回旋が生じてても良いはずであるが、実際には外力に「追従」する)。第二にこの自発的な回旋運動はなぜ自己の運動とは認識されずに他者によって「回されて」いると感じるのか、という疑問である。以上の疑問点は結局、ハンガー反射の脳内プロセスに関する疑問である。今後はこの錯覚現象を、「無意識下の反応」と「意識下の認識」に分けたモデルで説明可能と考えている。ハンガーを装着することによって活動する脳内部位が特定されることにより、ハンガーの装着が「瞬間的な矯正具」としての役割しか果たさないのか、「長期の運動学習装置」としての役割を果たすのかが明らかとなり、医療福祉に応用する際の合理性と限界を説明することになると考えている。

(2) 全身触覚呈示装置の開発

本研究を通じて電気刺激による大面積触覚呈示と関節部への振動による擬似身体姿勢呈示の手法を確立した。これらの手法はビデオゲーム等のエンタテインメントへの応用が容易であると考えられ、実際にデモンストレーション等を行ってきたが、その中で実用に足る触覚呈示のためには身体計測から触覚呈示までの遅延時間を数ミリ秒以下に抑えないと没入感がかえって損なわれることが判明している。今後はこうした計測の簡略化手法を確立することによって、コンテンツ分野での実用化を行っていく。

(3) 感覚器刺激による運動感覚の生起

筋や腱に存在する運動感覚器を刺激することによる運動感覚の生成は原理的な検証は行ったものの、3割程度の被験者では力感覚のみ生じ運動する感覚を生じないことが明らかとなっている。この問題を解決するため頭部搭載ディスプレイや皮膚感覚呈示を組み合わせた複数感覚の重畳呈示を行い、安定した運動感覚呈示を実現する。さらにリハビリテーションへの応用を行う。

以上の三点は今後も継続的な研究開発を行い、(1)については2年以内の解決、(2)については1年以内の実用展開、(3)については3年以内の実用展開への着手を行う。

4. 評価

(1) 自己評価

(研究者)

本研究は、運動ないし運動感覚を低コストに生起させるインタフェースの開発を目標として、次のような科学技術への貢献および社会実装を実現した。科学技術への貢献に関してはまず

ハンガー反射によって運動を生じる錯覚現象の機序を明らかにし、それに基づいて全身への力覚呈示手段とした。現在複数の研究グループが同様の手法を外科手技の伝達等に利用する提案をするに至っており、本分野に一定の影響を与えることが出来たと考えている。さらに感覚提示に関する原理的な考察から腱受容器電気刺激によって運動感覚を直接的に生起できることを示し、今後の運動感覚に関する科学的解明に有用なツールを提供した。社会実装に関してはハンガー反射の機序に基づく痙性斜頸患者のための装具の製品化(2014年12月段階で医療機器番号取得済み)まで行っており、運動障害に関するトップカンファレンスにおいても海外の専門医から強い関心を集めている。本疾患の患者は当然世界中に居り、今後高価な薬品や手術の恩恵を得られない発展途上国において特に真価を発揮すると予想される。本研究では人の錯覚現象の解明からインタフェース応用までの一連の流れを示すことが出来たが、今後さらに具体的な応用事例を増やしていく予定である。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

本研究の主要な成果は、頭部の圧迫による回旋現象であるハンガー反射に着目し生起条件を初めて明らかにすると共に、医療応用に結びつけ、製品化まで実現したことである。若手の大学研究者として、異例とも言える優れた研究活動である。まずハンガー反射現象が、当初想定された圧迫によるものではなく、皮膚の剪断変形によって生じるものであることを明らかにし、この成果に基づいて身体各部で同様の現象が生じることを確認している。さらにハンガー反射から得られた知見を頭部姿勢異常の疾患として知られる痙性斜頸へ応用し、症状を抑制する装具を開発している。実際に、全国7つの医学部および大学付属病院による治験へとつなげ、また医療機器としての製品化も行っていることは高く評価できる。さらに運動錯覚現象を身体各部で生起させるという観点から、関節部への振動呈示や手掌部全体を覆う触覚提示、腱受容器の電気刺激による運動錯覚生起といった新たな手法を確立している。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、医学療法やリハビリテーションなど幅広い展開が期待される。本研究の成果が認められ、触覚のトップカンファレンスにおけるプログラムチェア就任や、平成25年度文部科学大臣表彰を受賞するなど、本分野の若手トップランナーとして注目されるに至っている。

5. 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. EuroHaptics'10 Proceedings of the 2010 international conference on Haptics – generating and perceiving tangible sensations: Part II, Lecture Notes in Computer Science 6192, Springer-Verlag, pp. 58-64, 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, Proceedings of 9th International Conference on Advances in Computer Entertainment, Lecture Notes in Computer Science 7624, Springer-Verlag, pp. 513-516, 2012.
5.	H. Kajimoto: Illusion of Motion Induced by Tendon Electrical Stimulation, in Proceedings of IEEE World Haptics Conference, pp.555-558, 2013.

(2)特許出願

研究期間累積件数:4件

1.
 - 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: 特願 2010-047789, 特開 2011-147749, 特許第 5552844 号
2.
 - 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: 特願 2010-130532
3.
 - 発明者: 横山 牧、梶本 裕之
 - 発明の名称: 端末装置及び入力補助シート
 - 出願人: 電気通信大学
 - 出願日: 2013/3/11
 - 出願番号: 特願 2013-47852, 特開 2014-174809
4.
 - 発明者: 梶本 裕之、佐藤 未知、井口 竹喜, 旭 雄士
 - 発明の名称: 装具
 - 出願人: 電気通信大学, 富山大学、菊池製作所
 - 出願日: 2014/9/29
 - 出願番号: 特願 2014-198623

(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)

受賞

1. Best Presentation Award, 2010/7/10, H. Kajimoto, "Electro-tactile Display with



Real-time Impedance Feedback”, EuroHaptics2010

2. 優秀講演賞, 2011/12/23, 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.
3. 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.
4. Best Paper Silver, 2013/11/15, Y. Kurihara, T. Hachisu, K. J. Kuchenbecker, H. Kajimoto, Virtual Robotization of the Human Body via Data-Driven Vibrotactile Feedback.10th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE 2013).
5. Emerging Technologies Prize, 2013/11/22, Y. Kurihara, T. Hachisu, K. J. Kuchenbecker, H. Kajimoto, Jointonation: Robotization of the Human Body by Vibrotactile Feedback. ACM SIGGRAPH Asia 2013 Emerging Technologies.