

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12080

研究課題名(和文)ソフトタッチの運動生理学的解析に基づく接触による高次コミュニケーションの設計

研究課題名(英文)Kinesiological analysis of gentle touch and design of intelligent communication

研究代表者

中村 裕一 (NAKAMURA, Yuichi)

京都大学・学術情報メディアセンター・教授

研究者番号：40227947

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：(1)筋電図より、複数筋の「同時活性」、「介在ニューロンを經由した脊髄反射」、「皮質経路反射」のそれぞれを示唆する信号成分、および、顕著な相関のない独立の活性成分を検出することを試みた。随意的な運動成分とのはっきりした分離は難しいものの、特徴的な運動において、顕著な特徴が検出されることを確認した。

(2)ソフトタッチに関わる、「触る」、「押す」、「押しつける」、「自分を支えるために押す」などの意図を持った接触動作において、動作意図の認識を行う手法について検討した結果、筋協調のパターンのみから動作の意図推定がある程度可能であることがわかってきた。

研究成果の概要(英文)：(1) We investigated the analysis of reflex or voluntary contractions of agonist, congener, and antagonist muscles based on the coherence of the measured myoelectric signals. Some features of muscle synergy were well detected, though the clear distinction in detail is still difficult.

(2) Our experiments suggests that recognition or discrimination of the motion intentions such as "touching", "pushing", "pushing away", etc., is partially possible by only using the above muscle synergy patterns detected from measured myoelectric signals.

研究分野：情報メディア工学

キーワード：ユーザインタフェース 接触によるコミュニケーション 運動生理学 高次コミュニケーション ソフトタッチ

1. 研究当初の背景

接触、つまり、皮膚感覚や体性感覚によるコミュニケーションは人間のコミュニケーションにおいて重要な位置を占めている。例えば、ユマニチュードと呼ばれる認知症の介護手法では、触れること、支えること（立ち上がらせること）などを、視覚による（患者の注意を引きつける）方法や音声による対話と同等の重要性を持つものとしている。近未来の社会では、ロボットが混雑した人ごみの中を移動していてロボットと人間との接触が避けられないケースや、ロボットが人間を誘導したり何かを教えたりするケースのように、ロボットや機械が積極的に人間に接触することが必要となる。このような状況において、やさしく人間に触れたり、また、必要な支援を行ったり、必要な協力を引き出したりするメカニズムを探る必要がある。さらに、このような考え方は、日常生活での行動支援（生活支援・危険防止）、スポーツや技能の習得、リハビリテーション等、種々の分野での応用も期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、「ソフトタッチによって双方向的な情報伝達と高次の合意形成が可能であること」を前提としている。例えば、働きかける側が軽く押すことによって、働きかけられる側に存在を気づかせるとともに、「誘導したい」との意図を伝えること、働きかけられる側が軽く引くなど、反応することによって「意図を了解した」ことを伝えることができることなどを仮定している。

これを検証するために、人間がソフトタッチでどのように体の機構を使っているか、また、人間同士でどのようにソフトタッチを使いこなすか、高次のコミュニケーションを成立させるかを詳細に解析することを目標とする。さらに、簡単なソフトタッチを機械に実装し、その可能性を見極めることも長期的な目標とする。将来的に、これらによって得られた知見が、人と優しく（物理的）接触をしながら移動・誘導・教示などの目的を果たすロボットの設計につながり、自律ロボットだけでなく、人間との力学的なインタラクションのある幅広い機械の設計指針として有用な知見となることを目指す。

ソフトタッチによるコミュニケーションは多層的かつ広い分野に関わる問題である。意図を基に運動生理学によって接触の行動が発生する過程、それが相手に

感覚として認知され、意図が伝わる過程、さらに合意が形成される過程まで多岐に渡る。つまり、運動生理学・コミュニケーション、ロボティクス等、基礎的な問題と応用が本質的に密に関わる。

このような問題に対して、運動生理学、コミュニケーションの面からアプローチする。

さらに、本研究ではこのような体性感覚によるコミュニケーションをロボットなどの機械に実装し、それによる人間とのコミュニケーションの実現を試みることも目的としている。ただし、本研究課題は萌芽の研究であり、この実施期間内での実現は困難であるため、期間終了後の中長期的なテーマとする。

3. 研究の方法

研究項目として大きく分けると、ソフトタッチに関する、(1) 人間の運動生理学的メカニズムの解析、(2) 接触デバイスの設計・実装と体性感覚呈示による情報伝達の性質の解析、を行った。研究の実施は、ブリストル大学（英国）、龍谷大学の協力を得て、主として京都大学で行った。

(1) ソフトタッチに関する人間の運動生理学的メカニズムの解析

ソフトタッチにおいても、人間の動作の目的や意図、また、対象への作用には多様なパターンがある。このような多様性に対応するために、本研究では、実際の動作における筋収縮の大きさ、タイミングの違いとそれによって実際に発現する運動との関係を調査した。

① 押す、引く、支える、叩く、等、様々な動作は、主に肘関節に対する主動筋とそれと同方向に働く協働筋、反対向きに作用する拮抗筋の協調関係、および、肩や手首の関節の動きとの協調関係から発現する。本研究では、肘におけるこのような筋シナジーを調べるために、種々の動作に対する筋電位と発生トルクの間関係を記録し、周波数解析、相関解析などを行った。ただし、肘の屈曲・伸展に関わる、上腕二頭筋、上腕三頭筋、上腕筋、腕橈骨筋、肘筋のうち、比較的正確に筋電位を計測できるのは、上腕二頭筋と上腕三頭筋であり、筋束としては上腕二頭筋の長頭と短頭、上腕三頭筋の内側頭、外側頭、長頭となる。これらの5つの筋束のみを計測することによって、協働作用、拮抗作用の解析、および、関節トルクの推定を行うことが可能かどうか等を含め、種々の実験を行った。

② 2リンク機構として、肘の簡単な力学的モデルを

設定し、押す、押し付ける、叩く、触る等の動作のシミュレーションを行った。

③ ①で設定した動作に対し、実際の動作時の協働作用、拮抗作用の筋電位の相関から特徴パラメータを設定し、この特徴量を用いて動作の種別の識別を行うことを試みた。つまり、主動筋、協働筋、拮抗筋の筋活性度の値の時間的变化、および、その変化の相関を特徴量とした時、この特徴量の組を入力にすることによって動作種別の推定を出力とするパターン認識が可能であるかどうかについて、種々の実験を行った。なお、これは、個人差に大きく左右される他、同じ個人でも計測時の体調やセンサの貼付け位置・方法等に左右される。そのため、条件を変えながら、複数人に対して調査した。

(2) 接触デバイスの設計・実装と体性感覚呈示による情報伝達の性質の解析

ソフトタッチのような体性感覚によって人間に情報に与えるデバイスの設計、実装を行った。これらのデバイスを用いて、他人の動作が伝わること、それによって、伝わった人の動作を支援できること等を確認した。

① 音と振動を用いて情報呈示をするデバイスを設計・実装した。振動によって、触る、軽く叩く等に近い感覚を与えた場合の効果を調査するとともに、装着者に動作を促したり、そのタイミングを伝える性能を確認した。

② 皮膚を伸張させることによって情報を呈示するデバイス (skin stretcher) を設計・実装した。押す、引く、触る等に近い感覚を与えた場合の効果を調査するとともに、上記と同様に、他人に対して動作を促したりタイミングを伝える性能を確認する。

4. 研究成果

(1) ソフトタッチに関する人間の運動生理学的メカニズムの解析に関して、以下のような成果が得られた。

① 筋活動を直接計測できない筋があること、また、上腕二頭筋の長頭と短頭のように、関節や筋の構造のために、個別に筋張力を計測することができない筋束がある問題に対し、これまでの手法ではこれらの協働筋が発揮する筋張力の比が一定であることを仮定していたが、実際には、これらの筋張力のバランスは大きく変化し得る。

そのため、本研究では、筋の協調関係を典型的なパターンに分け、各パターンごとに筋張力の推定を行う

表 1: 筋協調の類型化 (各成分が強いことをそれぞれのモードの条件とする)

	協働筋間	拮抗筋間
(1) 同時活性	モード I	モード III
(2) 皮質経由反射	その他	モード II
(3) 低相関	モード IV	その他

手法を提案した。まず、筋協調の状態を同時活性、皮質経由反射 (LLR: Long Loop Reflex)、低相関の 3 つに分類し、さらに、これを協働筋間、拮抗筋間で考えることにより、4 つの筋協調モードとそれ以外に分類し、表 1 とした。

実際の筋電図からこれらのモードを検出するためにはウェーブレットコヒーレンス (ウェーブレット相関) 解析を用いる。まず 2 つの筋 (筋束) の筋活性度 $x(t), y(t)$ に対してスケールパラメータを変化させながら複素ウェーブレット変換を行い、パワースペクトル $S_{xx}(\tau, f), S_{yy}(\tau, f)$ 及び、クロススペクトル $S_{xy}(\tau, f)$ を算出する。

$$W_x(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi_{\tau, f}^*(t)dt \quad (1)$$

$$S_{xx}(\tau, f) = \int_T W_x(\tau, f)W_x^*(\tau, f)d\tau \quad (2)$$

$$S_{xy}(\tau, f) = \int_T W_x(\tau, f)W_y^*(\tau, f)d\tau \quad (3)$$

このときのスケールパラメータを同時活性から皮質経由反射で想定される 100ms の遅れ時間に対応する範囲までとする。また、マザーウェーブレットとしては、モルレーウェーブレットを用いた。

続いて得られたパワースペクトル S_{xx}, S_{yy} 及びクロススペクトル S_{xy} を用いて式 (4) によりコヒーレンスの計算を行う。

$$r_{xy}^2(t, f) = \frac{|S_{xy}(t, f)|^2}{S_{xx}(t, f)S_{yy}(t, f)} \quad (4)$$

コヒーレンス値が高いことにより、そのスケール (時間的スケール) で筋の活性が同期していることがわかる。このようなコヒーレンスを複数のスケール、複数の筋ペアの間で計算することにより、上記のモードを検出する。

結果として、等尺・等張条件で筋収縮を行った場合でも、協働筋・拮抗筋間のバランスが変化し、複数の

モードが交代して現れることが確認された。また、当然予想されることであるが、押す、支える等、動作の意図を変化させた場合にも、瞬間的な運動の性質に応じたモードが現れることが実際に観測された。例えば、肘の屈曲の場合のモード分けの条件は以下のとおりである。

モード I: スケール 0.04 (秒) において、主動筋・協働筋のコヒーレンスが 0.7 以上

モード II: スケール 0.04 (秒) において、主動筋・協働筋のコヒーレンスが 0.3 以下

モード III: スケール 0.04 (秒) において、主動筋・拮抗筋のコヒーレンスが 0.7 以上

モード IV: スケール 0.1 (秒) において、主動筋・拮抗筋のコヒーレンスが 0.6 以上

次に、それぞれのモードとして検出された区間に対し、各筋の活性度のばらつきを特異値の大きさと特異ベクトルの分布によって確認した。まず、協働筋に関する結果として、今回の試行データに関し、第一特異値と第二特異値の大きさの比が全て 5 以上、ほとんどの場合で 10 以上になった。また、モード分けしない場合に比べ、その値が大きくなっていることも確認された。さらに、この特異ベクトルを用いて関節トルクの計測値を推定した場合、モード分けした場合の方が有意に良い推定を行えることが確認された。

② 肘周りの動力学シミュレーションにはロボットの動作シミュレーションのためのソフトウェア (Open Dynamic Engine) を用い、実際の腕の重さその他をパラメータとして与えた。このモデルに対し、実際の人間の動作時に計測した主動筋、拮抗筋の筋電値から推定した関節トルクを与え、このような設定で、筋収縮から腕の運動が概ね再現できることを確認した。また、動作の目的を叩く、撫でる、押すなど、種々に変えた場合の上腕・下腕の筋活性度を計測し、それぞれの違いを動力学シミュレーションによって再現できること、また、逆に筋活性度の違いから動作の目的を推定できる可能性について確認した。

③ それぞれの動作 (意図) において観測された特徴を以下に示す。

(i) 「一定の力で押す動作、引く動作」では、動作中、モード I, モード II, モード III とともに頻繁に現れることが確認できる。一定の力を発揮するために運動調整が行われていることがわかる。またモード IV も

現れていることから、皮質経由反射による運動調整も行われている。

(ii) 「押し支える、引いて支える動作」では、動作開始時にモード I, モード III, モード IV が現れる。これは急な負荷変化に伴う、同時活性及び負荷補償であると想定される。一方、動作中盤ではモード II が頻繁に現れ、モード III やモード IV も時折現れる。協働筋の相補的な活性や拮抗筋による運動調整が行われていると想定される。

(iii) 「押し出す動作、引き寄せる動作」では、モード I は動作開始時と動作後半でピークが見られる。モード III は強く押す際にコヒーレンスが高まりスティフネスが上昇していることが示唆される。これは急な負荷変化に耐えるための同時活性であると想定される。モード IV は一定して現れており、負荷補償であると想定される。

(iv) 「触れる動作」では、動作中盤ではモード II とモード III が頻繁に変動することが確認できる。モード IV のコヒーレンスは後半に高まる傾向があり、この傾向は全試行で確認される。動作終了時はモード I が現れている。各モードが複雑に現れていることから、動作調整のために複雑な制御が行われていることが推定される。

動作意図によってこれらの違いが見られるため、逆に、各モードの現れ方から動作意図を推定することが可能であると予想される。それを以下のように確認した。まず、動作の開始から終了までを等間隔に 4 分割し、それぞれの区間について、各モードが現れている時間を積算して、それぞれの区間の特徴量とする。さらに、4 つの区間をまとめたものを 16 次元のベクトルとし、一動作の特徴量とする。実験では、上記の 4 種類の動作について各 10 試行ずつ、合わせて 40 試行を学習データとする。識別器としては、SVM(サポートベクターマシン) を用い、カーネル関数にはガウス関数を用いた。交差検定は leave-one-out 法を用いた。

その結果、同一被験者内では伸展について 79%、屈曲について 59% の推定精度となった。さらに、複数人のデータを加え、同様の識別を行った場合には、伸展が 68%、屈曲は 51% の推定精度となった。誤りの多くは「触れる」動作を「押す・引く」動作として推定してしまうものであった。両方とも、力の加減を調整する動作であるため、筋協調関係が似ていることが要因として挙げられる。

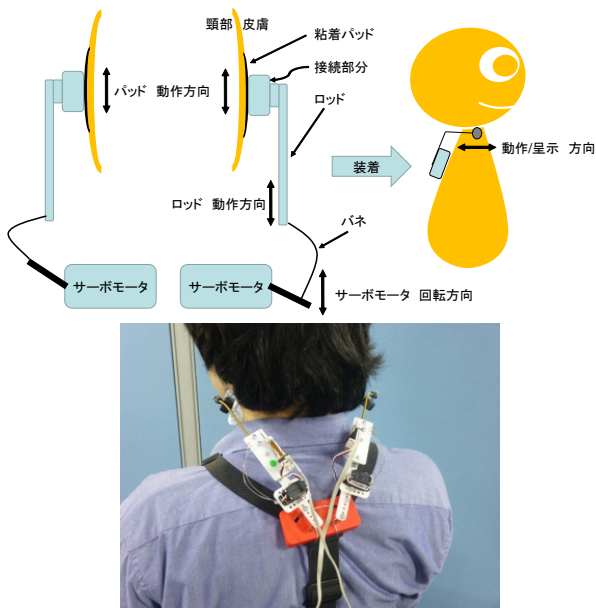


図 1: skin stretcher デバイス

この識別実験では、筋活性度の大きさ、つまり、筋張力の大きさを全く用いていないことが重要な点であり、我々が設定した筋協調のモードだけでも上記の程度の動作意図推定が行えることを明らかにしたことが新しい。実際の応用では、力の大きさや姿勢など、付加的な特徴を加えれば、より精度が上がることを期待できる。

(2) 接触デバイスの設計・実装と体性感覚呈示による情報伝達の性質の解析に関して、以下の成果が得られた。

① 音と振動を用いて情報呈示を行うデバイスを用いて動作を教示した場合の時間遅れや正解率をそれぞれ確認した。音だけの場合、振動だけの場合に比べ、音と振動の両方を用いた場合に、間違いや遅れが少なくなることが実際に確かめられた。

② skin stretcher の模式図を図 1 上段に、装着時の例を図 1 下段に示す。設計した Skin Stretcher 型デバイスによって装着者の動作が発現する系の基本的な性質を調べた。入力の本デバイスによる皮膚の変位（頭部の回転角に換算）とし、出力を装着者の頭部の回転角とした系の基本特性を伝達関数などを用いてモデル化した。

実験では、20 代の男性 2 人の被験者に対し、複数の回転の要求角度、要求角度の変化の速さを設定し、入力と出力の関係を計測した。その際に、サーボモータの作動音がヒントとならないように、ノイズキャンセ

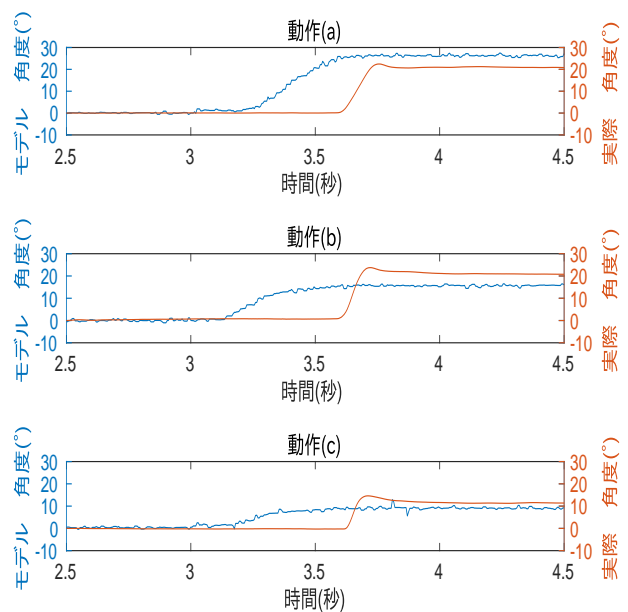


図 2: 測定例 動作 (a)~(c)

リング機能を持つヘッドフォンにランダムに作動音を再生しながら実験を行った。図 2 に計測結果の例を示す。青色の線が入力（要求角度）としての変位角度、橙色の線が頭部の実際の回転角である。(a)~(c) はサーボモータの最大角速度でデバイスの伸縮を行った場合で、回転の要求角度は (a), (b), (c) それぞれ 25 度、15 度、10 度である。

システム同定には古典制御モデルを利用し、系の基本的な性質として、2 次遅れまたは 3 次遅れとむだ時間の存在するモデルを仮定した。人間の動作は低い次数の遅れとむだ時間で近似できるとの報告が数多くなされているためである。図 3 に結果の例を示す。これは一回の試行（入出力）から伝達関数を推定した結果であり、青色の線が入力、黒色の線が出力、赤色の線が推定された伝達関数を用いて出力を推定した結果を表す。各グラフは以下のようにになっている。(a) は 2 次遅れ + むだ時間のモデルとして同定した場合、(b) は 3 次遅れ + むだ時間の場合である。

これらのグラフからわかるように、個々の動作は比較的単純な古典制御モデルで良く近似できる。ただし、ここには示さないが、回転角によるばらつき、試行間のばらつき、個人差によるばらつきなどがあり、これらを利用者、利用状況に合わせて調整することが必要であり、これは今後の課題となっている。

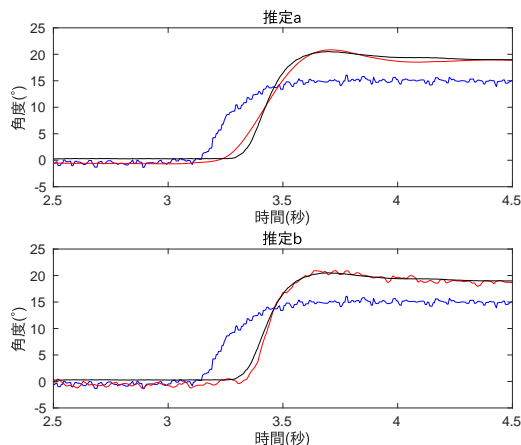


図 3: 2次遅れ系としての推定 (a) と3次遅れ系としての推定 (b)

5. 主な発表論文等

【雑誌論文】(5件)

- ① J.Rossiter, K.Espen, Y.Nakamura, "Affective Touch and Low Power Artificial Muscles for Rehabilitative and Assistive Wearable Soft Robotics", The International Symposium on Wearable Robotics (Werob2016), USB (2pages), 2016, 査読有
- ② K.Kondo, G.Mizuno, Y.Nakamura, "Analysis of Human Pointing Behavior in Vision-Based Pointing Interface System — Difference of Two Typical Pointing Styles", 13th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, USB (6pages), ThuETrack-2.1, 2016, 査読有
- ③ N.Kokubo, K.Kondo, Y.Nakamura, J.Akita, M.Toda, S.Sakurazawa: "Transmitting muscle activities from trainer to trainee using electromyography measurement and its display via sound and vibration", International Symposium on Socially and Technically Symbiotic Systems, 2015, pp.385-392, 査読有
- ④ K.Kondo, Y.Nakamura, K.Yasuzawa, H.Yoshimoto, T.Koizumi: "Human Pointing Modeling for Improving Visual Pointing System Design", International Symposium on Socially and Technically Symbiotic Systems, 2015, pp.393-400,

査読有

- ⑤ R.Imoto, M.Migita, M.Toda, S.Sakurazawa, J.Akita, K.Kondo, Y.Nakamura, "Preliminary Study of Coordinated Movement Mechanism of Multiple Muscle using Wavelet Coherence Analysis" Proc. of 4th International Conference on Smart Computing and Artificial Intelligence (SCAI 2016), 2016, 査読有

【学会発表】(5件)

- ① 中村裕一, "なにをどのようにみるか ~ 見るためのモデル ~", 信学技報 PRMU2016-131, Vol.116, No.411, pp.83-88, 2017, 京都
- ② 小久保夏実, 近藤一晃, 中村裕一, 秋田純一, 戸田真志, "振動によるフィードバックを用いた動作の習得支援に関する検討", 信学技報 MVE2016-19, Vol.116, No.412, pp.7-10, 2017, 京都
- ③ 井藤隆秀, 近藤一晃, 中村裕一, Jonathan Rossiter, "Skin Stretcher 型の頭部回転誘導デバイスの基礎的検討", HCG シンポジウム 2016, pp.517-524, 2016, 高知
- ④ 渡邊真樹, 右田雅裕, 戸田真志, 近藤一晃, 櫻沢繁, 秋田純一, 中村裕一: "時間周波数解析を用いた筋電信号からの動作変容の検知", HCG シンポジウム 2015, 2015, pp.532-535, 富山
- ⑤ 渡邊真樹, 右田雅裕, 戸田真志, 近藤一晃, 櫻沢繁, 秋田純一, 中村裕一: "筋電信号を用いた認知状態推定に関する試み", 信学技報 MBE2014-106, Vol.114, No.408, 2015, pp.65-69, 熊本

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 裕一 (NAKAMURA, Yuichi)
 京都大学・学術情報メディアセンター・教授
 40227947

(2) 研究分担者

渡辺 靖彦 (WATANABE, Yasuhiko)
 龍谷大学・理工学部・講師
 10288665

(3) 連携研究者

近藤 一晃 (KONDO, Kazuaki)
 京都大学・学術情報メディアセンター・講師
 30467609