

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25280075

研究課題名(和文) 着るアシスタント：動作と行動の支援と教示を行うためのセンシングと認識の統合

研究課題名(英文) Wearable Assistant: Integration of sensing and pattern recognition for motion and activity assistance and teaching

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) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、(1)着るアシスタントのための筋電位センサと情報呈示デバイスの設計と検証、(2)意図や内部状態の推定を目的とした筋電位の計測と基礎的な調査、(3)動作や行動の計測・認識に必要なセンサフュージョンや力学的モデルの構築と検証を行った。その成果として、深層筋の計測に使えるリング電極アレイの提案、振動と皮膚の引張を使った情報呈示デバイスの提案、筋電位計測によって反射や筋シナジーを推定して動作の意図を読み取る手法の提案、筋骨格モデルや運動生理学に基づいた動力学モデルを用いて動作の解析を行う手法等を提案した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we investigated (1) design and verification of myoelectric sensing and tactile display for wearable assistant, (2) fine myoelectric measurements and analyses of the relation between signals and motion intention and internal states, (3) sensor fusion and dynamic modeling required for motion and behavior analyses. As outcomes, we obtained good results concerning, ring electrode array useful for the measurement of deep layer muscles, tactile information display device with vibration, skin stretch, sound, etc., intention and internal condition estimation by measuring reflection and muscle synergy, kinematic and dynamic modeling of human motion based on anatomy and kinesiology.

研究分野：情報メディア工学

キーワード：ヒューマンインタフェース 筋電位計測 画像センシング 動作・行動支援 ウェアラブルコンピュータ

## 様式 C-19、F-19、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

電子万歩計や fitbit(米国)のような簡単な活動モニタをはじめ、心拍や心電のような生理的情報を常時計測し、データを蓄積したり医師などに伝送する機器など、種々のデバイスが開発され、利用されている。同様に、身体動作(体の動かし方)の詳細を日常的に記録したり伝送することができれば、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、種々の分野での利用が期待できる。そのため、身体動作や行動を計測し、「どのように動作・行動すれば良いか」を行動中の本人に呈示したり教示する機能を持つ「着るアシスタント」の実現が望まれる。

このような「着るアシスタント」を実現するためにはまだ多くの困難がある。その主なものには、(i) 動作や生理的状态を計測するセンサを身につけることの煩わしさやセンサの精度、(ii) 身体動作の多様性・自由度の高さによる解析・認識の難しさがあげられる。さらに、体の動かし方の技能、効率、安定性、疲労等、考慮すべき重要な点も多い。そのため、種々の観点から詳細な計測を行うことや、内部状態のモデル化を行うことが必要となる。

### 2. 研究の目的

身体動作は、心理的な「意図・内部状態」、生理的な「筋収縮」、幾何的な「姿勢・動き」の側面を持つため、その計測や認識には、(a) 脳・神経系の活動、(b) 筋肉の活動および生理的状态、その結果得られる(c) 身体の姿勢・動きを考えることが必要となる。現時点では、(a) を日常の一般的な活動中に精度良く計測することが難しいため、本研究では後者2つを計測対象にし、(a) は必要に応じて後者2つから推定する。

このような「着るアシスタント」の実現のために重要となる3つの課題に取り組む。

(1) 着ることのできる電気生理センシング: 日常的に装着できるように、ゲル状・フィルム状の貼り付けるセンサ、伝送媒体となる導電布を用いた服、センサ情報を処理し外部と通信を行う端末からなるシステムを用いる。センサ部分の設計、センサ部分と服の間の通信、端末部分のデータ処理や情報提示が重点要素となる。センサの装着感、時間的な変化、データ通信・蓄積の安定性、音や振動による情報提示について検討し、長時間にわたって負担感なく使えるものとする。

(2) 意図や内部状態と動作の詳細な関係の解析: 筋活動の詳細な計測と、それによる動作の意図・内部状態の推定を行う。そのために、多点の高密度(空間的・時間的)のセンサによる詳細な計測、インナーマッスルの計測、内部状態(感覚・心理状態)と筋電の関係推定などを研究要素とする。それにより、内部状態(例えば、慣れ、恐怖、戸惑い、怒り等)と筋活動における自由度の制御に明確な関係を発見し、筋活動から内部状態を推定する方法論を提案する。

(3) 内と外の両面からのセンシングの統合: 身体動作を、位置・速度と筋緊張の両面から計測することと力学的モデルを含めたシミュレーションにより、運動の正しさ・効率・その他の評価を行う。それにより、典型的な応用課題(リハビリテーション)について身体動作の適切な指示や教示が可能であることを実証する。さらに、持つ・置く・立つ・座る等の典型的な動作についてその予測方法を探る。

### 3. 研究の方法

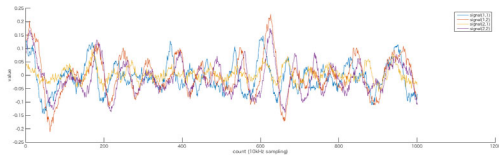
研究体制は、京都大学、金沢大学、熊本大学、公立はこだて未来大学の協力体制とし、以下のように研究を進めた。

#### (1) センサシステム

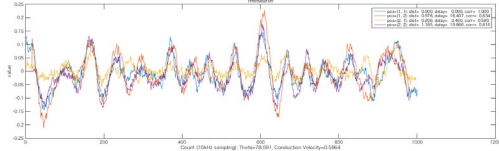
センサとしては導電性ゲルを用いたもの、アレイ電極を用いたものなど、軽く高精度となるように種々の形態を試した。多点化に関しては、腕・肩・腰、下肢の各部位の主動筋、拮抗筋に対して複数のアレイ状センサを装着することを検討した。さらに、支援情報を伝えるためのメディア変換について設計を行う。音・振動などによって各筋肉の力やその特徴を知らせる小型デバイスを装着したり、近傍のディスプレイを用いて仮想的な鏡の上に注釈を重畳するような表示を行うことによって、リアルタイムに自分の様子をフィードバックしたり教示を与える手法の有効性を確認する。

#### (2) 意図や内部状態と動作の詳細な関係の推定

人間の動作は、直接的な意図だけでなく、様々な要因の複合によって発現する。つまり、骨格や筋肉の収縮力等の力学的要因、運動学的要因、疲れなどの生理学的要因、習熟、戸惑いのような意図的な要因、快・不快等の心理的要因等、多くのものを考えなければならぬ。そのための手がかりとなるのは、動作における自由度の高さであり、筋肉中のモーターユニット発火(Motor Unit Action Potential)の自由度(発火頻度



(a) 各電極における計測値をそのまま重ねたもの



(b) 伝搬方向・時刻により補正したもの

図 1: リング電極による多点計測

と筋繊維の選択性)、主動筋・拮抗筋の同時活性、インナーマッスルを含めた協働筋の筋交代等、様々な現象が関連する。これらと心理的及び生理的内部状態との関わりを調査する。特に、複数筋の筋シナジーは比較的計測しやすく、かつ、重要な役割を果たしているため、筋シナジーと意図との対応関係を求める。

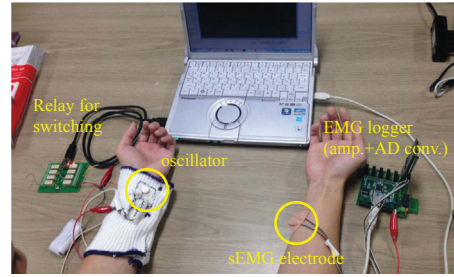
### (3) 内と外の両面からのセンシングの統合

身体動作を筋緊張から測る筋電位計測と、動作をその位置・動きから測る位置計測の2つの計測の統合を、リハビリテーション、動作予測等の応用的課題を扱いながら実証的に検討する。前述したように、筆者らは把持行動の予測においてその方法を提案してきたが、他の意図や他の部位についてはまだ手をつけていなかった。そのために、力学モデルを介した2種類の計測結果の統合と予測を行う。まず、各筋が発生する関節トルクなどを解析的に求め、それらを統合して力学的な動作の予測を行うこと、それを位置計測結果と比較することによってモデル化することを試みる。ただし、人間は多くの自由度を持ち、可観測でない部分が多い。そのため、純粋に定量的なモデルを用いるのは困難である。そのため、観測信号の特異点等を用いて、量に基づいた定性的な関係を発見的に検出し、それをモデル化することも試みる。

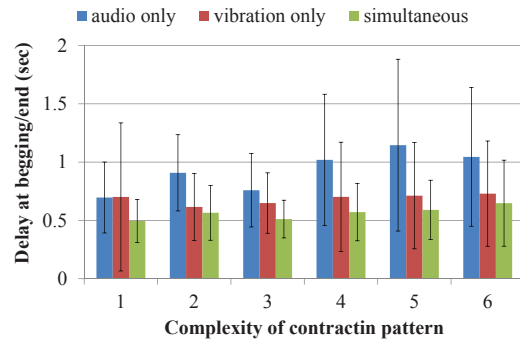
## 4. 研究成果

(1) 筋電位センサ、及び、振動などの表示インタフェースについて、以下のような成果が得られた。

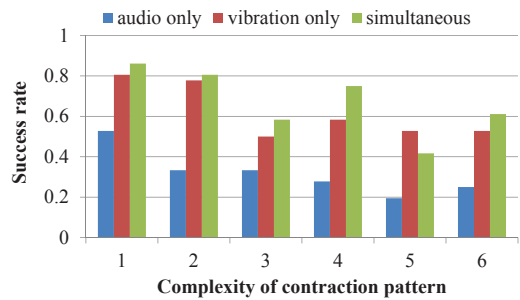
① リング電極をアレイ状に並べた多点計測デバイスを試作した。リング電極は指向性が高いため、複数の筋から発生する筋電位の分離に向いていることが期待



(a) 振動デバイス



(b) 遅れ時間の評価 (小さいほど良い)



(c) 正答率の評価 (大きいほど良い)

図 2: 振動デバイス

できる。実際に、肩周りの筋電位計測に適用した結果、僧帽筋と棘上筋のように、異なる筋繊維の方向を持つ筋が重なっている場合には、その分離を良好に行うことができることがわかった。リング電極によって計測された各電極の筋電位波形そのまま重ねたものを図 1(a) に、そこから伝搬速度・方向を推定して時間遅れを補正して重ねた波形を図 1(b) に示す。アレイ電極により、筋活動の伝搬状態が良く計測されていることがわかる。

② 多点の筋電位計測を行うために、マルチプレクサを用いた電極アレイを設計した。それにより、従来より簡単な構成で多点計測が行えることを確認した。

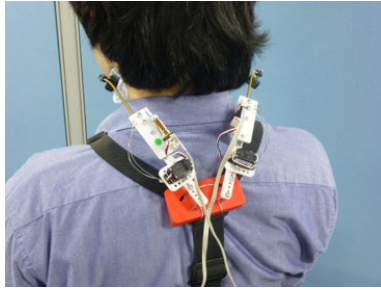
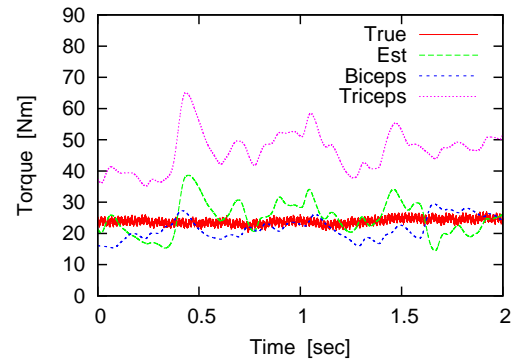


図 3: 皮膚を引っ張るデバイス

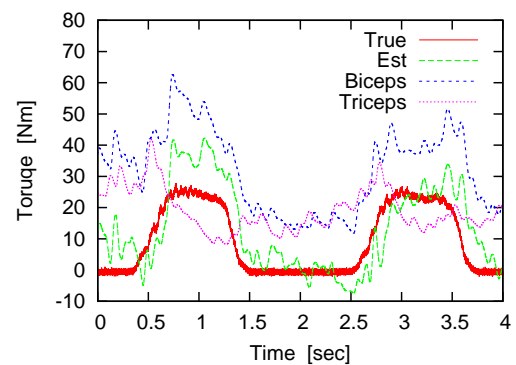
- ③ 電気刺激 (EMS) を用いたりハビリテーション支援に関し、EMS 中でも筋電位計測が行えることを確認し、負荷の適切さやトレーニング中の疲労状態をリアルタイムに推定するための方法を提案した。
- ④ 筋電信号を計測して、筋の収縮情報を音と振動を用いて他者に伝えるデバイスを設計・実装した。外形を図 2(a) に示す。また、このデバイスを用いて動作を教示した場合の時間遅れや正解率をそれぞれ図 2(b), (c) に示す。音だけの場合、振動だけの場合に比べ、音と振動の両方を用いた場合に、間違いや遅れが少なくなることが実際に確かめられた。
- ⑤ 皮膚の伸張を利用して動作情報を提示するデバイス (図 3) を設計した。実際の被験者に対してそれらの動作特性を計測・評価した。

(2) 意図や内部状態と動作の詳細な関係の推定について、以下のような成果が得られた。

- ① 予測と動作の関係を調査するための一つの方法として、手でオモリを叩く動作について、オモリの重さを種々に変えながら、主動筋、拮抗筋の筋電位を計測した。その際に、重さの予想と実際に感じる感覚 (打撃感) が合致しない場合に特徴的な筋電位が発生すること、M2, 3 として知られる反射のタイミングと一致することから、期待に反した状況を修正するための反射であることが強く示唆された。これらを安定して計測することができれば、意図の推定方法の一つとして利用できる。
- ② 心理的な状態と動作との関係を調査する方法として、他から不安定な外乱を与えられて動作をした場合と、自然に (何も気兼ねなしに) 動作をした場合の動作の特性について調査した。例えば、揺れる椅子の上で立ち上がる場合と通常の硬い床の上で立ち上がる場合の比較などである。このような場合の動作の違いが、



(a) 負荷が一定の場合



(b) 負荷が変動する場合

図 4: 主動筋・拮抗筋による拮抗作用の推定 (太線が外部トルク、緑線が推定トルク)

複数筋の筋協調の違いに現れ、それが複数筋の筋電位間の位相差を検出することによって検出できることを示した。つまり、外乱に対応している場合には筋の収縮の時間的順序関係が一定のパターンから崩れて様子が観測される。これを安定に定量化できれば、外乱への対応を意図的に行っていることを推定する特徴となることが期待できる。

- ③ 人体の中で比較的単純な関節である肘周りでも、筋電位の実効値と筋張力の比例関係を仮定するような単純なモデルでは、主動筋、拮抗筋の力学的なバランスが十分に近似できない。そのため、解剖学的に得られる身体パラメータと Hill-Strove モデル等の筋肉の運動生理学的モデルを用いることにより、統制された静的な環境においては、図 4(a), (b) のように、拮抗作用がある場合でも筋張力の推定が改善されることを示した。実際の環境では、協働作用、拮抗作用が様々に変化すること、単独の筋だけを収縮させてキャリブレーションを行うことが難しいことから、より良い方法が

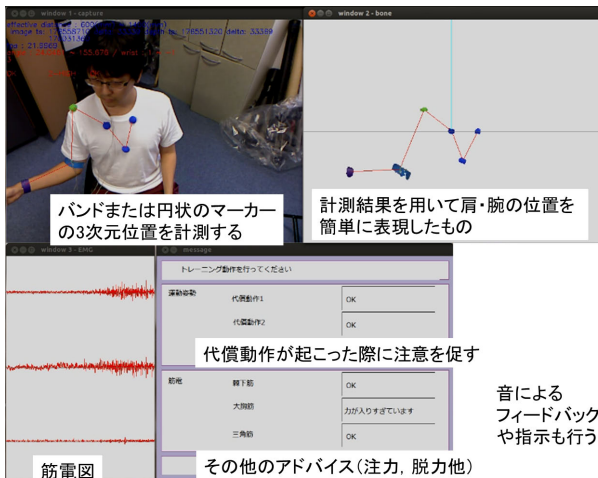
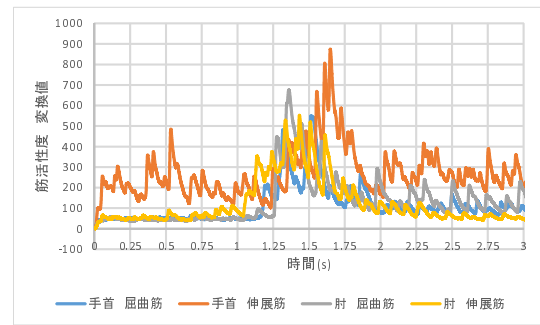


図 5: リハビリテーション支援のための試作システム。「正しい姿勢・動き」を保ちながら「正しく筋肉を活動させる」支援を行う。

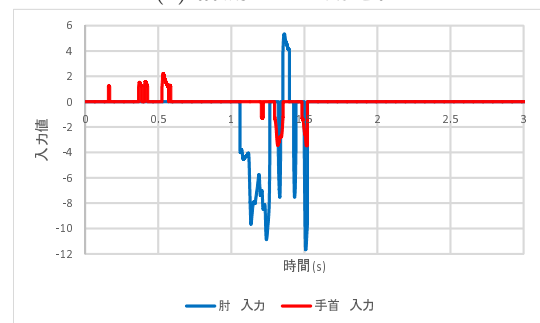
必要とされており、現在取り組んでいる。

(3) 内と外の両面からのセンシングの統合について以下のような成果が得られた。

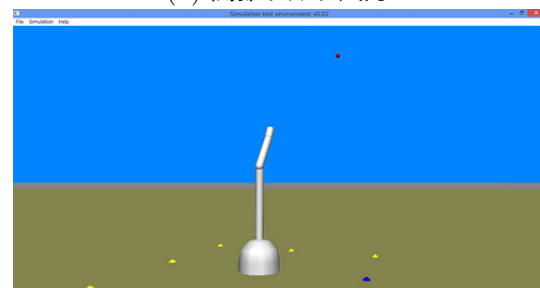
- ① リハビリテーションに要求される精度が満たされるように、カメラ系の設定、3次元計測の精度の確認を行った。京都大学附属病院との協力により、実際に肩のリハビリテーションの支援システムを試作し、患者、理学療法士からその設計の妥当性や問題点について種々の意見を得た。
- ② 膝周りの筋肉のように、単関節筋と二関節筋の間の拮抗作用、協働作用がある場合のモデル化手法について検討を行い、上腕と同様の手法の適用を試みた。その結果、運動の目的や姿勢によって協働作用、拮抗作用のための筋活性度の比が大きく変わることがわかってきた。力学的モデル化には、今後のより詳細な解析が必要である。しかし、逆にこのような性質を用いて、姿勢と筋活性度を入力として運動の意図などを推定できる可能性が示唆されており、このような方向も検討していく予定である。
- ③ 動作対象を、上腕・下腕とし、筋収縮の状態から運動を予測する手法を検討した。そのために、ロボット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、筋収縮から推定される関節トルク、つまり、主動筋と拮抗筋による関節トルクの差を回転トルクとして与えた。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。



(a) 計測された筋電位



(b) 関節トルク入力



(c) ODE による描画例

図 6: 筋電位と関節トルクの入力

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。図 6(a) に計測された筋電位、(b) に入力としたトルク、(c) にシミュレーションの結果を表示させた例を示す。

## 5. 主な発表論文等

### 【雑誌論文】(6 件)

- ① N.Kokubo, K.Kondo, Y.Nakamura, J.Akita, M.Toda, S.Sakurazawa: "Transmitting muscle activities from trainer to trainee using electromyogra-

phy measurement and its display via sound and vibration”, International Symposium on Socially and Technically Symbiotic Systems, 2015, pp.385-392, 査読有

② 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

③ 吉本廣雅, 中村裕一: ”識別器の特性の学習とユーザの誘導による協調的ジェスチャインタフェース”, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.17, No.2, 2015, pp.107-116, 査読有

④ M.Yoshimoto, Y.Nakamura: ”Cooperative Gesture Recognition: Learning Characteristics of Classifiers and Navigating User to Ideal Situation”, The 4th IEEE International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods, 2015, pp.210-218, 査読有

⑤ 朝倉僚, 宮坂淳介, 近藤一晃, 中村裕一, 秋田純一, 戸田真志, 櫻沢繁: ”筋電位計測と画像による姿勢計測を用いたリハビリテーション支援システムの設計”, 信学論, Vol.J97-D, No.1, 2014, pp.50-61, 査読有

⑥ K.Owada, M.Toda, S.Sakurazawa, J.Akita, K.Kondo, Y.Nakamura: ”Observation of movement state using surface EMG signal”, Proc. of IEEE 2nd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE2013), 2013, pp.412-416, 査読有

#### 【学会発表】(7 件)

① 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

② 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

③ 市田大貴, 中村裕一, 近藤一晃, 秋田純一, 戸田真志, 櫻沢繁: ”上腕筋群の同時活性分析に向けた筋張力推定”, 信学技報 MBE2014-42, Vol.114, No.42, 2014, pp.51-56, 長野

④ 北尾憲一, 近藤一晃, 中村裕一, 秋田純一, 戸田真志, 櫻沢繁: ”バンド型電極を用いた EMS 刺激による誘発筋電位の特徴解析”, 信学技報 MBE2013-129, Vol.113, No.499, 2014, pp.73-78, 東京

⑤ 大和田敬吾, 戸田真志, 櫻沢繁, 秋田純一, 近藤一晃, 中村裕一: ”環境に依存した筋動作変化に関する筋電図的考察”, 信学技報 MBE2013-130, Vol.113, No.499, 2014, pp.79-84, 東京

⑥ 平野貴之, 秋田純一, 櫻沢繁, 戸田真志, 近藤一晃, 中村裕一: ”筋電信号の多点計測のためのマトリクス電極配置アーキテクチャとその実装”, 信学技報 MBE2013, Vol.113, No.499, 2014, pp.25-28, 東京

⑦ 北尾憲一, 近藤一晃, 中村裕一, 秋田純一, 戸田真志, 櫻沢繁: ”EMS トレーニング中の筋の状態推定を目的とした誘発筋電位の計測”, 信学技報 MBE2013-28, Vol.113, No.147, 2013, pp.15-20, 東京

#### 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

秋田 純一 (AKITA, Junichi)  
金沢大学・電子情報学系・教授  
10303265

戸田 真志 (TODA, Masashi)  
熊本大学・総合情報統括センター・教授  
40336417

櫻沢 繁 (SAKURAZAWA, Shigeru)  
公立ほこだて未来大学・複雑系知能学科・准教授  
40325890