

# 筋シナジー情報による筋活動のカラー化

## Muscle activity visualization with color using muscle synergy information

神原裕行, 辛徳, 姜有宣

Hiroyuki Kambara, Duk Shin, Yousun Kang

東京工芸大学、243-0297 神奈川県厚木市飯山南5-45-1

### 概要

本研究では、運動中の筋活動を色情報を用いて可視化することを目的としたシステムの開発を行なった。具体的には、手首関節運動中の筋活動データに内在する、筋シナジーと呼ばれる複数の筋の協調的な活動情報を抽出するとともに、各筋シナジーの活動強度をRGBカラーモデルの各要素の値へとマッピングすることで、手首の運動方向に応じた筋活動の変化を色情報として可視化することを実現した。

### 1. はじめに

今後の超高齢化社会においては、運動機能の維持やリハビリテーションを目的とした運動トレーニングを自宅で気軽に行えることが望まれる。運動を評価・サポートする専門家が不在の自宅においてトレーニング効果を向上させるためには、運動中の筋活動を解析し適切な筋活動をフィードバックするシステムが重要となる。現在のところ、筋活動を皮膚の上から安全に計測できる表面筋電計が比較的安価に販売されている。一方、計測した筋活動を患者にどのようにフィードバックすれば良いかという点は、依然として難しい問題と言える。その理由としては、1) 普段の運動時は筋肉の活動を意識することはないため、数値やグラフで表示された筋活動を直感的に把握することは難しいこと、2) 身体動作は複数の筋肉の協調的な活動により成立しているため、一本一本の筋肉ごとの筋活動を表示されたとしても、それぞれを独立に調整することが難しいことが挙げられる。

本研究では、筋シナジーと呼ばれる複数の筋肉の協調的な活動を、数値やグラフではなく色の変化としてフィードバックすることで筋活動の直感的な知覚を促進するシステムの開発を目指す。特に本稿では、手首関節の運動中の筋活動の可視化システムの開発を目指して行なった、手首の筋肉群に存在する筋シナジーの数を検討するシミュレーション実験、および、実際の手首関節運動中の筋活動から筋シナジーを抽出する計測実験の結果について報告する。

### 2. 筋シナジーによる筋活動のカラー化システム

#### 2.1 筋シナジーとは

人の身体には数百にも及ぶ筋肉が存在している。一方、脳が身体運動を生成する際には、筋肉一本一本を独立に調節するのではなく、筋シナジーと呼ばれる複数の筋肉群に内在する協調構造を利用している可能性

が示唆されている。実際、多くの計測実験により、様々な運動中の筋活動パターンが、下記の式(1)のように、数個の筋シナジーの基底ベクトルの線形和として再現できることが報告されている[1]。

$$\mathbf{m}(t) = \sum_{i=1}^N c_i(t) \mathbf{w}_i \quad (1)$$

ただし、 $\mathbf{m}(t) \in \mathbb{R}^M$ は時刻 $t$ における $M$ 個の筋肉の活動強度、 $c_i(t) \in \mathbb{R}$ は時刻 $t$ における $i$ 番目のシナジーの活動強度、 $\mathbf{w}_i \in \mathbb{R}^M$ は $M$ 個の筋肉に対する $i$ 番目のシナジーの基底ベクトル、 $N$ はシナジーの個数を表す。なお、シナジーの個数 $N$ は筋肉の個数 $M$ よりも小さい数となる。

#### 2.2 筋活動のカラー化システム

本研究では、複数の筋シナジーの活動強度を、RGB、HSV、CMYKなどのカラーモデルで表現される色情報として可視化するシステムを構築する(図1)。このシステムでは、まず、筋電センサーを皮膚上に装着し、筋活動の大きさに応じて変化する表面筋電位を計測する。次に計測された表面筋電信号の時系列パターン( $\mathbf{m}(t)$ )に非負値行列因子分解を適用することで、筋シナジーの基底( $\mathbf{w}_i$ )と活動強度( $c_i(t)$ )を求める。そして、各筋シナジーの活動強度をカラーモデルの各成分の値とすることで色情報へと変換する。

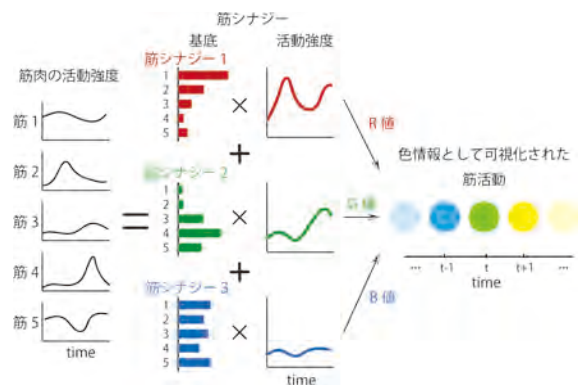


図1 筋シナジーによる筋活動のカラー化 (RGB カラーモデルを用いた場合の例)

#### 3. 最適化シミュレーションによる手首の筋シナジー数の検討

前章で提案したシステムを用いて筋活動を色情報へと変換する場合、全体の筋活動をいくつの筋シナジーに分解するかを事前に決める必要がある。そこで、手首の屈曲・伸展と尺屈・橈屈の2自由度の関節運動中に、

手首関節に作用する5つの筋肉(長橈側手根伸筋, 短橈側手根伸筋, 尺側手根伸筋, 尺側手根屈筋, 橈側手根屈筋)が最適な活動を行っていると仮定した場合に, いくつかの筋シナジーを用いることで全体の筋活動が再現できるかを検討する.

まず, 最適な筋活動を求めるために, 上述の2自由度を有する手首関節と5つの筋肉からなる筋骨格モデル, および, 手首の関節運動を実現するための最適な筋活動を求めることができる運動制御モデル[2]を用いた計算機シミュレーションを行なった. 次に, シミュレーションにより求められた5つの筋肉の時系列の筋活動データに対して非負値行列因子分解を適用した. その際に, 筋シナジーの数, つまり, 因子のランクを1から5まで変化させ, 筋肉の個数よりも少ない筋シナジーの線形和によって, 元の筋活動データをどの程度で再現できているかを決定係数 $R^2$ により検証した(図2). その結果, 3つの筋シナジーにより, 決定係数0.9以上の高い値で, 元の筋活動を再現できることがわかった.

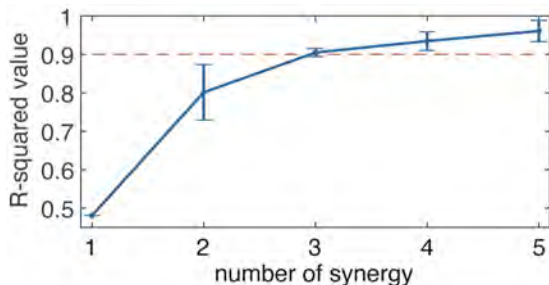


図2 筋シナジーによる最適な筋活動の再現

#### 4. 手首関節運動中の筋シナジーの抽出とカラー化

##### 4.1 手首の筋活動の計測実験

実際の筋活動データから筋シナジーの抽出が行えるかを検証するため, 手首の関節運動中の筋活動を計測および解析する実験を行なった. 関節運動の自由度や筋活動を計測する筋肉は, 3章のシミュレーション実験と同様とする. また, 各筋肉の筋活動データは, Delsys社製の表面筋電計測装置Bagnoli-16により計測した. また, 計測した表面筋電信号の時系列データの前処理として, 全波正流, 正規化, ローパスフィルタ(カットオフ周波数2.2Hz)を行なった後, 非負値行列因子分解を適用した. なお, 因子分解のランクは前述のシミュレーション実験の結果を参考として3とした(つまり, 3つの筋シナジーを抽出した).

##### 4.2 抽出された筋シナジーによる筋活動の再現

図3に, 前処理前後の筋活動と3つの筋シナジーの線形和として再現された筋活動の時系列データを表示する. ここでは, 例として橈側手根屈筋のデータを表示した. 図より, 元の筋活動データが筋シナジーにより精度良く再現できていることがわかる. なお, 5つの筋肉全ての筋活動データを再現した際の決定係数は0.96とな

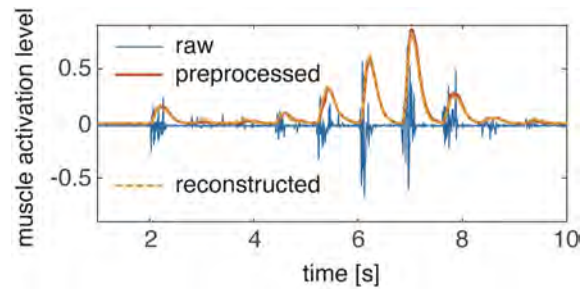


図3 手首運動中の橈側手根屈筋の筋活動

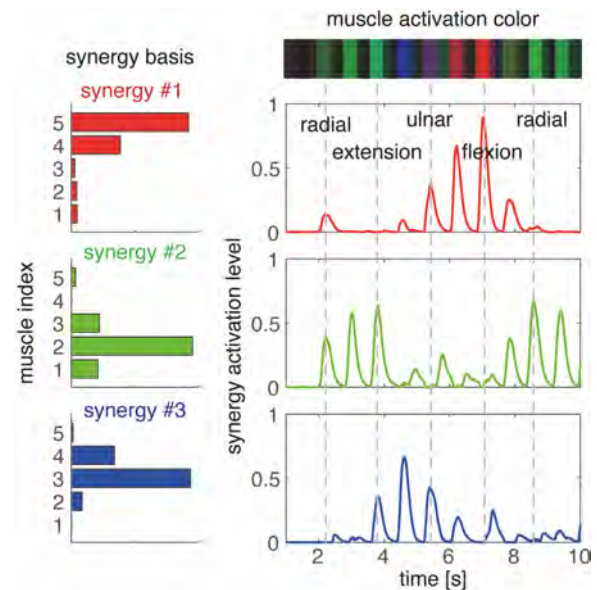


図4 筋シナジーの活動強度と対応する色情報

り, 実際の手首関節運動中の筋活動パターンも3つの筋シナジーで説明できることが示唆された.

##### 4.3 筋シナジー活動強度を用いた筋活動のカラー化

2章で記述した方法を用いて, 筋活動をカラー化した結果を図4に示す. ここでは, シナジー1, 2, 3の活動強度を, R, G, Bの値に対応させた. 図より, 手首の運動方向に応じて, 筋活動の色が変化する様子が見える.

#### 5. まとめと今後

本研究では, 手首の関節運動中の表面筋電信号から筋シナジーと呼ばれる複数の筋肉の協調的な活動を抽出するとともに, 筋シナジーの活動強度をRGBカラーモデルにより色情報へとシステムの開発を行なった. 今後は, このシステムの有効性を検証するための評価実験を行う予定である.

#### 6. 参考文献

- [1] M.C. Tresch, A. Jarc: Curr. Opin. Neurobiol. 19(6), 601-7(2009).
- [2] H. Kambara, D. Shin, Y. Koike: J. Neurophysiol. 109(8), 2145-60(2013).