

順動力学計算を用いた筋シナジーによるヒトの起立動作生成

○ Qi An 石川雄己 (東京大学) 船戸徹郎 (電気通信大学) 青井伸也 (京都大学)
岡敬之 山川博司 山下淳 浅間一 (東京大学)

1 序論

日常生活において起立動作は起点となる重要な動作である。従来、起立動作に関する様々な研究が行われており、起立動作を現象論的に解析して、特徴的な現象を抽出したものは多いが、起立動作を達成するための要件やその戦略の解明には至っていない。

本研究では起立動作を構成論的に理解するため、ヒトの力学特性や筋の特徴を考慮した筋骨格モデルを構築する。また筋シナジーを用いた順動力学計算から、ヒトの起立動作が生成されることを示す。

2 手法

本研究ではヒトを2次元3リンクの剛体モデルとして表現し、下肢9筋を有する筋骨格モデルを構築する(図1)。筋モデルとして、Hillモデルを使用し、ある時刻 t に筋が能動的に発生する張力($f(t)$)は式(1)で表され、筋の最大発揮張力($f_{\max}$)と筋活性度($a(t)$)の掛け合わせで算出される¹⁾。筋活性度は、 N 個のシナジーと呼ばれる複数筋の協調発揮パターン(w_i)とそれらの発火頻度(c_i)の掛け合わせで表される²⁾(式(2))。筋長などの解剖学的パラメータは先行研究と同一のものを用いる¹⁾。また臀部への床反力は弾性要素で表現され、水平・垂直方向に加わるものとする。

$$f(t) = f_{\max} a(t) \quad (1)$$

$$a(t) = \sum_{i=1}^N w_i c_i(t) \quad (2)$$

順動力学計算によって起立動作を生成するため、まず実験から計測された身体軌道を用いて逆動力学計算から関節トルクを算出する。二関節筋を含む筋肉から生成されるトルクは一意に決まらないため、計測された筋電位との二乗誤差を最小化するように最適化計算から筋活動を算出する。筋シナジーはこの算出された筋活動から非負値行列因子分解を用いて抽出される。

起立動作を生成するために、時刻 t で与えられた姿勢($\theta(t), \dot{\theta}(t)$)と筋シナジーに対し、各シナジーの発揮頻度を調整することで、各筋の活動度を求める。筋

活動から筋に張力が生じ、姿勢($\theta(t+dt), \dot{\theta}(t+dt)$)が生成される。本研究では、姿勢を安定化させ、起立動作の軌道に追従させるため、PD制御から算出されるトルクを関節に加える。

本稿の順動力学計算で使用される筋シナジーに含まれる筋活性度は抽出されたシナジーの平均値を用い、生成する目標となる起立動作は計測された複数試行の動作の平均とする。算出される関節角度・角速度とその目標値の二乗誤差を最小化するように、シナジーの発揮頻度を算出する。本研究では dt を0.001secとし、4次のルンゲクッタ法を用いて数値計算を行う。

3 結果

1名の被験者の起立動作計測実験で得られた17試行の起立動作から3つのシナジーが抽出された。図1に抽出された3つの筋シナジーの協調発揮パターンとそれらの発揮頻度の平均と標準偏差を示す。また図中の右には実際に生成された起立動作時の姿勢が0.5secごとに示されている。3つの筋シナジーにはそれぞれ固有の筋協調パターンが観測され、それが順序構造をもって発揮されることで起立動作が生成されている。

4 結論・展望

本研究では、ヒトの筋骨格モデルを構築し、起立動作を達成する筋シナジーの抽出を行った。順動力学シミュレーションから3つの筋シナジーによって起立動作が生成されることを示した。

今後は筋骨格モデルを通じて、抽出された筋シナジーの役割を定量的に評価することで、起立動作の戦略を明らかにする。

参考文献

- 1) Davy D.T. and Audu M.L., "A Dynamic Optimization Technique for Predicting Muscle Forces in the Swing Phase of Gait", J. Biomech., vol. 20, pp. 187-201, 1987.
- 2) Tresch, M.C., Saltiel, P., and Bizzi, E., "The Construction of Movement by The Spinal Cord", Nat. Neurosci., vol. 2, pp. 162-167, 1999.

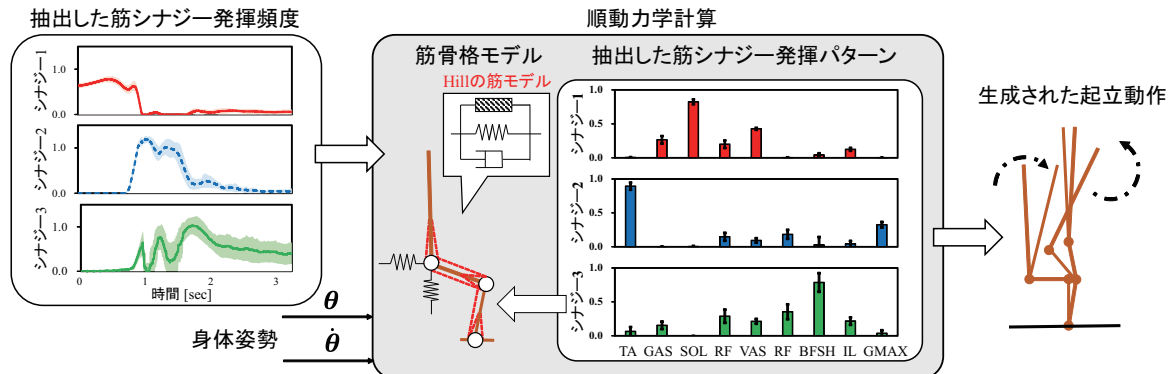


Fig. 1: 順動力学計算を用いた抽出されたシナジーと発揮頻度からの起立動作の生成