

身体動作分析への動力的アプローチ

1. はじめに

身体は、多数の節が関節によって連結された多体系であるため、その動作特性を把握するためには、身体を多体系として捉えた分析が必要となる。加えて、身体動作の動力源である筋は、筋長、収縮速度、および収縮様式などによって、発揮張力特性が変化するという特性を有している。

本稿では、多体系としての身体の特長、ならびにアクチュエータとしての筋の発揮張力特性を考慮して、身体動作生成の仕組みを定量化する動力的分析手法^{(1)~(3)}について紹介する。

2. 筋骨格モデル

図1(a)に示すように、走動作支持期における支持脚各筋群の筋張力を推定するために、筋骨格モデリングソフトウェア(SIMM, MusculoGraphics社製)を用いて、3関節5自由度(股関節屈曲伸張、股関節内外転、股関節内外旋、膝関節屈曲伸張、足関節底背屈)、計33の筋を有する支持脚筋骨格モデルを構築する。なお、各筋モデルは、長さ-張力関係、および速度-張力関係を考慮した、Hillタイプの筋腱複合体モデルとしている。また、筋腱複合体の長さ変化から、筋の収縮様式を伸張性収縮と短縮性収縮とに分けて表している。ここで、筋腱複合体長の時間微分が正、すなわち複合体が伸張しながら張力を発揮する伸張性収縮様式では、複合体が短縮しながら張力を発揮する短縮性収縮様式と比較すると、より大きな筋張力が発揮できることが知られている。

3. 全身のモデル化

図1(b)に示すように、身体を計15の剛体セグメントとしてモデル化している。また、支持脚である右脚の足部セグメントにおいては、足底部の圧力中心点を仮想的な関節として、身体と地面とが連結しているものとして扱っている。

各セグメント単体の運動方程式、セグメント間の加速度拘束式、ならびに各関節の解剖学的な幾何学的拘束式を連立することによって全身の運動方程式の解析式を得ることができる。そしてこの解析式を利用すると、身体重心加速度の生成に対する身体関節トルクの動力的貢献を定量化することができる。さらに、支持脚筋骨格モデルを用いて支持脚関節トルクから筋張力を推定することによって、各筋群の身体重心加速度への動力的な貢献を定量化できる。なお、関節自由度数に対して筋要素数が大きいことに起因する冗長性によって、関節トルクから筋張力への分配問題が生じるため、ここでは最適化手法を用いて各筋の張力を推定している。

4. 支持脚筋群の役割

図2に、踵接地タイプの被験者による走速度3.3m/sの定速走動作について、身体重心加速度の水平前後方向成分に対する支持脚筋群の動力的な貢献の分析例を示す。定速走動作では、

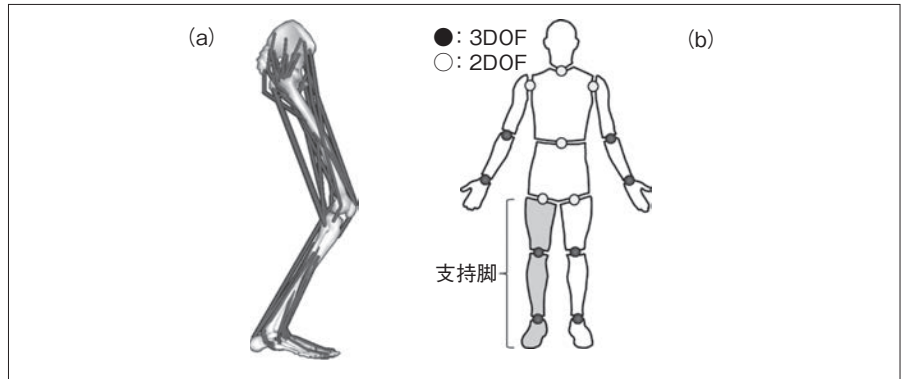


図1 分析モデル。(a) 支持脚筋骨格モデル (b) 全身モデル

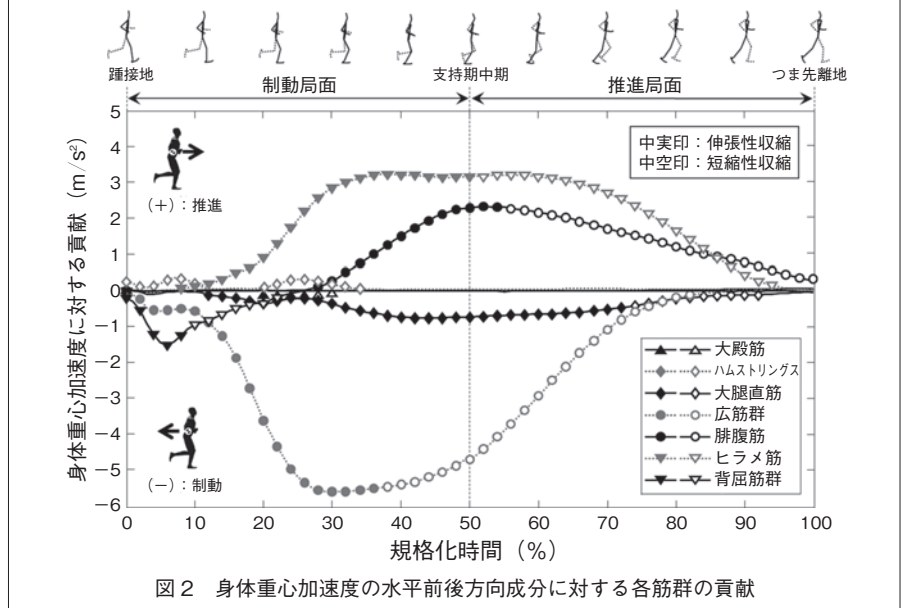


図2 身体重心加速度の水平前後方向成分に対する各筋群の貢献

踵接地から支持期中期までの制動局面において、身体重心が減速され、その後のつま先離地までの推進局面においては、身体重心が加速されており、この減速と加速との相殺によって結果的に一定の走速度を維持している。なお、この走動作では、身体重心加速度のほとんどが、支持脚(地面に接地している脚)の筋群によって生成されたものである。

同図から、まず制動については、広筋群(膝関節の伸張に働く単関節筋群)が大きく貢献していることがわかる。なおこの筋群においては制動局面では主に伸張性収縮、推進局面では短縮性収縮による筋張力がそれぞれ貢献している。広筋群と比較してその貢献は小さいが、大腿直筋(股関節の屈曲、および膝関節の伸張に働く二関節筋)が主に伸張性収縮による筋張力によって制動に貢献していることもわかる。つぎに推進については、ヒラメ筋(足関節の底屈に働く単関節筋)が大きく貢献していることがわかる。なおこの筋においては、制動局面では伸張性収縮、推進局面では短縮性収縮による筋張力がそれぞれ貢献している。また、制動局面中盤からの腓腹筋(膝関節の屈曲、および足関節の底屈に働く二関節筋)

による貢献も大きいことが見て取れる。これらの結果をまとめると、広筋群および大腿直筋の役割は身体の制動であり、ヒラメ筋および腓腹筋の役割は身体の推進となる。

5. おわりに

以上に例示したように、対象とする系の運動方程式に基づく分析では、この運動方程式の持つ入出力間の因果関係を利用することによって、各筋群の動力的な役割を定量化することが可能となる。このことから、今後このアプローチによって、広範囲にわたる身体動作に対する各筋群の役割が明らかになっていくものと考えている。

(原稿受付 2014年1月7日)

[小池関也 筑波大学]

●文献

- (1) 小池関也・森 洋人, 順動力的貢献度によるスポーツ動作における関節トルク・筋張力の機能抽出, バイオメカニクス研究, 12-1 (2008), 58-65.
- (2) Hamner, S.R. and Delp, S.L., Muscle Contributions to Fore-aft and Vertical Body Mass Center Accelerations over a Range of Running Speeds, *Journal of Biomechanics*, 46-4 (2013), 780-787.
- (3) 仲谷政剛・小池関也, 収縮様式を考慮した定速走動作における支持脚筋群の動力的な役割, バイオメカニクス学会誌, 38-1 (2014), 61-73.