

# 生体機構の単・二関節筋駆動の制御則を規範とする二足歩行の提案

河邊 貴之\*, 古関 隆章 (東京大学)

A proposal of biped walking motion control referring mono- and bi-articular muscle actuation of living bodies

Takayuki Kawabe, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

## 1. はじめに

本論文では、二足歩行ロボットの運動に生体機構を取り入れることによる制御の簡略化について取り組んだ。生体機構に着目した研究として、二関節筋をロボットに応用したものの[1]が脚光を浴びており、本論文でも二関節筋機構を含む種々の生体機構に学んだ運動制御について検証を行った。

## 2. 単・二関節筋協調制御による先端力の定式化

ここでは、図1に示す生体の上肢と単・二関節筋協調制御について考える。図中の e1, f1 は肩関節 S を駆動する単関節筋、e2, f2 は肘関節 E を駆動する単関節筋である。単・二関節筋協調制御では、これらの単関節駆動筋に加えて e3, f3 にて表される、肩関節 S と肘関節 E を同時に駆動する二関節筋を導入する。さらに、各筋群により発生される関節トルクと上肢を図2のようにモデル化する。肩関節トルク T1 および肘関節トルク T2 が単関節筋に対応し、T3 が肩・肘関節の両方に作用する二関節筋トルクを表す。手先位置は、肩関節を原点として、

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

であるから、仮想仕事の原理から関節トルクと先端で発生する力との関係がヤコビ行列を用いて以下のように求まる。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \frac{1}{l_1 l_2 \sin \theta_2} \begin{bmatrix} l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) - (l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2)) \\ l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) - (l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 + T_3 \\ T_2 + T_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、ヒトの構造上の特徴に着目すると、各リンク長が等しい。また、日常生活で頻繁に行われる支点と先端を結んだ方向への力を出す場合、 $2\theta_1 + \theta_2 = \pi$  の関係を満たす。こ

れらの特性を取り入れることで

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \frac{1}{2l \sin \theta_1 \cos \theta_1} \begin{bmatrix} -T_1 \cos \theta_1 - T_3 \cos \theta_1 \\ T_1 \sin \theta_1 - 2T_2 \sin \theta_1 - T_3 \sin \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{T_1 + T_2}{l \cos \theta_1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

となる。ここで、最後の項は  $T_1 = -T_3 = T$  としている。このように、単関節筋トルクと二関節筋トルクが釣り合い関係を満たすように制御すれば、非常に簡単に支点と先端を結ぶ方向への曲げ伸ばしによる静力学的な力を発生させることが可能となる。

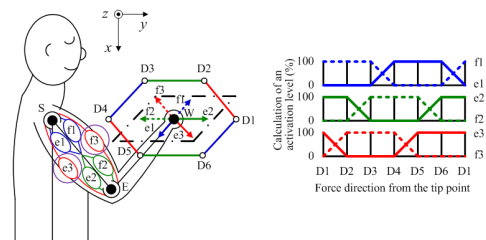


図1 上肢における各筋群と手先出力

Fig.1 Relationship between muscle torque and tip force

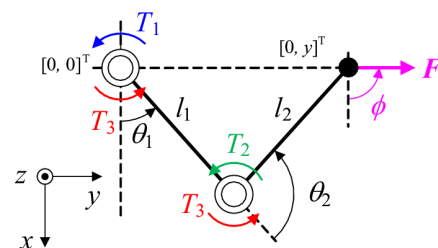


図2 アームモデルと各関節トルク

Fig. 2 The arm model and each joint torque

## 3. 単・二関節筋協調制御による二足歩行

本論文では、二足歩行モデルとして質量が身体重心に集中した単振り子モデルを仮定する。アクチュエータは、腰関節・膝関節の各単関節筋とそれらにまたがる二関節筋トル

クを仮定し、足首関節についてはアクチュエータを持たない受動関節とする。これはヒトのように体幹から末端にかけて筋肉量が少なくなることと合致する。さらに、実際のヒトの歩行と同様に立脚期における膝関節角度は一定とし、変化しないように制御を行う。

二足歩行アルゴリズムとしては、両脚支持期において地面を蹴り出すことによる床反力により運動エネルギーを供給し、立脚期においては足首受動関節を中心とした円運動を行うよう制御する。両脚支持期における各脚が発生する支点と先端を結ぶ方向の力との関係を図3に示す。腰関節と足首関節を結んだ方向を y 軸(求心力方向)、それと直交する方向を x 軸(接線力方向)とすれば、y 軸方向において前脚足首関節を中心とした円運動するための条件として、

$$mr\omega^2 = mg \cos \theta_2 - F_f - F_h \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (4)$$

を満たしつつ、x 軸方向において角加速度方程式

$$I \frac{d\omega}{dt} = (F_h \sin(\theta_1 + \theta_2) - mg \sin \theta_2) L \quad (5)$$

で与えられる円運動を行うよう制御することで、立脚期における運動エネルギーを与える。ここで、 $m$  は全体の質量、 $I$  は立脚足首周りの慣性モーメント、 $L$  は足首関節から質量中心までの距離、 $F_f$  は前脚により発生する床反力、 $F_h$  は後脚による床反力を表す。このとき、後脚は姿勢変化を伴うため、先端に発生させる力に加えて関節角度変化に必要なトルクを足し合わせる必要がある。

立脚期においては、円運動を持続するための条件

$$mr\omega^2 = mg \cos \theta_2 - F_f \quad (6)$$

を満たすよう制御する。足首関節はトルクを発生しないと仮定することから、立脚期には両脚支持期において補償された角運動エネルギーと円運動を保持するための床反力により運動を持続させる。円運動が成立するためには、

$$\omega_0 > \sqrt{\frac{2mgL}{I}(1 - \cos \theta_2)} \quad (7)$$

を満たす初速度を両脚支持期に与えれば良い。

このようにして、単・二関節筋駆動による簡略化された支点と先端を結ぶ方向の力のみで、二足歩行における支持脚の運動を実現することが出来る。

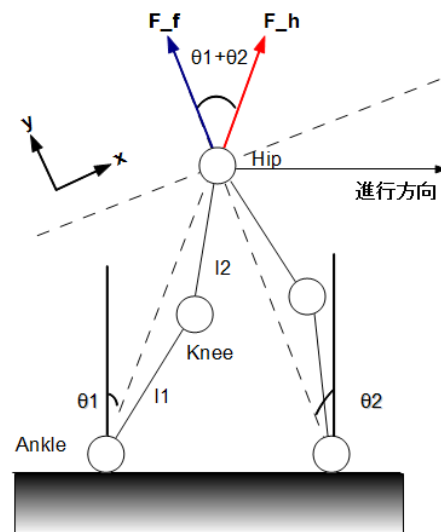


図3 二足歩行モデルと質量中心に加わる床反力  
Fig.3 Biped walking model and ground reaction force

#### 4. まとめ

本論文では、生体機構に着目した二足歩行ロボットの運動制御についての検討を行った。二関節筋機構と各リンク長が等しいことを導入することで、ヒトの日常生活において頻繁に行われる支点と先端を結ぶ方向の運動を特異的に簡略化した式(3)が、歩行動作においても役立つ可能性を示した。式(3)による伸縮方向の単純化された運動と、式(5)で与えられる角運動量に基づく立脚の円運動式(4)(6)により、ダイナミクスに沿った歩行運動が実現される。

今回のモデルでは、式(4)(5)で示される両脚支持期および式(6)(7)の立脚期にのみ着目した検討を行ったが、同様に遊脚期における運動も考慮しなければならない。足首を受動関節とすることで末端部に大きなアクチュエータが必要なくなり、遊脚期に必要なアクチュエータトルクは立脚期に重心を支えるために必要なトルクより小さくなるだろう。このように、本論文の手法を用いることで、身体の末端部を軽くすることが出来るため、遊脚期においてもエネルギー的貢献があると考えられる。

#### 文献

- (1) 熊本水頼: "ヒューマノイド工学", 2006

