

# 倒立振り子系に基づく人間の歩行分析と評価指標の提案

本城豊之<sup>†1</sup>

**概要:** モーションキャプチャシステムの開発により、人体の複雑な運動を簡便に計測することが可能となった。計測した人体各部の位置データを元に、目には見えない重心の運動や関節で発揮されている力情報などを推定することが可能となり、人間の運動の特徴などが明らかにされてきた。本発表では人間の基本的な運動の一つである二足歩行を対象とし、モーションキャプチャによって計測・算出した歩行時の重心の運動を倒立振り子系として扱うことで判明した二足歩行における上半身の役割について報告する。

**キーワード:** 二足歩行, 倒立振り子, 運動計測

## Bipedal Walking Analysis Based on an Inverted Double Pendulum Model

TOYOYUKI HONJO<sup>†1</sup>

**Abstract.** Motion capture system enables us to estimate and evaluate human body dynamics during walking. I have previously revealed a role of the upper body during walking based on a bipedal walking simulation using an inverted double pendulum model, which consists of the upper and lower bodies. In this paper, I introduce the importance of the upper body to improve walking performance.

**Keywords:** Bipedal Walking, Inverted Pendulum Model, Motion Analysis

### 1. はじめに

モーションキャプチャシステムの開発により、人体の複雑な運動を簡便に計測することが可能となった。そのため、計測した人体各部の位置データを元に、目には見えない重心の運動や床反力データとの組み合わせによって関節で発揮されている筋力情報などを推定することが可能となり、人間の運動の特徴などが明らかにされてきた。

歩行運動は人間の生活において最も基本的な動作の一つであるだけでなく、近年ウォーキングなどの形で健康増進のためにも積極的に行われている活動でもある。しかし、この人間の二足歩行を評価する定量的な指標には今もって研究の余地がある。

著者らは効率的な歩行のために上半身を活用するための手法を数値シミュレーションを通じて模索してきた。その結果、人間の歩行運動を二重倒立振り子系として扱うことで、これを達成するための一手法を提案した[1]。そして、モーションキャプチャを用いた歩行計測・分析から、提案手法と人間の二足歩行運動との関係を調査した[2][3][4][5]。本稿ではこの歩行時の重心の運動を二重倒立振り子系として扱うことで判明した二足歩行における上半身の役割について報告する。

### 2. 二重倒立振り子モデル

本稿では歩行運動を上半身の重心位置からなる二重倒立振り子として扱う(図1)[1][2][3][4][5]。光学式モーションキャプチャによって計測した人間の身体各部位の位置情報から、人間の身体部分慣性特性[6]を用いて重心位置を算出する。この時人体は13の部位に分けられ、上半身は頭部、胴、左右上腕・前腕(手を含む)からなり、下半身は骨盤、左右大腿部、下腿部、足部からなる。このように扱うことで、複雑な歩行運動の中から上半身の運動の影響を二重倒立振り子の角度(Upper Inverted Pendulum Angle : UIPA)として扱うことが可能となる。提案手法では以下の2つの条件が満たされることが重要である(図2)[1]。

- 歩行中 UIPA の値が一定に保たれる
- UIPA の角度を前方(進行方向)に傾けておく

この2条件が満たされた場合、シミュレーションでは歩幅や歩行速度が上昇し、エネルギー効率が改善した[1]。これは上半身によって重力を巧みに利用し歩行に活用できることを示している。

先行研究から人間は歩行中、歩行速度や歩行路の斜度が変化したとしても重心周りの角運動量を抑制しているが判明している[7][8][9]。そのため、提案された2条件の前者に関しては、人間の歩行運動においても満たされていることが予想される。しかし、後者の角度の大きさに関しては

<sup>†1</sup> 立命館大学  
Ritsumeikan University

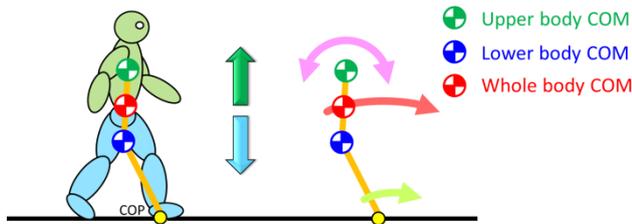


図 1 歩行運動と二重倒立振り子モデル

Figure 1 An inverted double pendulum model for bipedal walking.

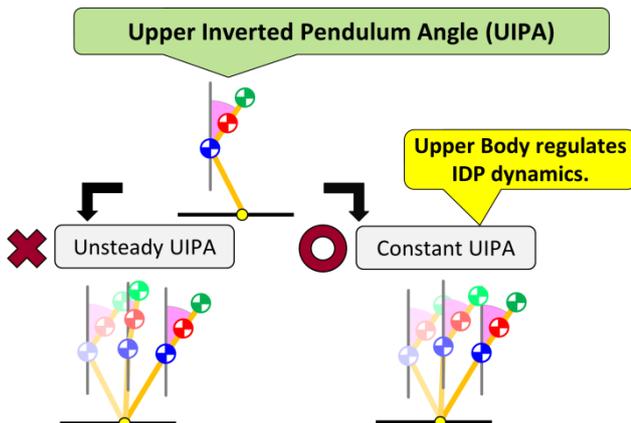


図 2 二重倒立振り子モデルに基づく歩行運動指標

Figure 2 Walking characteristic based on an inverted double pendulum model.

研究されていなかったため、歩行運動と UIPA との関係を調査した。

### 3. 二重倒立振り子モデルに基づく歩行分析

#### 3.1 平地歩行に関して

平地歩行に関して、快適な歩行速度とそれよりも速い歩行速度での歩行をモーションキャプチャを用いて計測した。結果として平地歩行においては、速度が変化したとしても UIPA の値は一定に保たれていた([7][8]と同様に角運動量が抑制されていた)。また、歩行速度が上昇することで UIPA の平均値は有意に前傾することが判明した[2][5]。UIPA の平均値は大股歩行のような歩幅の大きさでは有意な変化を占めず、歩行速度では有意な変化を示した[5]。このことから、人間は上半身を用いて歩行速度を調整していることが示唆された。

#### 3.2 斜面歩行に関して

傾斜面上における歩行を評価するために、傾斜角 15 度の斜面登り歩行においても、快適な歩行速度とそれよりも速い速度での歩行を計測した[3][4]。結果として平地歩行と同様に、歩行速度の上昇によって UIPA は有意に前傾した[3][4]。このとき、[9]と同様に UIPA の値は斜面歩行におい

ても一定に保たれているため、斜面登り歩行においても人間は上半身によって歩行速度を調節していると考えられる。この速度調節は足の接地様式(踵接地とつま先接地)等にも影響されないことが分かった[4]。

#### 3.3 上半身の歩行速度調節機能

人間の歩行速度は経済速度の観点からエネルギー効率と密接な関係になる。そのため、上半身による歩行速度の調節は歩行時のエネルギー効率にも関係していると考えられる。そのため、速い歩行速度において意図的に UIPA を前傾させないことで、下半身の活動を増加させるなどの、ウォーキング等の運動における評価指標として利用できる可能性が考えられる。

### 4. おわりに

歩行は日常的な活動であり、運動としても積極的に取り入れられているが、その定量的な評価指標の確立には研究の余地がある。モーションキャプチャを用いることで、二足歩行という複雑な運動を簡便な二重倒立振り子モデルとして扱うことができるようになり、UIPA という歩行速度と関係した評価指標が提案できた。今後はこの UIPA の値をウォーキング等の運動に対する定量的な評価指標として応用できるよう、ウェアラブルな計測方法の考案や基準となる角度の算出を目指す。

### 参考文献

- 1) Honjo, T., Nagano, A. and Luo, Z.W.: Parametrically excited inverted double pendulum and efficient bipedal walking with an upper body. *Robotica*, Vol. 31, No. 6, pp.875-886 (2013).
- 2) Honjo, T. and Isaka, T.: Upper Body Behavior in Human Walking Based on Inverted Double Pendulum, 7th World Congress of Biomechanics, (2014).
- 3) 本城豊之, 長野明紀, 伊坂忠夫: 斜面歩行時の上半身重心解析, 第 23 回日本バイオメカニクス学会大会予稿集, (2014)
- 4) 本城豊之, 原以起, 岡村成浩, 伊坂忠夫: 斜面登り歩行時における足部接地様式と上半身の速度調節機能の関係, *スポーツアンドヒューマンダイナミクス*, (2014).
- 5) Honjo, T., Tanaka, T., Fujimoto, M., and Isaka, T.: Effect of step length on upper body dynamics using an inverted double pendulum model, *International Society for Posture and Gait Research World Congress 2015*, (2015).
- 6) 阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志: 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定, *バイオメカニクス学会*, Vol. 11, pp. 23-33, (1992).
- 7) Herr, H., and Popovic, M.: Angular momentum in human walking. *Journal of Experimental Biology*, 211, pp. 467-481 (2008).
- 8) Bennett, B.C., Russell, S.D., Sheth, P. and Abel, M.F.: Angular momentum of walking at different speeds. *Human Movement Science*, Vol 29, No. 1, pp.114-124 (2010).
- 9) Silverman, A.K., Wilken, J.M., Sinitski, E.H., and Neptune, R.R.: Whole-body angular momentum in incline and decline walking, *Journal of Biomechanics*, Vol. 45, No. 6, pp. 965-971 (2012).