

上肢を有する受動歩行の研究

茂瀬 亮太 内田 翔
法政大学大学院工学研究科電気工学専攻

小林 尚登
法政大学工学部システムデザイン学科

能動的に制御する歩行運動と比較して効率のよい受動歩行をヒューマノイド等へ応用するには、上肢を有する二足歩行モデルでの議論が必要である。つまり、上体の姿勢および腕の動作等の上肢の状態が受動歩行に与える影響を解明しなければならない。しかし、現在までの受動歩行研究の多くは脚部のみを対象としたモデルが多く、胴と腕を有する二足歩行モデルの研究例は少ない。そこで、本研究では腕、胴、脚を有した二足歩行モデルを用い、上体姿勢、腕振り動作の諸条件を変化させることでシミュレーション実験を行った。シミュレーション実験の結果に基づいて上肢を持つ受動歩行の安定性について解析し、報告する。

1. はじめに

McGeer[1] はアクチュエーターを用いずに緩やかな斜面を歩行する歩行機械を製作し、実験的に実現したことで、ダイナミクスを規範とする受動歩行の可能性を示した。

能動的に制御する歩行運動と比較して受動歩行はエネルギー効率の高い歩行であり、複雑な制御や軌道計画を必要とせずに滑らかな歩行運動が生成可能という利点がある。

また、それと同時に人間を力学的にモデル化し、運動解析を行うことは、人間の歩行メカニズムを解明することの一助となると考えられる。

しかし、現在までの受動歩行研究の多くは脚部のみを対象としたモデルが多く、胴と腕を有する二足歩行モデル[5]の研究例は少ない。一般的なヒューマノイド等への応用や人間の運動解析を行うには上体の姿勢および腕の動作が受動歩行に与える影響を無視することはできないと考えられる。

そこで、本研究では腕、胴、脚を有した二足歩行モデルを用い、胴体の姿勢、腕の動作といった諸条件を変化させることでシミュレーション実験を行った。シミュレーション実験の結果に基づいて上肢を持つ受動歩行の歩行安定性について解析し、報告する。

2. 受動歩行モデル

本研究で用いる受動歩行モデルの概要図を Fig.1 に示す。簡単化のため膝および肘はなく、5link, 7 質点とした。この受動歩行モデルでは膝関節がないため片足支持期において遊脚が地面に擦る現象が一般に起きる。これは Foot Scuffing 問題と呼ばれ、ここでは遊脚に伸縮機構があると仮定し、これを回避することができるものとする。

2.1 運動方程式の導出

二足歩行は片方の足が支持脚となり、もう一方が遊脚となる。このような一脚支持期は倒立振り子系と同等であり、運動方程式は次のようになる。

$$M_{\theta}(\theta)\ddot{\theta} + C_{\theta}(\theta, \dot{\theta}) + G_{\theta}(\theta) = \tau_{\theta} \quad (1)$$

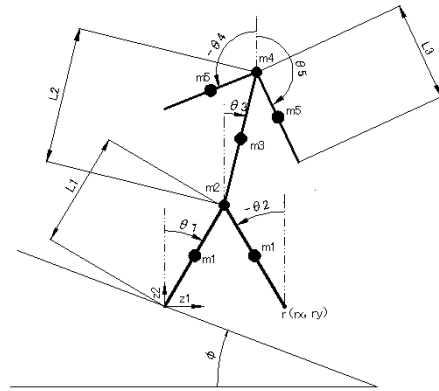


Fig.1 passive walker model

$M_{\theta}(\theta) \in R^{5 \times 5}$ は慣性行列, $C_{\theta}(\theta, \dot{\theta}) \in R^{5 \times 5}$ は遠心力, コリオリ力項行列, $G_{\theta}(\theta) \in R^{5 \times 1}$ は重力項ベクトル, $\tau_{\theta}(\theta) \in R^{5 \times 1}$ は入力トルクベクトルを表している。

また, $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5]^T$ となる。

2.2 衝突モデル

歩行時の遊脚が接地することにより、対象モデルは遊脚と地面の衝突を含む離散力学系として表現される。支持脚、遊脚の角度、遊脚着地によって変化する角速度をそれぞれ計算し衝突後の角度、角速度を再設定する[2]。支持脚の足先(接地点)における座標 (Z_1, Z_2) を含め一般化座標系を再設定すると運動方程式は次のようになる。

$$M_q(q)\ddot{q} + C_q(q, \dot{q}) + G_q(q) = \tau_q \quad (2)$$

再設定された一般化座標系 $q = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, Z_1, Z_2]^T$ とし $M_q(q) \in R^{7 \times 7}$, $C_q(q, \dot{q}) \in R^{7 \times 7}$, $G_q(q) \in R^{7 \times 1}$,

$\tau_q(q) \in R^{7 \times 1}$ とそれぞれなる.

また, 2link 目の先(遊脚の足先)の座標 $r = [r_x, r_y]^T$ と関節角度の関係から

$$\dot{r} = J\dot{q} \quad (3)$$

が成り立つ. ただし, $J \in R^{2 \times 7}$ はヤコビ行列である. 遊脚が地面に着地したとき, 遊脚が

- 1: 遊脚足先は地面と完全非弾性衝突をする.
- 2: 衝突点において滑りと跳ね返りは無い.
- 3: 遊脚と支持脚は瞬時に切り替わる.

この3つの条件を満たす時, 次の拘束条件が満たされる.

ここで衝突直後の速度ベクトルを \dot{q}^+ , 衝突直前の速度ベクトルを \dot{q}^- とすると

$$\dot{r} = J\dot{q}^+ = 0 \quad (4)$$

また, 足先に加わる着地時に発生する激力を $F_{ext} \in R^{2 \times 1}$ とすると

$$M_q(q)(\dot{q}^+ - \dot{q}^-) = J^T F_{ext} \quad (5)$$

が成り立ち, 式(4), 式(5)をまとめると

$$\begin{pmatrix} \dot{q}^+ \\ F_{ext} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_q(q) & -J^T \\ J & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_q(q)\dot{q}^- \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

上式より \dot{q}^+ を求めることで着地直後の各関節ベクトルの角速度を算出できる. より詳しい導出過程については文献[2]を参照されたい.

3 シミュレーションによる運動解析

受動歩行は適切な関節角, 角速度の初期値を与えることで定常的な歩行が成立する.

本稿では, $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ の初期値を探索集合内で任意に指定したとき, 受動歩行が成立する初期条件の多さを安定性の指標とする.

これは, 受動歩行が成立する股関節, 足首関節に与える初期値の組み合わせが多いほど, 受動歩行が成立しやすい状態, または環境であると考えられるからである. ここで, 状態とは受動歩行モデルの胴体の姿勢と腕の動作, 環境とは歩行路面の傾斜角のことを意味する. また, 本稿では 10[s] 以上受動歩行が継続する初期条件の集合領域のことを安定領域と表現する.

シミュレーション実験は傾斜角度を一定として胴体姿勢角度を変動させ, 腕を振らない制御を加えた場合と, 腕振り制御を加えた場合の2パターンで行う. 腕を振らない制御を加えた場合は, 腕なし胴体付受動歩行モデルと等価であると考えられる.

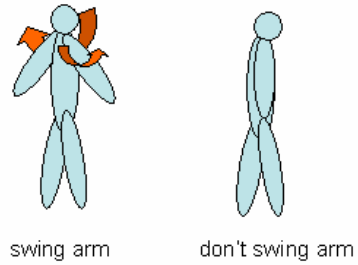


Fig.2 pattern of arm control

両実験パターンを行うことで, 歩行安定性の面で腕の存在, または動作がどのような影響を及ぼしているかを解析し, 考察する.

3.1 シミュレーション諸条件

股関節の質量 m_2 , 肩関節の質量 m_4 に関しては胴体中心に質量が集中しているとし無視する. また, 肩, 股関節の粘性摩擦は無視できるものとする. 各リンクを円柱形の剛体として考え, 平均的な成人男性の手足胴の長さ, 太さ, 体重を参考にして次のように定めた.

・質量

$$m_1 = 9.725 [kg] \quad m_3 = 32.753 [kg] \quad m_5 = 5.541 [kg]$$

・link 長

$$L_1 = 0.748 [m] \quad L_2 = 0.653 [m] \quad L_3 = 0.578 [m]$$

また, 変動させるパラメータと探索範囲を次のように定めた.

初期値 ($\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$)

$$\text{探索範囲} (0 \quad \dot{\theta}_1 \quad 2.5 [\text{rad/s}] \quad 0.01 \text{ 刻み})$$

$$(-4.0 \quad \dot{\theta}_2 \quad -1.5 [\text{rad/s}] \quad 0.01 \text{ 刻み})$$

胴体の姿勢 (θ_3)

$$\text{探索範囲} (-0.5 \quad \theta_3 \quad 0.5 [\text{rad}] \quad 0.1 \text{ 刻み})$$

$$\text{傾斜角} : 0.03 [\text{rad}] \text{ (constant)}$$

上述したパラメータを変動させ, 受動歩行が 10[s] 以上継続したときの値をそれぞれ集計した.

尚, 腕を振る制御では腕振り周期 1.4[s], 振幅 $\pm 0.3 [\text{rad}]$ となるようにし, 腕を振らない場合では腕が胴体角度と等しくなるような制御を加えた.

また, 前述の Foot Scuffing 問題を回避するため遊脚角度 θ_2 が $-0.25 + \phi$ θ_2 $0.25 + \phi$ [rad] の間にあって, 遊脚の長さを 1[cm] 縮小させることとした.

3.2 シミュレーション結果と考察

Fig.3 に腕を振らない制御を行った場合, Fig.4 に腕振り制御を行った場合の結果をそれぞれ示す.

Fig.3 を見ると後傾姿勢においては広い安定領域を得られているが, 前傾姿勢になるにしたがって安定領域が狭くなっていることがわかる. それに対し, Fig.4 を見ると前傾姿勢になっても後傾姿勢時とほぼ同等な広い安定領域が得られている.

従来, 腕を周期的に振る動作は, 人間のヨー方向のモーメントを打ち消すための動作であると考えられてきた. そのため, 本研究モデルのようなロール方向に転倒しない拘束がある 2次元歩行モデルに対しては腕の動作は影

響しないと考えられる。

しかし、今回の結果より腕を周期的に振ることで胴体姿勢が前傾になっても広い安定領域を得られている。このことは、2次元歩行モデルあっても腕の存在、動作が歩行安定性に影響を及ぼし、且つ受動歩行的安定性が向上することを示している。

つまり、受動歩行機械のモデル化、今後、応用されるであろうヒューマノイドへのダイナミクススペース制御を行う上で、腕は無視できないと考えられる。

4 おわりに

本研究では、上肢を有する受動歩行モデルの腕の動作を変化させて、シミュレーション実験から解析を行った。

実験結果から、腕の動作が受動歩行の歩行安定性に影響を与える可能性が高いということを示した。

今後の課題としては、受動歩行におけるの胴体姿勢、腕振り動作が歩行安定性へどのような影響を及ぼすのかを力学的解析によって明らかにしたい。

参考文献

- [1] T. McGeer ; Passive Dynamic Walking ; The Int. J. of Robotics Research, Vol.9, No.2, pp.62-82, 1990.
- [2] J.W. Grizzle, G. Abba and F. Plestan ; Asymptotically Stable Walking for Biped Robots: Analysis via Systems with Impulse Effects. ; IEEE Transactions on Automatic Control, Volume 46, No.1, Jan. 2001 pp:51- 64
- [3]Fumihiko Asano, Masaki Yamakita, Norihiro Kamamichiand Zhi-wei Luo ; A Novel Gait Generation for Biped Walking Robots Based on Mechanical Energy Constraint ; Robotics and Automation, IEEE Transactions on, Volume 20, Issue 3, June 2004 Page(s):565 – 573
- [4]A. Goswami, B. Thuilot, and B. Espiau ; Compass-like biped robot Part I: Stability and bifurcation of passive gaits ; INRIA Research Report No. 2996, October 1996
- [5] 藤本英雄, 池俣吉人, 佐野明人, 上体を含んだ受動二足歩行の運動解析; ロボティクス・メカトロニクス講演会 02 講演論文集, 1A1-H07, 2002

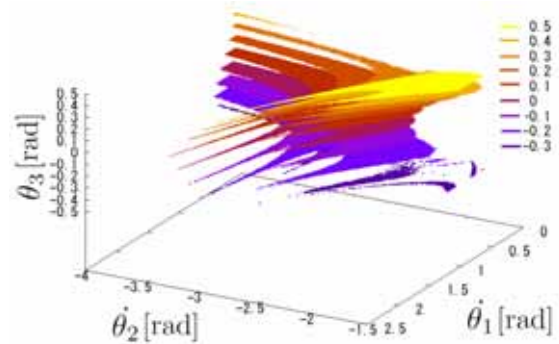


Fig.3 initial values area of each angle of body (don't swing arm)

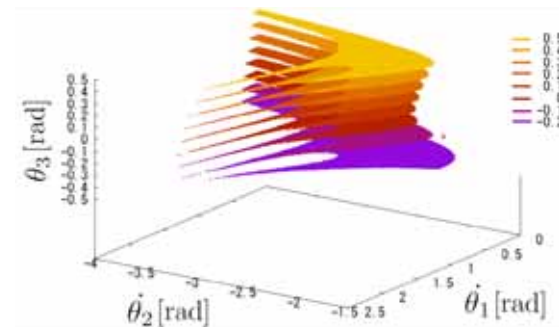


Fig.4 initial values area of each angle of body (swing arm)

キーワード.

受動歩行、上肢、上体

Summary.

Study of passive walker with upper limb

Ryota Mose Sho Uchida
Graduate School of Engineering, Hosei University

Hisato Kobayashi
Art and Technology, Faculty of Engineering, Hosei University

This paper analyzes a property of passive walking mechanism, which has upper body and arms. Though there are lots of studies on passive walkers, it is still unclear how its body posture and its upper limb's motion affect its stability. By doing various kinds of computer simulations, we can derive an answer to the above open question; namely we can know the sinusoidal movement of the arms gives positive effect to the walking mechanism.

Keywords.

passive walking, upper limb, upper body