

曲線足裏断面形状を持つロボットのメモリ・ベースト制御による 二足歩行シミュレーション

宮腰 清一 (産総研)

Memory based control of bipedal walking robot with round foot profile

*Seiichi MIYAKOSHI (AIST)

Abstract— In this paper, with a compass-like biped model, a memory-based controller for a planar bipedal walking system is presented. This paper is structured into three parts: Firstly, it is shown that the model with a point shaped foot is able to represent human walking characteristics. A systematic conversion from the point shaped foot to the equivalent of a normal surface foot - resembling the shape that of humans, this extension preserves the same human-like walking characteristics. Secondly, the memory based walking motion generation and controller is presented, this controller refers to a memorized trajectory library, made of neutral orbits with various gait parameters for continuous walking. Thirdly, the proposed surface foot and the controller are combined, and the bipedal system is examined and evaluated with dynamical simulations.

Key Words: Bipedal walking control, compass-like biped model, foot sole profile, motion based shape design, partial passive system, memory based motion generation and control.

1. 始めに

今日まで、歩行様態や安定性に関して、足裏形状やその重要性を話題として扱っている論文は極めて少ない。一般に、二足歩行の安定化において、制御の形式が足裏形状を無条件に規定してしまう(逆に言えば、特定形状を前提としてしまう)ため、相互の依存関係は暗黙の前提となり、そもそも相上り載らない。

ZMP(zero moment point)[1]を基とした制御は、足裏と地面との接触面の凸包中に、幾何的にZMPを留める事により、安定性を保証している。それ故、安定性を最大化するため、多くは四角く平らな足裏(四隅の点で支えるものも同様)を用いている([2]等)。例外的に、ヒューマノイドH7はヒトのように分割・可動の爪先機構を装備しているが、構造の設計パラメータの決定理由は述べられていない[3]。

これとは別に、様々な二足歩行に対するアプローチが、受動歩行[4]とホッピング・ロボット[5]を代表として研究されている。これらでは、理論的な単純化が可能な、点状の足先、または円弧状の足裏が用いられる。

本論文では、[6]で提案した安定化制御方式と[7]で提案した運動中の最適化に基づく、ヒト類似の足裏形状の形成法とを利用して、特定の足裏形状に依存せず安定化制御が可能な事を示し、また、足裏形状と歩きやすさの関係の評価に使用可能な方法を提案する。

一般に、二足歩行ロボットの大域的安定化制御を行うには、実時間で目標軌道自体の(微調整ではなく)大幅な修正が必要と考えられる。実時間性は、転倒が短時間で起こるためであり、目標軌道自体の大幅な修正は、マニピュレータと違い、系が安定な基盤に固定されていない[1]劣駆動系(under-actuated system)[8]であるため、当初の(一步を踏み出した時点での)計画目標軌道への復元が常に可能ではないからである。

従来、歩行制御において目標軌道は一つで、実際の状態が軌道から外れた場合、そこに復元する形の制御

系を組む([9]を筆頭に、目標軌道自体を一定程度修正する事は行われている[10][11])。多重軌道推移制御と名付けた本論文で用いた制御法(枠組みはメモリ・ベースト制御)のポイントは、類似中立軌道を多数(全て)並べて用意しておき、必要に応じて軌道自体を取り替える(推移させる)事で、復元せずに広い範囲で平衡状態を維持し続ける事にある。同様の考え方とシミュレーション結果(外乱に対する強いロバスト性)は、P.-B. Wieber[12]により示されているが、運動方程式を導くやり方(点状足先モデル)のため、本論文のように任意形状の足裏の場合を取り扱うのは現実的には難しい。

一方、足裏形状形成に関しては、一般的な機械システムの設計手順(形状・機構→目標軌道、制御)を一部逆転させ、簡単な機構設計(点状足先)において、ヒトと同様の歩行特性が得られるような目標軌道(運動パターン)設計を先にしておき、その運動パターンに基づいて、特性を維持するように足裏断面形状曲線の設計(最適化による自動設計)を行う、と言う手順を取る。

本論文の構成は以下の通り。2.章において、劣駆動性を意識した形でモデル化を行う。3.章において、前章(2.章)での基本モデル(点状足先)に基づき、足裏断面形状(曲線状足裏)を求める手法と求めた最適足裏形状を示す。4.章において、メモリ・ベースト運動制御に基づく、大域的にロバストな安定化が可能な二足歩行制御法を示す。5.章において、シミュレーションによる検証結果により、メモリ・ベースト運動制御が足裏形状の違いに基本的にロバストである事、足裏形状の違いに対して調整したパラメータが歩きやすさと関連がある事が示唆される事、求めた最適足裏形状が歩きやすい足裏である事等を示す。

2. 基本モデルと基本運動パターン [13]

本論文で採用しているモデルは、ヒトの全身の構造を極限まで簡素化した形態(Fig. 1左を参照)へとまとめた矢状面内コンパス状二足歩行モデルである。受動

歩行でよく見られるモデル化の一つとして、同様のコンパス状モデル [14][15][16] が、研究されている。

Fig. 1 中央に示すモデルは、二本の棒状の分布質量脚、股関節部に重なる質点の上体、点形状足先、摩擦や粘性の無い回転型股関節、膝部の直動関節から構成されている。地面は平坦で、接触力は鉛直方向は弾性・粘弾性要素、水平方向は摩擦要素を通じて発生させている。 θ は垂直軸からの股関節角度であり、歩行運動パターンを決める独立変数である。Fig. 1 右は、動力学シミュレータ LMS DADS (LMS International 社の製品) 内に作成したモデルである。

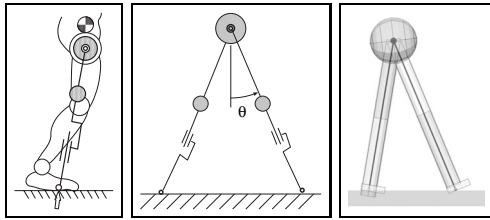


Fig.1 Biped walker model: A compass-like leg configuration provides a simplified and equivalent human-leg like mechanism. Compass-like biped walking model and the model in the dynamic simulator LMS DADS.

シミュレーション・モデルの物理パラメータを Table 1 に示す。ヒトの質量配分 [17] を目安にしている。

Table 1 Physical parameters of the biped model

Torso mass	40.0	[kg]
Leg mass	10.0	[kg]
Foot mass	1.0	[kg]
Thigh neutral length	0.5	[m]
Shank neutral length	0.5	[m]
Restitution coefficient	0.0	
Floor young's modulus	2.058×10^7	[N/m ²]

このモデルは、股関節フリーでも、Fig. 2 に示すように、脚の振りに同期して、その 3 倍の周波数で脚伸縮を行うだけで、歩行様の運動が行える。ただし、この形態の二足歩行は、不安定平衡状態である。しかも、

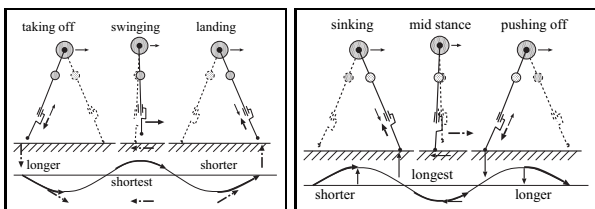


Fig.2 Conditions of swing leg, and extrapolated stance leg

一見するとヒトの形状と大きく異なるモデルの構造や簡単化だけを目的として作作的に与えた運動パターンによる歩行運動のようだが、動力学シミュレーションを

行くと、床反力は、ヒト歩行の反力 [18] と良く対応し、パタン、大きさ、周期の類似が見られる [13]。また、両脚支持期と単脚支持期のデューティ比は、1 重複歩に対して約 20% となった。この百分率もヒトのそれ [19] と良く対応している [20]。

最終的にヒトと類似する歩行を目指す研究に簡単なコンパス状モデルを用いる事は、妥当性を失わない。

2.1 長く歩ける歩容パラメータ

股関節フリーの場合において、コンパス状モデルの歩行周期と歩幅に関し、歩行周期は脚の振り子としての固有振動数でほぼ決定されてしまうが、歩幅は脚伸縮の強さとの関係で決まり、広過ぎても狭過ぎても安定性を欠き、最も長く(多歩数)歩ける、という意味で、歩きやすい歩幅が存在した [20]。本研究では、あらゆる歩幅と歩行周期に対して歩きやすい足裏形状が存在する、ないしは、全ての形状の平均を取る、という考え方をせず、最も歩きやすい歩幅と歩行周期の時の脚伸縮のパラメータに対して足裏形状を歩きやすいように最適化する、とした。これは、現実に、ヒトの歩行において、歩きやすい歩容が存在し、その最も利用率が高いと考えられる歩容に対して、足裏形状の最適化が成されるのが妥当であろう、と考えたためである。

3. 点状足先から曲線状足裏へ [7]

2. 章での極端に簡素化されたモデル(機構と運動)でも、ヒト類似の二足歩行運動を生成することができる。我々は、足部に曲線状の足裏を導入する事で、このモデルを発展させる。

3.1 脚の直動から足首の回転への関係づけ

足部の拡張された足裏の曲線形状を得るために、対応する拡張された運動パターンを定義する必要がある。足裏の縦断面曲線形状は、離床(push-off)と着床に最適化されている、との仮説を立て、足部を爪先部分(離床)と踵部分(着床)との二つの部分に分け、独立して動かした。

直動脚の伸縮運動は、脚運動の総計を表している(Fig. 1 左を参照)。脚の直動運動は、それに対応する膝の曲げ伸ばしと足首の回転運動、と言う二つの運動に分解される(Fig. 3 左を参照)。

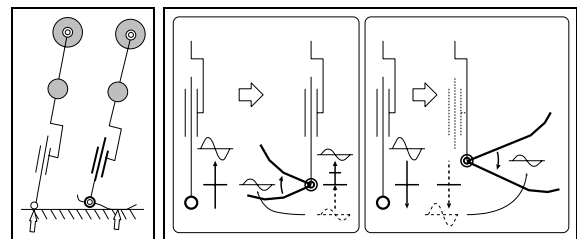


Fig.3 Decompose the leg motion to prismatic knee and rotational ankle motion to transform from point foot to surface foot

爪先と踵の各々についての足首の正弦波的回転の周期は、前記の直動脚の運動と同じであるが、相互に逆相である。これは、爪先部分の離床(蹴り出し)、踵部

分の着床(軟着陸)が、両者とも足首の回転としては底屈方向の運動として働いている事による。

拡張された機構と運動パターンは、Fig. 3 に示される。着床において、脚の直動関節は中立点(脚全体の最大伸縮幅の中央)から最短へと収縮し、その間、足首関節は最大背屈から最大底屈へと回転する(Fig. 3 中央を参照)。これに対して、離床(push-off)時に、脚の直動関節は最短のままで固定され、その間、足首関節は、最大背屈から最大底屈へと回転する(Fig. 3 右を参照)。

足首での回転運動の振幅は、(自然長における)2本の脚と両脚支持期の歩幅との間で出来る二等辺三角形の底角と同じになるよう、幾何学的に決められる。

3.2 接触点群の配置最適化による足裏形状曲線

足部曲線は、接触(点)要素を並べる事により構成されている(Fig. 4 左)。半径10[mm]の接触要素は、中心が10[mm]ずつ離れた距離に並べられている。

爪先と踵の部分における、これらの接触要素の中心の垂直方向変位は、適当な値に設定された後、歩行の試行が行われ、歩けた歩数が記録される。適当に選んだ接触要素を微少に変位させて、同様の行程を繰り返し、最も安定的な歩行となる(歩数が多くなる)ような足裏断面曲線(接触要素変位配列)が得られる。このモデルは、2.章の記述のように、不安定平衡な歩行であり、足裏に不適切な凹凸があったり、形状により着地や蹴り出し(push off)が不適切であると、即座に転倒につながる。足長は、まず、多めの数の接触要素を配置し、最適化後、歩行中に床と一切接触しないような要素は取り除く、と言う手順により定めた。

3.3 最適化足裏断面曲線

Fig. 4 は、最適化後、獲得された足裏断面曲線である。右側が爪先で、左側が踵である。ワイヤフレームの柱状に描かれたものは、下腿である。

今回は、[7]で求めたものと比較すると、形、大きさ、比率のヒトとの類似度は低くなっており、全体的に円弧状の足裏に近づいた。

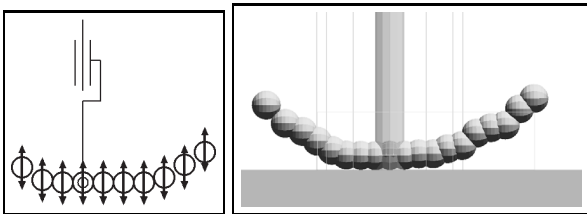


Fig.4 Schematic picture of foot profile adjustment and acquired foot profile via optimization

3.4 一体化された足裏での運動

分割された足部に対する二つの回転型駆動器は、これまで述べたように、それぞれ逆相である。以降のシミュレーションで、足部一体化により運動の矛盾が起きないように、位相によって全体を6つに区分し、連続的に運動が起きるように足首の回転運動を再設計した。

4. 多重軌道推移制御 [6]

本論文で利用する、多重軌道推移制御と名付けたメモリ・ベースト運動制御の具体的手順を以下にまとめる。

1. ballistic 歩行の能動化と記述関数による歩容のパラメータ化
2. 動力学シミュレータを用いた、記述関数パラメータと対応付けられた中立軌道群から成るデータベース構築
3. 状態をキーにした、データベースからの記述関数パラメータの検索と再現による運動生成・制御

4.1 ballistic 歩行の能動化

全てが自由関節の場合、固定脚長コンパス状二足歩行モデルの一步の対称踏み出し運動における股関節角度(脚の相対角度) φ の時間変化は、式(1)の余弦関数

$$\varphi = -2a \cos(2\pi ft) \quad (1)$$

で近似できる。式(1)を記述関数と呼ぶ。

記述関数を目標軌道と見て股関節にサーボを掛けると全体の踏み出し動作は殆ど異なるない。

4.2 軌道群データベース構築

ある一組の股関節記述関数のパラメータ(歩行周期に対応する周波数 f 、歩幅に対応する振幅 a)に対して、対称歩容の、支持脚の角度 θ ・角速度 $\dot{\theta}$ から成る双曲線的な一本の軌道(状態遷移曲線)が求められる(上体の適切な初速度は求める必要がある)。手順(Fig. 5に模式図)の繰り返しにより軌道群のデータを求めて、データベースを作成した。

4.3 再現による運動生成・制御

4.3.1 単脚支持期

前節では、股関節の記述関数パラメータから、支持脚の角度・角速度の時間遷移への対応関係を求めた(Fig. 5)。逆に、この対応関係を参照する事で、現在の支持脚の角度・角速度から、対応する(最も近い)軌道が求められる。そしてその軌道に対応する股関節の記述関数パラメータ(振幅 a と周波数 f 、時刻 t)が求められる。記述関数を今度は目標値生成関数($M_h()$)として見ると、股関節の目標角度が求まる(Fig. 6)。

$$\varphi_d = M_h(a, f, t) = -2a \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

目標角速度は、目標角度の式(2)を微分しておく。

$$\dot{\varphi}_d = 4\pi fa \sin(2\pi ft) \quad (3)$$

一方、脚長は、遊脚の前方への振り抜きを行うために、時刻 t と周期 $T(=1/f)$ から位相 $\phi(=t/T)$ を求め、区分的に、以下の脚長の変位量(正が収縮、負が伸長)の目標値 δ を与えた。 δ_{sw} は遊脚、 δ_{st} は支持脚を表す。 $d(=0.03)$ は定数とした。

$\phi < 1/6$ または $5/6 < \phi < 1$ の時、

$$\delta_{sw} = \delta_{st} = d \sin(2\pi(1.5\phi)) \quad (4)$$

$1/6 < \phi < 5/6$ の時、

$$\delta_{sw} = d \quad (5)$$

$$\delta_{st} = -0.5d(\sin(2\pi(1.5\phi)) - 1) \quad (6)$$

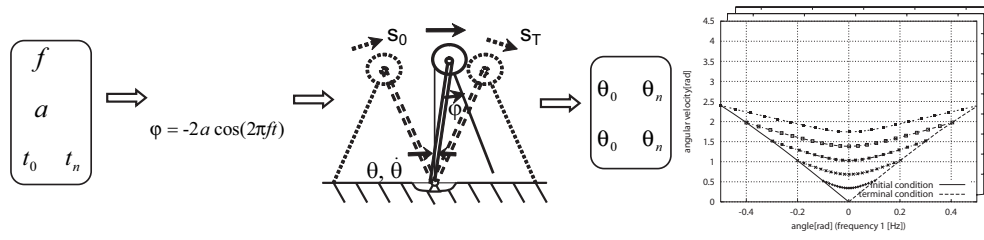


Fig.5 The procedure to acquire the data sets for each combination of parameters including time. For each set of frequency and amplitude, a corresponding symmetric trajectory with sampling time interval are derived from dynamic simulations.

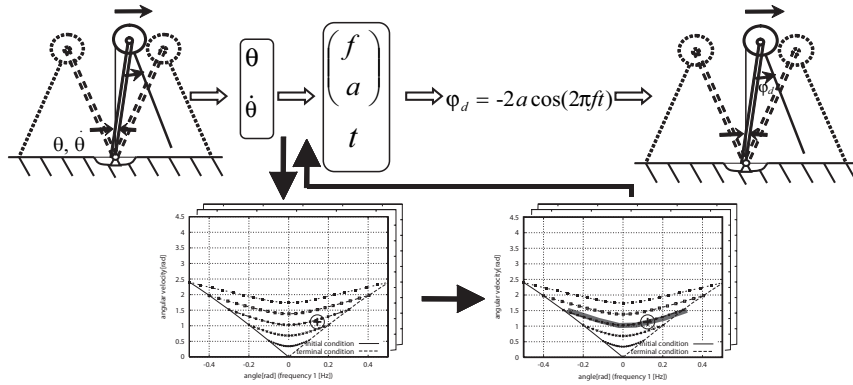


Fig.6 Scheme for hip joint control in single support phase using the inverse derivation from stance leg states to hip joint parameters, based on the acquired data sets. In each frequency layer (in each phase plot), the closest point from the stance leg state is chosen, then the point itself shows the phase (time progress), the trajectory, which the point falls on, indicates the angle parameter, and the cross-section itself provides the frequency parameter.

1 <= phi の時,

$$\delta_{sw} = \delta_{st} = 0 \quad (7)$$

股関節サーボのトルクは、式(8)の単純なPD(比例・微分)制御で生成した。

$$\tau = k_P(\varphi - \varphi_d) + k_D(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_d) \quad (8)$$

脚長制御は、DADSに用意されているconstraint driver要素を使用した。これは、硬いサーボと同様のものがあるため、ローパス・フィルタを介して、目標値deltaを与えた。

4.3.2 両脚支持期

両脚支持期においては、両脚と床とから成る三角形で幾何学的に拘束されるため、股関節制御器は休止させている。

一方、脚長は、ballistic歩行[21]を行わせるため、歩幅に応じて、蹴り出し(push-off)を適切に行う必要がある[13]。ここでは、直接、後脚の蹴り出しと前脚の沈み込みの速度制御を行う事はせずに、脚長の目標変位量deltaを変える事で、間接的に速度制御を行う方法を用いた。まず、角速度目標値theta-dot_dが、データベースにより、

歩幅¹から目標角速度を対応付けるメモリ関数M_l(theta)によって決定され、次に目標変位量deltaが導かれる。

$$\dot{\theta}_d = M_l(\theta) \quad (9)$$

$$\delta = k_l(\dot{\theta}_l - \dot{\theta}_d) + d_0 \quad (10)$$

d_0は固定的変位量で、本来は歩幅によって変化するが、ここでは定数とした。k_lは調整係数、theta-dot_lは前方の脚の角速度、theta-dot_dは角速度目標値である。

足部を含む、後脚の蹴り出し(push off)と前脚の沈み込みは、目標値deltaに向けてのPD制御(ダンパ付きのパネによるパチンコ)により駆動されている。

5. シミュレーション結果

5.1 シミュレーションの条件と環境

足長は同じという条件の下で、異なる足部形状を用意した。最適形状(Fig. 7上図)、下駄状(Fig. 8上図)、革靴状(Fig. 9上図)、平面状(Fig. 10上図)を例としたが、最適形状以外は適当にそれらしい形状になるように定めたものである。下駄状足裏の歯の高さは3[cm]、

¹脚長が決まっている場合、股関節角度、または脚の絶対角と対応づけられるので、ここでは(前側)脚の絶対角を用いている

革靴状足裏の爪先と踵の最深部の深さは1[cm]である。それぞれにおいて、可能な限り定常的に歩行が行えるように、両脚支持期の蹴り出し (push-off) 量のパラメータを調整した。

シミュレーションは、制御系に MaTX[22]，機械系に DADS を用い、Socket 通信で接続した。制御周期は1[ms]である。DADS 内部での計算は自動的に4倍程度細かい時間刻みで計算されている。

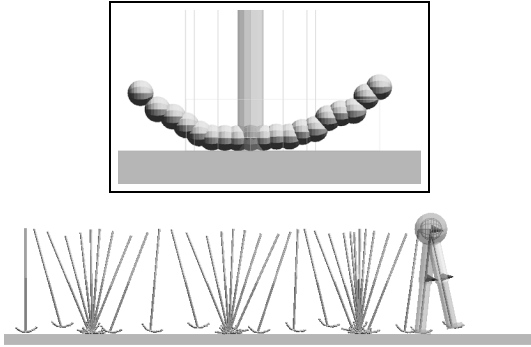


Fig.7 Quasi-Constant step length walking with the optimized foot profile. The upper figure shows the optimized foot profile, and the lower diagram depicted a stick figure of the produced motion. The target hip amplitude, with corresponding to the step length, is 0.3[rad].

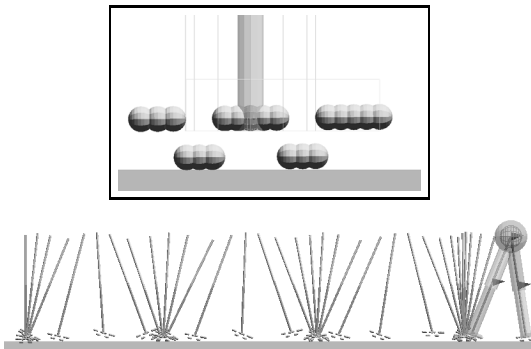


Fig.8 Quasi-constant step length walking with the wooden clog like profile. The upper figure shows the wooden clog like profile, and The lower diagram depicted a stick figure of the produced motion. The target hip amplitude, with corresponding to the step length, is 0.3[rad].

5.2 足裏形状と歩容の相同

制御系と組み合わせた動力学シミュレーションにより得られた準定常歩行の棒線図を示す。歩幅(股関節角度)指令値は、どれも0.3[rad]とした。

- 最適化足裏での歩行が Fig. 7 下図に、
- 下駄状足裏での歩行が Fig. 8 下図に、
- 革靴状足裏での歩行が Fig. 9 下図に、
- 平面状足裏での歩行が Fig. 10 下図に

それぞれ示されている。

どれも足裏の違いに関わらずほぼ同じ歩容であり、使用した多重軌道推移制御が足裏形状と独立して安定化が可能である事が分かる。また、ヒトの歩行のように踵から着地し爪先で地面を蹴って (push off) 歩行している事等も見取れる。

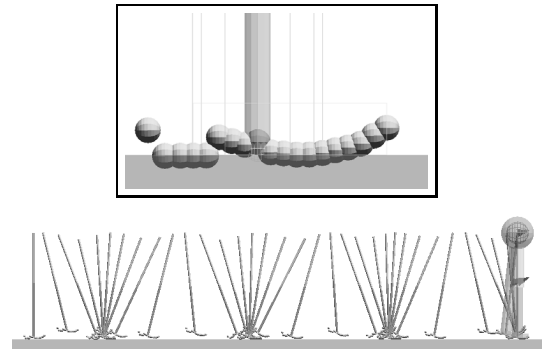


Fig.9 Quasi-constant step length walking with the shoe like profile. The upper figure shows the shoe like profile, and The lower diagram depicted a stick figure of the produced motion. The target hip amplitude, with corresponding to the step length, is 0.3[rad].

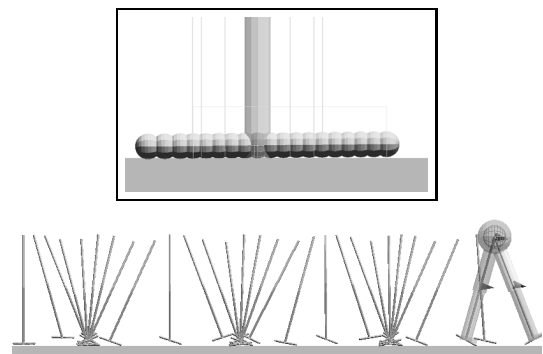


Fig.10 Quasi-constant step length walking with the flat foot profile. The upper figure shows the flat foot profile, and The lower diagram depicted a stick figure of the produced motion. The target hip amplitude, with corresponding to the step length, is 0.3[rad].

5.3 足裏形状と蹴り出し強さの相違

5.1 節に記述したように、定常的歩容を得るために、各脚形状に対し、式 10 の両脚支持期の蹴り出し量パラメータ d_0 と k_l とを調整した。Table. 2 に示す。

最適化足裏形状が最も必要蹴り出し量が少なく済んでいる事。下駄状と革靴状がそれに次ぎ、比較的必要性が少ない事。平面状は、踵と爪先の衝突によるエネルギー消費が多いためか、必要性が多い事が分かる。

蹴り出し目標量 δ を決める d_0 と k_l の値が小さい事は、結果として、蹴り出し量が少なく済む事を表し、より効率的に歩行が行える事を示していると考えられる。

Table 2 difference of push-off efforts

Foot profile (足裏形状)	d_0	k_l
Optimized (最適化)	0.345	0.32
Wooden clog (下駄状)	0.40	0.32
Shoe (革靴状)	0.45	0.37
Flat (平面状)	0.61	0.59

6. 結論

本論文では、[7] で提案した運動中の最適化に基づく、ヒト類似の足裏形状の形成法を利用して、安定性を乱さず長く歩ける事を評価基準に最適な足裏形状を求めた。

一方、[6] で提案した多重軌道推移制御と名付けた安定化制御方式を利用して、特定の足裏形状に限らず様々な足裏形状でも安定化制御が可能である事をシミュレーションにより示した。

また、異なる足裏形状で同様の歩容を得るために調整したパラメータが存在した。蹴り出し強さに対応するその値を比較する事で、足裏形状と歩きやすさの関係の評価に使用可能な方法を提案した。

謝辞

本研究を進めるに当たり、有益な御討論・御協力を頂いた産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センタの皆様、ATR 脳情報研究所 情報科学ヒューマノイドロボット研究室の皆様へ感謝の意を表します。

本研究は、CREST 高度メディア社会の生活情報技術デジタルヒューマン基盤技術の一環として行われた。

参考文献

[1] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla, and D. Stokic, "Biped locomotion: dynamics, stability, control and application," Springer-Verlag New York, Inc., (1990).

[2] A. Takanishi, M. Ishida, Y. Yamazaki, and I. Kato, "The Realization of Dynamic Walking by the Biped Walking Robot WL-10RD," Proc. of ICAR, pp. 459-466, (1985).

[3] K. Nishiwaki, S. Kagami, Y. Kuniyoshi, M. Inaba and H. Inoue, "Toe Joints that Enhance Bipedal and Full-body Motion of Humanoid Robots", Proc. of ICRA, Vol. 3, pp. 3105-3110, (2002).

[4] T. McGeer, "Passive dynamic walking," The Int. J. of Robotics Research, Vol. 9, No. 2, pp. 62-82, (1990).

[5] M. H. Raibert, "Legged Robot that Balance. The MIT Press series of artificial intelligence," The MIT Press, (1986).

[6] S. Miyakoshi, and G. Cheng, "Utilizing Physical Relationships for Biped Walking Control: a preliminary study in identifying key essential properties for the two support phases," Proc. of CLAWAR, pp. 543-550, (2003).

[7] S. Miyakoshi, and G. Cheng, "Examining Human Walking Characteristics with a Telescopic Compass-like Biped Walker Model," Proc of SMC, pp. 1538-1543, (2004).

[8] A. Goswami, "Postural stability of biped robots and the foot rotation indicator (FRI) point," The Int. J. of Robotics Research, Vol. 18, No. 6, pp. 523-533, (1999).

[9] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, "The Development of Honda Humanoid Robot," Proc. of ICRA, pp. 1321-1326, (1998).

[10] 杉原 知道, 中村 仁彦, "全身協調反力操作によるヒューマノイドロボットの高機動化制御," 第 10 回日本 IFToMM 会議シンポジウム, (2004).

[11] 梶田 秀司, 金広 文男, 金子 健二, 藤原 清司, 原田 研介, 横井 一仁, 比留川 博久, "分解運動量制御: 運動量と角運動量に基づくヒューマノイドロボットの全身運動生成," 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 6, pp. 772-779, (2004).

[12] P.-B. Wieber, "Constrained dynamics and parametrized control in biped walking," Proc. of the Int. Sympo. on Math. Theory of Networks and Systems, (2000).

[13] 宮腰 清一, 山本 知幸, 多賀 巖太郎, 國吉 康夫, "脚伸縮機構による二足歩行シミュレーション," 日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol. 3, pp. 1107-1108, (2000).

[14] A. D. Kuo, "A simple model predicts the step length-speed relationship in human walking," J. of Biomech. Eng., Vol. 123, pp. 264-269, (2000).

[15] R. Q. van der Linde, "Passive Bipedal Walking with Phasic Muscle Contraction", Biological cybernetics, Vol. 81, pp. 227-237, (1999).

[16] A. Goswami, B. Espiau, and A. Keramane, "Limit cycle and their stability in a passive bipedal gait," Proc. of ICRA, pp. 246-251, (1996).

[17] W. T. Dempster, and G. R. L. Gaughran, "Properties of Body Segments Based on Size and Weight," American J. of Anatomy, Vol. 120, pp. 33-54, (1965).

[18] 中村 隆一, 斎藤 宏, "臨床運動学," 医歯薬出版, (1990).

[19] 山崎 信寿 (編著), 鈴木 隆雄, 河内 まき子, 楠本 彩乃, 西沢 哲, "足の事典," 朝倉書店, (1999).

[20] S. Miyakoshi, G. Cheng, and Y. Kuniyoshi, "Transferring Human Biped Walking Function to a Machine -Towards the Realization of a Biped Bike-, " proc. of CLAWAR, pp. 763-770, (2001).

[21] S. Mochon, and T. A. McMahon, "Ballistic Walking," J. of Biomechanics, Vol. 13, pp. 49-57, (1980).

[22] 古賀 雅伸, "科学技術計算プログラミング言語 MATX," 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 6, pp. 42-45, (1996).