メモリ・ベースト運動制御による2足歩行の制御

宮 腰 清 一*

Bipedal Walking with a Memory-based Motion Controller

Seiichi Miyakoshi*

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 two parts: Firstly, the passive dynamics of the compass-like biped is presented - to allow continuous stepping, the essential relationship between step length and initial push-off speed for ballistic motion is explored. The dynamics is enhanced and utilized via additional actuation by the controller. 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. The proposed controller is examined and evaluated with dynamical simulations.

Key Words: Bipedal Walking Control, Compass-like Model, Passive Dynamics Based Control, Memory Based Motion Generation and Control

1. は じ め に

1.1 背景と関連研究

多くの2足歩行ロボットが開発されてきている[1]~[5]. しかし, よろけ[†]してしまうような外乱に対する, 歩行や佇立(立位の平衡維持)の大域的平衡維持制御は未解決の問題である.

ヒューマノイド(2足歩行ロボット)での平衡維持制御の例として, P2やQRIOの, 後ずさりでの転倒回避や傾きの変動する路面上での佇立や歩行の実演がある. ただし, このときの押され方や路面の動きは, 穏やかで, ゆっくりとしていた[6].

2足歩行ロボットの大域的安定化を行うには, 実時間で目標軌道の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[7] 劣駆動系(under-actuated system)[8][9]であるため, 計画目標軌道への復元が常に可能ではないからである.

これまでも, 目標軌道を絶えず修正しながら, 運動を行わせる研究がある.

P2[2]においては, 目標ZMPを変更し, 「転倒力モーメント」を逆用して安定化を行っている. 長阪らは, 「体幹位置コンプライアンス」[3]で, 目標ZMP軌道を修正し, 倒立振子的に安定化を行っている. 杉原らは, 「重心ヤコビアン」[10]で, 重心の運動を全身に分配して平衡維持を行う方法を提案した. 外乱に

よる全重心のズレを打ち消すように, 脚部が反応して振り出される. また, 梶田らにより, さらに拡張・一般化された概念が提案されている[11]. これらは, 台車型倒立振子やAcrobot[12]の制御と類似で, 両脚支持期の安定性は利用していない.

脚ロボットにおける動的平衡維持の著名な例として, hoppingロボットがある[13]. また, 倒立振子モードによるもの[14][15]がある. これらは, 簡素な数式モデルで系が表現され, 軌道修正も容易だが, モデルや運動の極端な単純化を必要とする.

絶対空間中の力を関節空間での等価な力に座標変換する手法[16]や反射運動の集合を切り替える方法[17]等がある. 神経振動子と反射による歩行運動生成と安定化も行われている[18]. 固定目標軌道追従の形ではないため, 状態変化に柔軟に反応するが, 制御系の調整は容易ではない.

一方, 劣駆動性を扱った脚ロボットの制御の研究がある.

「竹馬(stilt)」型ロボットの着地点制御による安定化[19], 伸縮型脚ロボットで, 単脚支持期の軌道追従と両脚支持期の蹴り出し(push-off)速度制御・離床タイミングの制御によるもの[20]や文献[21]のTime-Scaling制御を用いたもの[22]の実験が行われた. 文献[23]や文献[24]は, 倒立振子系が自然にたどる角運動量変化やdynamicsを逆に目標とする方法であるが, 目標角運動量やtarget dynamicsは, 1歩の内では変更されず, また, 前者は制御に足首トルクを用いている.

受動歩行[25]においては, 周期軌道自体がlimit cycle attractorとなるよう設計するが, 安定性は低い.

原稿受付 2005年5月10日

*産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター

*Digital Human Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

[†]ここでは, 計画した目標軌道や定常的周期軌道から大きくはずれた状態とする.

1.2 本研究の手法と論文の構成

本研究では、動力学シミュレータを用いて、事前に多数の歩容での中立軌道 (neutral orbit) [26] 群によるデータベースを作成しておき、制御の局面では状態に対応した歩容を検索し、再現するやり方で実時間の平衡維持・運動生成・制御を行う。この方法は、オフラインでうまくいった事例を保存・利用するメモリ・ベース運動制御の一手法と言える。このとき、求める目標軌道 (群) は中立軌道であればよく、ZMP ベースの運動制御のように、全時間での (全方向への) 可制御性、受動歩行における軌道自体の収束性を前提としない。

一般に、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。本研究のポイントは、類似中立軌道を多数並べて次々と切り替えることで、復元せずに広い範囲で平衡状態を維持し続けることにある。同様の考え方は、Wieber [27] により示されている。本論文では、より一般的なメモリ・ベース制御と簡素なコンパス状モデルを用いて、こうした制御戦略の有効性を実証した。

本論文の構成は以下の通りである。2 章において、劣駆動性を含んだ形でモデル化を行う。3 章において、制御を行う前の、モデルそのものの持つ特性とそれに基づく歩行継続 (転倒回避) の条件を見る。4 章において、メモリ・ベース運動制御に基づく、平衡維持と目標値への追従を両立する制御を提案し、5 章において、シミュレーションによる検証結果を示す。

2. モデル化

受動歩行でよく見られるモデル化 [28] の一つとして、コンパス状モデル [29] で、矢状面内における 2 足歩行機構をモデル化した [30]。

床面と足裏との間の接触を加重集中心 (CoP: center of pressure) で代表させ、仮想的な関節として見る (Fig. 1 左) と、駆動器 (actuator) が存在せずトルクが加えられないため、全関節数 (自由度) と比べて駆動器の数が少ない劣駆動系となる。

Fig. 1 中央に示すモデルは、脚が分布質量、上体が股関節部への集中質量、摩擦や粘性のない非駆動の回転型股関節、脚部直動関節と点状足先から成る。Fig. 1 右は、動力学シミュレータ LMS DADS^{††} 内に作成したモデルである。

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。質量配分は、上体に多くの質量が配分されている。これは、ヒトの質量配分 [34] を目安にしている^{†††}。

3. モデルの ballistic 運動特性

歩行中の遊脚の筋活動が低い、というヒトの生理学的研究や脚の振動的機械構造を考慮し、2 足歩行の ballistic モデルが提

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

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]

案された。ヒト類似の脚 3 リンク機構が、初期姿勢と初速度を適切に設定すれば、駆動や制御抜きでもヒトのように自然な 1 歩の踏み出し運動を行うことが示された [35]。

逆に言えば、ballistic 機構の制御において重要な点は、運動開始時に適切な初期状態を設定することである [13]。コンパス状 2 足歩行モデルにおいては、歩幅に対応した適切な初速度を、上体に与えることができれば、対称形の踏み出し運動が自然に生起する [31] [36] [37]。上体の目標初速度が決まると、これを生成する後脚の蹴り出し (push-off) と前脚の沈み込みの速度も決まる [38]。逆に、上体の運動速度に応じた適切な着地の歩幅が存在する [19] [39]。

三体問題と同様に、重力場の中で鉛直平面内に拘束されている二重振り子 (コンパス状 2 足歩行モデルや Acrobot [12]) は、カオス的に動くことが知られている。多重振り子のように 3 以上の自由度 (二重振り子は 4) を含むハミルトン系は可積分ではない。それゆえ、2 足歩行の運動方程式 (微分方程式) を解析的に解くことはできない [40]。そこで、動力学シミュレータを用いて実験的に問題を分析するやり方を選択した。

動力学シミュレータを用いた探索で、対称歩容となる様々な歩幅と適切な上体初速度の関係を求め、Fig. 2 右に示した。

終了状態は初期状態の鏡像となる。大きな歩幅には大きな上体初速度が必要となることが分かる。なお、脚長が一定とすると、歩幅と初期脚角度の間には一対一対応が成り立つため、鉛直軸から取られた脚角度を歩幅の代わりに用いている。

機構モデルの物理パラメータ (脚長や質量分布) を変化させた場合については、文献 [39] を参照されたい。

3.1 歩行の継続要件

対称的踏み出し運動において、着床位置・着床速度は、離床位置・離床速度とは鏡像関係となった。着床後、脚交換が行われるが、着床時に運動エネルギーの散逸がない、または、(蹴り

[†]こうしたモデル化は、一見、ヒトの形状から離れたモデルのように見えるが、脚伸縮パターンの適切な選択によりヒト歩行との共通性を保持することも可能であり [31]、また、高速歩行・不整地歩行にはむしろ適したモデル化である [32]。ヒト歩行とロボット歩行の違いについては文献 [33] も参照されたい。

^{††}LMS International 社の製品。

^{†††}結果的に、制御系の導入後、外乱への対処として脚を振る動作を行った場合に、相対的にその影響が小さくなる (振る動作自体の反動で転倒しない)、という良い効果をもたらした。

Fig. 2 One step motion of the compass-like model. The right figure shows the relationships between leg angle (x axis) and initial body speed (y axis). Adequate initial speeds of the upper body versus leg angle (corresponding to the hip angle, i.e. step length) for a symmetrical one step motion; state transition curves which connect between the initial and terminal condition can be produced. Because of symmetry, the terminal states (θ_T, s_T) will be a mirror image of the initial states (θ_0, s_0)

Fig. 3 An example of the phase plot of a passive dynamic walking with adequate initial and terminal condition curves. The orbit start from the adequate initial speed curve will end on the neighbourhood of the adequate terminal speed curve. Unless the initial condition is not met, walking will continued. The right figure is zoomed up of the neighbour of the initial conditions of the left figure

出し等により) 散逸した分の補償ができるとするならば, 着床時の終了状態が直後の離床時の初期状態となるので, 次の一歩を同じように踏み出して定常歩行を行える. この軌道を中立軌道[26], または, 逆S字軌道 (reverse S shape orbit) [37] と言う.

Fig. 3 左に, 適切な初期状態から始まり, 対称歩容の状態遷移軌道を経て, 鏡像としての終了条件に至る軌道の例を示す. 支持脚側の軌道は, 図中左から右へ双曲線状に推移し, 遊脚側の軌道は, 図中右から左へ大きく回って戻る.

Fig. 3 右に示したものは, 受動的歩行時の, 歩容が一定せず転倒に至るまでの状態遷移軌道である. 直動型の受動歩行機[25][36][38]と同様に, 股関節は自由関節のまま, 立脚中期の foot clearance を確保するために遊脚を縮め, 着床時のエネルギー散逸を補償し水平面上で前進させ続けるために, わずかに脚長変化させ, 前脚で短縮, 後脚で伸長させている. 着床・離床の変化時の状態が, 初期条件と終了条件の曲線からある程度離れてしまった (図中の太い矢印) 後, 最終的に, この歩行機は転倒してしまった. しかし転倒に至るまで, 着床・離床時の状態 (図中の細い矢印) が, これらの曲線近辺にある間は, 歩

容は一定しないが, 歩行が続けられていることが分かる.

4. 多重軌道推移制御

本論文で提案する, 多重軌道推移制御と名付けたメモリ・ベース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

2足歩行には, バランス維持制御と目標値 (歩行速度等) に向かつての運動制御の二者の両立が必要である. 本研究では, 単脚支持期には主にバランス維持制御を行い, 両脚支持期に主に歩行速度制御を行っている.

4.1 ballistic 歩行の能動化

系を制御する場合, 系の受動的特性を基盤に, それを拡張する形で能動化・制御系を構成すると, 系のもともとの特性を生かした制御系の構築が期待できる [41].

すべてが自由関節の場合のコンパス状2足歩行モデルの1歩の踏み出し運動を調べると, 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.

式 (1) の記述関数を目標角度として, 股関節を自由関節からサーボ制御を行う関節に置き換えても, 運動は全体としてほとんど同じになる [39].

いったん股関節を能動関節で置き換えて歩行を能動化すれば, 式 (1) の記述関数の周波数 f と振幅 a とを調整することにより, 受動歩行と相似な形で, 歩調と歩幅の異なる対称歩容をさせることができるようになる. ただし, 床と足裏との間の仮想関節は依然自由関節のままであるため, 対称歩容とするには股関節が自由関節であったときと同様に, 記述関数パラメータの組 (f, a) に対応した適切な上体初速度を与える必要がある.

4.2 軌道群データベース構築

ある1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1本の軌道 (状態遷移曲線) が求められる. 以下の手順 (Fig. 6 に模式図) の繰り返しにより求められた軌道群の例を **Fig. 4** に示す.

- (1) 股関節記述関数パラメータの組 $(f$ と $a)$ を選択する.
- (2) 動力学シミュレータを用いて, 対称的な1歩の踏み出し運動が得られるまで, 対応する上体初速度を探索する.
- (3) 支持脚の角度・角速度を必要な時間刻みで記録する.
- (4) 記述関数パラメータの組と対応付けて, 角度・角速度の時間軌跡を保存しておき, 上記の手順を繰り返す.

周波数は 0.5 [Hz] から 1.5 [Hz] まで 0.1 [Hz] ごと, 歩幅は 0.05 [rad] から 0.5 [rad] まで 0.01 [rad] ごと, サンプリング・タイムは 2 [ms] で, 軌道群のデータを求めてデータベースを作成した. 例として, **Fig. 4** に周波数 0.5 [Hz] と 1.5 [Hz] における支持脚の絶対角と角速度の位相図を示す. これらの周波数層を

Fig. 4 Examples of the phase plots of the stance leg for each different frequencies (0.5, 1.5 [Hz]). The initial (left) and terminal (right) condition curves, and transition curves between them. The x axis represents the angle of the stance leg, and y axis is the angular velocity. The initial/terminal condition curves increase with step frequency.

Fig. 5 Combined 3D image of the phase plots. For illustrative purpose, frequency cross-sections have been removed from the diagram. The horizontal axis represents the angle, the vertical axis is the angular velocity, and the depth axis shows the frequency. A set of angles and angular velocities corresponds to different trajectories for each frequency cross-sections, these cross-sections provide redundancy information for the controller.

重ね合わせて作成したデータベースを可視化したものは **Fig. 5** に (周波数層を間引いて) 示した。股関節の記述関数の周波数 f が高い程、初期条件と終了条件の線の傾きが大きくなり、それらを結ぶ状態遷移曲線も底部での双曲線的形状から、上部での開いた形状へと変化していくことが分かる。

支持脚の状態 (角度・角速度) から、股関節の目標値となるパラメータ (周波数・振幅と時刻) を時々刻々求められるデータベースが得られたことになる。この関係 (記述関数パラメータと状態遷移軌道群からなるデータベース) を遊脚の制御に利用できる。直接制御できない足先の仮想関節 (支持脚) は放置して、直接制御できる股関節 (遊脚) で、上体速度 (支持脚状態量) と歩幅 (遊脚振出量) のマッチングを行う。

歩調 f を速く、かつ、歩幅 a を広くしていくと、あるところから遊脚の振り出し速度が大きくなり過ぎるために、支持脚と地面との接触が失われる。こうした現象が発生した軌道は、データベースに含めない。こうすることで、破綻してしまう歩容で

の歩行を防ぐ。また、状態空間内で軌道が存在しない領域では、そもそも歩行ができないということも判別可能になる。

Fig. 4 の「 $f: 0.5$ [Hz]」は、このモデルにおいて、ほぼ受動歩行と同じ歩調である。軌道が狭い範囲にあることから、歩容がほぼ一つに決まってしまう、安定化可能領域が狭いことが分かる。

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. 6**)。逆に、この対応関係を参照することで、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 ($M_h(\cdot)$) として見ると、股関節の目標角度が求まる (**Fig. 7**)。

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

目標角速度は、目標角度の式 (2) を微分しておく。

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

ここで求めた股関節の目標角度・角速度は、現在の支持脚の角度・角速度に対して、最終的 (着床時) に適切な歩幅に到達できるような軌道の途中の点である。支持脚の角度・角速度の情報を基に、制御周期ごとに、股関節目標値を更新し続けることは、特定の目標中立軌道に追従するだけ、あるいは、制御器に対応した計画済みの軌道追従を行うだけではない、複数中立軌道の渡り歩きを許すことを意味する。

股関節サーボのトルクは、式 (4) の単純な PD (比例・微分) 制御で生成した。

$$\tau = k_P(\varphi - \varphi_d) + k_D(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_d) \quad (4)$$

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。 $\phi \leq 1/6$ または $5/6 \leq \phi < 1$ のとき、

$$\delta_{sw} = \delta_{st} = d \sin(2\pi(1.5\phi)) \quad (5)$$

$1/6 < \phi < 5/6$ のとき、

$$\delta_{sw} = d \quad (6)$$

$$\delta_{st} = -0.5d(\sin(2\pi(1.5\phi)) - 1) \quad (7)$$

$1 \leq \phi$ のとき、

$$\delta_{sw} = \delta_{st} = 0 \quad (8)$$

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であるため、ローパス・フィルタを介して目標値 δ を与えた。

Fig. 6 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. 7 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

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 [35] 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 [30]。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ことはせずに、脚長の目標変位量 δ を変えることで、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 $\dot{\theta}_d$ が、データベースにより、歩幅[†]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 δ 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、 $\dot{\theta}_l$ は前方の脚の角速度、 $\dot{\theta}_d$ は角速度目標値である。

4.4 冗長性

Fig. 5 に見られるように、支持脚のある状態を表す角度 θ と角速度 $\dot{\theta}$ の組 (太い直線) に対し、異なる周波数層において、異

なる近接軌道が対応し得る。つまり、ある同一の状態に対しても複数の異なる記述関数パラメータ (振幅 a と周期 $T (= 1/f)$) が求まる、いわゆる冗長性が存在する。

この冗長性は、ある状態に対して、外乱への対処・安定化のために、歩幅と着床タイミングを混合して変えられることを示している。着床場所が望ましい状態ではない場合 (例えば、穴が開いている、水溜まり、壊れやすい物があるなど)、あるいは股関節角度が限界に近い場合、あるいは急激に遊脚の運動状態を変えると反動で支持脚が滑ってしまう場合等、この冗長性が利用できる。それゆえ、冗長性はこの即時的運動生成・制御法に柔軟性をもたらす。

また、安定確保の要請が厳しくない場合、系の固有振動数に近い周波数層に限定して目標値を求めると、もともとの機械系の運動と制御目標が近いために定常性が出てくる。

5. シミュレーション結果

5.1 シミュレーション環境

シミュレーションは、制御系に MaTX [42]、機械系に DADS を使い、Socket 通信で接続した。制御周期は 1 [ms] である。DADS 内部での計算は可変刻み幅であるため、さらに平均して 4 倍程度細かい刻みで計算されている。

[†]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。

Fig. 8 Constant step length walking. The upper diagram depicted a stick figure of the produced motion, the corresponding time profiles of the hip parameters are provided in the lower plots. The target hip amplitude, with corresponding to the step length, is 0.3 [rad]

Fig. 9 Temporary shorten the step length to step on the closer side of a pitfall. The target amplitude is changed to 0.15 [rad] from 0.3 [rad] between the first taking off and the second landing

5.2 定常的歩行と一時的目標値変更

定常的歩行の結果を **Fig. 8** 上図に棒線図として, **Fig. 8** 下図に股関節記述関数パラメータの位相 (t/T), 振幅 (a), 周波数 (f) の時間変化として示す. 歩幅 (股関節角度) 指令値は, 0.3 [rad] とした. **Fig. 8** より, 1 歩ごとに, 位相がほぼ一定の傾きで増加していること, 歩幅 (股関節角度) がほぼ一定であること, 周波数に多少変化があることが分かる. これは, 冗長性により, ある瞬間の支持脚状態に対応する記述関数パラメータの組み合わせが複数存在し, それらを実現可能なパラメータ目標値候補とし, その内で指令値に近いものを目標値として選択するという手順によるためである. 得られた目標値は, 必ずしも指令値に近いとは限らないが, 歩行継続を実現可能とするものである. すべての周波数層のデータ (**Fig. 5**) を用いて制御すると, 特定の周波数層のみを用いた場合 [39] と比べて, 外乱に対するロバスト性は増すが, 冗長性が目標値をぶれさせるため, 定常性は多少損なわれる.

冗長性利用の一例として, 一時的な歩幅の変更を行った. 2 歩目の床面に障害物が存在する場合に, 1 歩目の着地直後から 2 歩目の着地までの間, 具体的には, 歩行開始の約 0.5 [s] 後から約 1.1 [s] までの間, 歩幅 (股関節角度) 指令値を一時的に変更した場合を示す. **Fig. 8** の指令値である 0.3 [rad] から, 指令値を小さくした場合 (**Fig. 9**: 0.15 [rad]) と大きくした場合 (**Fig. 10**: 0.45 [rad]) とを示す. 2 歩目の着地位置が棒線図中の逆三角形で示される穴 (障害物) の位置から, 前, あるいは, 後ろにずれた着地がなされていること, またすぐに回復して定常の歩幅に戻っていることが分かる. 振幅 (a) は, 一時的に, 指令値に近くなるように選ばれていること, 対応して周波数が変化していること (歩幅小で周波数高, 歩幅大で周波数低) が分かる.

Fig. 10 Temporary lengthen the step length to step on the farther side of a pitfall. The target amplitude is changed from 0.3 [rad] to 0.45 [rad] with the same time interval

ただし, 両脚支持期の制御が不十分なため, 歩幅を狭くした試行において, 狭くした直後の着地のみ手調整で蹴り出しを弱くした.

5.3 突発的外乱

質量 80 [kg] の振子を, 右方に進行中の歩行機に衝突させた場合 (**Fig. 11** 左) を示す. 振り子の初期角度は 30 [deg], 振り子と

Fig. 11 Stepping back (right figure) caused by hitting of a pendulum (80 [kg]) to backward (left figure)

歩行機との反発係数は 1.0 とした。大きな外乱（歩行機本体は 62 [kg]）なので、衝突により歩行機に後向き（backward）の速度が与えられたため、自動的に後退した（Fig. 11 右）。衝突直後（約 0.4 [s]）から、振幅（ a ）が負の目標値となっていること、その後は徐々に後退歩行しているの、足並みが落ちていることが分かる。

5.4 連続的外乱

地震のように、正弦波で地面を水平方向に揺らした。Fig. 12 に示す。揺れを示すものとして、地面の左隅に三角形（錐体）を固定して置いた。揺れの周波数を 3 [Hz] としたところ、揺れのため歩容は一定しなくなるが、振幅 5 [cm]（振れ幅 10 [cm]）の揺れまで転倒せず歩行を続けた。前後に振られているため、それによる支持脚の揺れによる状態変化に伴い、位相・振幅とも行きつ戻りつしている。また、地面の揺れの 3 [Hz] が記述関数パラメータの時間変化に現れており、環境変化に合わせた運動であることが分かる。

5.5 モデルと実装が違う場合（膝付き）

モデル化誤差に対するロバスト性を見るため、これまでと同じ直動脚モデルで生成したデータベースを利用して、ヒトのように膝に回転型関節を持ったモデルの制御を行った。直動脚と比べて、回転型の場合、半径方向の運動と接線方向の運動は干渉しており、脚伸縮により脚の重心が接線方向にも運動する。この動きが外乱となる。特に膝が前方に出るヒト型では、遊脚の振り出しが妨げられる [43]。

Fig. 13 に結果を示す。ただし、前記のように遊脚の振り出し、ひいては全身を前方に蹴り出す（push off）運動が妨げられるため、両脚支持期の蹴り出し運動を約 1.5 倍強化した。

Fig. 12 Walking on a quaking ground. The ground swings sinusoidally with the frequency 3 [Hz] and the amplitude 5 [cm]. The biped walks back and forth, despite temporarily lost of balance

Fig. 13 Geometrically transformed motion from compass-like model to human-like model. Human-like knee model walks Human-like knee model walks with the controller via the memorised trajectory database of the compass-like reference model

6. おわりに

受動特性を基盤として拡張し、メモリ・ベース運動制御手法により、様々な条件を変えた（歩幅、歩行周期等）事前の多

数シミュレーションによるデータベース構築とその参照による2足歩行の運動生成・制御を行う方法を提案した。この制御系は、状態に応じて、データベース内の複数軌道間を渡り歩くことを許し、それにより広い安定化可能領域を持つ。

単脚支持期において、股関節の駆動・制御により遊脚の振り出しを調節して、劣駆動系においても問題なく、状況に応じて即応的に運動目標値を生成してバランス維持を行い、転倒回避の意味でのロバスタ性において良好な結果を得た。

両脚支持期において、脚長を変化させ・蹴り出し (push-off) 量を制御することにより、歩幅と初速度との間の関係性から決まる、蹴り出し初速度の目標値を時々刻々メモリ・ペーストで検索し、バランス維持をしながら歩行の速度を調節した。

動力学シミュレータを用いて、実装した制御系の有効性を検証した。定常的歩行、突発的／連続的外乱の下での安定化を行い、またもともと直動脚モデルに基づく制御を、ヒト型の回転型膝関節を持つ異構造の対象に適用しても歩行が可能であることを示した。

機構モデルの複雑化 (上体や足裏の付加等)、多様な環境 (坂や階段、(床の) 反発係数、粘性場 (例: 水中) 等) への適用、三次元化、実機における検証は、今後の課題である。

謝 辞 本研究を進めるに当たり、有益なご討論・ご協力をいただ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、特に Gordon Cheng に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] A. Takanishi, M. Ishida, Y. Yamazaki and I. Kato: "The Realization of Dynamic Walking by the Biped Walking Robot WL-10RD," Int. Conf. on Advanced Robotics, pp.459-466, 1985.
- [2] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: "The Development of Honda Humanoid Robot," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1321-1326, 1998.
- [3] 長阪憲一郎, 稲葉雅幸, 井上博允: "体幹位置コンプライアンス制御を用いた人間型ロボットの歩行安定化", 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1193-1194, 1999.
- [4] T. Ishida, Y. Kuroki, J. Yamaguchi, M. Fujita and T. Doi: "Motion Entertainment by a Small Humanoid Robot Based on OPEN-R," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1079-1086, 2001.
- [5] K. Löffler et al.: "Sensors and Control Concept of Walking "Johnnie", The Int. J. of Robotics Research, vol.22, pp.229-239, 2003.
- [6] 加藤恵輔, 黒木義博, 長阪憲一郎, 宮本敦史, 上野謙一郎, 山口仁一: "小型ヒューマノイドロボットの運動性能評価システム 6 自由度モーションベースの開発", 第 22 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1L26, 2004.
- [7] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla and D. Stokic: Biped locomotion: dynamics, stability, control and application. Springer-Verlag New York, Inc., 1990.
- [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] 広瀬茂男, 古田勝久, 美多勉: "スーパーメカノシステムの研究: 東工大 COE プロジェクト", 日本ロボット学会誌, vol.18, no.8, pp.1061-1065, 2000.
- [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, pp.25-30, 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] 南澤樺, 美多勉, I. Pantelidis, 山北昌毅: "アクロボットの振り上げ倒立制御と特異点問題", 日本ロボット学会誌, vol.20, no.1, pp.85-88, 2002.
- [13] M.H. Raibert: Legged Robot that Balance. The MIT Press series of artificial intelligence, The MIT Press, 1986.
- [14] 梶田秀司, 谷和男: "凹凸路面における動的 2 足歩行の制御について", 計測自動制御学会論文集, vol.27, no.2, pp.177-184, 1991.
- [15] 梶田秀司, 松本治, 西郷宗玄: "伸縮脚機構を持つ 2 足歩行ロボット Meltran V の歩行制御", 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1113-1114, 2000.
- [16] J. Pratt, A. Torres, P. Dilworth and G. Pratt: "Virtual Actuator Control," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1219-1226, 1996.
- [17] J. Pratt, C.-M. Chew, A. Torres, P. Dilworth and G. Pratt: "An Intuitive Approach for Bipedal Locomotion," The Int. J. of Robotics Research, vol.20, no.2, pp.129-143, 2001.
- [18] G. Taga, Y. Yamaguchi and H. Shimizu: "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment," Biological Cybernetics, vol.65, pp.147-159, 1991.
- [19] H. Miura and I. Shimoyama: "Dynamic Walk of a Biped," The Int. J. of Robotics Research, vol.3, no.2, pp.60-74, 1984.
- [20] A.A. Grishin, A.M. Formal'sky, A.V. Lensky and S.V. Zhitomirsky: The Int. J. of Robotics Research, vol.13, no.2, pp.137-147, 1994.
- [21] C. Chevallereau: "Time-Scaling Control for an Underactuated Biped Robot," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.19, no.2, pp.362-368, 2003.
- [22] P. Micheau, M.-A. Roux and P. Bourassa: "Self-tuned trajectory control of a biped walking robot," Proc. of Int. Conf. on Climbing and Walking Robots, pp.527-534, 2003.
- [23] 佐野明人: "重力場を巧みに利用した動的 2 足歩行", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.3, pp.354-359, 1993.
- [24] 上井将弘, 長谷川泰久, 福田敏男: "Passive Dynamic Autonomous Control による二足歩行制御", 第 22 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3G18, 2004.
- [25] T. McGeer: "Passive dynamic walking," The Int. J. Robotics Research, vol.9, no.2, pp.62-82, 1990.
- [26] W.J. Schwind and D.E. Koditschek: "Characterization of monopod equilibrium gaits," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1986-1992, 1997.
- [27] P.-B. Wieber and C. Chevallereau: "Online adaptation of reference trajectories for the control of walking systems," INRIA Research Report, no.5298, 2004.
- [28] 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.
- [29] A. Goswami, B. Espiau and A. Keramane: "Limit cycle and their stability in a passive bipedal gait," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.246-251, 1996.
- [30] 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", 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1107-1108, 2000.
- [31] S. Miyakoshi, G. Cheng and Y. Kuniyoshi: "Transferring Human Biped Walking Function to a Machine—Towards the Realization of a Biped Bike—," Proc. of Int. Conf. on Climbing and Walking Robots, pp.763-770, 2001.
- [32] 木村浩: "生物を規範とした脚式ロボットの不整地適応", 計測と制御, vol.42, no.9, pp.705-711, 2003.
- [33] S. Kagami, M. Mochimaru, Y. Ehara, N. Miyata, K. Nishiwaki, T. Kanade and H. Inoue: "Measurement and comparison of

- humanoid H7 walking with human being,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol.48, no.4, pp.177–187, 2004.
- [34] 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.
- [35] S. Mochon and T.A. McMahon: “Ballistic Walking,” *J. of Biomechanics*, vol.13, pp.49–57, 1980.
- [36] 南方英明, 堀洋一: “三次元可変速二足歩行に関する実験的研究”, *電気学会論文誌 D*, vol.118, no.1, pp.10–15, 1998.
- [37] 森田晋, 大塚敏之: “コンパス型モデルの対称性を用いた平地における歩容生成”, 第 7 回 ロボティクス・シンポジウム予稿集, pp.101–106, 2002.
- [38] S. Miyakoshi and G. Cheng: “Ballistic Walking by Compass-like Biped Walker: Exploiting Physical Dynamics in Achieving Human-like Walking,” *Proc. of Int. Conf. on Climbing and Walking Robots*, pp.445–452, 2002.
- [39] 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 Int. Conf. on Climbing and Walking Robots*, pp.543–550, 2003.
- [40] 中西淳, 福田敏男, D.E. Koditschek: “ハイブリッドコントローラ

による 2 リンクブラキエーションロボットの振幅制御”, *日本ロボット学会誌*, vol.19, no.5, pp.652–659, 2001.

- [41] 大須賀公一: “メカニカルシステムに対する制御系設計理論”, *計測と制御*, vol.40, no.6, pp.403–410, 2001.
- [42] 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.800–803, 1996.
- [43] 宮腰清一, G. Cheng: “脚構造の違いがもたらす動的効果”, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1A19, 2003.

宮腰清一 (Seiichi Miyakoshi)

1968 年 8 月 17 日生. 1992 年東京工業大学工学部制御工学科卒業. 1994 年同大学大学院システム科学科修士課程修了. 同年工業技術院電子技術総合研究所入所. 現在, 改組により産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センタ研究員. 2002 年から約 2 年間, ATR 脳情報研究所客員研究員. 人間型ロボットの研究に従事. 操縦型歩行ロボットに興味を持つ. 計測自動制御学会会員.
(日本ロボット学会正会員)