

# 境界条件緩和による二脚ロボットのオンライン歩容計画法

東京大学 杉原 知道 中村 仁彦

## Online Gait Planning with Boundary Relaxation of Biped Robot

University of Tokyo Tomomichi Sugihara and Yoshihiko Nakamura

**Abstract**— A fast online gait planning method is proposed. It generates physically feasible referential trajectory only from the next desired foot placement by relaxation of boundary condition, namely, by admitting some error between the desired and actually reached state. Based on an approximate dynamical biped model whose mass is concentrated to COG, general solution of the equation of motion is analytically obtained. It potentially creates responsive motion which requires strong instantaneous acceleration by accepting discontinuity of ZMP. The validity of proposed is ensured through both simulations and experiments with a small anthropomorphic robot.

**Key Words:** biped robot, online gait planning, inverse kinematics

### 1. はじめに

大自由度を巧みに操りながら、複雑な環境内を移動することが求められる二脚ロボットの運動制御において、問題を軌道計画および安定化に陽に分離し簡単化する、いわゆるパターンベースな方法の有効性が多く報告されている [1] [2] [3] [4] [5] [6]. マニピュレータ等の軌道計画問題では通常, Fig.1(A) に示すように、まず状態を初期値から目標終端値へと導く経路を求める境界値問題を解き、必要ならばその解を運動方程式に代入して入力を求める。しかしながら脚型ロボットは、ベースリンクが地面に固定されておらず、関節トルクを環境に作用させ、その反作用として受ける外力によって移動するシステムであり、厳しい力学的拘束を受ける。すなわち外力を入力と見なすと、接触点において引っ張り方向に力を発生できないという制約が入力に課され、経路計画と力学的な問題とを切り分けることができない。ここに本質的な難しさがある。

Vukobratović ら [7] は、単純な二脚ロボットモデルにおいて下肢に適当な運動を与え、それに対する床反力の重心 (ZMP, Zero Moment Point[8]) を支持脚足先に一致させるような上肢の軌道を、収束計算によって求める方法を提案した。これは Fig.1(B) に示すように、入力がある既知関数としたときに運動方程式から軌道を求める初期値問題に置き換えるものであり、山口ら [2], 長阪 [3], Kitagawa ら [4], 梶田ら [6] などによってより一般的な形で解かれた。しかし、ロボットを目標状態へと導くためには試行錯誤が要求される。一方、長阪ら [9], 倉爪ら [10], 原田ら [11] は、ロボットの全質量が重心に集中した近似モデルにおいて運動を時間軸に沿って分割し、区間ごとの目標 ZMP をそれぞれ 1 次関数, 2 次関数, 3 次スプライン関数で与え、運動方程式から導出した解析解の係数を境界条件から決定する方

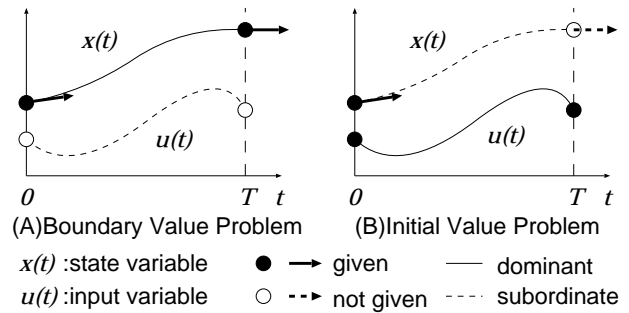


Fig.1 Initial value problem VS boundary value problem

法を提案している。しかし本来、入力をどのような関数で与えるかは、力学的拘束条件を満足しかつ適切な加速を系に与えられるか否かを大きく左右する。これらはそれについての議論が十分でない。加えて文献 [9] では、境界条件の与え方が過剰であるために、動き出し・停止まで考慮したときに不可解問題となっている。大和ら [12], 長谷川ら [13], Huang ら [14] などそれぞれ、入力と経路を同時に導く方法を提案しているが、進化的プログラミングや補間パラメータ調整などを用いており信頼性に欠ける。

本稿では文献 [9][10] と同様に、近似的質量集中モデルの運動方程式の解析的一般解において、初期条件及び目標とする境界条件から未知係数を決定し、二脚ロボットの運動軌道を高速に計画する方法をとる。その際、i) 移動を主体とした二脚ロボットの運動においては、位置・速度に関する境界条件は必ずしも厳密に満たす必要がないこと、および ii) 外力は不連続でも構わないことの 2 点に着目し、境界条件を緩和することで、外力に関する力学的拘束条件を確実に満足し、かつ完全なオンライン目標軌道計画を可能にする。また ZMP 軌道を指数関数で設計し、急激な加速を伴うなど高度な反力操作が要求される運動における支持脚交換を、比較的簡単に行う方法を提案する。

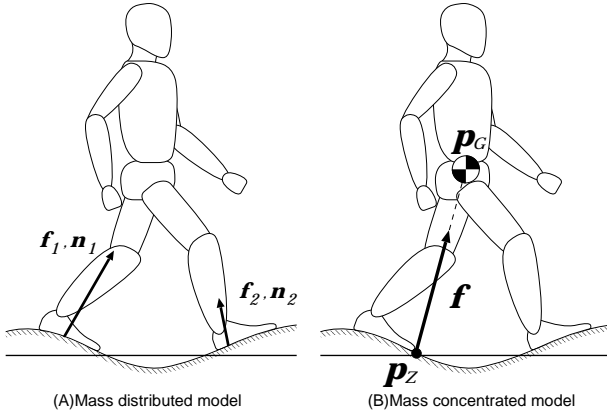


Fig.2 Mass distributed VS Mass concentrated model

## 2. 境界条件緩和による重心軌道計画

二脚ロボットは通常、数十の関節から成る大自由度系であり、厳密な運動方程式は複雑な形をとる。しかし、移動を中心とする脚ロボットの運動において最も支配的なのは重心の並進運動であり、重心まわりモーメントを無視しても深刻な問題となることは少ない。この仮定に基づき、Fig2(B) のような全質量が重心に集中したモデルを考えれば、運動方程式は次式で表される。

$$m(\ddot{p}_G + g) = f \quad (1)$$

$$(p_G - p_Z) \times f = 0 \quad (2)$$

ただし  $m$  はロボットの全質量、 $p_G = [x_G \ y_G \ z_G]^T$  は重心、 $g = [0 \ 0 \ g]^T$  は重力加速度、 $f = [f_x \ f_y \ f_z]^T$  はロボットに働く全並進外力、 $p_Z = [x_Z \ y_Z \ z_Z]^T$  はZMPである。ここで  $z_Z$  は地面の高さであり、既知であるとする。Eq.(1)(2) の各成分を書き下すと次のようになる。

$$\ddot{x}_G = \omega_G^2(x_G - x_Z) \quad (3)$$

$$\ddot{y}_G = \omega_G^2(y_G - y_Z) \quad (4)$$

$$\ddot{z}_G = \frac{f_z}{m} - g \quad (5)$$

ただし

$$\omega_G \equiv \sqrt{\frac{\ddot{z}_G + g}{z_G - z_Z}} \quad (6)$$

Eq.(3)(4)(5) は、 $x_Z, y_Z, f_z$  を入力とする  $p_G$  についての微分方程式と見なせる。このモデルに基づけば、軌道計画は時刻  $t=0 \sim T$  において  $p_G(0)$  と  $p_G(T)$  を結ぶ経路  $p_G(t)$  およびそれに対応する  $x_Z(t), y_Z(t), f_z(t)$  を求める問題と定式化される。本稿では、跳躍や走行など、環境と接触しない期間を有する運動は考えないことにする。このとき外力には次のような条件が課される。

$$p_Z \in S(t) \quad (7)$$

$$f_z \geq 0 \quad (8)$$

ただし  $S(t)$  は水平面  $z = z_Z$  上のある凸領域で、ロボットと環境との接触状態から形状が決定される(全ての接

触点が同一平面上にあるならば、それらの点群の凸包となる)。またこれは、一般に不連続に変化する。Eq.(7)(8) は共に、環境との接触点において引っ張り方向に力を発生できないということに由来する。鉛直方向の運動はEq.(5) より水平方向と独立に決定できるので、その間を例えば次のような関数で滑らかに補間する。

$$z_G(t) = z_G(0) + (z_G(T) - z_G(0)) \left( \frac{t}{T} - \sin \frac{2\pi t}{T} \right) \quad (9)$$

$z_G(0)$  と  $z_G(T)$  との差が十分小さければ、 $T$  秒の間に鉛直方向の運動が水平方向の運動に及ぼす影響は十分小さい、すなわち Eq.(3)(4) において  $\omega_G$  は時間の関数であるが、 $0 \leq t \leq T$  においてはほぼ定数であると見なせる。以降では、 $\omega_G$  を  $\omega_G(0)$  で置き換えることにし、それを単に  $\omega_G$  と記す。ここに Eq.(3)(4) の齊次方程式は線形であり、 $x_Z(t)$  および  $y_Z(t)$  を何らかの時刻の関数として与えれば一般解が得られる。また Eq.(3) と Eq.(4) は完全に同形であるので、本節では今後  $x$  軸方向の運動のみを考えることにする。

二脚ロボットが支持状態を不連続に推移させ、時にダイナミックな蹴り出し動作を必要とすることを踏まえ、本稿では入力(目標 ZMP 軌道)を次のように指数関数で与えるものとする。

$$x_Z(t) = x_Z(T) - (x_Z(T) - x_Z(0)) e^{-\beta \omega_G t} \quad (10)$$

ただし

$$\beta > 0, \quad \beta \neq 1 \quad (11)$$

このように関数を選ぶことによって、 $t=0$  において地面上の  $x_Z(0)$  を蹴り始め、 $t=T$  において  $x_Z(T)$  で全身を支えるという動作が生み出される。 $\beta$  は蹴り出し動作の勢いを決定するものであり、これが大きいほど、蹴り足から支持足への ZMP の推移が素早く行われる。また Eq.(3) の一般解は次のように表される。

$$x_G(t) = C_1 e^{\omega_G t} + C_2 e^{-\omega_G t} + \frac{x_Z(T) - x_Z(0)}{\beta^2 - 1} e^{-\beta \omega_G t} + x_Z(T) \quad (12)$$

ただし  $C_1, C_2$  は未知係数である。これを微分すると、

$$\dot{x}_G(t) = \omega_G C_1 e^{\omega_G t} - \omega_G C_2 e^{-\omega_G t} - \beta \omega_G \frac{x_Z(T) - x_Z(0)}{\beta^2 - 1} e^{-\beta \omega_G t} \quad (13)$$

これらより、 $t=0$  および  $t=T$  における境界条件は次のように表せる

$$C \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ x_Z(0) \\ x_Z(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_G(0) \\ \dot{x}_G(0) \\ x_G(T) \\ \dot{x}_G(T) \end{bmatrix} \quad (14)$$

ただし,

$$C \equiv \begin{bmatrix} 1 & 1 & -\frac{1}{\beta^2-1} & \frac{1}{\beta^2-1} + 1 \\ \omega_G & -\omega_G & \frac{\beta^2-1}{\beta\omega_G} & -\frac{\beta^2-1}{\beta\omega_G} \\ e^{\omega_G T} & -e^{\omega_G T} & \frac{e^{\beta\omega_G T}}{\beta^2-1} & \frac{e^{-\beta\omega_G T}}{\beta^2-1} + 1 \\ \omega_G e^{\omega_G T} - \omega_G e^{-\omega_G T} & \frac{\beta\omega_G e^{-\beta\omega_G T}}{\beta^2-1} & -\frac{\beta\omega_G e^{-\beta\omega_G T}}{\beta^2-1} & \frac{\beta\omega_G e^{-\beta\omega_G T}}{\beta^2-1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

今,  $\omega_G > 0$  を仮定しているので  $C$  は正則である. これはすなわち, 初期条件  $x_G(0), \dot{x}_G(0)$  および目標終端条件  $x_G(T), \dot{x}_G(T)$  を与えれば, ZMP 軌道および重心軌道が一意的に求まることを意味している. このように解を求めた場合, Eq.(7) が満足される保証はない.

そこで, Eq.(14) における各パラメータの性質を考えてみよう. まず  $x_G(0)$  および  $\dot{x}_G(0)$  は初期条件であり, 運動の連続性から厳密に満足されなければならないのに対し,  $x_G(T)$  および  $\dot{x}_G(T)$  は目標とする状態  ${}^d x_G(T)$  および  ${}^d \dot{x}_G(T)$  からのある程度の誤差を許容できる. また  $x_Z(0), x_Z(T)$  は Eq.(7) を満たすためにそれぞれある値  ${}^d x_Z(0), {}^d x_Z(T)$  の近傍にあることが求められるが,  $C_1, C_2$  は任意の値をとれる. 以上より, Eq.(14) を解く代わりに次のような二次計画問題を考える.

$$\frac{1}{2} (x - {}^d x)^T Q^{-1} (x - {}^d x) \rightarrow \text{minimize} \quad (*)$$

subject to  $Dx = s$

ただし

$$x \equiv [x_Z(0) \ x_Z(T) \ x_G(T) \ \dot{x}_G(T)]^T \quad (16)$$

$${}^d x \equiv [{}^d x_Z(0) \ {}^d x_Z(T) \ {}^d x_G(T) \ {}^d \dot{x}_G(T)]^T \quad (17)$$

$$Q \equiv \text{diag}\{q_i\} \quad (i = 1 \sim 4, q_i > 0) \quad (18)$$

$$D \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 & -d_{33} & -d_{34} \\ 0 & 1 & -d_{43} & -d_{44} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$s \equiv \begin{bmatrix} d_{31} & d_{32} \\ d_{41} & d_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_G(0) \\ \dot{x}_G(0) \end{bmatrix} \quad (20)$$

$d_{ij} (i, j = 1 \sim 4)$  は  $C$  の逆行列  $C^{-1}$  の各成分を表す.

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} \end{bmatrix} \quad (21)$$

問題 (\*) を実際に解けば, 次式を得る.

$$x = {}^d x - QD^T (DQD^T)^{-1} (D^d x - s) \quad (22)$$

$C_1, C_2$  は次式より求まる.

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_G(0) \\ \dot{x}_G(0) \\ x_G(T) \\ \dot{x}_G(T) \end{bmatrix} \quad (23)$$

${}^d x_Z(0), {}^d x_Z(T)$  をそれぞれ  $t = 0, t = T$  における支持領域内に設定し,  $q_1, q_2$  に十分大きな値を選べば, Eq.(7) は満足される. 以上で, 力学的拘束条件を満たしつつ, ある程度の誤差を許しながらも目標終端状態へとロボットを移動させる ZMP および重心の軌道が同時に求まった.

### 3. 運足指定からの半自動歩容生成

本節では前節の方法を用い, 動き出し・停止を含む連続的な歩容を, 指定された足着地予定位置のみから半自動的に, オンラインで計画する方法について述べる. 簡単のために, 足先を点として考えるが, 足裏面を持つロボットの場合はこれを足裏面内の適当な点で置き換えれば良い. 前節と同様に  $x$  軸方向の運動についてのみ考えるが, 支持領域に関する拘束条件は  $x, y$  両方向について同時に考えなければならない.

現在の時刻を  $t = 0$  とし, この時の支持脚および蹴り脚の足先接地位置をそれぞれ  $x_S(0), x_K(0)$  とする. また,  $t = T$  における蹴り脚の予定接地位置を  $x_K(T)$  とする. この間, 支持脚は移動せずに接地を保つので,  $x_S(t) = x_S(0)$  である. 重心の目標位置は, 次式のように支持脚足先と蹴り脚足先の中点に定める.

$${}^d x_G(T) = \frac{x_K(T) + x_S(T)}{2} \quad (24)$$

また重心の目標速度は次式のように定める.

$${}^d \dot{x}_G(T) = \begin{cases} \alpha_x ({}^d x_G(T) - x_G(0)) & (\text{運動を継続する場合}) \\ 0 & (\text{停止する場合}) \end{cases} \quad (25)$$

ただし  $\alpha_x$  は,  $T$  秒間の平均重心速度に対する境界速度の比を表す係数である.  $t = 0$  において蹴り足で強く地面を蹴り始めて進行方向に十分な加速を与え,  $t = T$  までに支持足裏に反力重心を完全に移すことを狙いとし, 次のように ZMP の目標境界条件を決定する.

$${}^d x_Z(0) = x_K(0) \quad (26)$$

$${}^d x_Z(T) = x_S(0) \quad (27)$$

これらより, 前節の方法を適用すれば重心および ZMP の目標軌道が計画される.

更に, Eq.(10) で決まる ZMP 計画軌道および  $t = 0$  における支持状態から, 蹴り脚が離床を開始できる時刻が判る. すなわち  $x_Z(t)$  は単調関数なので,  $x_Z(t)$  が支持脚足先接地領域に入った後の任意の時刻に蹴り脚を離床させれば良い. この時刻を  $t = T_s$  とすると, 例えば次のように蹴り脚足先軌道を計画できる.

$$x_K(t) = \begin{cases} x_K(0) & (0 \leq t < T_s) \\ x_K(0) + ({}^d x_K(T) - x_K(0)) \left( \frac{t}{T} - \sin \frac{2\pi t}{T} \right) & (T_s \leq t < T) \end{cases} \quad (28)$$

また鉛直方向の足先位置  $z_K(t)$  は、例えば次のような軌道で計画できる。

$$z_K(t) = \begin{cases} z_K(0) & (0 \leq t < T_s) \\ z_K(0) + ({}^d z_K(T) - z_K(0)) \left( \frac{t}{T} - \sin \frac{2\pi t}{T} \right) \\ \quad + h_K \left( 1 - \cos \frac{2\pi t}{T} \right) & (T_s \leq t < T) \end{cases} \quad (29)$$

ただし  $h_K (> 0)$  は最大足上げ高さから決める。  $t = T$  となったら改めて  $t = 0$  とし、同様の手続きを繰り返せば、連続的な歩容をオンラインで生成できる。

#### 4. 重心を含む全身逆運動学

本節では、計画された重心および足先軌道を同時に満たす全関節角を求める逆運動学について述べる。これは大自由度冗長な問題であり解析解導出は困難であるため、Newton=Raphson 法により数値的に求解する。

まず、筆者らの提案する重心ヤコビアン [15] を用いれば、接地リンク (支持脚足先リンク) が面接触状態を維持している下で、全関節角  $\theta$  と重心  $p_G$  それぞれの微小変位  $\Delta\theta, \Delta p_G$  を次式のように関係づけられる。

$$\Delta p_G = J_G \Delta\theta \quad (30)$$

また足先など、拘束する部位の微小変位  $\Delta p_C$  はやはり  $\Delta\theta$  と次のように関係づけられる。

$$\Delta p_C = J_C \Delta\theta \quad (31)$$

ただし  $J_C$  は Orin ら [16] の方法によって求めることができる。式 (30)(31) をまとめて

$$\Delta p_U = J_U \Delta\theta \quad (32)$$

とすると、所望の  $p_U$  を満たす  $\theta$  は次のような収束計算によって求めることができる。

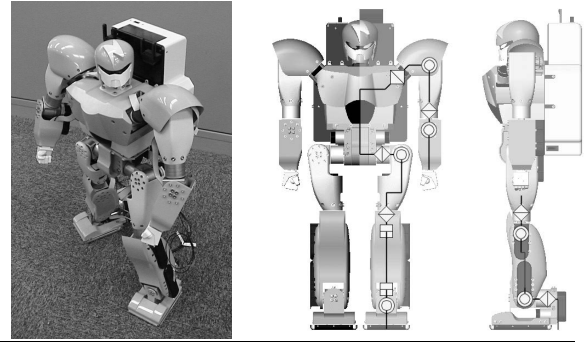
$$\theta \leftarrow \theta + J_U^* \Delta p_U \quad (33)$$

ただし  $J_U^*$  は  $J_U$  の特異値低感度逆行列 [17] である。

#### 5. 運動生成例・実験

提案方法により歩容を生成し、シミュレーションおよび実機実験にて検証した。Fig.3 は、用いたヒューマノイドロボットの外観および仕様である。

Table 1 は、与えた足着地予定位置および重心高さの列であり、時刻、距離の単位はそれぞれ [sec],[m] である。計画された目標軌道を Fig.4 に示す。重心を一旦支持脚側に加速する蹴り動作が、指数関数で設計された ZMP 軌道によって生成されていることが分かる。軌道の終端において重心は目標位置に完全に収束してはいないが、これは指数関数で入力軌道を与える下での限



Name:	UT- $\mu$ :mighty
height:	580 [mm]
weight:	6.5 [kg]
Number of joints:	20 ( 8 for arms,12 for legs )

Fig.3 External view and specifications of the robot

界であり、図が示す通り、実用的には運動を完全に停止するまでに数回の軌道再計画が求められる。

Fig.6 は計画軌道に逆運動学を適用し作成した運動を、シミュレーションにて再現したときのスナップショット、Fig.7 はこの軌道を用いた実ロボットに歩行させたときのスナップショットである。各関節が計画軌道に追従するようにのみ制御し、床反力のフィードバックなどは行っていないが、ロボットは転倒することなく運動を完遂し、計画軌道の力学的妥当性が確認できた。Fig.5 に ZMP の計画軌道およびシミュレーションで得られた ZMP 軌跡を示す。軌道計画において無視された重心回りモーメントの影響が、両者のずれとなって現れていることが確認される。実際の場面では、このような外乱がロボットの転倒を引き起こす原因となり得るため、何らかの方法で補償する必要がある。しかし外乱を生じさせるものには、ロボット自身のモデル誤差以外に、環境の動的な変化や未知障害物との衝突などモデル化の困難な要因が多い。従って、軌道計画の段階でこれを解決しようとするのは得策ではなく、信頼性の高い安定化制御の併用が望まれる [18]。

Table 1 A series of the desired foot placements and the height of COG and time index

$T$	switch <sup>†</sup>	${}^d x_K(T)$	${}^d y_K(T)$	${}^d z_K(T)$	${}^d z_G(T)$
0.7	L	0.10	0.045	0.0	0.28
0.7	R	0.20	-0.045	0.0	0.28
0.7	L	0.30	0.047	0.0	0.28
0.7	R	0.30	-0.047	0.0	0.29
0.3	S	0.30	0.000	0.0	0.29
0.2	S	0.30	0.000	0.0	0.29
0.1	S	0.30	0.000	0.0	0.29

<sup>†</sup> L ... kicking with left foot,  
R ... kicking with right foot,  
S ... stop

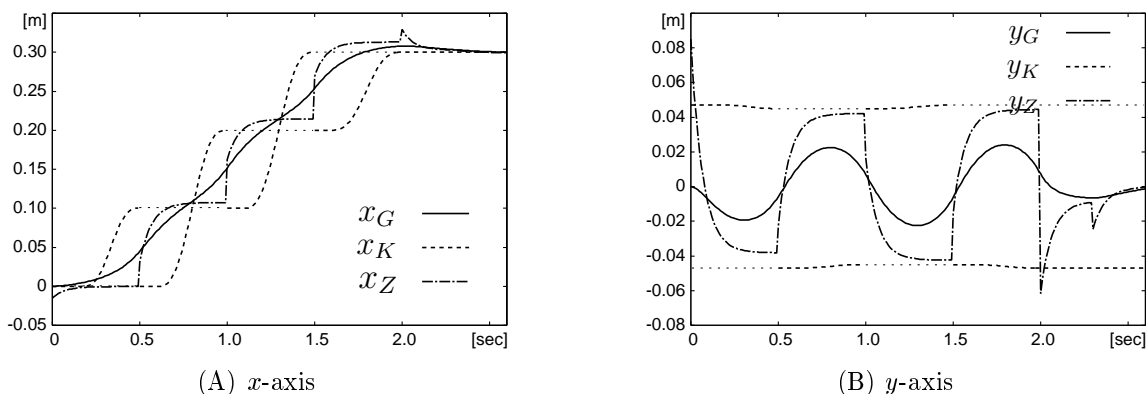


Fig.4 Planned trajectory of COG, foot and ZMP

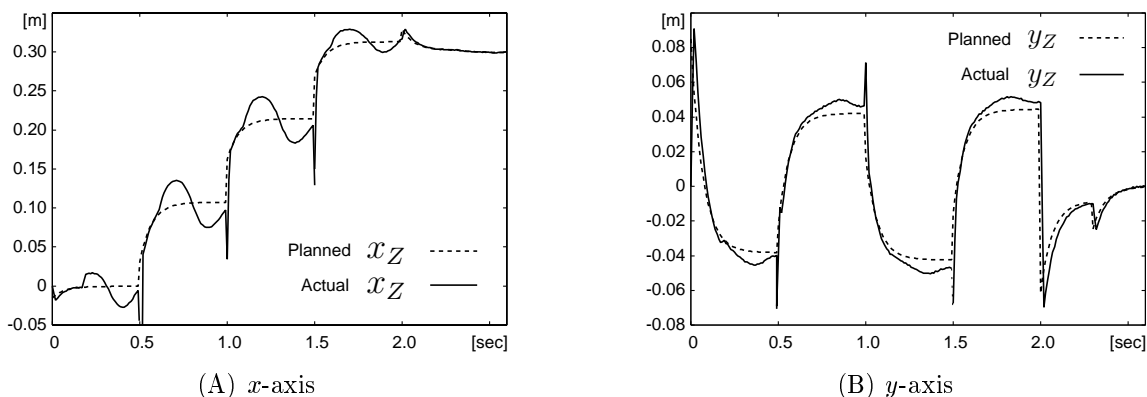


Fig.5 Planned ZMP and actual ZMP

## 6. おわりに

重心に質量が集中した近似モデルの運動方程式の解析解を利用し、二脚ロボットの歩容を高速に計画する方法を提案した。これは以下のような特徴を有する。

1. 位置・速度に関する境界条件を緩めることで、外力に関する力学的拘束条件をほぼ確実に満足できる。
2. 外力の不連続性を許容することで、完全なオンライン目標軌道計画を可能にする。また、急激な加速を要求する俊敏な運動を実現できる。
3. 目標 ZMP 軌道を指数関数で設計し、支持脚交換の際の高度な反力操作を比較的簡単に行える。

実際のオペレーションにおいては、信頼性の高い安定化制御器との併用が要件となる。

なお本研究は、科学研究費補助金基盤研究 (S) (課題番号：15100002) の支援を受けた。

### 参考文献

[1] Kazuo Hirai, Masato Hirose, Yuji Haikawa, and Toru Takenaka. The Development of Honda Humanoid Robot. In *Proceeding of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1321–1326, 1998.

[2] 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎. 上体運動により 3 軸モーメントを補償する 2 足歩行ロボットの開発.

日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 4, pp. 581–586, 1993.

[3] 長阪憲一郎. 動力学フィルタによる人間型ロボットの全身運動生成. PhD thesis, 東京大学大学院工学系研究科, 2000.

[4] S. Kagami, T. Kitagawa, K. Nishiwaki, T. Sugihara, M. Inaba, and H. Inoue. A Fast Dynamically Equilibrated Walking Trajectory Generation Method of Humanoid Robot. *Autonomous Robots*, Vol. 12, No. 1, pp. 71–82, 2002.

[5] Shuuji Kajita, Osamu Matsumoto, and Muneharu Saigo. Real-time 3D walking pattern generation for a biped robot with telescopic legs. In *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 2299–2036, 2001.

[6] 梶田, 原田, 金広, 金子, 藤原, 横井, 比留川. 予見制御を用いた ZMP 補正用動力学フィルタ. 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2003.

[7] Miomir Vukobratović and Davor Juričić. Contribution to the Synthesis of Biped Gait. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, Vol. BME-16, No. 1, pp. 1–6, 1969.

[8] M. Vukobratović and J. Stepanenko. On the Stability of Anthropomorphic Systems. *Mathematical Biosciences*, Vol. 15, No. 1, pp. 1–37, 1972.

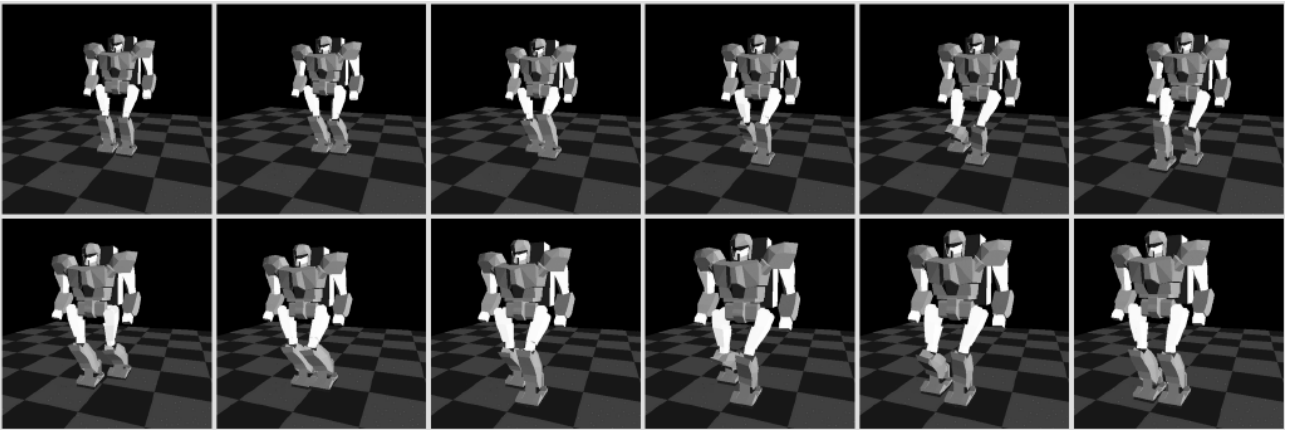


Fig.6 Snapshots of a simulation of a walking motion generated

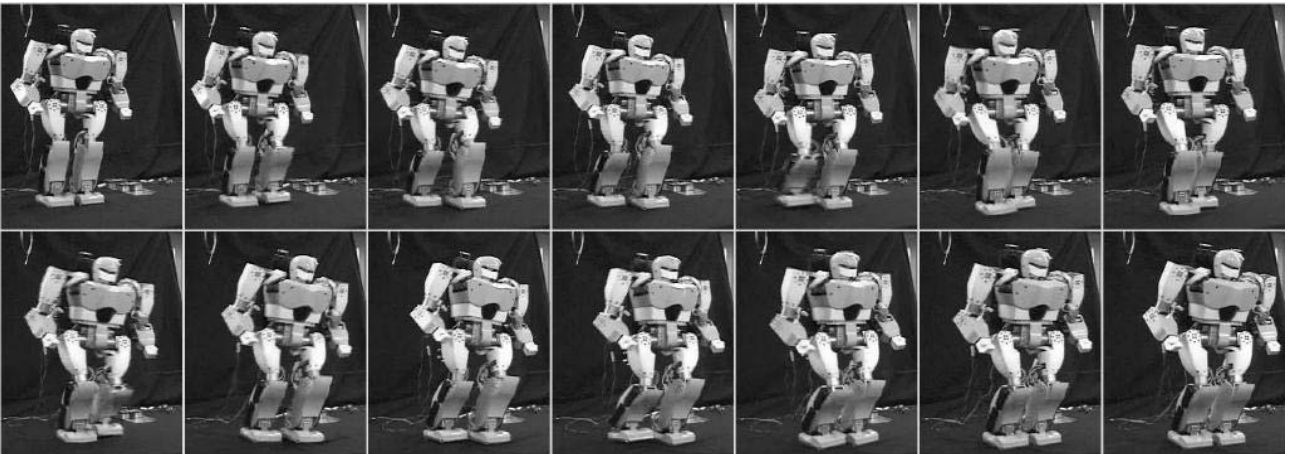


Fig.7 Snapshots of the played walking pattern by a real robot

- [9] 長阪憲一郎, 黒木義博, 鈴木伸也, 伊藤禎洋, 山口仁一. 小型二足歩行エンターテインメントロボットによる歩行・跳躍・走行運動統合制御. 第9回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 386–391, 2004.
- [10] 倉爪亮, 米田完, 田中俊太郎, 玉木達也, 太田祐介, 長谷川勉. 2足歩行機械の3D揺動歩行. 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 7, pp. 115–122, 2003.
- [11] 原田研介, 梶田秀司, 森澤光晴, 金広文男, 藤原清司, 金子健二, 比留川博久. 実時間歩容計画における解析的アプローチ. 第22回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2004.
- [12] 大和秀彰, 古田貴之, 富山健. 脚式移動ロボットにおける三次元二足歩行の実現 – 終端値を利用した歩容の生成及び安定化手法 –. 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1107–1108, 1998.
- [13] 長谷川泰久, 荒川文昌, 福田敏男. 階層形進化アルゴリズムを用いた二足歩行ロボットの歩行動作獲得. 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 66, No. 645, pp. 1605–1612, 1999.
- [14] Qiang Huang, Kauhito Yokoi, Shuuji Kajita, Kenji Kaneko, Hirohiko Arai, Noriho Koyachi, and Kazuo Tanie. Planning Walking Patterns for a Biped Robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 3, pp. 280–289, 2001.
- [15] Tomomichi Sugihara, Yoshihiko Nakamura, and Hirochika Inoue. Realtime Humanoid Motion Generation through ZMP Manipulation based on Inverted Pendulum Control. In *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1404–1409, 2002.
- [16] David E.Orin and William W.Schrader. Efficient Computation of the Jacobian for Robot Manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 66–75, 1984.
- [17] Yoshihiko Nakamura. *ADVANCED ROBOTICS:Redundancy and Optimization*. Addison Wesley Publishing Company, 1991.
- [18] Tomomichi Sugihara and Yoshihiko Nakamura. Whole-body Cooperative Balancing of Humanoid Robot using COG Jacobian. In *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2002.