

二脚ロボットの3次元跳躍運動計画のための境界条件緩和法拡張

東京大学 杉原 知道 中村 仁彦

Enhancement of Boundary Condition Relaxation Method for 3D Hopping Motion Planning of Biped Robots

University of Tokyo Tomomichi Sugihara and Yoshihiko Nakamura

Abstract— Boundary Condition Relaxation method[1], which realizes stepwise legged motion planning by accepting an error from the desired goal state of the center of mass and discontinuity of the zero-moment point, is enhanced to enable hopping motion planning from arbitrary initial conditions. The main issues of the enhancement are how to utilize intermittent reaction force by solving piecewise equation of motion of the mass-concentrated model, and how to condition the angular-momentum conservation and body attitude control seamlessly by a variable weighted inverse kinematics.

Key Words: Biped robot, Hopping motion, Legged motion planning, Weighted inverse kinematics

1. はじめに

脚型ロボットは環境との機械的な結合を持たず、接触状態の不連続な変化にともなう形を変える非ホロノミック拘束を受けながら運動する。特に浮遊期間を含む跳躍運動は、運動量保存則および角運動量保存則に支配されながら、間歇的に現れる外界との接点と、そこに発生する反力を巧みに操作することが要求される。

Raibertら[2]は、反復的な跳躍を機械的に与え、足先着地位置の単純な制御だけで安定走行が可能であることを示した。Hyonら[3]は犬の後脚をモデルにした一脚ロボットを開発し、走行に成功した。跳躍に特化しない一般的な脚機構を持つロボットに関する研究として、平野ら[4]は、運動履歴に基づいて適応的に制御器を調整する二脚ロボットの連続跳躍制御を提案した。また長崎ら[5]は、ばね要素を持つ脚が結合した質点モデルに基づくヒューマノイドロボットの定常走行軌道計画法を提案した。しかし、非定常な跳躍運動の実現には解決すべき問題が多い。池田ら[6]は、劣駆動系の運動方程式に自然拘束条件と制御拘束条件を埋め込む可変拘束制御を提案し、脚型ロボットの走行制御に成功した。これはロボットの詳細な力学モデルを必要とし、計算コストも高い。長阪[7]は、多目的最適化問題であるヒューマノイドロボットの複雑な全身運動計画を、最適化単位である力学フィルタの組み合わせによって統一的に行う方法を提案したが、速度拘束条件を陽に考慮できないという問題がある。Nagasakaら[8]は、線形近似された力学モデルに基づき、浮遊期間を含む二脚運動の解析的な軌道を計画する方法を提案したが、接地状態が切り替わる際の拘束条件の整合性については明らかにされていない。杉原ら[9]は、仮想的なインピーダンス特性を有する倒立振り子モデルに基づき、ヒューマノイドロボットの跳躍制御を提案した。

また山本ら[10]は、同モデルに基づくヒューマノイドロボットの跳躍運動計画法を提案した。これらは、浮遊期の角運動量保存則を考慮していない。

本稿は、任意の初期状態から任意の終端状態への一歩分の指令から跳躍運動を計画する方法を提案する。脚運動計画は、入力に不等式拘束条件が課せられる二点境界値問題となる。入力とは環境から受ける反力であり、不等式拘束条件とは、接触点において引張り方向に力を発生できないことに起因する。筆者ら[1]はこれまでに、ロボットの全質量が重心に集中した近似モデルに基づき、位置・速度に関する目標値からの多少の誤差と外力の不連続性を許容することで、力学的拘束条件を満足しオンライン脚運動計画を可能にする境界条件緩和法を開発している。本稿ではこれを拡張し、接地状態の遷移を支配する鉛直方向重心運動計画、離床・着床にともなう時間拘束条件下での水平方向重心運動計画、鉛直・水平方向運動の干渉を考慮した軌道補正という問題の扱いをとり入れる。また近似モデルによって得た運動を全身運動へと還元する際に、特異値低感度逆行列[11]を用い、荷重可変とした過拘束問題を解くことによって浮遊期間における角運動量保存則と接地期間における体幹姿勢制御をシームレスに整合させる逆運動学についても述べる。

2. 跳躍運動のための境界条件緩和法拡張

2.1 質量集中モデルと運動方程式

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、その運動方程式は一般化座標に関して複雑な形をとるが、重心運動を抽出すると次式で表される。

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

ただし m はロボットの全質量、 $\mathbf{p} = [x \ y \ z]^T$ は重心、 $\mathbf{g} = [0 \ 0 \ g]^T$ は重力加速度、 $\mathbf{f} = [f_x \ f_y \ f_z]^T$ はロボッ

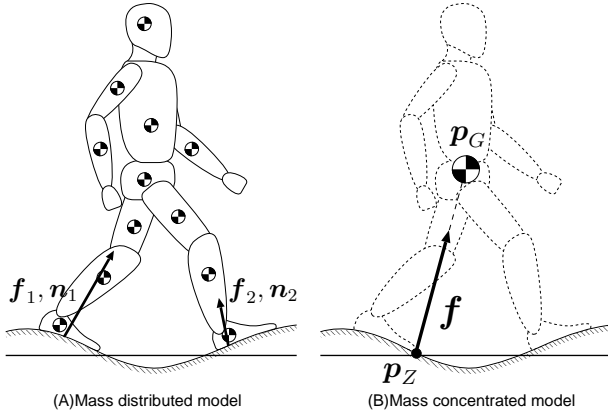


Fig.1 Mass distributed VS mass concentrated model

トに働く全並進外力である．接地期においては，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と仮定し，Fig.1 (B) のような全質量が重心に集中したモデルを考えれば，次式が成り立つ．

$$(\mathbf{p} - \mathbf{p}_Z) \times \mathbf{f} = 0 \quad (2)$$

ただし $\mathbf{p}_Z = [x_Z \ y_Z \ z_Z]^T$ は ZMP[12] 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．環境との接触点においては引張り方向に力を発生できないため，次のような条件が課される．

$$\mathbf{p}_Z \in S(t) \quad (3)$$

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.(1)(2) の各成分を書き下すと次のようになる．

$$\ddot{x} = \omega^2(x - x_Z) \quad (4)$$

$$\ddot{y} = \omega^2(y - y_Z) \quad (5)$$

$$\ddot{z} = \frac{f_z}{m} - g \quad (6)$$

ただし

$$\omega \equiv \sqrt{\frac{\ddot{z} + g}{z - z_Z}} \quad (7)$$

Eq.(4)(5)(6) は， x_Z, y_Z, f_z を入力とする \mathbf{p} についての微分方程式と見なせる．また浮遊期においては，Eq.(1) は次式となる．

$$m(\ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{g}) = 0 \quad (8)$$

このモデルに基づけば，跳躍軌道計画は，接地状態に応じ Eq.(1) または (8) と形を変える区分微分方程式において，時刻 $0 \leq t \leq T$ で初期条件 $\mathbf{p}(0) = [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ および $\dot{\mathbf{p}}(0) = [v_{x0} \ v_{y0} \ v_{z0}]^T$ と，終端条件 $\mathbf{p}(T) = [x_T \ y_T \ z_T]^T$ および $\dot{\mathbf{p}}(T) = [v_{xT} \ v_{yT} \ v_{zT}]^T$ を結ぶ経路 $\mathbf{p}(t)$ 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．

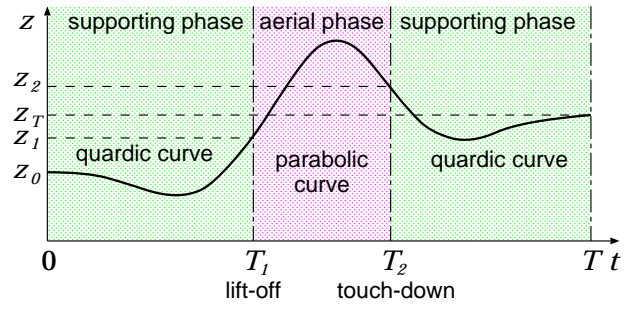


Fig.2 Phase transition in hopping motion

2.2 鉛直方向の重心軌道計画

Eq.(6) より，鉛直方向の重心運動は水平方向運動と独立に決定できる．時刻 $0 = t \sim T$ に浮遊期を挟む鉛直方向重心運動は，Fig.2 のように，時刻 0 から離床時刻 T_1 まで， T_1 から着床時刻 T_2 まで， T_1 から T までの 3 期に分割できる．時刻 T_1, T_2 における境界条件 $z(T_1) = z_1$ および $z(T_2) = z_2$ を与えれば，浮遊期 $T_1 \leq t \leq T_2$ における $z(t)$ の軌道が次のように定まる．

$$z(t) = -\frac{1}{2}g(t - T_1)(t - T_2) + \frac{z_2(t - T_1) - z_1(t - T_2)}{T_2 - T_1} \quad (9)$$

これを時刻に関して一階微分すると，次式を得る．

$$\dot{z}(t) = -gt + \frac{1}{2}g(T_1 + T_2) + \frac{z_2 - z_1}{T_2 - T_1} \quad (10)$$

よって時刻 T_1, T_2 における速度境界条件は，それぞれ次のようになる．

$$\dot{z}(T_1) = v_{z1} \equiv -\frac{1}{2}g(T_1 - T_2) + \frac{z_2 - z_1}{T_2 - T_1} \quad (11)$$

$$\dot{z}(T_2) = v_{z2} \equiv -\frac{1}{2}g(T_2 - T_1) + \frac{z_2 - z_1}{T_2 - T_1} \quad (12)$$

また加速度は常に $\ddot{z}(t) = -g$ である．よって， $0 \leq t \leq T_1$ においては境界条件 $z(0) = z_0, \dot{z}(0) = v_{z0}, z(T_1) = z_1, \dot{z}(T_1) = v_{z1}, \ddot{z}(T_1) = -g$ を， $T_2 \leq t \leq T$ においては境界条件 $z(T_2) = z_2, \dot{z}(T_2) = v_{z2}, \ddot{z}(T_2) = -g, z(T) = z_T, \dot{z}(T) = v_{zT}$ をそれぞれ満たすよう，例えば 4 次関数で $z(t)$ を与えればよい．

2.3 水平方向の重心軌道計画

接地期においては，鉛直方向の運動が水平方向の運動に及ぼす影響が十分小さい，すなわち Eq.(4)(5) において ω がほぼ定数であると思なせると仮定しよう．Eq.(4)(5) において， $0 \leq t \leq T_1$ および $T_2 \leq t \leq T$ における ω をそれぞれ $\omega(0) = \omega_0, \omega(T) = \omega_T$ で置き換えると，その斉次方程式は線形であり，与えられた $x_Z(t)$ および $y_Z(t)$ に対する特解を発見できれば，一般解が得られる．また Eq.(4) と Eq.(5) は完全に同形であるので，本節では x 軸方向の運動のみを考える．

目標 ZMP 軌道は次のような形で与える .

$$x_Z(t) = \begin{cases} x_{Z1} - (x_{Z1} - x_{Z0}) e^{-\beta\omega_0 t} & (0 \leq t \leq T_1) \\ \text{(未定義)} & (T_1 < t < T_2) \\ x_{ZT} - (x_{ZT} - x_{Z2}) e^{-\beta\omega_T(t-T_2)} & (T_2 \leq t \leq T) \end{cases} \quad (13)$$

ただし β は, $\beta > 0, \beta \neq 1$ を満たす定数である . このとき Eq. (4)(8) の一般解は次式となる .

$$x(t) = \begin{cases} {}^1C_1 e^{\omega_0 t} + {}^1C_2 e^{-\omega_0 t} + \frac{x_{Z1} - x_{Z0}}{\beta^2 - 1} e^{-\beta\omega_0 t} + x_{Z1} & (0 \leq t \leq T_1) \\ x_1 + v_1(t - T_1) & (T_1 < t < T_2) \\ {}^2C_1 e^{\omega_T(t-T_2)} + {}^2C_2 e^{-\omega_T(t-T_2)} + \frac{x_{ZT} - x_{Z2}}{\beta^2 - 1} e^{-\beta\omega_T(t-T_2)} + x_{ZT} & (T_2 \leq t \leq T) \end{cases} \quad (14)$$

ただし ${}^1C_1, {}^1C_2, x_1, v_1, {}^2C_1, {}^2C_2$ は未知定数である . これを微分すると次式を得る .

$$\dot{x}(t) = \begin{cases} \omega_0 ({}^1C_1 e^{\omega_0 t} - {}^1C_2 e^{-\omega_0 t} - \beta \frac{x_{Z1} - x_{Z0}}{\beta^2 - 1} e^{-\beta\omega_0 t}) & (0 \leq t \leq T_1) \\ v_1 & (T_1 < t < T_2) \\ \omega_T ({}^2C_1 e^{\omega_T(t-T_2)} - {}^2C_2 e^{-\omega_T(t-T_2)} - \beta \frac{x_{ZT} - x_{Z2}}{\beta^2 - 1} e^{-\beta\omega_T(t-T_2)}) & (T_2 \leq t \leq T) \end{cases} \quad (15)$$

位置・速度の連続性から, 境界条件は次のように表せる .

$$\begin{bmatrix} C_1 & C_2 & O & O \\ C_3 & C_4 & O & O \\ O & O & C_1 & C_2 \\ O & O & C_5 & C_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1c \\ {}^1x_Z \\ {}^2c \\ {}^2x_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ B_1 x_1 \\ B_2 x_1 \\ x_T \end{bmatrix} \quad (16)$$

ただし,

$$\begin{aligned} C_1 &\equiv \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, & C_2 &\equiv \begin{bmatrix} -\gamma & \gamma + 1 \\ \beta\gamma & -\beta\gamma \end{bmatrix} \\ C_3 &\equiv \begin{bmatrix} \lambda_1 & \frac{1}{\lambda_1} \\ \lambda_1 & -\frac{1}{\lambda_1} \end{bmatrix}, & C_4 &\equiv \begin{bmatrix} -\gamma\lambda_1^{-\beta} & \gamma\lambda_1^{-\beta} + 1 \\ \beta\gamma\lambda_1^{-\beta} & -\beta\gamma\lambda_1^{-\beta} \end{bmatrix} \\ C_5 &\equiv \begin{bmatrix} \lambda_2 & \frac{1}{\lambda_2} \\ \lambda_2 & -\frac{1}{\lambda_2} \end{bmatrix}, & C_6 &\equiv \begin{bmatrix} -\gamma\lambda_2^{-\beta} & \gamma\lambda_2^{-\beta} + 1 \\ \beta\gamma\lambda_2^{-\beta} & -\beta\gamma\lambda_2^{-\beta} \end{bmatrix} \\ B_1 &\equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\omega_0} \end{bmatrix}, & B_2 &\equiv \begin{bmatrix} 1 & T_2 - T_1 \\ 0 & \frac{1}{\omega_T} \end{bmatrix} \\ \gamma &\equiv \frac{1}{\beta^2 - 1}, & \lambda_1 &\equiv e^{\omega_0 T_1}, & \lambda_2 &\equiv e^{\omega_T(T-T_2)} \end{aligned}$$

$${}^1c \equiv \begin{bmatrix} {}^1C_1 \\ {}^1C_2 \end{bmatrix}, {}^2c \equiv \begin{bmatrix} {}^2C_1 \\ {}^2C_2 \end{bmatrix}, {}^1x_Z \equiv \begin{bmatrix} x_{Z0} \\ x_{Z1} \end{bmatrix}, {}^2x_Z \equiv \begin{bmatrix} x_{Z2} \\ x_{ZT} \end{bmatrix} \\ x_0 \equiv \begin{bmatrix} x_0 \\ v_{x0} \\ \omega_0 \end{bmatrix}, x_1 \equiv \begin{bmatrix} x_1 \\ v_1 \end{bmatrix}, x_T \equiv \begin{bmatrix} x_T \\ v_{xT} \\ \omega_T \end{bmatrix}$$

左辺の係数行列は正則であり, 仮に x_0, x_T および x_1 が与えられれば, Eq. (16) から ZMP 軌道および重心軌道が一意に決まってしまう . このように解を求めた場合, Eq. (3) が満足される保証はない . そこで, Eq. (16) における各パラメータの性質を考えよう . まず x_0 は運動の連続性から厳密に満足されなければならないが, x_T は目標状態 ${}^d x_T$ からのある程度の誤差を許容できる . ${}^1x_Z, {}^2x_Z$ は, Eq. (3) を満たすために足先計画位置に整合する参照値 ${}^{d1}x_Z, {}^{d2}x_Z$ の近傍にあることが求められる . 特に x_{Z1}, x_{Z2} はそれぞれ離床直前・着床直後の ZMP であり, 許容できる誤差は小さい . また $x_1, {}^1c, {}^2c$ は任意の値をとれる . 以上より, まず Eq. (16) を次のように書き換える .

$$\tilde{C}\eta = \chi + \tilde{x}_T \iff \eta = \tilde{C}^{-1}(\chi + \tilde{x}_T) \quad (17)$$

ただし

$$\tilde{C} \equiv \begin{bmatrix} 1 & 1 & -\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & \beta\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_1 & \frac{1}{\lambda_1} & -\gamma\lambda_1^{-\beta} - 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1} & \beta\gamma\lambda_1^{-\beta} & 0 & -\frac{1}{\omega_0} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 - (T_2 - T_1) & 1 & 1 & \gamma + 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\omega_T} & 1 & -1 & -\beta\gamma \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_2 & \frac{1}{\lambda_2} & \gamma\lambda_2^{-\beta} + 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_2 - \frac{1}{\lambda_2} & -\beta\gamma\lambda_2^{-\beta} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\eta \equiv \begin{bmatrix} {}^1C_1 \\ {}^1C_2 \\ x_{Z0} \\ x_1 \\ v_1 \\ {}^2C_1 \\ {}^2C_2 \\ x_{ZT} \end{bmatrix}, \chi \equiv \begin{bmatrix} x_0 - (\gamma + 1) {}^d x_{Z1} \\ \frac{v_0}{\omega_0} + \beta\gamma {}^d x_{Z1} \\ -(\gamma\lambda_1^{-\beta} + 1) {}^d x_{Z1} \\ \beta\gamma\lambda_1^{-\beta} {}^d x_{Z1} \\ \gamma {}^d x_{Z2} \\ -\beta\gamma {}^d x_{Z2} \\ \gamma\lambda_2^{-\beta} {}^d x_{Z2} \\ -\beta\gamma\lambda_2^{-\beta} {}^d x_{Z2} \end{bmatrix}, \tilde{x}_T \equiv \begin{bmatrix} 0 \\ x_T \end{bmatrix}$$

Eq. (17) から x_{Z0}, x_{ZT} に関する行を抜き出す .

$$\begin{bmatrix} x_{Z0} \\ x_{ZT} \end{bmatrix} = D_1 \chi + D_2 x_T \quad (18)$$

さらに, 次のような二次計画問題を考える .

$$\frac{1}{2} (\xi - {}^d \xi)^T Q^{-1} (\xi - {}^d \xi) \rightarrow \text{minimum} \quad (\text{QP}) \\ \text{subject to } D\xi = s$$

ただし

$$\begin{aligned}\xi &\equiv [x_{z0} \ x_{zT} \ x_T \ v_T/\omega_T]^T \\ d\xi &\equiv [{}^d x_{z0} \ {}^d x_{zT} \ {}^d x_T \ {}^d v_T/\omega_T]^T \\ Q &\equiv \text{diag}\{q_i\} \quad (i = 1 \sim 4, q_i > 0) \\ D &\equiv \begin{bmatrix} 1 & -D_2 \end{bmatrix}, \quad s \equiv D_2 \chi\end{aligned}$$

問題 (QP) を実際に解けば、次式を得る。

$$\xi = d\xi - QD^T(DQD^T)^{-1}(D^d\xi - s) \quad (19)$$

${}^1c, {}^2c$ および x_1 は式 (17) より求まる。 ${}^d x_{z0}, {}^d x_{zT}$ 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. (3) は満足される。足先の軌道は、離床時刻 T_1 、着床時刻 T_2 および目標 ZMP 軌道 $x_z(t)$ と整合するように計画する。

2.4 鉛直・水平方向運動の干渉に対する重心軌道補正

前節で、 ω は区間毎に定数と見なせると仮定した。跳躍のように鉛直方向に大きく運動する場合、この仮定は崩れ、重心・ZMP 軌道間のずれが無視できなくなる。拘束条件 (3) は全時刻で満たさなければならないので、短期的には重心軌道よりも ZMP 軌道の再現を優先する。時刻の関数としてすでに得られている ZMP 軌道 $x_z(t)$ および鉛直方向重心軌道 $z(t)$ を運動方程式 Eq. (4)(7)(8) に代入し、微分方程式の初期値問題として Runge-Kutta 法などの数値解法を用いれば、補正された重心軌道が得られる。

3. 姿勢制御・角運動量整合のための逆運動学

計画された重心および足先軌道を満たし、かつ、接地期間における体幹姿勢制御と、浮遊期間における角運動量保存則を両立するロボットの全関節角を求める。

ベースリンクの 6 自由度を含むロボットの一般化座標を θ とする。まず、重心および両足先の位置・姿勢などの微小変位 Δp_U と、 θ の微小変位 $\Delta\theta$ との関係は、重心ヤコビアンおよび両足先の基礎ヤコビ行列を用いれば次式のように表される。

$$\Delta p_U = J_U \Delta\theta \quad (20)$$

また、接地期においては体幹姿勢を計画軌道に追従させる。これは次のような拘束条件で表現される。

$$J_{\Omega_0} \Delta\theta = \Delta\Omega_0 \quad (21)$$

ただし J_{Ω_0} はベースリンクの角速度に関する基礎ヤコビ行列、 $\Delta\Omega_0$ は目標姿勢と現在の姿勢との間の誤差ベクトルである。一方、浮遊期においてはロボットの振る舞いは角運動量保存則に支配される。すなわち重心

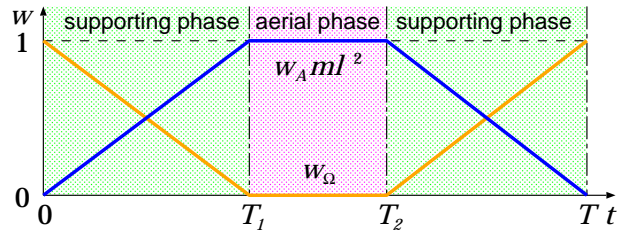


Fig.3 Variable weight in accordance with contact phase

まわりの全角運動量に関し、時刻 $t = T_1 \sim T_2$ において次式を満たさなければならない。

$$J_A \Delta\theta = {}^d L \quad (22)$$

ただし ${}^d L$ は、浮遊期における重心まわり角運動量の目標値であり、 J_A は次式で定義される。

$$J_A \equiv \sum_{i=1}^N \{m_i(p_i - p) \times J_{G_i} + R_i {}^i I_i {}^i J_{\Omega_i}\} \quad (23)$$

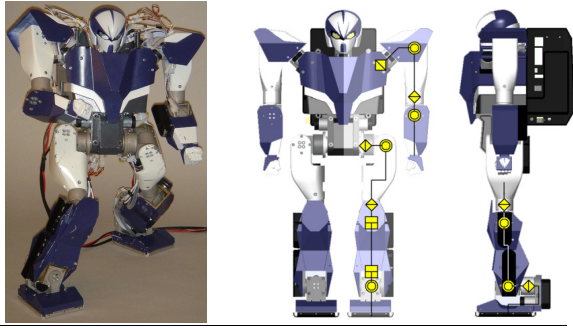
N はリンク個数、 m_i は i 番目リンク質量、 p_i は i 番目リンク重心位置ベクトル、 J_{G_i} は i 番目リンク重心運動に関するヤコビ行列、 R_i は i 番目リンク姿勢行列、 ${}^i I_i$ は i 番目リンクに固定された座標系 Σ_i から見たリンクの慣性テンソル、 ${}^i J_{\Omega_i}$ は i 番目リンクの Σ_i から見た角速度に関する基礎ヤコビ行列である。

接地期・浮遊期の切り替わり時に条件 (21) から (22) へとシームレスに遷移するように、これらの条件を重み付きで全時刻にわたって課し、Fig.3 のように重みを連続的に変化させる。すなわち条件 (21) および (22) に対し、それぞれの重み w_{Ω_0} および w_A を次式のように与える。

$$w_{\Omega_0} = \begin{cases} \frac{T_1 - t}{T_1} & (0 \leq t \leq T_1) \\ 0 & (T_1 \leq t \leq T_2) \\ \frac{t - T_2}{T - T_2} & (T_2 \leq t \leq T) \end{cases} \quad (24)$$

$$w_A = \frac{1}{ml^2} \begin{cases} \frac{t}{T_1} & (0 \leq t \leq T_1) \\ 1 & (T_1 \leq t \leq T_2) \\ \frac{T - t}{T - T_2} & (T_2 \leq t \leq T) \end{cases} \quad (25)$$

ただし l はロボットの代表長さ（たとえば全高）とする。後者を ml^2 で除算しているのは、拘束条件の物理的な次元の違いを吸収するためである。条件 (20) に関しても同様に、重心位置および足先位置に関する拘束条件の重みを l で除算する。このような重み付き拘束条件に対し、特異点低感度逆行列 [11] を用いた Newton=Raphson 法によって逆運動学を解き、最終的に全身関節の軌道を得る。



Name:	UT- μ 2:magnum
height:	540 [mm]
weight:	7.5 [kg]
Number of joints:	20 (8 for arms, 12 for legs)

Fig.4 External view and specifications of the robot

4. 運動生成例・実験

Fig.4のヒューマノイドロボットを用い、提案方法によって前方への跳躍運動軌道を生成した例を示す．初期時刻における右足，左足および重心の位置はそれぞれ $[0 \ -0.0485 \ 0]^T$, $[0 \ 0.0485 \ 0]^T$, $[0 \ 0 \ 0.26]^T$ であり，静止状態から運動を開始した．指令値として $T_1 = 0.2$, $T_2 = 0.3$, $T = 0.5$, $z_1 = 0.29$, $z_2 = 0.30$, $z_T = 0.27$, $x_{z0} = 0$, $x_{z1} = 0$, $x_{z2} = 0.05$, $x_{z3} = 0.05$, $\beta = 1.5$, $^d x_T = 0.05$, および足上げ高さ $h_K = 0.02$ を与えた．浮遊期間の目標重心まわり角運動量は0とした．また2次計画問題(QP)における重み行列 Q は $\text{diag}\{1, 2, 0.2, 0.1\}$ とした．Fig.6(A)は，計画された重心・足先およびZMPの x 軸方向の軌道，(B)は z 軸方向の重心・足先軌道，(C)は z 軸方向重心加速度である．水平方向重心軌道補正にはRunge-Kutta-Gill法を用いた．図から，補正の前後で特に離床時の前方速度に差が生じていることが判る．またこの例では，終端時刻において目標値と実際の重心位置との誤差は x 軸方向で8[mm]程度に収まっている．

Fig.6(D)は，計画された軌道から逆運動学によって得た全身運動に逆動力学を適用し，ZMP軌跡を求めたものである．図中，点ハッチングを施した領域は支持領域である．目標軌道と似た傾向を示すが，(C)と比較し，重心の鉛直方向加速度が減少するとずれが大きくなることが分かる．特に離床直前や着床直後で大きく変動している．この期間においては地面から受ける反力が小さく，精密な補正制御を行うことは難しいが，反面，ロボットを転倒させるような過大な力も生じないと考えられる．(E)は体幹のピッチ方向の傾き角度である．目標値は全期間で0としたが，重み付き逆動力学の働きにより浮遊期間の角運動量を0に拘束するよう自動的に角度を変化させる軌道が生成されている．Fig.5は，計画軌道に逆運動学を適用し作成し

た跳躍運動のスナップショットである．

以上の計算には，CPU: Intel PentiumM 1GHz, RAM:256MBである計算機を使用し，逆運動学計算には1ステップに平均約1[s]を要した．

5. おわりに

筆者らの開発した境界条件緩和法を拡張し，任意の初期状態からの3次元跳躍運動を計画できる方法を提案した．これは次のような特徴を持つ．

- i) 所望の離床・着床時刻と，それぞれの境界時刻における重心高さを厳密に満たす鉛直方向重心軌道を計画できる．
- ii) 上記から決まる厳しい時間境界条件と，外力に課せられる不等式拘束条件下での，水平方向重心およびZMPの目標軌道を同時に計算できる．
- iii) 上記において外力の軌道を同時に求めることによって，鉛直方向の大運動が水平方向運動に及ぼす干渉を考慮した重心軌道補正が行える．
- iv) 重心軌道を全身運動へと還元する逆運動学計算の際に，浮遊期間における角運動量保存則と接地期間における体幹姿勢制御をシームレスに整合させることが可能である．

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] 杉原知道, 中村仁彦. 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. 第10回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 153–158, 2005.
- [2] Marc H. Raibert, H. Benjamin Brown Jr., and Michael Chepponis. Experiments in Balance with a 3D One-Legged Hopping Machine. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 3, No. 2, pp. 75–92, 1984.
- [3] S. H. Hyon and T. Mita. Development of a Biologically Inspired Hopping Robot – “Kenken”. In *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 3984–3991, 2002.
- [4] 平野毅, 河村篤男. 適応インピーダンス制御による人間型2足ロボットの跳躍動作. 電気学会産業計測制御研究会資料, pp. 137–142, 1999.
- [5] 長崎高巳, 梶田秀司, 横井一仁, 金子健二, 谷江和雄. 走行ヒューマノイドの軌道生成. 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1155–1156, 2001.
- [6] 池田貴幸, 巢瀬浩一, 岩谷靖, 美多勉. 可変拘束制御による走行ロボットの実現. システム制御情報学会誌, Vol. 45, No. 5, pp. 233–243, 2001.

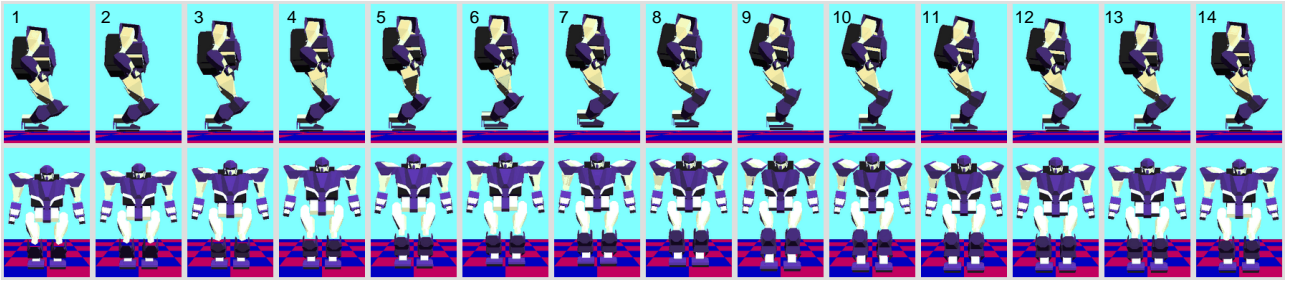


Fig.5 A hopping-forward motion by a miniature humanoid robot

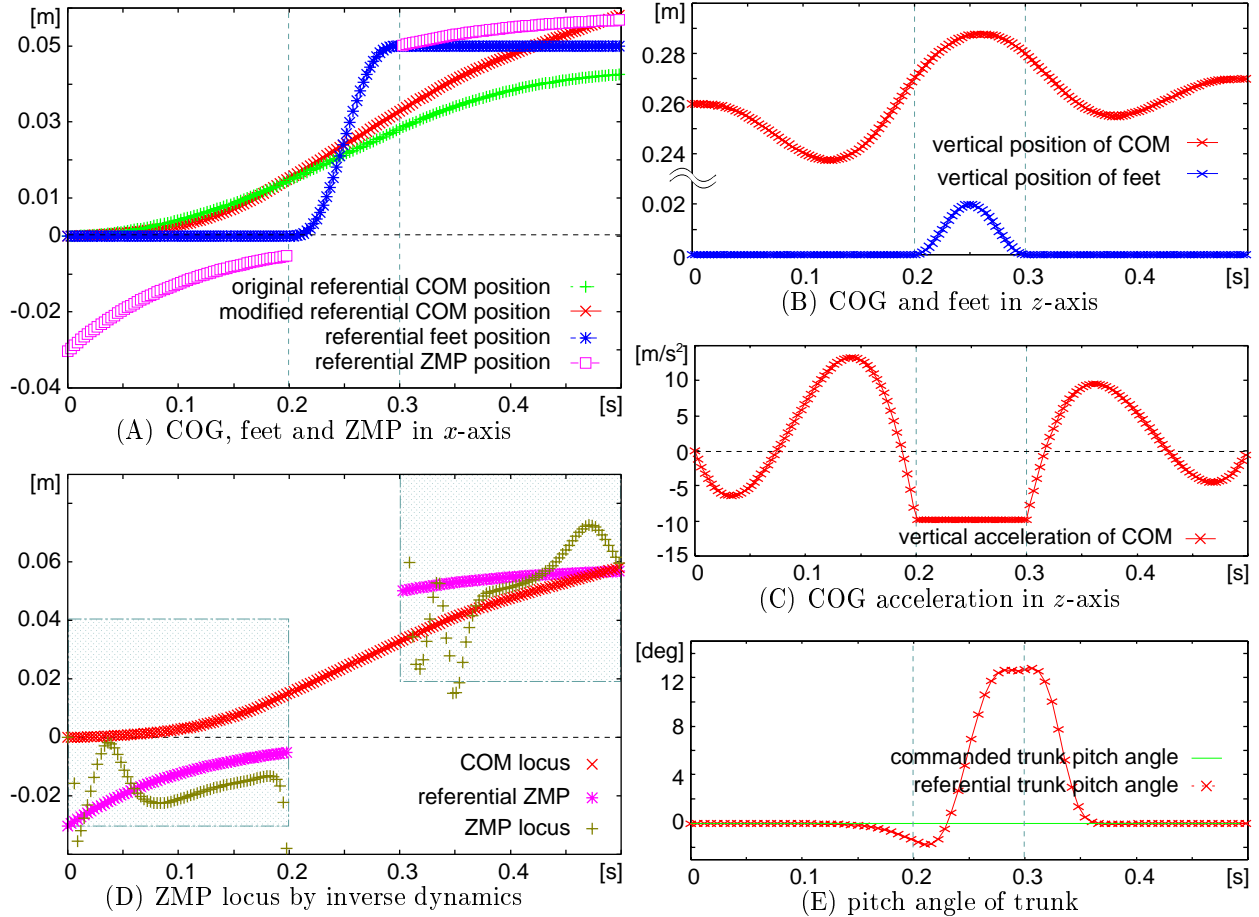


Fig.6 Planned trajectory of COG, foot and ZMP

- [7] 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.
- [8] Ken'ichiro Nagasaka, Yoshihiro Kuroki, Shin'ya Suzuki, Yoshihiro Itoh, and Jin'ichi Yamaguchi. Integrated Motion Control for Walking, Jumping and Running on a Small Bipedal Entertainment Robot. In *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3189–3914, 2004.
- [9] Tomomichi Sugihara and Yoshihiko Nakamura. Contact Phase Invariant Control for Humanoid Robot based on Variable Impedant Inverted

- Pendulum Model. In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 51–56, 2003.
- [10] 山本江, 杉原知道, 中村仁彦. 厳しい時間拘束下で多様に接地状態を変化させるヒューマノイドロボットの脚動作計画. 第12回日本IFTToMM会議シンポジウム前刷集, pp. 43–46, 2006.
- [11] 中村仁彦, 花房秀郎. 関節型ロボットアームの特異点低感度運動分解. 計測自動制御学会論文集, Vol. 20, No. 5, pp. 453–459, 1984.
- [12] M. Vukobratović and J. Stepanenko. On the Stability of Anthropomorphic Systems. *Mathematical Biosciences*, Vol. 15, No. 1, pp. 1–37, 1972.