

可変インピーダンス脚倒立振子に基づくヒューマノイドの
接触状態非依存型コントローラ的设计

○学 杉原知道 (東大) 正 中村仁彦 (東大,CREST)

Contact Phase Invariant Controller Design for Humanoid Robot
based on Inverted Pendulum Model with Variable Impedance Leg

*Tomomichi SUGIHARA (Univ.of Tokyo), Yoshihiko NAKAMURA (Unif.of Tokyo,CREST)

Abstract— Manipulation of external forces is the key to enhance the humanoid mobility. We propose a new controlling method based on the control of inverted pendulum with variable impedance to realize the scheme. Using the proposed, various types of legged motions, including motions on the ground and in the air, are achieved.

Key Words: Humanoid, Contact phase invariant control, Inverted pendulum with variable impedance leg

1. はじめに

ヒューマノイドは、内力 (関節トルク) を環境に作用させ、その反作用として得られる外力によって自らを駆動する系である。従って、環境との接触状態及び外力を巧みに操作することが、潜在的な高機動性を引き出すための鍵となる。とりわけ、実環境における予測不可能な状況に対応するために不可欠な接地/無接地状態の随意的な遷移運動 (跳躍など) は、そのような外力操作によって初めて可能になると言える。

無接地状態を経由する代表的な動作である跳躍や走行の実現に関しては、これまでに幾つか研究がなされている^{1) 2) 3) 4) 5)}が、

1. ヒューマノイドが多自由度を有する複雑な系であることを考慮し、十分な現実性と汎用性を有した制御方法が必要である
2. 非ホロミックな拘束条件に支配されるため、運動の計画と制御を分離することは本質的に不可能である
3. 計画的な跳躍のみならず、転倒を防ぐ等の目的から即座に離床・着床を行えなくてはならない
4. ダイナミックな動作の実現のためには制御周期が十分に短くなくてはならず、小さい計算負荷での実装が求められる

等の問題を全て解決する有効な制御法が提案されたとはいえない。

筆者らはこれまでに、ヒューマノイドのダイナミクスが ZMP⁶⁾ を支持点と見なした倒立振子のそれと類似していることに着目し、ZMP の間接操作による全身運動の実時間制御法を提案してきた。また同手法を用い、接地状態が維持される動作において、操縦者からの指令への迅速な応答、運動中に受けた衝撃の吸収、定常的な歩行運動等を実現した⁷⁾。本稿ではこれを拡張し、脚に可変インピーダンスを有する倒立振子モデルを導入することによって、接地/無接地状態のシームレスな遷移が比較的容易になることを示す。また導入したモデルに基づいて設計した、ヒューマノイドの全身運動コントローラを提案する。

2. 可変インピーダンス脚倒立振子モデル

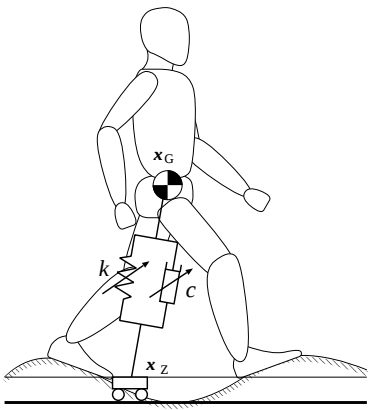


Fig.1 Legged system and inverted pendulum with variable impedance

ヒューマノイドは多リンクから成る分布質量系であるが、重心に質量が集中したモデルで近似することによって、次のような運動方程式を導くことができる。

$$\ddot{x}_G = \omega_G^2 (x_G - x_Z) \tag{1}$$

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

$$\ddot{z}_G = \frac{f_z}{m} - g \tag{3}$$

ただし鉛直方向を z 軸にとり、 $\mathbf{x}_G = [x_G \ y_G \ z_G]^T$ 及び $\mathbf{x}_Z = [x_Z \ y_Z \ z_Z]^T$ はそれぞれ重心位置及び ZMP、 f_z は垂直床反力、 m はロボットの全質量、 g は重力加速度である。また、 ω_G は次のように定義される。

$$\omega_G^2 = \frac{f_z}{m(z_G - z_Z)} \tag{4}$$

これらより、ZMP $\mathbf{x}_Z$ 及び垂直床反力を操作することで重心を制御できることが分かる。特に重心の水平方向運動に関する式 (1)(2) は、系が ZMP を支持点とした倒立振子と似たダイナミクスを有することを示唆している。従って、操作量としての ZMP の決定には倒立振子

の制御法 (PID 制御, H_∞ 制御等) を応用することが可能である。

一方, 重心の鉛直方向運動に関する式 (3) においては $f_z \geq 0$ (特に $f_z = 0$ のときは無接地状態であることを意味する) であり, 接地/無接地状態のシームレスな遷移に要求される離床のための加速, 及び着床時に発生する衝撃力吸収等には, この垂直床反力 f_z の操作が大きな役割を果たす。このような重心加速や衝撃吸収を統一的に実現するために, 本研究では図 1 に示すような可変インピーダンス脚倒立振子モデルに基づく制御法を提案する。このとき, $^{ref}f_z$ は次式より決定される。

$$^{ref}f_z = K_{Pz}({}^{ref}z_G - z_G) + K_{Dz}({}^{ref}\dot{z}_G - \dot{z}_G) \quad (5)$$

ただし $^{ref}z_G$ は重心高さの参照値であり, 後述するように, 運動の内容によって意味が変わる。 K_{Pz}, K_{Dz} は図 2 に示すように, 接触状態と運動内容によって適切な値を設定する必要がある。具体的には次のような指針に

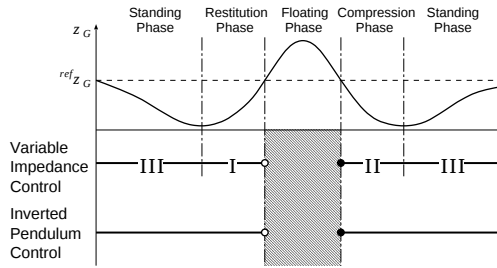


Fig.2 Contact phase, impedance and inverted pendulum control

基づいて決定する (図 2 中の I, II, III に対応する)。

I) 離床のための抗重力インピーダンス

離床時は, 重力に抗するために十分な加速を得ることが要求されるため,

$$K_{Dz} = 0 \quad (6)$$

$$K_{Pz} = \frac{2mgz_H}{z_d^2} \quad (7)$$

とする。ただし z_d は予定屈み込み量, z_H は目標跳躍高さである。このとき, $z_G = {}^{ref}z_G - \frac{mg}{K_{Pz}}$ にて離床することが期待される。

II) 着床のための衝撃吸収インピーダンス

着床の瞬間に受ける衝撃力を低減するために

$$K_{Dz} = 0 \quad (8)$$

$$K_{Pz} = \frac{m\dot{z}_{G-}^2}{z_p^2} \quad (9)$$

とする。このとき $^{ref}z_G$ は着床の瞬間における重心の高さであり, $\dot{z}_{G-}$ は衝突直前の重心落下速度, z_p は着床後の予定屈み込み量である。

III) 立位維持のためのインピーダンス

次式を満たす範囲で K_{Pz}, K_{Dz} を決定することで, オーバershootさせずに重心を一定高さ $z_G = {}^{ref}z_G - mg/K_{Pz}$ に収束させることができる。

$$K_{Pz} > 0, \quad K_{Dz} > 0, \quad K_{Dz}^2 - 4K_{Pz} > 0 \quad (10)$$

ただし, 接地を維持するためには $^{ref}f_z \leq 0$ でなくてはならず, 適切な下限値 $^{ref}f_{z,min} (> 0)$ を設ける必要がある。

3. 接地/無接地型運動の統一的制御

3.1 接地状態における ZMP, 垂直床反力の間接操作

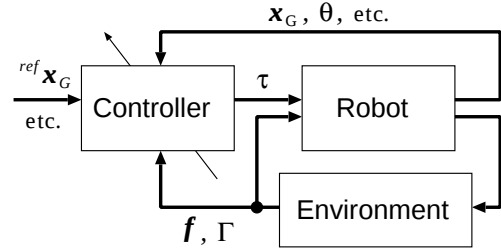


Fig.3 Humanoid control system connected with environment

ロボットが接地状態にある時には, 前節で決定した操作量としての ZMP 及び垂直床反力を実現することで重心を制御できるが, これら ZMP, 床反力を直接操作することは不可能である。そこで, 以下に述べるアルゴリズムに従って, これらに所望の操作量を間接的に与えるのと等価な内力を求める。

I) 厳密目標重心速度の決定

式 (1)(2)(3) より, 重心に次のような加速度を瞬間的に発生させることで間接的に ZMP, 垂直床反力を操作することが可能になる。

$$^{ref}\ddot{x}_G = {}^{ref}\omega_G^2(x_G - {}^{ref}x_Z) \quad (11)$$

$$^{ref}\ddot{y}_G = {}^{ref}\omega_G^2(y_G - {}^{ref}y_Z) \quad (12)$$

$$^{ref}\ddot{z}_G = \frac{{}^{ref}f_z}{m} - g \quad (13)$$

ただし $^{ref}\omega_G$ は次のように定義される。

$$^{ref}\omega_G^2 = \frac{{}^{ref}f_z}{m(z_G - {}^{ref}z_Z)} \quad (14)$$

上記のような加速度を瞬間的に重心に与えるために必要な内力を厳密に求めることは大きな計算量を要し, 十分に短い周期で行われなければならない迅速な運動の制御のためには実用上問題がある。そこでこれを積分し, 瞬間的な重心の目標速度 (厳密目標重心速度) $^{ref}\dot{x}_G$ を得る。このようにすることで, 実用上支障がない程度に精度を保ったまま, 計算量を大幅に低減することが可能となる。

II) 厳密目標重心速度を実現する全身関節角速度

$^{ref}\dot{x}_G$ と等価な全関節角 θ の目標速度 $^{ref}\dot{\theta}$ を求める。

重心 x_G は全身関節角ベクトル θ の関数であり, 次のような重心 Jacobian J_G が存在する。

$$\dot{x}_G = \frac{\partial x_G}{\partial \theta} \dot{\theta} \equiv J_G \dot{\theta} \quad (15)$$

J_G は次のように求められる。

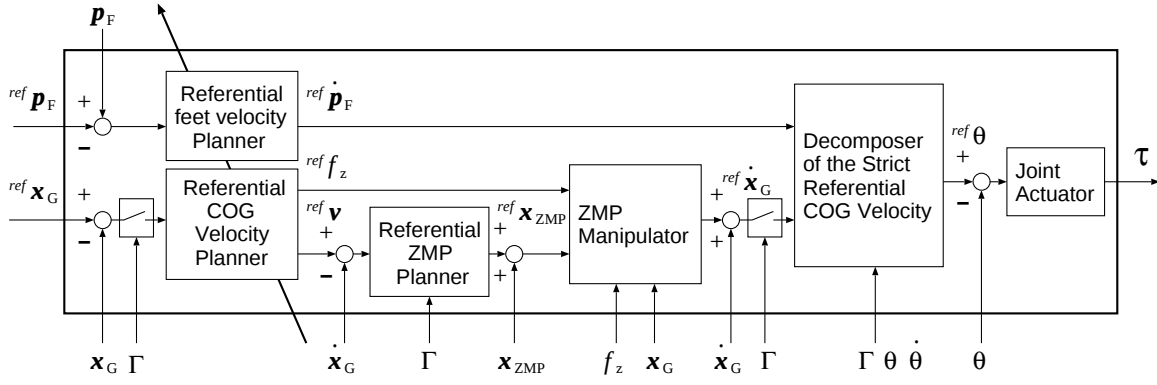


Fig.4 Block diagram of a humanoid controller

まず, 基底に対する相対重心速度 ${}^0\dot{x}_G$ について

$${}^0\dot{x}_G = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} m_i {}^0\dot{r}_i}{\sum_{i=0}^{n-1} m_i} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} m_i {}^0J_{Gi} \dot{\theta}}{\sum_{i=0}^{n-1} m_i} \quad (16)$$

ただし n は全リンク数, m_i はリンク i の質量, 0r_i は基底から見たリンク i の重心位置ベクトル, J_G は, リンク i 重心の基底に対する Jacobian である. 故に, ${}^0\dot{x}_G$ の $\dot{\theta}$ に対する Jacobian 0J_G は

$${}^0J_G = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} m_i {}^0J_{Gi}}{\sum_{i=0}^{n-1} m_i} \quad (17)$$

次に, リンク F が絶対座標系に対して静止していることが既知ならば,

$$\begin{aligned} \dot{x}_G &= \dot{x}_0 + \omega_0 \times R_0 {}^0x_G + R_0 {}^0\dot{x}_G \\ &= R_0 \{ \dot{x}_G - {}^0\dot{p}_F + ({}^0x_G - {}^0p_F) \times {}^0\omega_F \} \\ &= R_0 \{ {}^0J_G - {}^0J_F + [({}^0x_G - {}^0p_F) \times] {}^0J_{\omega F} \} \dot{\theta} \end{aligned} \quad (18)$$

ただし, x_0, R_0, ω_0 はそれぞれ基底リンクの原点位置, 姿勢行列, 角速度, ${}^0p_F, {}^0\omega_F$ はそれぞれリンク F の基底から見た原点位置, 角速度であり, また ${}^0J_F, {}^0J_{\omega F}$ は次式を満たす, 基底に対するリンク F の運動に関する Jacobian である.

$${}^0J_F \dot{\theta} = {}^0\dot{p}_F \quad (19)$$

$${}^0J_{\omega F} \dot{\theta} = {}^0\dot{\omega}_F \quad (20)$$

故に, $\dot{x}_G$ の $\dot{\theta}$ に対する Jacobian J_G は次式より求まる.

$$J_G = R_0 \{ {}^0J_G - {}^0J_F + [({}^0x_G - {}^0p_F) \times] {}^0J_{\omega F} \} \quad (21)$$

この J_G によって, 目標関節角速度 ${}^{ref}\dot{\theta}$ の満たすべき方程式が次のように表される.

$$J_G {}^{ref}\dot{\theta} = {}^{ref}\dot{x}_G \quad (22)$$

III) 全身動作に課せられる拘束条件の全関節への分解
式 (22) は, ${}^{ref}\dot{x}_G$ を実現するために動作に課せられる拘束条件の一つとなっている. この他にも, ある動作を遂行する際には, 手先や足先の動作等に関する拘束条件が次式のように課せられる.

$$J_C {}^{ref}\dot{\theta} = c \quad (23)$$

式 (22)(23) を連立すれば, 関節角速度の満たすべき式が得られる. これを重み付き一般化逆行列を用いて解くことで, 重心制御に関するものも含め, 動作に課せられた拘束条件を全関節角の目標速度 ${}^{ref}\dot{\theta}$ に分解できる.

IV) 関節トルクの算出

${}^{ref}\dot{\theta}$ に追従するように, 各関節毎にローカルなフィードバック制御を行い, 関節トルクを決定する. これを各アクチュエータに発生させ, その結果としてロボットの全身動作が生成される.

3.2 無接地状態における姿勢制御

ロボットが無接地状態にあるときには, 重心は運動量保存則によって運動が決まり, 制御することは不可能である. そこでこのときは, 基底に対する相対的な姿勢のみを制御する. この場合全身関節の動作は, 式 (23) と同じ重心を除くロボットの身体の各部位の相対的な運動に関する拘束条件により表現される. よってこの拘束条件を全関節に分解し, 接地状態における場合と同様, 各関節毎に適切な関節トルクを決定することができる.

3.3 接地/無接地状態の統一的制御

環境との相互作用が駆動源となるヒューマノイドにおいては, ロボットの内部状態を表す様々な情報と共に環境とのインタラクション情報もフィードバックするようなコントローラを設計しなければならない. 図 3 はそのようなコントローラを包含したシステム全体のブロック線図を示している.

また図 4 は, 図 3 におけるコントローラ部の詳細を説明したものである. 図中, p_F は環境と接触する部位の位置及び姿勢であり, 接地状態においては絶対座標系における制御が可能である. 無接地状態においては基底座標系に対する相対的な位置姿勢の制御のみ有効となる.

Γ は接地状態 (接地/無接地) を示すインジケータであり, これによって重心制御の有効化・無効化が切り換えられる. Γ によって系が無接地状態にあると判断された場合には, 重心速度を厳密目標速度と一致させるための拘束条件 (22) を無効にする. 拘束条件の種類が変化するだけで, これを全身関節の動作に分解する方法は接地状態に全く依存しない. このため提案するコントローラは, 接地状態における運動及び無接地状態における運動をシームレスに扱うことが可能である.

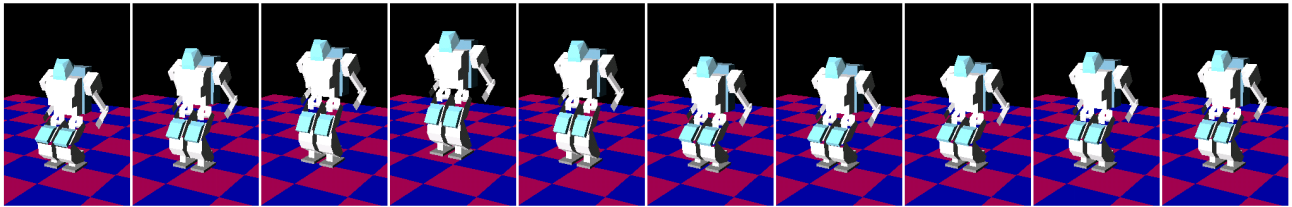


Fig.5 Snapshot of jump motion simulation

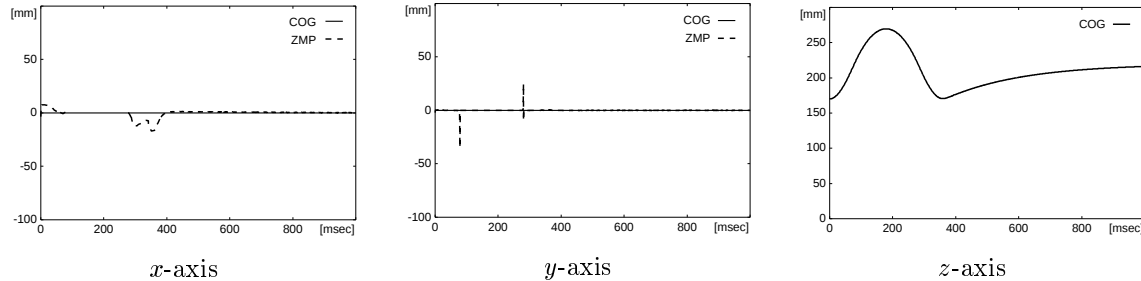


Fig.6 Loci of COG and ZMP in each axis

4. 跳躍動作シミュレーション

提案した手法を用いて、垂直跳躍動作制御をシミュレーション上にて行った。ロボットモデルとしては HOAP-1⁸⁾ を想定し、シミュレーションには Z-DYNAFORM を用いた⁹⁾。離床、着床は、予定沈み込み量、目標離床高さ、目標最大跳躍高さをそれぞれ 50[mm], 220[mm], 50[mm] とし、跳躍後は重心が一定高さ 220[mm] に収束するように、各フェイズにおいてインピーダンスを決定した。図 5 は検証した動作制御例をアニメーションにて確認したときのスナップショットである。また図 6 は、重心及び ZMP の軌跡である。接地期間に倒立振子制御及びインピーダンス制御が適切に機能し、安定な跳躍動作が実現できていることが分かる。

5. おわりに

文献⁷⁾の方法を拡張し、可変インピーダンス脚を有する倒立振子モデルに基づいたヒューマノイドの運動制御法を提案した。この方法の持つ利点として次のような事柄が挙げられる。

- インピーダンスを適切に設定することにより離床、着床、立位維持等が容易に実現できる
- ヒューマノイドの運動制御にとって重要な ZMP 及び外力の操作を比較的小さい計算量で、かつ実用上支障のない精度で行える
- 接地/無接地状態をシームレスに扱うことができる

またシミュレーションにてその有効性を確認した。

なお、本研究は科学事業振興事業団戦略的基礎研究推進事業 (CREST) 領域「脳を創る」の補助を受けた。

参考文献

- 1) Marc H. Raibert. *Legged Robots That Balance*. MIT Press, 1986.
- 2) 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.

- 3) 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 会日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1155–1156, 2001.
- 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, IIC-99-22, 1999.
- 5) 池田貴幸, 巢瀬浩一, 岩谷靖, 美多勉. 脚式ロボットの開発と走行制御. ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演予稿, 1999.
- 6) Miomir Vukobratović, B. Borovac, D. Surla, D. Stokić. *Biped Locomotion: Dynamics, Stability, Control and Application*, Vol. 7 of *Scientific Fundamentals of Robotics*. Springer-Verlag, 1990.
- 7) 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.
- 8) 村瀬有一, 安川裕介, 境克司, 植木美和. 研究用小型ヒューマノイドの設計. 第 19 会日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 789–790, 2001.
- 9) 杉原知道, 西脇光一, 稲葉雅幸, 井上博允. 汎用多リンク系動力学演算ライブラリ「Z-DYNAFORM」の開発. 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1139–1140, 2000.