

可変インピーダンス脚モデルによるヒューマノイドの即応的な脚運動制御

Responsive Legged Motion Control for Humanoid Robot via Variable Impedant Leg Model

○ 学 杉原知道 (東大) 正 中村仁彦 (東大)

*Tomomichi SUGIHARA, Yoshihiko NAKAMURA.

Univ. of Tokyo. 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

Responsive legged motion and skillful footwork is achieved on humanoid robots via Variable Impedant Leg model control. Positive manipulation of the reaction force which acts on each sole is encouraged by proper modification of impedance, and is realized through the whole-body cooperation. The result of simulation shows the validity of proposed.

Key Words: Humanoid Robot, Responsive Legged Motion, Variable Impedant Leg Control

1. はじめに

ダイナミックに変化する実環境の中でヒューマノイドロボットが柔軟に振舞うために求められる、敏捷かつ即応的なフットワークは、環境との積極的な相互作用、接触状態の能動的な操作の上に成り立つ。これは制御の問題としては難解なもので、例えば単純な片足昇降動作でさえ、一連の運動の間に重心や外力作用点の動き、環境との接触状態等が巧みに連携し合っ初めて実現される。脚運動制御の分野において、このような脚の接地状態の切り替え、特に脚を環境から離すフェイズに焦点を当てた研究例は比較的少ない。GA によって予め作成された基本運動パターンの混成により任意の方向への踏み出し動作を実現した研究もあるが¹⁾、実際のタスク遂行時に要求されるような俊敏性、即応性を期待するのは難しい。

しかし一方で人間は、このような複雑な手続きを容易に遂行する。重心の運動や接触点における力の作用等のコンビネーションが、比較的シンプルな原理に基づいて実現されていると考えられる。本稿では、このような制御メカニズムを実装することを目的とし、可変インピーダンス脚制御法を提案する。着床時の衝撃吸収のためにインピーダンス制御を適用した研究例は幾つか報告されているが²⁾³⁾、本研究ではそれにとどまらず、敏捷な脚運動を創出する機構としての性質に特に着目する。

2. 可変インピーダンス脚制御法

2.1 伸縮脚モデル

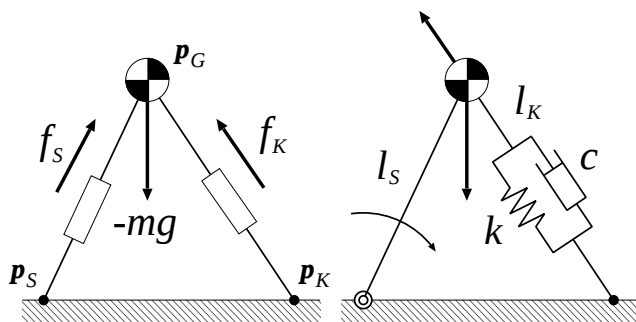


Fig.1 Telescopic impedance leg model

二脚運動系を Fig.1 の左に示すような伸縮脚によってモデル化する。このとき、以下の仮定をおく。

1. 質量は重心 p_G に集中 (脚質量は 0)
2. 各脚は軸方向に並進力のみ発生可能
3. 各脚と地面は一点で接地
4. 離床している脚は自由に位置制御可能

便宜上、二つの脚を支持脚 S と蹴脚 K に区別し、各々の脚に発生する力 (スカラ) を f_S, f_K 、接地点を p_S, p_K とそれぞれおく。

2.2 インピーダンス設計

f_K, f_S が任意に操作できるならば、これらを次式 (1) 及び (2) に従って決定することで、Fig.1 の右に示すような、バネ・ダンパを持つ蹴脚で地面と接触し、回転関節によって支持脚が床に結合された 1 リンク機構と等価なダイナミクスを付与することが可能である。

$$f_K = \begin{cases} k^{(ref)} l_K - l_K + c^{(ref)} \dot{l}_K - \dot{l}_K & (l_K < {}^{ref}l_K) \\ 0 & (l_K \geq {}^{ref}l_K) \end{cases} \quad (1)$$

$$f_S = (mg - f_K d_K) \cdot d_S \quad (2)$$

ただし、

$$l_K = \|p_G - p_K\| \quad (3)$$

$$d_K = (p_G - p_K) / l_K \quad (4)$$

$$d_S = \frac{p_G - p_S}{\|p_G - p_S\|} \quad (5)$$

である。また ${}^{ref}l_K$ は仮想的な蹴脚自然長で、任意に設定できる。 k 及び c は以下に従って決定する。

I) 蹴脚離床のための抗重力インピーダンス

最大屈み時 (蹴脚長 ${}^{min}l_K$) から蹴り動作によって重心高さを h 増加させる。このためには、

$$c = 0, \quad k = \frac{2mgh}{({}^{ref}l_K - {}^{min}l_K)^2} \quad (6)$$

とすれば良い。このとき蹴脚は、 $l_K = {}^{ref}l_K$ にて離床すると期待される。また $h > l_S - {}^{min}h$ (l_S は支持脚長、 ${}^{min}h$ は最大屈み時重心高さ) の場合は、重心は次の速さ v を以て直立平衡点を通過する。

$$v = \sqrt{2g(h - l_S + {}^{min}h)} \quad (7)$$

II) 遊脚着床のための衝撃吸収インピーダンス

遊脚着床の瞬間に受ける衝撃力を低減するために

$$c = 0, \quad k = \frac{m\dot{v}_-^2}{({}^{ref}l_K - {}^{min}l_K)^2} \quad (8)$$

とする。ただし着床の瞬間における遊脚長を ${}^{ref}l_K$ とし、 $\dot{v}_-$ は着床直前の重心速さ、 ${}^{min}l_K$ は最大屈み時の蹴脚長である。

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, c を決定すれば、重心位置は収束する。

$$k > 0, \quad c > 0, \quad c^2 - 4k > 0 \quad (9)$$

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

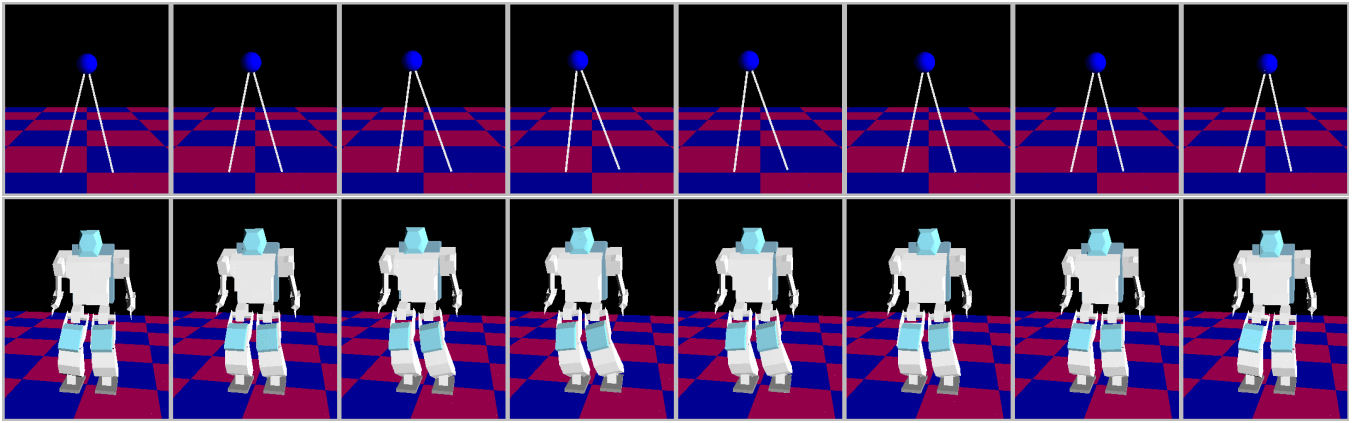


Fig.2 Snapshots of a stepping motion realized by Variable Impedant Leg model control

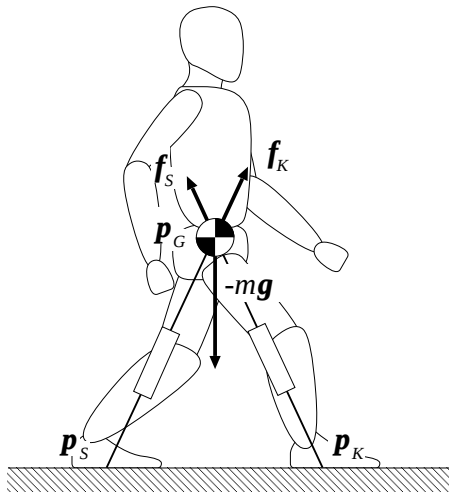


Fig.3 Variable Impedant Leg model

3. 重心速度制御による近似的脚力制御

前節にて提案した制御法を、ヒューマノイドロボットに適用する。ヒューマノイドロボットは多数のリンクから成る分布質量系であり、各々の脚に働く力を精度良く操作するのは一般的には困難である。ここでは次のような方法により、間接的にこれら进行操作を試みる。

各脚に生じさせる f_K, f_S 力及び重力から、重心に加えるべき加速度の目標値 ${}^{ref}\ddot{p}_G$ が次式のように求まる。

$${}^{ref}\ddot{p}_G = \frac{f_K + f_S}{m} - g \quad (10)$$

これを積分し、目標重心速度とする。また、接地状態に応じて蹴脚（離床時は遊脚）足先の目標速度を決定する。文献⁴⁾の方法を用いれば、これらを満たすような全身の運動を求めることができる。

両足が面接地している場合には、厳密にはこれは不静定問題となり、重心加速度が ${}^{ref}\ddot{p}_G$ となったとしても、各々の足に働く外力作用点は計画された p_S, p_K と必ずしも一致しない。次節にて示されるシミュレーションにおいてはこのことは大きな問題とはならなかったが、今後、ロバスト力制御系⁵⁾を設計する等によって改善する必要がある。

4. シミュレーション

提案した手法を用い、片足昇降運動をシミュレーション上にて行った。ヒューマノイドロボットモデルとしては HOAP-1⁶⁾を

想定し、シミュレーションには Z-DYNAFORM⁷⁾を用いた。右脚を支持脚、左脚を蹴脚とし、まず初期姿勢（両足中心点の左右間隔 10cm、重心高さ 20cm）における足-重心距離+2cm を仮想的な左脚の自然長としたところ、直ちに蹴り動作が発現し、左足が離床した。また再び左足が着床した後、屈み込み動作が完了した時点でダンピング係数を調節し、一定位置に重心を収束させた。以上において、支持脚力を式 (2) のみで決定すると、積分誤差の影響によりドリフトが生じるので、脚長を一定に保つようなインピーダンス制御も併用した。

Fig.2 は、上記の運動制御を無質量脚モデル及び HOAP-1 モデルに適用した結果を、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。

5. おわりに

即応的な脚運動を比較的容易に実現するための方法として、可変インピーダンス脚制御法を提案した。また同方法により、インピーダンス及び仮想的な脚の自然長の適切な変更のみで、環境との接触状態を操作できることを、シミュレーションによって示した。

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) 西脇, 北川, 杉原, 長阪, 稲葉, 井上. ダイナミックヒューマノイド「H5」における視覚運動型踏み出し動作の実現. ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演会論文集, pp. 2P1-78-111, 1999.
- 2) Setiawan, 圓戸, 稗田, 長坂, 森, 林, 高西, 藤江. 2 足ヒューマノイドロボットのリアルタイム歩行安定化制御-HRP における歩行制御モジュールの有効性の検証-. 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1467-1468, 2000.
- 3) 空尾, 村上, 大西. インピーダンス制御による 2 足歩行ロボットの歩行制御. 電学論 D, Vol. 117, No. 10, pp. 1227-1233, 1997.
- 4) 杉原, 井上. 倒立振子に基いた ZMP 操作によるヒューマノイドの実時間動作生成. 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2001.
- 5) Y.Fujimoto, S.Obata, and A.Kawamura. Robust Biped Walking with Active Interaction Control between Foot and Ground. In *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 2030-2035, 1998.
- 6) 村瀬, 安川, 境, 植木. 研究用小型ヒューマノイドの設計. 第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 789-790, 2001.
- 7) 杉原, 西脇, 稲葉, 井上. 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.