重心 Jacobian を用いたヒューマノイドの全身協調バランス制御

Whole-body Cooperative Balancing of Humanoid Robot using COG Jacobian

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

This paper proposes the whole-body cooperative balancing method for humanoid robots with a little modification of a pre-designed motion trajectory, using COG Jacobian. The method has an advantage that allows robot to distribute loads to all joints with arbitrary weights. The validity of the method is shown with a simulation.

Key Words: Humanoid Robot, Motion Control, Whole-body Cooperative Motion, COG Jacobian

1. はじめに

予め用意した軌道を再現することによるヒューマノイドの全 身動作生成法は、多自由度を有するが故に生じる幾何学的・力学 的な問題の難しさを回避でき、比較的容易に動作を設計出来る という利点がある.しかし実ロボットにおいては、環境やロボッ ト自身のモデル化誤差等の様々な外乱が生じ、バランスを崩す 原因となるため、何らかの方法によってこれを吸収することが 要求される.

計画された軌道が幾何学的にも力学的にも妥当であり,かつ 外乱がそれほど大きくなければ,元々の計画軌道に微小な修正 を加えることによってバランス維持が可能であることが期待さ れる.このような考え方に基づく研究はこれまでに数例報告さ れている¹⁾²⁾³⁾が,計算量が多い,適用可能な動作が限定され ている,特定の関節に負荷が集中するなどの問題があった.

本研究では重心 Jacobian⁴⁾ を用いて全身の関節を協調させる ことによって、特定の関節に負荷を集中させることなく外乱を 吸収しバランスを維持出来るような、計画軌道の実時間補正方 法を提案する.

2. 全身協調バランス制御

脚動作においてバランス維持とは、予定外の力を受けたときに

- その力を吸収するために,動作を適切に変更する
- その力に抗して、計画された動作に頑健に追従する

という、相反する二つの機能の連動によって成されると考えられる.換言すれば、動作における幾何学的条件と力学的条件との間の整合性が損なわれたときに、前者に合わせて後者を、同時に後者に合わせて前者を相互に補正し、整合性を回復することで バランス維持が図られるわけである.

この相反する二つの制御を、人間を含む生体は、全身を協調 させて重心を巧みに操作することにより行っている.人間との 形態類似性と多自由度性を特徴とするヒューマノイドにおいて、 このような働きを実現することによって信頼性の高い全身運動 が可能になると考えられる.以下では、次の二つの問題に対して 解決法を与える.

i) バランスをとるために重心をどのように動かすか

ii) 所望の重心変位を得るために全身をどのように動かすか

2.1 バランス維持のための重心操作量決定

全身型ヒューマノイドの動作を全身関節角 θ ,重心 $x_G = [x_G \ y_G \ z_G]^T$, ZMP $x_Z = [x_Z \ y_Z \ z_Z]^T$, 垂直床反力 f_z の セットによって記述する.また,指令となるこれらのセットの時 系列軌道を,外乱のない条件の下で幾何学的条件と力学的条件 との整合性が保証されている(即ち,実ロボットが理想的な環境 の下で理想的に $^{cmd}\theta$ に追従するならば,実際の x_G, x_Z 及び f_z がそれぞれ $^{cmd}x_G, ^{cmd}x_Z$ 及び $^{cmd}f_z$ に完全に一致する)も

のとして与える.

提案する手法は、本節の最初に掲げたバランス維持のための 二つの要件を満たすような、 $^{cmd}\theta$ になるべく近い θ の目標値 $^{ref}\theta$ を算出するというものである. Fig.1 にその概要を示す.



Fig.1 A Block Diagram of the proposed balancing method with a realtime motion modification

各々の要件は次のようにして解決される.

I) 動作の適切な変更による予定外外力の吸収

水平方向に予定外の力を受けると、足底が床面から剥がれ転倒 する恐れが生じる.従って先ず、足底と床面との安定な接地状態 を維持することが、水平方向の外力吸収に繋がる.これは、接地 多角形内に設定された $^{cmd}x_Z$ に実 ZMP x_Z を追従させること で解決出来る.

ロボットの全質量を m とおくと, 水平面内における重心の運動方程式は近似的に次のように表される.

$$(z_G - z_Z)m\ddot{x}_G - (x_G - x_Z)f_z = 0$$
(1)

$$(z_G - z_Z)m\ddot{y}_G - (y_G - y_Z)f_z = 0$$
(2)

故に, x_Z を $^{cmd}x_Z$ に一致させたいならば,

$$\ddot{x}_G = \zeta_i (x_G - {}^{cmd} x_Z) \tag{3}$$

$$\ddot{y}_G = \zeta_i (y_G - {}^{cmd} y_Z) \tag{4}$$

(ただし $\zeta_i \equiv f_{z,i}/m(z_{G,i} - {}^{cmd}z_{Z,i})$) なる加速度を重心に与え れば良い. これを離散化すれば,

$$\Delta x_{G,i+1} = \Delta x_{G,i} + \zeta_i (x_{G,i} - {}^{cmd} x_{Z,i}) \Delta t^2 \tag{5}$$

$$\Delta y_{G,i+1} = \Delta y_{G,i} + \zeta_i (y_{G,i} - {}^{cma} y_{Z,i}) \Delta t^2 \tag{6}$$

を得る. ただし Δt は制御周期, $*_i$ は時刻 i における * の値を表し, $\Delta *_{i+1} \equiv *_{i+1} - *_i$ である.

水平方向の外力はこのような ZMP の間接操作によって吸収 できるが, 垂直床反力に関しては別に考慮する必要がある.特に 遊脚着床時に生じる衝撃力は, バランスを崩す大きな原因とな るため, これを適切に吸収することが望まれる. 重力加速度を g とすれば, 鉛直方向の重心の運動方程式は,

$$m(\ddot{z}_G + g) = f_z \tag{7}$$

と表される. 従って, f_z を $^{cmd}f_z$ に一致させたいならば,

$$\ddot{z}_G = {}^{cmd} f_z / m - g \tag{8}$$

なる加速度を重心に与えれば良い. これを離散化すれば,

$$\Delta z_{G,i+1} = \Delta z_{G,i} + (^{cmd}f_{z,i}/m - g)\Delta t^2 \tag{9}$$

を得る.

以上が,適切に動作を変更し予定外に受けた外力を柔軟に吸 収する,いわば力学的条件に合わせて幾何学的条件を補正する 方法である.

II) 予定外外力の影響を補償する計画動作への追従

I)は、計画動作を故意に崩すことで柔軟に予定外外力を吸収す る、短期的バランス維持と言える.動作遂行の目標が計画動作へ の追従であるならば、重心を本来あるべき位置へと収束させる 長期的バランス維持が必要である.この目的から、式(5)(6)(9) を変更し、次のように、目標重心位置からのずれを補償する項を 加える.

$$\Delta x_{G,i+1} = \Delta x_{G,i} + \zeta_i (x_{G,i} - {}^{cmd} x_{Z,i}) \Delta t^2 + K_{Ix} \Delta^{cmd} x_{G,i} + D_{Ix} \Delta \Delta^{cmd} x_{G,i}$$
(10)

$$\Delta y_{G,i+1} = \Delta y_{G,i} + \zeta_i (y_{G,i} - {}^{cmd} y_{Z,i}) \Delta t^2$$

$$+ K_{Iy}\Delta^{cma}y_{G,i} + D_{Iy}\Delta\Delta^{cma}y_{G,i} \qquad (11)$$
$$\Delta z_{G,i+1} = \Delta z_{G,i} + (^{cmd}f_{z,i}/m - g)\Delta t^2$$

$$+ K_{Iz} \Delta^{cmd} z_{G,i} + D_{Iz} \Delta \Delta^{cmd} z_{G,i} \qquad (12)$$

ただし $\Delta^{cmd} *_{G,i} \equiv {}^{cmd} *_{G,i} - *_{G,i}$, $\Delta \Delta^{cmd} *_{G,i} \equiv \Delta^{cmd} *_{G,i}$ $-\Delta^{cmd} *_{G,i-1}$ であり, また K_{I*} , D_{I*} は, 重心の目標位置から の誤差を各々の成分に関して補償するための比例ゲイン及び差 分ゲインである (* には x, y, z が入る).

これは間接的に,目標姿勢に復帰するために ZMP 及び垂直床 反力を操作しているのと等価であり,幾何学的条件に合わせて 力学的条件を補正していると言える.

結局,式(10)(11)(12)によりバランスを維持するための重心 操作量が決定される.

2.2 重心操作のための全身動作決定

前項で決定した微小変位を重心に与えられるような θ の変位 $\Delta \theta_{i+1} \epsilon, \theta_{i+1} = \theta_i + \Delta \theta_{i+1}$ が^{*cmd*} θ_{i+1} になるべく近くなる ように決定する.これは、次のような等式制約条件付二次計画問 題を解くことで解決できる.

$$\frac{1}{2} (\Delta^{cmd} \boldsymbol{\theta}_{i+1} - \Delta \boldsymbol{\theta}_{i+1})^T \boldsymbol{W} (\Delta^{cmd} \boldsymbol{\theta}_{i+1} - \Delta \boldsymbol{\theta}_{i+1}) \to \min.$$
subject to $\boldsymbol{J}_{G,i} \Delta \boldsymbol{\theta}_{i+1} = \Delta \boldsymbol{x}_{G,i+1}, \ \boldsymbol{J}_{C,i} \Delta \boldsymbol{\theta}_{i+1} = \boldsymbol{c}_{i+1}$

$$\iff \boldsymbol{J}_{U,i} \Delta \boldsymbol{\theta}_{i+1} = \boldsymbol{u}_{i+1}$$
(13)

ただし $\Delta^{cmd} \theta_{i+1} \equiv {}^{cmd} \theta_{i+1} - \theta_i, W$ は重み行列, $J_{G,i}$ は時刻 *i*における重心 Jacobian, $J_{C,i} \Delta \theta_{i+1} = c_{i+1}$ は動作に課せられ る拘束条件をそれぞれ表す.また $J_{U,i}$ 及び u_{i+1} は、重心変位 に関する条件と拘束条件を一つにまとめたものである.

(13)の解は次式を解くことにより得られる.

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{W} & \boldsymbol{J}_{U,i}^T \\ \boldsymbol{J}_{U,i} & \boldsymbol{O} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Delta}\boldsymbol{\theta}_{i+1} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{W}\boldsymbol{\Delta}^{cmd}\boldsymbol{\theta}_{i+1} \\ \boldsymbol{u}_{i+1} \end{bmatrix}$$
(14)

ただし λ は $\Delta \theta_{i+1}$ の随伴ベクトルである.これを解けば、

$$\Delta \boldsymbol{\theta}_{i+1} = \Delta^{cmd} \boldsymbol{\theta}_{i+1} + \boldsymbol{W}^{-1} \boldsymbol{J}_{U,i}^{T} (\boldsymbol{J}_{U,i} \boldsymbol{W}^{-1} \boldsymbol{J}_{U,i}^{T})^{-1} (\boldsymbol{J}_{U,i} \Delta^{cmd} \boldsymbol{\theta}_{i+1} - \boldsymbol{u}_{i+1})$$
(15)

Wを適切に設定すれば、全身を効率良く協調させてバランスを 維持することが可能となる.



Fig.2 Snapshots of a Simulation of Balance Controlling



Fig.3 Loci of COG along x, y, z axes

提案した手法を、シミュレーションにより検証した. ロボッ トモデルには富士通製 HOAP-1⁵⁾を用い、シミュレーションは Z-DYNAFORM⁶⁾を用いて行った. Fig.2 は、両足立脚状態を 維持するように目標軌道を設定し、それを再現しつつ乱数的に 外乱を与えたときの応答の様子(動画)のスナップショットであ る. また Fig.2 は、そのときの重心の軌跡を各軸毎にプロットし たものである. 両腕を含めた全身を協調させて、外力を吸収しつ つ目標姿勢に収束している、つまり旨くバランスを維持出来て いることが分かる.

4. おわりに

指令動作軌道を補正し,幾何学的条件と力学的条件の整合性 を回復させることによって,実環境における外乱を吸収するバ ランス維持法を提案した.本手法は,全身を協調させて重心を操 作し,特定の自由度に負荷を集中させることなく外乱を吸収出 来るという利点を持つ.また,提案した手法が期待通りに機能す ることをシミュレーションによって確認した.今後は,高速な軌 道生成と組み合わせて多様な動作・行動を実現出来るシステム を構築していく予定である.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) 田宮幸春, 稲葉雅幸, 井上博允. 人間型ロボットの片足立脚動 作における全身を用いた実時間動バランス補償. 日本ロボッ ト学会誌, Vol. 17, No. 2, pp. 268–274, 1996.
- 2) 梶田秀司,横井一仁,金子健二,黄強,神徳徹男,荒井裕彦,小 谷内範穂,小森谷清,西郷宗玄,谷江和雄.高精度 zmp 制御 に基づくヒューマノイドロボットのバランス維持方式 (hrp 仮想プラットフォーム基本動作ライブラリ).第17回日本ロ ボット学会学術講演会予稿集,pp. 1215–1216, 1999.
- 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) 杉原知道,井上博允. 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) 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.
- 6) 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.