

# 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<sup>1) 2) 3)</sup>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 Jacobian<sup>4)</sup>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  $\theta$ 、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  $\theta$  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。

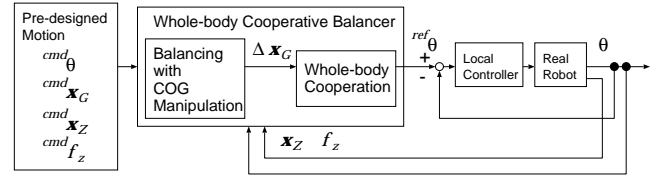


Fig.1 A Block Diagram of the proposed balancing method with a realtime motion modification

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。

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

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

故に、 $x_Z$  を  $^{cmd}x_Z$  に一致させたいならば、

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

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

(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、

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

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

を得る。ただし  $\Delta t$  は制御周期、 $*$  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、

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

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

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

なる加速度を重心に与えれば良い。これを離散化すれば、

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

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。

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

$$\Delta y_{G,i+1} = \Delta y_{G,i} + \zeta_i(y_{G,i} - ^{cmd}y_{Z,i})\Delta t^2 + K_{Iy}\Delta ^{cmd}y_{G,i} + D_{Iy}\Delta \Delta ^{cmd}y_{G,i} \quad (11)$$

$$\Delta z_{G,i+1} = \Delta z_{G,i} + (^{cmd}f_{z,i}/m - g)\Delta t^2 + K_{Iz}\Delta ^{cmd}z_{G,i} + D_{Iz}\Delta \Delta ^{cmd}z_{G,i} \quad (12)$$

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  $\theta$  の変位  $\Delta \theta_{i+1}$  を、 $\theta_{i+1} = \theta_i + \Delta \theta_{i+1}$  が  $^{cmd}\theta_{i+1}$  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。

$$\frac{1}{2}(\Delta ^{cmd}\theta_{i+1} - \Delta \theta_{i+1})^T W(\Delta ^{cmd}\theta_{i+1} - \Delta \theta_{i+1}) \rightarrow \min. \\ \text{subject to } J_{G,i}\Delta \theta_{i+1} = \Delta x_{G,i+1}, J_{C,i}\Delta \theta_{i+1} = c_{i+1} \\ \iff J_{U,i}\Delta \theta_{i+1} = u_{i+1} \quad (13)$$

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。

$$\begin{bmatrix} W & J_{U,i}^T \\ J_{U,i} & O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_{i+1} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W \Delta ^{cmd}\theta_{i+1} \\ u_{i+1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

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

$$\Delta \theta_{i+1} = \Delta ^{cmd}\theta_{i+1} + W^{-1}J_{U,i}^T(J_{U,i}W^{-1}J_{U,i}^T)^{-1}(J_{U,i}\Delta ^{cmd}\theta_{i+1} - u_{i+1}) \quad (15)$$

$W$  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。

## 3. シミュレーション

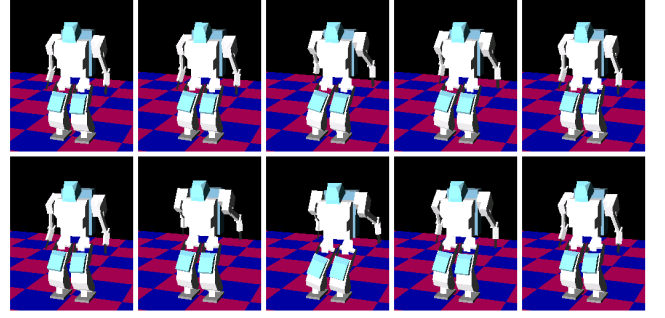


Fig.2 Snapshots of a Simulation of Balance Controlling

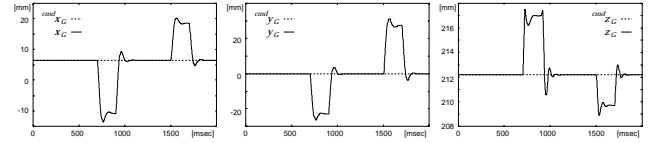


Fig.3 Loci of COG along  $x, y, z$  axes

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-1<sup>5)</sup> を用い、シミュレーションは Z-DYNAFORM<sup>6)</sup> 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ることで多様な動作・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 回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.