分解運動量制御：運動量と角運動量に基づく ヒューマノイドロボットの全身運動生成

梶 田 秀 司* 金 広 文 男* 金 子 健 二* 藤 原 清 司*
原 田 研 介* 横 井 一 仁* 比留川 博 久*

Resolved Momentum Control: Motion Generation of a Humanoid Robot based on the Linear and Angular Momenta

Shuuji Kajita*, Fumio Kanehiro*, Kenji Kaneko*, Kiyoshi Fujiwara*, Kensuke Harada*,
Kazuhito Yokoi* and Hirohisa Hirukawa*

We introduce a method to generate whole body motion of a humanoid robot such that the resulted total linear/angular momenta become specified values. First, we derive a linear equation which gives the total momentum of a robot from its physical parameters, the base link speed and the joint speeds. Constraints between the legs and the environment are also considered. The whole body motion is calculated from a given momentum reference by using a pseudoinverse of the inertia matrix. As examples, we generated kicking and walking motions and tested on an actual humanoid robot HRP-2. This method, the Resolved Momentum Control, gives us a unified framework to generate various maneuver of humanoid robots.

Key Words: Humanoid Robot, Biped Robot, Balance Control, Momentum Control

1. は じ め に

ヒューマノイドロボットの技術を実用に供するためには、人間と同様の様々な動作を効率よく生成する手法を確立することが重要である。2足歩行はその代表的な例であり多くの研究がなされてきた[1]~[4]。一方、歩行に限定することなくバランスを維持しつつ様々な運動や作業を実現させる手法の研究が近年活発化している。

Wooten と Hodgins は動力学シミュレーションに少数の基本制御要素を組み合わせることにより体操競技のような複雑でダイナミックな運動を生成できることを示した[5]。しかし、このような行動ベースに基づく手法では制御系がロボットのモデルを持っていないために、手先を定められた点へ正確に位置決めするなどの要求に応えることが難しい。

ロボットのモデルを適切に使った、最初の実用的なバランス動作生成法として田宮らの研究がある[6]。田宮らはバランス維持を支持足で発生するモーメントを一定範囲に保持しつつ、目標に近い姿勢を見出す最適化問題として定式化し、提案したアルゴリズムによりロボットを実時間でバランスさせることが可能なことを実証した。また Baerlocher と Boulic はヒューマノイ

ドロボットのような冗長多自由度系に対して、手先位置の目標位置への制御、障害物回避、バランス制御等の複数タスクを優先順位をつけて実現するために擬似逆行列を用いる手法を提案している[7]。長阪、稲葉、井上[8]や Yamane と Nakamura [9]は概略設計された動作パターンやキャプチャされた人間の運動データを各種の拘束条件や動力学の整合性を満足しヒューマノイドロボットで実現可能なものに変換する「動力学フィルタ」あるいは Dynamics Filter と呼ばれる手法を開発した。これらは実用的なヒューマノイドの全身動作生成法であるが、ベースとなる運動データが必要、オフライン計算を前提とするなどの若干の制約が存在する。

本論文ではヒューマノイドロボットの多様な運動を単純な枠組みで生成するためロボット全体の運動量に着目する。いかに複雑な構造を持つロボットであってもその全運動量ベクトル（並進成分と回転成分）はロボット全体の巨視的な挙動を与えている。そこで逆に全運動量を陽に与えることで所望のロボットの動作を指定できると考えられる。この計算は一見複雑に思われるが、全運動量はロボットの構造データによって定まる慣性行列と関節速度ベクトルとの積で与えられるから、指定された全運動量の値から必要な関節速度が逆算できる。得られた関節速度でロボットを駆動すればバランス維持、歩行等様々な運動を実現することができる。以上が本論文の基本となるアイデアである。

本論文の構成は以下のとおりである。第2章ではロボットの

原稿受付 2003年5月27日

*産業技術総合研究所

*National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

運動量に関する基礎的な方程式と、空間的な拘束の影響について考察する。これを用いて第3章で与えられた全運動量を実現する関節運動を計算する動作生成手法「分解運動量制御」を定式化する。第4章では分解運動量制御の実装に必要な絶対空間での慣性行列の再帰計算法について説明する。第5章では実際のヒューマノイドロボットを用いてキック動作と歩行動作の実験を行い、機能を評価する。第6章で本論文のまとめと今後の展望について述べる。

2. 運動量方程式

2.1 関節角速度と全運動量の関係

n 個の能動関節を持つヒューマノイドロボットを空間内 6 自由度を持つボディリンク（腰リンク）とこれに接続された開リンク機構でモデル化する（Fig. 1）。ボディに位置と姿勢が一致する座標系 Σ_B で表現されたボディの並進速度と角速度を $\mathbf{v}_B$, $\boldsymbol{\omega}_B$, ロボットの全関節速度を縦に並べた $n \times 1$ ベクトルを $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ とする。ロボット全体の並進運動量 $\mathbf{P}$ (3×1) と重心回りの角運動量 $\mathbf{L}$ (3×1) は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{m}\mathbf{E} & -\tilde{m}\hat{\mathbf{r}}_{B \rightarrow \tilde{c}} & \mathbf{M}_{\dot{\boldsymbol{\theta}}} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{I}} & \mathbf{H}_{\dot{\boldsymbol{\theta}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_B \\ \boldsymbol{\omega}_B \\ \dot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで $\tilde{m}$ はロボットの全質量、 $\mathbf{E}$ は 3×3 の単位行列、 $\hat{\mathbf{r}}_{B \rightarrow \tilde{c}}$ は腰リンクから全重心 $\tilde{c}$ への位置ベクトル (3×1)、 $\tilde{\mathbf{I}}$ は全重心回りの慣性行列 (3×3)、 $\mathbf{M}_{\dot{\boldsymbol{\theta}}}$, $\mathbf{H}_{\dot{\boldsymbol{\theta}}}$ は関節速度がそれぞれ並進運動量と角運動量に及ぼす効果を表す慣性行列である ($3 \times n$)。また、記号 $\hat{\cdot}$ は 3×1 のベクトルを外積と等価な 3×3 の歪対称行列に変換する操作を表す。式を簡単化し見通しをよくするため本論文における位置、速度、角速度ベクトルおよびそれに関連するヤコビアン等はすべて地面座標系 Σ_O で考える。座標軸はロボットの、前、左、上をそれぞれ x, y, z とする。

2.2 脚に関する拘束条件

式 (1) は $n+6$ 個の速度変数から運動量への変換式を与えるが、実際の歩行ロボットでは床面との相互作用によって系の自由度が減少する。今、両脚先端 Σ_{F_i} ($i = 1, 2$) の速度 $\mathbf{v}_{F_i}$, 角

Fig. 1 A model of humanoid robot

速度 $\boldsymbol{\omega}_{F_i}$ が与えられたとすると次式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{F_i} \\ \boldsymbol{\omega}_{F_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & -\hat{\mathbf{r}}_{B \rightarrow F_i} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_B \\ \boldsymbol{\omega}_B \end{bmatrix} + \mathbf{J}_{leg_i} \dot{\boldsymbol{\theta}}_{leg_i}, \quad (2)$$

$\mathbf{J}_{leg_i}$ は脚の構造と姿勢から定まるヤコビアン (6×6)、 $\mathbf{r}_{B \rightarrow F_i}$ はボディリンク原点から脚先端へ向かう位置ベクトル、 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_{leg_i}$ ($i = 1, 2$) はそれぞれの脚の関節速度ベクトル (6×1) である。式 (2) より脚が特異姿勢でなければ $\dot{\boldsymbol{\theta}}_{leg_i}$ は次式で与えられる。

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_{leg_i} = \mathbf{J}_{leg_i}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{F_i} \\ \boldsymbol{\omega}_{F_i} \end{bmatrix} - \mathbf{J}_{leg_i}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{E} & -\hat{\mathbf{r}}_{B \rightarrow F_i} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_B \\ \boldsymbol{\omega}_B \end{bmatrix}. \quad (3)$$

2.3 拘束条件を考慮した運動量方程式

拘束条件を付加した場合の運動量を計算するために、関節速度ベクトルを左右の脚に関する $\dot{\boldsymbol{\theta}}_{leg_1}$, $\dot{\boldsymbol{\theta}}_{leg_2}$ とそれ以外の部分 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_{free}$ に分解しよう。対応する慣性行列も同様に分割する。

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\theta}} &= [\dot{\boldsymbol{\theta}}_{leg_1}^T \quad \dot{\boldsymbol{\theta}}_{leg_2}^T \quad \dot{\boldsymbol{\theta}}_{free}^T]^T \\ \mathbf{M}_{\dot{\boldsymbol{\theta}}} &= [\mathbf{M}_{leg_1} \quad \mathbf{M}_{leg_2} \quad \mathbf{M}_{free}] \\ \mathbf{H}_{\dot{\boldsymbol{\theta}}} &= [\mathbf{H}_{leg_1} \quad \mathbf{H}_{leg_2} \quad \mathbf{H}_{free}] \end{aligned}$$

これらを用いて運動量方程式 (1) を書き直すと、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{m}\mathbf{E} & -\tilde{m}\hat{\mathbf{r}}_{B \rightarrow \tilde{c}} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{I}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_B \\ \boldsymbol{\omega}_B \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{leg_i} \\ \mathbf{H}_{leg_i} \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}}_{leg_i} + \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{free} \\ \mathbf{H}_{free} \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}}_{free}. \quad (4)$$

式 (3) を式 (4) に代入することで、拘束条件下の運動量方程式を得る。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{m}\mathbf{E} & -\tilde{m}\hat{\mathbf{r}}_{B \rightarrow \tilde{c}} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{I}} \end{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_B + \sum_{i=1}^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{leg_i} \\ \mathbf{H}_{leg_i} \end{bmatrix} \mathbf{J}_{leg_i}^{-1} \left(\boldsymbol{\xi}_{F_i} - \begin{bmatrix} \mathbf{E} & -\hat{\mathbf{r}}_{B \rightarrow F_i} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_B \right) + \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{free} \\ \mathbf{H}_{free} \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}}_{free}. \quad (5)$$

ここで速度、角速度ベクトルを以下のようにまとめた。

$$\boldsymbol{\xi}_B \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{v}_B \\ \boldsymbol{\omega}_B \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\xi}_{F_i} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{F_i} \\ \boldsymbol{\omega}_{F_i} \end{bmatrix}.$$

式 (5) を整理することにより、脚の拘束条件を考慮したロボットの速度と運動量の関係式が次のような簡潔な形で与えられる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_B^* & \mathbf{M}_{free} \\ \mathbf{H}_B^* & \mathbf{H}_{free} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_B \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_{free} \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{F_i}^* \\ \mathbf{H}_{F_i}^* \end{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_{F_i}, \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{M}_B^*, \mathbf{H}_B^*, \mathbf{M}_{F_i}^*, \mathbf{H}_{F_i}^*$ は拘束条件を考慮した慣性行列を表し、次式により与えられる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_B^* \\ \mathbf{H}_B^* \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \tilde{m}\mathbf{E} & -\tilde{m}\hat{\mathbf{r}}_{B \rightarrow \tilde{c}} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{I}} \end{bmatrix} - \sum_{i=1}^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{F_i}^* \\ \mathbf{H}_{F_i}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E} & -\hat{\mathbf{r}}_{B \rightarrow F_i} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{F_i}^* \\ \mathbf{H}_{F_i}^* \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{leg_i} \\ \mathbf{H}_{leg_i} \end{bmatrix} \mathbf{J}_{leg_i}^{-1}.$$

3. 分解運動量制御

3.1 目標運動量の設定

どのように複雑な構造を持つ多リンク機構であっても運動中の各瞬間において重心位置 $\tilde{c}$ 、全並進運動量 $\mathbf{P}$ 、全角運動量 $\mathbf{L}$ の各 x, y, z 成分、計 9 個の状態量を決定できる。

また、全並進運動量 $\mathbf{P}$ を全質量 $\tilde{m}$ で割ったものは重心の並進速度に一致することに注意しよう。

$$\frac{d}{dt}\tilde{c} = \frac{\mathbf{P}}{\tilde{m}} \quad (7)$$

すなわち、重心運動は並進運動量の積分値で与えられるから、結局 $\mathbf{P}, \mathbf{L}$ の 6 個の状態量を逐次与えていくことでロボットの大域的な運動を決定できることになる。

このようにロボットの全運動量を陽に指定し、これを満足するように関節を駆動する軌道生成/制御方式を「分解運動量制御 (Resolved Momentum Control)」と呼ぶことにする[†]。これは多リンク系であるヒューマノイドロボットを質量が等しく可変な慣性モーメントを持つ仮想的な一個の剛体とみなして制御することを意味する。両者の重心位置、重心速度、角運動量は原理的に完全に一致させることができるが、角運動量を与えた結果として得られる仮想的な剛体の姿勢を現実のロボットの姿勢に関連付けることはできない。例えば多リンク系の場合、角運動量が 0 であっても姿勢が変化するいわゆる「猫ひねり」のような動作が可能であるが、この現象は分解運動量制御のゼロ空間において生じるため、単一の剛体運動では表現することができない。

3.2 運動量の選択と擬似逆行列による制御

分解運動量制御は全運動量の目標値 $\mathbf{P}^{ref}, \mathbf{L}^{ref}$ と各脚先端の目標速度 $\xi_{F_i}^{ref}$ を与え、これを実現する腰速度と関節速度ベクトルを計算する軌道生成法である。ところが後で述べるように、運動量のすべての成分を実現しようとするとはロボットの挙動がむしろ不自然になる場合があるため (5.1 節)、制御したい運動量成分を次のような $l \times 6$ の選択行列 $\mathbf{S}$ で抽出する ($0 < l \leq 6$)。

$$\mathbf{S} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{s_1}^T \\ \vdots \\ \mathbf{e}_{s_l}^T \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$\mathbf{e}_{s_i}$ は全運動量ベクトルの第 s_i 成分に対応する要素を 1、それ

以外を 0 とした 6×1 の列ベクトルである。例えば並進運動量の x 成分と角運動量の y, z 成分を制御し、他の成分について関知しないのであれば、 $\mathbf{S} = [\mathbf{e}_1 \mathbf{e}_5 \mathbf{e}_6]^T$ のように設定する。

第 2 章で求めた運動量方程式 (6) の右辺第二項を左辺へ移項した後、左から $\mathbf{S}$ を乗じ、次式を得る。

$$\mathbf{y} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \xi_B \\ \dot{\theta}_{free} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

ここで、

$$\mathbf{y} \equiv \mathbf{S} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{P}^{ref} \\ \mathbf{L}^{ref} \end{bmatrix} - \sum_{i=1}^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{F_i}^* \\ \mathbf{H}_{F_i}^* \end{bmatrix} \xi_{F_i}^{ref} \right\}, \quad (10)$$

$$\mathbf{A} \equiv \mathbf{S} \begin{bmatrix} \mathbf{M}_B^* & \mathbf{M}_{free} \\ \mathbf{H}_B^* & \mathbf{H}_{free} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

式 (9) により、目標運動量 $\mathbf{P}^{ref}, \mathbf{L}^{ref}$ の選択された成分と目標足先速度 $\xi_{F_i}^{ref}$ を二乗ノルム最小の意味で実現するベースリンクおよび脚以外の関節速度は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} \xi_B \\ \dot{\theta}_{free} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^\dagger \mathbf{y} + (\mathbf{E} - \mathbf{A}^\dagger \mathbf{A}) \begin{bmatrix} \xi_B^{ref} \\ \dot{\theta}_{free}^{ref} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

ここで $\mathbf{A}^\dagger$ は $\mathbf{A}$ の擬似逆行列を表す。 ξ_B^{ref} はベースリンクの参照速度、 $\dot{\theta}_{free}^{ref}$ は脚以外の関節の参照速度であり、目標運動量を作り出すのに矛盾しない範囲で実現される。上式で得られたベースリンクの速度 ξ_B を用いて次式により脚の関節速度を計算する (式 (3) に同じ)。

$$\dot{\theta}_{leg_i} = \mathbf{J}_{leg_i}^{-1} \left(\xi_{F_i}^{ref} - \begin{bmatrix} \mathbf{E} & -\hat{\mathbf{r}}_{B \rightarrow F_i} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \xi_B \right). \quad (13)$$

以上をまとめると分解運動量制御では次の手順で軌道を計算することになる。

- Step 1** 制御したい運動量成分に応じて選択行列 $\mathbf{S}$ を設定する。
- Step 2** 現時刻における関節角度 θ 、ベースリンクの位置 $\mathbf{p}_B$ 、姿勢 $\mathbf{R}_B$ より、式 (11) により行列 $\mathbf{A}$ を計算する。
- Step 3** 目標全運動量 $\mathbf{P}^{ref}, \mathbf{L}^{ref}$ および、目標足先速度 $\xi_{F_i}^{ref}$ を設定し、式 (10) によりベクトル $\mathbf{y}$ を計算する。
- Step 4** 式 (12) によりベースリンク速度 ξ_B および、脚以外の関節速度 $\dot{\theta}_{free}$ を計算する。
- Step 5** ベースリンク速度 ξ_B と目標足先速度 $\xi_{F_i}^{ref}$ より式 (13) により脚関節速度 $\dot{\theta}_{leg_i}$ を計算する。
- Step 6** 関節速度 $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_{leg_1}^T, \dot{\theta}_{leg_2}^T, \dot{\theta}_{free}^T]^T$ を積分して次の時刻における関節角度 θ を求める。ベースリンク速度 ξ_B を積分して次の時刻における位置 $\mathbf{p}_B$ 、姿勢 $\mathbf{R}_B$ を求める。
- Step 7** Step 2 へ戻る。

[†]本研究の初期段階では「分解運動量制御」を「モーメンタム・コントロール」と呼んでいた [10]。

3.3 関連する研究について

角運動量を状態量としてロボットの動作設計やフィードバック制御に利用することは佐野と古荘の三次元動的2足歩行制御 [11] を先駆とし、水戸部らのバランス制御 [12]、筆者らのバランス制御 [13]、池田らによる走行ロボットの制御 [14] など多くの研究において行われてきた。一方、杉原らはロボット全体の重心位置を直接操作することで軌道生成や制御を行う方式を提案している [15]。これは並進運動量の制御に等しく、特に式 (6) に現れる慣性行列の上半分 $[M_B^* \ M_{free}^*]$ を全質量 $\tilde{m}$ で割ったものは「重心ヤコビアン」を与える。

また、宇宙ロボットの分野では従来より運動量の重要性が指摘されてきた。梅谷と吉田は運動量保存則を包含した分解速度制御法を提案し、これにより浮遊ベース上に設置されたマニピュレータ先端を絶対座標系で正確に制御できることを示した [16]。これと等価な計算を分解運動量制御を用いて以下のように行うことができる。先に定義した記号を流用するため宇宙ロボットを軌道上に浮遊する1本足の脚ロボットと考えよう。適切な座標系を設定すれば目標運動量を $\mathbf{P}^{ref} = \mathbf{0}$, $\mathbf{L}^{ref} = \mathbf{0}$ とできる。選択行列 $\mathbf{S} = \mathbf{E}$ とすると式 (10) は、

$$\mathbf{y} = \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{F_1}^* \\ \mathbf{H}_{F_1}^* \end{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_{F_1}^{ref} \right\}.$$

ここで、 $\boldsymbol{\xi}_{F_1}^{ref}$ が目標とする足先速度（手先速度）である。ロボットがベースリンクと1本の脚のみで構成されている場合 $\mathbf{A}$ は 6×6 の正方行列となるから、式 (12) は、

$$\boldsymbol{\xi}_B = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{y}.$$

$\boldsymbol{\xi}_B$ は脚の反動で生ずるベースリンクの速度である。最後に式 (13) を使って、希望する運動を作り出す脚関節速度が計算される。

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_{leg1} = \mathbf{J}_{leg1}^{-1} \left(\boldsymbol{\xi}_{F_1}^{ref} - \begin{bmatrix} \mathbf{E} & -\hat{\mathbf{r}}_{B \rightarrow F_1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_B \right)$$

以上のように分解運動量制御はロボットの運動計画や制御のために従来提案されてきた様々な方式を包含する概念であると考えられる。

4. 慣性行列の計算

本章では式 (1) における慣性行列 $\mathbf{M}_\theta$ と $\mathbf{H}_\theta$ を算出する方法を説明する。Fig. 2 はヒューマノイドロボットの一部を構成する隣接したリンクと関節 $j-1$ 軸と j 軸を示す。各関節は適切な制御により指定された回転速度を発生できるとしよう。第 j 関節が角速度 $\dot{\theta}_j$ で回転することにより新たに発生する並進運動量と角運動量は次式で与えられる。

$$\mathbf{P}_j = \boldsymbol{\omega}_j \times (\tilde{\mathbf{c}}_j - \mathbf{r}_j) \tilde{m}_j, \quad (14)$$

$$\mathbf{L}_j = \tilde{\mathbf{c}}_j \times \mathbf{P}_j + \tilde{\mathbf{I}}_j \boldsymbol{\omega}_j, \quad (15)$$

$$\boldsymbol{\omega}_j \equiv \mathbf{a}_j \dot{\theta}_j, \quad (16)$$

$\mathbf{r}_j$ と $\mathbf{a}_j$ は関節 j の位置ベクトルと回転軸ベクトルを示す。また、 $\tilde{m}_j$, $\tilde{\mathbf{c}}_j$, $\tilde{\mathbf{I}}_j$ は関節 j より先端に存在する全リンクの質

Fig. 2 Link configuration

量、重心位置、慣性テンソルを合算したものである。

関節 j に対応する慣性行列の並進運動成分と回転運動成分はそれぞれ次式で与えられる。

$$\mathbf{m}_j \equiv \mathbf{P}_j / \dot{\theta}_j, \quad (17)$$

$$\mathbf{h}_j \equiv \mathbf{L}_j / \dot{\theta}_j, \quad (18)$$

$\mathbf{m}_j$, $\mathbf{h}_j$ はそれぞれ 3×1 のベクトルである。式 (14) と式 (17) を比較することで $\mathbf{m}_j$ が、式 (15) と式 (18) を比較することで $\mathbf{h}_j$ が得られる。

$$\mathbf{m}_j = \mathbf{a}_j \times (\tilde{\mathbf{c}}_j - \mathbf{r}_j) \tilde{m}_j, \quad (19)$$

$$\mathbf{h}_j = \tilde{\mathbf{c}}_j \times \mathbf{m}_j + \tilde{\mathbf{I}}_j \mathbf{a}_j. \quad (20)$$

これらを用いて慣性行列 $\mathbf{M}_\theta$, $\mathbf{H}_\theta$ は以下のように構成される。

$$\mathbf{M}_\theta = [\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2, \dots, \mathbf{m}_n], \quad (21)$$

$$\mathbf{H}_\theta = {}^0\mathbf{H}_\theta - \hat{\mathbf{c}} \mathbf{M}_\theta, \quad (22)$$

$${}^0\mathbf{H}_\theta \equiv [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_n]. \quad (23)$$

式 (22) は地面座標系原点回りの角運動量を重心回りの角運動量に変換している。

$\tilde{m}_j$, $\tilde{\mathbf{c}}_j$, $\tilde{\mathbf{I}}_j$ はリンク先端より再帰的に計算して求めることができる。今、関節 j より先端の質量 $\tilde{m}_j$ 、重心位置 $\tilde{\mathbf{c}}_j$ 、慣性テンソル $\tilde{\mathbf{I}}_j$ が既に得られているとすると、それより一つ胴体よりの関節 $j-1$ に関しては

$$\tilde{m}_{j-1} = \tilde{m}_j + m_{j-1}, \quad (24)$$

$$\tilde{\mathbf{c}}_{j-1} = (\tilde{m}_j \tilde{\mathbf{c}}_j + m_{j-1} \mathbf{c}_{j-1}) / (\tilde{m}_j + m_{j-1}), \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{I}}_{j-1} = & \tilde{\mathbf{I}}_j + \tilde{m}_j \mathbf{D}(\tilde{\mathbf{c}}_j - \tilde{\mathbf{c}}_{j-1}) + \mathbf{R}_{j-1} \mathbf{I}_{j-1} \mathbf{R}_{j-1}^T \\ & + m_{j-1} \mathbf{D}(\mathbf{c}_{j-1} - \tilde{\mathbf{c}}_{j-1}), \end{aligned} \quad (26)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}) \equiv \hat{\mathbf{r}}^T \hat{\mathbf{r}}, \quad (27)$$

m_{j-1} , $\mathbf{c}_{j-1}$, $\mathbf{R}_{j-1}$ は第 $j-1$ リンクの質量、重心位置、姿勢行列を表す。また $\mathbf{I}_{j-1}$ は各リンクのローカル座標系で表された慣性テンソルである。

5. 運動生成例

ここでは、実際のヒューマノイドロボット HRP-2 によるシミュレーションと実験により分解運動量制御を評価する。HRP-2 は経済産業省の人間協調・共存型ロボットプロジェクト (HRP) [17]

Fig. 3 Kick: $S = E$ Fig. 4 Kick: $S = [e_1 e_2 e_3 e_6]^T$

において開発された身長 154 [cm], 体重 58 [kg], 全 30 自由度のロボットであり, 腰にヨー, ピッチの 2 軸, 股関節に片持ち構造を持つなどの特徴を持っている [18].

5.1 キック動作

Fig. 3, 4 は, バランスを保持しつつキック動作を行った計算結果を示す. 両脚支持から片脚支持へ移行し, 以後重心を支持脚直上に維持するため目標運動量を次式で与えた.

$$P_{x,y}^{ref} = \tilde{m} K_p (\tilde{c}_{x,y}^{ref} - \tilde{c}_{x,y}) + \dot{\tilde{c}}_{x,y}^{ref}, \quad (28)$$

$$P_z^{ref} = \tilde{m} K_p (z_B^{ref} - z_B), \quad (29)$$

$$L^{ref} = 0. \quad (30)$$

K_p は適当なフィードバックゲインでヤコビアン の時間微分に起因する誤差を補正するために与える. $\tilde{c}^{ref}$ は重心の目標位置, $\dot{\tilde{c}}^{ref}$ は目標重心速度, z_B は目標の腰高さである. キック動作や次節の歩行動作では全重心高さを一定とするよりも腰高さ一定のほうが好都合なため, 式 (29) によって z 方向の並進運動量経路で腰高さを制御している.

キック動作を生成するために右足に与えた目標速度 $\xi_{F_1}^{ref}$ のパターンを Fig. 5 に示す. 左足は地面に着地したままなので全期間において $\xi_{F_2}^{ref} = 0$ である. 以上の目標運動量と目標速度パターンを用い 3 章で示したアルゴリズムに従ってロボットの運動を計算した. 離散化時間は 5 [ms] とした.

Fig. 3 では式 (8) の選択行列 S を単位行列として, 目標運動量の全成分が実現されるように運動を生成した. ロボットは両脚支持の初期姿勢から重心を左脚の上へ移動させ (0.0 [s] → 2.0 [s]), 右脚を持ち上げて後方へ引き (2.0 [s] → 3.0 [s]), 前方へキックする (3.0 [s] → 4.0 [s]). Fig. 6 は生成された運動パターンから改めて全運動量を計算し, 設定した目標運動量が再現されていることを確認したものである. 上段のグラフは並進運動量を示し, ロボットが片脚でバランスを維持している 2.0 [s] から 4.5 [s] にかけて P_x, P_y がほぼ 0 に保たれていることが分

Fig. 5 Reference velocity of right foot $\xi_{F_1}^{ref}$

かる. P_z は式 (29) によって腰高さを一定にするため変動している. なお, 0.0 [s] から 2.0 [s] にかけて P_y が大きく増減しているのはロボットの重心が左脚真上に移動したことによる.

Fig. 6 下段のグラフはロボットの重心回りの角運動量 L が式 (30) で指定されたとおり 0 を維持していることを示している (厳密には離散化に伴う誤差によって ± 0.03 [Nms] 程度の変動が存在する). Fig. 3 の time = 3.0, 4.0 [s] の図に見られるようにロボットは重心回りの全角運動量を 0 に保つため脚を後方に引く際には胴体を反り返らせ, 前へ振り出す際には胴体を前に屈めるような動作を行っている. この結果, 股関節における関節可動範囲の超過と腕と胴体の干渉が発生するため実現不可能なパターンになっている.

角運動量の全成分を目標値どおり制御しようとして発生する上述の問題を解消するために, 選択行列を $S = [e_1 e_2 e_3 e_6]^T$ として角運動量のうち L_x, L_y の制御を行わないように設定した場合の結果を Fig. 4 に示す. 角運動量の制御を一部断念した

 Fig. 6 Momentum change during kick action ($S = E$)

 Fig. 7 Momentum change during kick action ($S = [e_1 e_2 e_3 e_6]^T$)

結果、胴体を鉛直に保つ無理のないキック動作が生成されている。Fig. 7 がその運動量であり、その下段の図から分かるように L_x と L_y は 0 に保たれていない。角運動量の時間微分はトルクに等しいから、 $\dot{L}_x, \dot{L}_y$ は重心の床面投影点から ZMP を変位させる効果を持つ。しかし ZMP のずれは支持脚足裏の範囲内に留まり、支持脚と床面の接触が保たれることを別途計算により確認した。一方、 L_z は 0 に保たれているから Yaw モーメント ($= \dot{L}_z$) は発生しないと期待できる。

この運動パターンを実際の HRP-2 に与えた実験の様子を Fig. 8 に示す。実験ではパターンを再生する際に安定化制御系（文献 [19] の制御系を改良したもの）を併用した。これはロボットのパラメータ誤差等を補償するために関節軌道を微修正するものであり、分解運動量制御の軌道に大きな影響を与えるものではない。Fig. 9 はロボットの支持脚足部に内蔵された力センサで計測した ZMP と 3 軸モーメントである。ZMP の変

 Fig. 8 Kick experiment: $S = [e_1 e_2 e_3 e_6]^T$

Fig. 9 ZMP and moment at support foot (experiment)

動は、支持脚足裏の範囲内であり安定した接触が維持されていることが分かる。また最下段のグラフは 3 軸モーメントのうち M_z が他の成分に比べて小さく保たれていることを示している。 M_z の変化は ± 5 [Nm] 以内であり、分解運動量制御が作り出した腕の振りと腰の回転により実際に Yaw モーメントが補償されたことが分かる。

5.2 歩行動作

筆者らはロボット全体を一質点の倒立振子として近似したのち、その解析解に基づいて 2 足歩行パターンを効率よく生成する三次元線形倒立振子モード [20] を提案している。この際、簡単のため重心のかわりに腰リンクの軌道を制御して 2 足歩行運動を生成していたが、分解運動量制御を用いれば近似ではなくロボット全体の重心運動を正確に設定できる。三次元線形倒立振子を用いて歩行パターンを生成し、ロボット全体の重心がこれに追従するように式 (28) で目標運動量を設定した。ただし、腰の上下動については式 (29) により一定高さで歩行するようにした[†]。ロボット全体を倒立振子のダイナミクスに一致させるため、重心回りの角運動量をすべて 0 に設定した場合、Fig. 3 と同様に胴体が過大な揺動を発生し、実行可能な歩行動作を得ることができなかった。そこで、角運動量 L_x, L_y の制御は行わないものとして生成した歩行パターン（一歩 0.8 [s]、歩幅 25 [cm]）の ZMP と腰中心の軌跡を Fig. 10 に示す（進行方向）。ZMP（細線）は支持領域の範囲内で変化しており安定な歩行が可能なが分かる。なお、支持脚交換の直後に ZMP のオーバーシュート（矢印）が発生しているが、これは制御しなかった角

[†]線形倒立振子モードは平地歩行では高さ一定の重心運動を与える。これをそのまま利用すると遊脚の上下動に呼応して支持脚相間で腰高さ最低、両脚支持期に腰高さが最高となる歩行パターンが生成される。これは人間の歩行とは逆の腰上下動となって不自然なため腰高さを一定とする制約を与えた。

Fig. 10 Hip motion and Zero-moment point (simulation)

Fig. 11 Walk experiment: $S = [e_1 e_2 e_3 e_6]^T$

運動量 L_y の影響である。

Fig. 11 に生成された歩行パターンを用いた歩行実験の様子を示す。この実験もオフライン生成された歩行パターンに前述の安定化制御系を併用して行った。ZMP のオーバーシュートの影響により多少振動が観察されたが転倒することなく歩行を実現することができた。写真から L_z を 0 に設定することで得られた自然な腕振りの様子を見ることができる。逆の見方をすればロボットは腕振りによって $L_z = 0$ を実現し、接地面で発生する鉛直軸回りのモーメントを抑制していることになる。

5.3 計算実行時間について

分解運動量制御の実装はヒューマノイド用動力学シミュレータ OpenHRP [21] 上に行った。Fig. 3 の計算、すなわち 30 自由度のロボットに対しすべての運動量要素を指定した場合の軌道算出に要した時間は単位時間刻み当たり平均 1.59 [ms] (Intel XEON processor 2.8 GHz dual) であった。このうち慣性行列の計算に要したのが 0.89 [ms] (56%)、擬似逆行列の計算に要したのが 0.31 [ms] (19%) である。なお、慣性行列の計算に関しては最適化がなされておらず、さらなる高速化が可能である。本論文で行った実験では 5 [ms] ごとに関節目標値を更新したので、適切な高速化を行えば分解運動量制御を実時間の軌道生成アルゴリズムとして使用できることが分かる。

6. 結 論

本論文ではヒューマノイドロボットの動作生成に関して、指定された並進運動量と角運動量を実現するように運動を生成する手法である「分解運動量制御」を提案し、これを用いること

で片脚でのダイナミックなバランス維持と自然な腕振りを伴う 2 足歩行運動を生成できることをシミュレーションと実験により示した。

同じ方法を用いて鉛直方向の運動量を制御すれば、2 足ロボットの跳躍運動や走行運動を生成することができる [22]。また、Neo らは両足先に加え両手先にも位置拘束を導入した分解運動量制御を実時間制御系の一部として実装し、実際のロボットを用いてバランス維持しつつ作業を行わせる実験に成功している [23]。

3.3 節で示したように分解運動量制御はヒューマノイドロボットだけではなく、宇宙ロボットの制御にも用いることができる。さらに敷衍すれば、本手法は脚型・車輪型を問わずあらゆるタイプの移動ロボットの運動生成に適用できる可能性がある。この観点からすれば、転がり接触等で発生するノンホロノミック拘束をどのようにに取り込み得るかは今後の興味深い課題となろう。

謝 辞 本研究は経済産業省/NEDO の「人間協調・共存型ロボットシステム」の一環として行われた。プロジェクトの推進に尽力された多くの方々に心より感謝する。

参 考 文 献

- [1] 山口, 木下, 高西, 加藤: “路面形状に偏差のある環境に対する適応能力を持つ 2 足歩行ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.4, pp.546-559, 1996.
- [2] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: “The Development of Honda Humanoid Robot,” Proc. of the 1998 ICRA, pp.1321-1326, 1998.
- [3] K. Nishiwaki, T. Sugihara, S. Kagami, F. Kanehiro, M. Inaba and H. Inoue: “Design and Development of Research Platform for Perception-Action Integration in Humanoid Robot: H6,” Proc. Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1559-1564, 2000.
- [4] K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Yokoyama, K. Akachi, T. Kawasaki, S. Ota and T. Isozumi: “Design of Prototype Humanoid Robotics Platform for HRP,” Proc. of IROS 2002, 2002.
- [5] W.L. Wooten and J.K. Hodgins: “Simulating Leaping, Tumbling, Landing and Balancing Humans,” Proc. of 2000 ICRA, pp.656-662, 2000.
- [6] 田宮, 稲葉, 井上: “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, 1999.
- [7] P. Baerlocher and R. Boulic: “Task-Priority Formulations for the Kinematic Control of Highly Redundant Articulated Structures,” Proc. of 1998 IROS, pp.323-329, 1998.
- [8] 長阪, 稲葉, 井上: “動力的動作変換フィルタ群を用いた人間型ロボットの全身行動設計”, 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1207-1208, 1999.
- [9] K. Yamane and Y. Nakamura: “Dynamics Filter - Concept and Implementation of On-Line Motion Generator for Human Figures,” Proc. of ICRA2000, pp.699-695, 2000.
- [10] 梶田, 金広, 横井, 比留川: “モーメント・コントロール: 運動量と角運動量に基づくヒューマノイドロボットの全身運動生成”, 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集 CD-ROM, 1D15, 2002.
- [11] A. Sano and J. Furusho: “Realization of Natural Dynamic Walking Using The Angular Momentum Information,” Proc. of ICRA1990, Cincinnati, 3, pp.1476-1481, 1990.
- [12] 水戸部, 益山, 柴田, 山野, 那須: “歩行ロボットの床圧・摩擦力に基づく ZMP 操作および角運動量制御への応用”, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.5, pp.515-520, 2002.
- [13] S. Kajita, K. Yokoi, M. Saigo and K. Tanie: “Balancing a Humanoid Robot Using Backdrive Concerned Torque Control and Direct Angular Momentum Feedback,” Proc. of ICRA2001,

- pp.3376-3382, 2001.
- [14] 池田, 岩谷, 巢瀬, 美多: “脚式ロボットの走行制御—動物の運動解析に基づく走行の実現”, システム制御情報学会論文誌, vol.14, no.5, pp.233-243, 2001.
- [15] T. Sugihara, Y. Nakamura and H. Inoue: “Realtime Humanoid Motion Generation through ZMP Manipulation based on Inverted Pendulum Control,” Proc. of ICRA 2002, pp.1404-1409, 2002.
- [16] Y. Umetani and K. Yoshida: “Resolved Motion Rate Control of Space Manipulators with Generalized Jacobian Matrix,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.5, no.3, pp.303-314, 1989.
- [17] H. Inoue, S. Tachi, Y. Nakamura, K. Hirai, N. Ohyu, S. Hirai, K. Tanie, K. Yokoi and H. Hirukawa: “Overview of Humanoid Robotics Project of METI,” Proc. of the 32nd ISR, April, 2001.
- [18] <http://www.kawada.co.jp/ams/promet>, 2003.
- [19] K. Yokoi, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, S. Kajita and H. Hirukawa: “Experimental Study of Biped Locomotion of Humanoid Robot HRP-1S,” Experimental Robotics VIII, STAR 5, pp.75-84, 2003.
- [20] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, et al.: “The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A simple modeling for a biped walking pattern generation,” Proc. of 2001 IROS, pp.239-246, 2001.
- [21] F. Kanehiro, K. Fujiwara, S. Kajita, et al.: “Open Architecture Humanoid Robotics Platform,” Proc. of ICRA2002, pp.24-30, 2002.
- [22] 長崎, 梶田, 横井, 金子, 谷江: “ヒトサイズの走行ヒューマノイドの実現性の検討”, 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集 CD-ROM, 1C15, 2002.
- [23] E.S. Neo, 横井, 梶田, 谷江: “ヒューマノイドロボットの全身遠隔操作 (モーメンタム・コントロールを用いた全身運動方式)”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '03 講演論文集, 2P-1F-F5, 2003.

梶田秀司 (Shuuji Kajita)

1961 年 1 月 26 日生。1985 年東京工業大学大学院修士課程修了 (制御工学専攻)。同年通産省工業技術院機械技術研究所に入所。2 足歩行ロボット等の動的制御技術の研究に従事。1996 年 2 月より 1 年間米国カリフォルニア工科大学客員研究員。2001 年より組織改変に伴い独立行政法人産業技術総合研究所主任研究員, 現在にいたる。博士 (工学)。1996 年度計測自動制御学会論文賞受賞。計測自動制御学会, IEEE (Robotics and Automation Society) の会員。(日本ロボット学会正会員)

金子健二 (Kenji Kaneko)

1965 年 9 月 22 日生。1990 年慶應義塾大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年工業技術院機械技術研究所に入所。1995 年 9 月より半年間米国カーネギーメロン大学客員研究員, 1999 年 9 月より 1 年間仏国 CNRS パリロボット研究所客員研究員。2001 年より組織改変に伴い独立行政法人産業技術総合研究所主任研究員, 現在にいたる。博士 (工学)。モーションコントロール, マイクロマシン, 遠隔制御, ヒューマノイドロボット等の研究に従事。日本機械学会, 電気学会の各会員。(日本ロボット学会正会員)

原田研介 (Kensuke Harada)

1968 年 9 月 28 日生。1997 年 3 月京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了。博士 (工学)。同年 4 月広島大学工学部助手, 2002 年 4 月独立行政法人産業技術総合研究所研究員。ヒューマノイドロボット, ロボットハンド, ロボットマニピュレータ等, ロボット機構の力学と制御に関する研究に興味を持つ。IEEE, 計測自動制御学会, 日本機械学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)

比留川博久 (Hirohisa Hirukawa)

1959 年 1 月 15 日生。1987 年神戸大学大学院自然科学研究システム科学専攻博士課程修了。学術博士。同年通産省工業技術院電子技術総合研究所に入所。1994~1995 年米国スタンフォード大学計算機科学科客員研究員。2001 年改組より独立行政法人産業技術総合研究所知能システム研究部門ヒューマノイド研究グループ長。ロボットの動作計画アルゴリズム, ネットワークロボティクス, ヒューマノイドロボット等の研究に従事。(日本ロボット学会正会員)

金広文男 (Fumio Kanehiro)

1971 年 7 月 22 日生。1999 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。1998 年より日本学術振興会特別研究員。2000 年電子技術総合研究所入所。現在産業技術総合研究所知能システム研究部門研究員。ヒューマノイドロボットのシステム構成法, 全身行動制御に興味がある。IEEE, 人工知能学会, 日本ソフトウェア科学会, 情報処理学会の各会員。(日本ロボット学会正会員)

藤原清司 (Kiyoshi Fujiwara)

1972 年 4 月 11 日生。1997 年筑波大学大学院工学研究科修了。同年電子技術総合研究所入所。現在独立行政法人産業技術総合研究所知能システム部門ヒューマノイド研究グループ研究員。生体制御, 医療福祉工学, マンマシンインタフェース, ヒューマノイドロボットなどの研究に従事。(日本ロボット学会正会員)

横井一仁 (Kazuhito Yokoi)

1961 年 11 月 11 日生。1986 年東京工業大学大学院機械物理工学専攻修了。博士 (工学)。1986 年工業技術院機械技術研究所に入所。1995~1996 年スタンフォード大学客員研究員。2001 年産業技術総合研究所知能システム研究部門主任研究員。神奈川県川工科大学連携大学院助教授, 東京工業大学非常勤講師併任。人間協調・共存型ロボットシステムプロジェクトに従事。IEEE, 日本機械学会会員。(日本ロボット学会正会員)