

逆動力学計算を用いた力学的整合性を満たすヒューマノイド動作の振付け

Physically Consistent Choreography of Human Figures

Based on Inverse Dynamics Computation

丹下 学 (東大) 山根 克 (東大) 正 中村 仁彦 (東大)

Manabu TANGE Katsu YAMANE Yoshihiko NAKAMURA

University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

Abstract— This paper proposes a new method to generate physically consistent whole-body motions of human figures with choreography. Choreography is given as motion-characteristic Cartesian trajectories of few parts instead of all joint angle trajectories. With inverse kinematics, this method generates all joint accelerations and automatically considers joint motion ranges and contact constraints. With inverse dynamics computation and a part of equation of motion, this method also considers physical consistency. For human figures which have no fixed base, external forces must be reasonable as contact forces. By thinking a human figures as a rigid body, reasonable external forces and base acceleration are calculated.

Key Words: Human Figures, Whole-Body Motion, Physical Consistency, Cartesian Trajectory, Inverse Dynamics Computation.

1 はじめに

ヒューマンフィギュアの全身動作生成が大きな技術課題となっている．伝統的に人間に動作を教授する方法である振付けでは，振付け師は少数部位の軌道を指示することで意図を伝える．これは人間自身の骨格・筋肉による可動範囲の制限や外界からの干渉による接触拘束によって実質的な自由度が減少しているために，少ない情報からでも全身の動作がほぼ決定されるという性質を利用している．山根ら [1] は，振付けの概念を用いたヒューマンフィギュアの全身動作計算法を提案した．しかし，この計算法は純粋に運動学的な計算であるため，生成された動作が力学的整合性をもつ必要がある場合には使うことができないという問題があった．

本論文では，力学的に実現可能なヒューマンフィギュアの全身動作を振付けによってインタラクティブに生成する方法を提案する．

2 振付けにおける力学的整合性

2.1 優先順位を考えた動作計算

可動範囲などのパラメタと少数部位への軌道目標から，種々の拘束と力学的整合性を満たす全関節加速度 $\ddot{\theta} \in \mathbb{R}^{N_{\text{dof}}}$ を求め，それを時間積分することで全身運動を生成する．ここで N_{dof} はヒューマンフィギュアのベースの 6 自由度を含めた全自由度数である．拘束条件同士の矛盾を解決するために条件の順位付けを行う [2]．以下に計算法の手順を述べ，2.2 節で対応する式番号を挙げる．

1. 厳密に満たすべき，高優先度の拘束を満たす $\ddot{\theta}$ の一般解を求める (式 (1) ~ 式 (3))．
2. その解空間の中で低い優先度の拘束をなるべく満たす $\ddot{\theta}$ を求める (式 (4) ~ 式 (7))．
3. 求められた $\ddot{\theta}$ による慣性力と釣り合うべき外力が接触力として妥当かどうかを判定 (力学的整合性チェック) (式 (8))．

4. 力学的整合性が満たされなかった場合，接触力として妥当な外力を決定し (3 節)，その外力を受けることを新たな拘束 (式 (8)) として再度手順 1, 2 を行う．

2.2 力学的整合性を満たす動作計算

高い優先度の拘束が N_h 個ある場合，これらをまとめ，以下のようにする．

$$\ddot{r}_h - J_h \dot{\theta} = J_h \ddot{\theta} \quad (1)$$

この方程式の一般解は $J_h \in \mathbb{R}^{N_{\text{dof}} \times N_h}$ の疑似逆行列 $J_h^\# \in \mathbb{R}^{N_h \times N_{\text{dof}}}$ と任意ベクトル $y' \in \mathbb{R}^{N_{\text{dof}}}$ を用いて，

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= J_h^\# (\ddot{r}_h - J_h \dot{\theta}) + (E - J_h^\# J_h) y' \\ &= \ddot{\theta}_0 + W y' \end{aligned} \quad (2)$$

と求められる．ここで， E は単位行列， $\ddot{\theta}_0 \triangleq J_h^\# (\ddot{r}_h - J_h \dot{\theta})$ は方程式 (1) の最小二乗解， $W \triangleq E - J_h^\# J_h$ は J_h の零空間を表す行列である．拘束のない関節が等速運動を続けることを避けるため， J_h の零空間へダンピング項を設ける．正定値行列 $K_D \in \mathbb{R}^{N_{\text{dof}} \times N_{\text{dof}}}$ と任意ベクトル $y \in \mathbb{R}^{N_{\text{dof}}}$ を用いて $y' = -K_D \dot{\theta} + y$ とすると，ダンピング効果を含めた式 (2) は以下になる．

$$\ddot{\theta} = \ddot{\theta}_0 + \ddot{\theta}_D + W y \quad (3)$$

ここで $\ddot{\theta}_D \triangleq -W K_D \dot{\theta}$ である．次に低い優先度の拘束条件をまとめて，

$$\ddot{p}_{\text{aux}} = J_{\text{aux}} \ddot{\theta} \quad (4)$$

とする．式 (3) で求められた一般解のうち低い優先度の拘束条件をできるだけ満たすように任意ベクトル y を決定する．式 (4) へ 式 (3) を代入し，以下の式 (5) を得る．

$$\ddot{p}_{\text{aux}} = J_{\text{aux}} (\ddot{\theta}_0 + \ddot{\theta}_D + W y) \quad (5)$$

この式を次式 (6) のように変形し， y についての線形方程式とする．

$$\Delta \ddot{p}_{\text{aux}} = S y \quad (6)$$

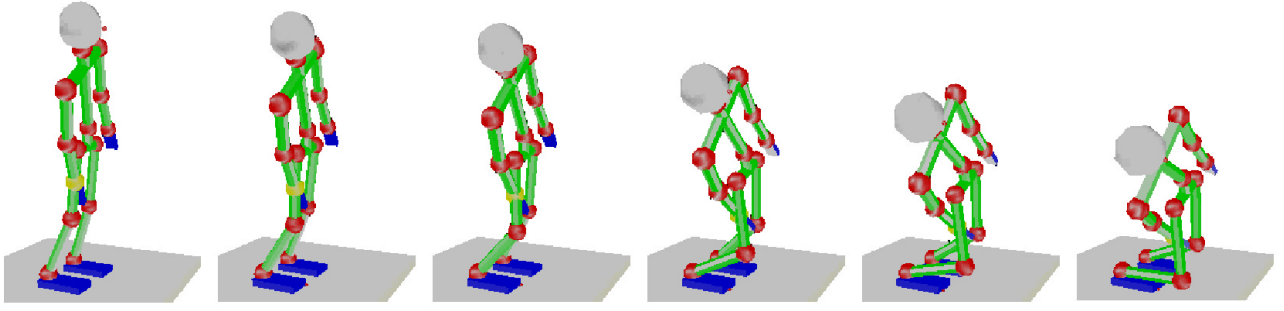


Fig.1: Dynamics Conscious Choreography

ここで $\Delta \ddot{\mathbf{p}}_{\text{aux}} \triangleq \ddot{\mathbf{p}}_{\text{aux}} - \mathbf{J}_{\text{aux}}(\ddot{\boldsymbol{\theta}}_0 + \ddot{\boldsymbol{\theta}}_D)$, $\mathbf{S} \triangleq \mathbf{J}_{\text{aux}} \mathbf{W}$ である．式 (6) を解いて次式 (7) を得る．

$$\mathbf{y} = \mathbf{S}^* \Delta \ddot{\mathbf{p}}_{\text{aux}} \quad (7)$$

ここで $\mathbf{S}^*$ は $\mathbf{S}$ の SR-Inverse [3] である．SR-Inverse は擬似逆行列の近似と考えることができ，解に誤差を許し，低い優先度の拘束条件によって運動の加速度が著しく大きくなる危険性を低くする．求められた $\mathbf{y}$ を式 (3) へ代入し関節加速度 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ が求められる．

上で求めた運動の力学的整合性を判定する．発生できるトルクに制限がないとすれば，力学的整合性は慣性力と釣り合うべき外力が接触力として妥当であるかどうかによって決定される．また加速度の最小二乗解はおおよそトルクの最適配分に当たる．ベース並進回転についての慣性部分行列 $\mathbf{A}^B \in \mathbb{R}^{6 \times N_{\text{dof}}}$ と速度項 $\mathbf{b}^B \in \mathbb{R}^6$ を用いてベースの運動方程式を

$$\mathbf{A}^B \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{b}^B = \begin{pmatrix} \mathbf{f}_{\text{ext}} \\ \mathbf{n}_{\text{ext}} \end{pmatrix} \quad (8)$$

のように作ることができ， $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ に上で求めた加速度を代入して外力 $\mathbf{f}_{\text{ext}}$ ・外モーメント $\mathbf{n}_{\text{ext}}$ を求めることができる．接触力としての妥当性は外力が以下の条件を満たすことで示される．

1. 接触力が床面に対し反発力となる
2. 摩擦力が最大静止摩擦力以下
3. ZMP (Zero Moment Point) が接地凸包内に存在．

接触力が妥当でない場合には式 (8) の外力項 $(\mathbf{f}_{\text{ext}}^T \ \mathbf{n}_{\text{ext}}^T)^T$ に次節で与える妥当な接触力を代入し， $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ に対する新たな拘束条件とすることで整合性を満たした運動が計算される．

3 外力の修正計算

ある接地状態における妥当な接触力は一意には決まらず，外力項 $(\mathbf{f}_{\text{ext}}^T \ \mathbf{n}_{\text{ext}}^T)^T$ の各成分を独立に修正すると，式 (8) の拘束により $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ が非常に大きくなる可能性がある．また決定された接触力を受ける加速度運動には冗長性が

あり，単純な最小二乗解では持続的に安定な運動が生成されない場合がある．まずヒューマンフィギュアを一つの剛体として考え，ベースの加速度・角加速度と妥当な接触力を概算する．次に種々の拘束を満たす運動を一つの剛体の運動からの差分として計算する．関節加速度 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ は冗長性を失わず，剛体の運動との差についての最小二乗解として与えられる．

4 運動生成例

Fig.1 は 34 自由度ヒューマンフィギュアの動作生成例を示している．両足を接地させ右手先に前方やや下への目標軌道を与える．ZMP を接地凸包内に維持するために前方に倒れる加速度運動を行い，加えて右手軌道に追従している様子が解る．

5 結論

本論文では振付けによる力学的に正しい加速度運動の計算法を提案した．時間に関してローカルな最適化であるため，実時間での運動生成が可能であるが，長期的な展望を持つ運動生成はこのままではできない．また，力学的整合性を満たし持続的に安定な運動を行うための外力修正は，意図する運動によって決定されるものである．この運動生成法はモーションプランニングと一体化した問題として扱うことによってこれらの問題を解決した動作生成法とすることができる．

本研究は，科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業 (CREST) 及び平成 13 年度科学研究費補助金 (B)(1) の支援を受けた．

参考文献

- [1] 山根, 中村. ヒューマンフィギュアの全身動作生成のための協応構造化インタフェース. 第 19 回日本ロボット学会学術講演論文集, p. 3A33, 2001.
- [2] Y.Nakamura and H.Hanafusa. Task priority based redundancy control of robot manipulators. *International Journal of Robotics Research*, vol.6, no.2, pp. 3–15, 1987.
- [3] 中村, 花房. 関節形ロボットアームの特異点低感度運動分解. 計測自動制御学会論文集, pp. 453–459, 1984.