

力学フィルタによるヒューマノイドの運動生成

—HRP 仮想プラットフォームへの適用—

○ 山根 克 中村 仁彦 (東京大学大学院工学系研究科 機械情報工学専攻)

Motion Generation of Humanoid Robots via Dynamic Filter

—Application to the HRP Virtual Platform—

*Katsu YAMANE, Dept. of Mechano-Informatics, Univ. of Tokyo

Yoshihiko NAKAMURA, Dept. of Mechano-Informatics, Univ. of Tokyo

Abstract—Humanoid robots are required to make a variety of dynamic and even expressive motions in changing environments. However, the conventional methods for generating humanoid motions fail to achieve this requirement since they can only generate quite artificial and predefined motions through rather complicated optimization processes. In this paper, we propose the concept of “dynamic filter” which transforms a physically inconsistent motion into a consistent one, and provide an example of its implementation using feedback control and local optimization. The proposed method can be applied to real-time motion generation of humanoid robots.

Key Words—Humanoid, Human Motion, Physical Consistency, Dynamics

1 はじめに

ヒューマノイドロボットは、人間と共存し、動的に変化する環境の中で様々なタスクを行うことが期待されている。しかし、2脚歩行ロボットは力学的に極めて不安定であり、その運動生成・制御には動力学を考慮することが必要不可欠である。ヒューマノイドの運動生成法としては、あらかじめ決められたパターンのパラメータをZMPなどを考慮して決定する方法[1]や学習により動作を獲得する方法[2]などの研究がある。しかし、いずれも運動の多様性や即応性の点で問題があり、実時間で環境や入力に対応することは難しい。

本論文ではより汎用的な運動生成法として、力学的整合性を満たすように運動を修正する“力学フィルタ”の概念を提案し、その実現法の一例を示す。力学フィルタを用いることにより、比較的小さいデータベースから運動を適宜組み合わせることで多様な運動を生成することができるだけでなく、動力学パラメータの異なる複数のロボットに共通のデータベースを利用することも可能となる。

2 力学フィルタ

力学フィルタとは、ロボットに要求する運動が力学的に実現不可能であるとき、もとの運動に修正を加えることによって力学的整合性を満たす運動に変換する機能である。ある特定のロボットに対して力学的整合性を満たすように生成された運動は、別のロボットに対しては力学的に実現不可能であるかもしれない。また、複数の運動の補間などによってできた運動では力学的整合性が失われている可能性がある。このような場合に力学フィルタを用いて運動を修正し、力学的整合性を満たす運動を生成することができれば、既存の運動データの適用範囲が格段に広がることが期待される。

従来の研究でも力学フィルタの一形態とみなすことのできるものが実現されている[2, 3]。しかし、人間やヒューマノイドのように自由度の大きい系の最適化問題は非常に複雑であり、解を得るまでに長い時間がかかる

ことが多い。実際の環境ではロボットの動作をあらかじめ決めておくことはできないため、力学フィルタは汎用性と高速性を持っていることが望ましい。

本論文で提案する力学フィルタは、筆者ら[4]が提案した拘束運動の方程式を応用したもので、複雑な最適化計算を必要とせず、高速に解を得ることができる。

3 拘束運動の方程式

ヒューマノイドは接触などにより環境から拘束を受けながら運動することが多い。拘束力を考慮した運動方程式は以下のように表される[4]。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A} & -\hat{\mathbf{H}}_C^T & -\mathbf{H}_J^T \\ \mathbf{H}_C & \mathbf{O} & \mathbf{O} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_G \\ \boldsymbol{\tau}_C \\ \boldsymbol{\tau}_J \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mathbf{b} \\ -\dot{\mathbf{H}}_C \dot{\boldsymbol{\theta}}_G \end{pmatrix} \quad (1)$$

$\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{N_G \times N_G}$	: リンク系の慣性行列
$\mathbf{b} \in \mathbf{R}^{N_G}$	: 速度項, 重力項
$\boldsymbol{\theta}_G \in \mathbf{R}^{N_G}$	: リンク系の一般化座標
$\boldsymbol{\tau}_J \in \mathbf{R}^{N_J}$	: 関節トルク
$\boldsymbol{\tau}_C \in \mathbf{R}^{N_C}$	: 拘束力
$\mathbf{H}_J = \partial \boldsymbol{\theta}_J / \partial \boldsymbol{\theta}_G \in \mathbf{R}^{N_J \times N_G}$	
$\mathbf{H}_C = \partial \boldsymbol{\theta}_C / \partial \boldsymbol{\theta}_G \in \mathbf{R}^{N_C \times N_G}$	
$\boldsymbol{\theta}_J \in \mathbf{R}^{N_J}$	: 駆動関節の関節値
$\boldsymbol{\theta}_C \in \mathbf{R}^{N_C}$	: 拘束点の位置・姿勢

文献[4]では関節トルク $\boldsymbol{\tau}_J$ が既知であるとして式(1)を動力学シミュレーションに用いた。ここでは同じ式を、加速度 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_G$ ・関節トルク $\boldsymbol{\tau}_J$ ・拘束力 $\boldsymbol{\tau}_C$ の空間の中で力学的に実現可能な運動の集合を与える式とみなし、これを用いて力学フィルタを実現する。

4 力学フィルタの実現

運動データから得られる加速度 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_G^d$ は式(1)を満たすとは限らない。そこで $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_G = \ddot{\boldsymbol{\theta}}_G^d + \Delta \ddot{\boldsymbol{\theta}}_G$ として式(1)を

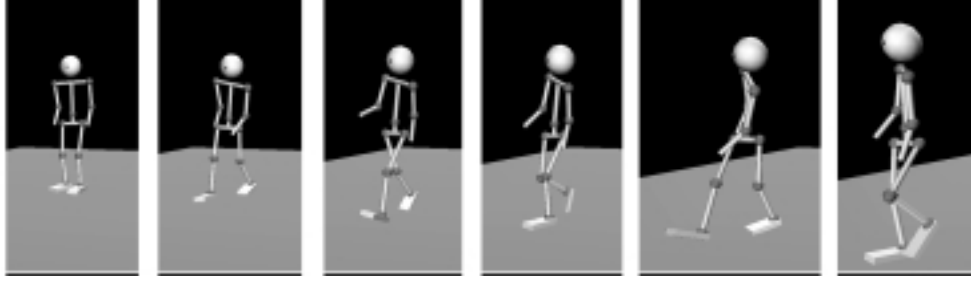


Fig.1: Walking motion on a slope generated by dynamic filter

満たすようにする. $\Delta\ddot{\theta}_G$ は以下の式を解いて求めることができる.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A} & -\hat{\mathbf{H}}_C^T & -\mathbf{H}_J^T \\ \mathbf{H}_C & \mathbf{O} & \mathbf{O} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\ddot{\theta}_G \\ \tau_C \\ \tau_J \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mathbf{A}\ddot{\theta}_G^d - \mathbf{b} \\ -\mathbf{H}_C\ddot{\theta}_G^d - \dot{\mathbf{H}}_C\dot{\theta}_G \end{pmatrix} \quad (2)$$

式 (2) を用いて力学フィルタを実現するための課題は, (A) 目標加速度 $\ddot{\theta}_G^d$ の決め方, および (B) 式 (2) を満たす $\Delta\ddot{\theta}_G, \tau_C, \tau_J$ の最適解を求めることの2つである.

(A) 目標加速度 $\ddot{\theta}_G^d$ の決定 各瞬間で加速度を修正するため, それを積分した結果はもとの運動から離れていく可能性がある. そこでまずベースボディの6自由度を含む全関節に resolved acceleration control[5]で用いられるフィードバック則を適用し, 目標加速度 $\ddot{\theta}_G^d$ とする. 次にグローバルな姿勢を考慮するため, 上半身に制御点を取り, その絶対位置・姿勢をフィードバックするスカイフック・コントロールを適用する. すなわち, 運動データから得られた制御点の位置・姿勢と現在の位置・姿勢から目標加速度を計算し, それを実現するようにベースボディからその点に至るリンク列上の各関節の目標加速度を修正する.

(B) 最適化 最適化は以下の2段階で行う. まず重み付き擬似逆行列を用いて次式の一般解を得る.

$$\begin{pmatrix} \Delta\ddot{\theta}_G^T & \tau_C^T & \tau_J^T \end{pmatrix}^T = \mathbf{W}^\dagger \mathbf{u} + \mathbf{V} \mathbf{y} \quad (3)$$

ここで $\mathbf{W}$ は式 (2) 左辺の係数行列, $\mathbf{u}$ は右辺のベクトル, $\mathbf{V} = \mathbf{E} - \mathbf{W}^\dagger \mathbf{W}$, $\mathbf{y}$ は任意ベクトルである. 重みを変えることで, 加速度の修正量や関節トルクの相対的な大きさを調整することができる. しかし, 最小ノルム解では拘束力や関節トルクも最小化されているため, 全体に怠惰な運動になる傾向がある. そこで, 次に任意ベクトル項を用いて加速度の修正量をさらに小さくする. 式 (3) から加速度の修正量に關係する行を取り出す.

$$\Delta\ddot{\theta}_G = \Delta\ddot{\theta}_G^0 + \mathbf{V}_G \mathbf{y} \quad (4)$$

ここで $\Delta\ddot{\theta}_G^0$ は最小ノルム解における加速度の修正量である. $\Delta\ddot{\theta}_G$ を小さくするため, 次式の誤差を最小化する $\mathbf{y}$ を求めて式 (3) に代入し, 得られた解を修正後の運動とする.

$$\mathbf{V}_G \mathbf{y} = -\Delta\ddot{\theta}_G^0 \quad (5)$$

生成された運動の例を Fig.1に示す. 力学を考慮して運動を修正するため, ある環境でモーションキャプチャしたデータを別の環境に適用し, 新たな運動を得ることもできる. ここでは水平面上で取得した歩行のモーションキャプチャデータを目標運動として, 斜面上での歩行運動の生成を試みた.

5 おわりに

本論文では, ヒューマノイドの運動生成に有効な力学フィルタの概念を提案し, その実現方法の1つを示した. この方法は以下のような特徴を持っている.

- 力学フィルタは基本的にはフィードバック制御のアルゴリズムでリアルタイム性の高いインタラクティブな動作生成に適しており, 任意の運動に適用できる.
- ローカルな最適化を繰り返しているため, 不整合性の大きい運動に対しては安定な運動が生成されるとは限らない.

本研究は (財) 製品科学研究センターからの受託研究「人間協調・共存型ロボットシステムの研究開発」の一環として行われた.

参考文献

- [1] O. Bruneau and F.B. Oueddou: "Dynamic Walk Simulation of Various Biped via Ankle Trajectory", *Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol.1, pp.58-63, 1998.
- [2] 長阪, 稲葉, 井上: "モーションキャプチャデータと遺伝的アルゴリズムを用いた二脚ロボットの跳躍動作の生成", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演論文集, 2P2-78-089, 1999.
- [3] Y. Nakamura and A. DasGupta: "Generation of Physically Consistent Interpolant Motion from Key Frames for Human-like Multibody Systems in Flight", *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1999 (to appear).
- [4] 山根, 中村: "HRP 仮想プラットフォームにおける動力学計算", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演論文集, 2P2-78-095, 1999.
- [5] J.Y.S. Luh, M.W. Walker, and R.P.C. Paul: "Resolved Acceleration Control of Mechanical Manipulators", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 25, no.3, pp.468-474, 1980.