

操作空間慣性逆行列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

Choreography of Humanoids Considering Physical Consistency

Based on Operational Space Inverse Inertia

山根 克(東大) 正 中村 仁彦(東大)

Katsu YAMANE Yoshihiko NAKAMURA

University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033 Japan

Abstract— This paper presents an interactive method to generate physically consistent motions of human figures, which is an extension of the previously published method called “pin-and-drag interface” which computes a motion that satisfies various kinematic constraints. The new method derives physically consistent pin/drag constraints from operational space inverse inertia matrix, which are to be used in combination with other kinematic constraints. The method is capable of generating physically feasible motions from scratch based on interactive inputs from the user.

Key Words: Human Figures, Whole-Body Motions, Physical Consistency, Pin-and-Drag Interface, Operational Space Inertia.

1 はじめに

ヒューマノイド、CG キャラクタなどのヒューマンフィギュアの運動生成法は多数提案されている [1, 2] が、実時間で力学的整合性を満たす多様な運動を生成するのは難しい。ここで力学的整合性を満たすとは、その運動が与えられたモデルの関節トルクと接触力で実現可能であることをいう。著者ら [3] は、様々な運動学的拘束を満たし、かつ特異点に近い場合でも安定な運動を生成する逆運動学計算法を開発し、ピン/ドラッグインタフェースと呼ぶ運動生成に応用した。ユーザは体の任意のリンクを空間中に固定 (ピン止め) し、他の任意のリンクの軌道を指示する (ドラッグ) するだけで自然な運動を生成することができる。この方法の大きな特徴の一つは参照運動を使うことなく直感的に全身運動を生成できる点にある。しかし、動力学を考慮していないため生成された運動を実際にヒューマノイドなどに適用するのは難しい。

本研究では、文献 [3] の方法に動力学的な拘束条件を追加することで、リアルタイム・インタラクティブに力学的整合性を満たす運動を生成する方法の開発を目指す。逆運動学計算により拘束条件を求める文献 [4] の方法に対し、ここでは著者ら [5] の順運動学計算法で使われている操作空間慣性逆行列から動力学的な拘束を導く。これと従来から考慮している関節可動域、目標関節値の運動学的拘束を同時に満たす運動を計算する。直感的な入力から力学的整合性を満たす運動が生成できるので、ヒューマノイドの遠隔操作作用インタフェース、CG アニメーション生成などへの応用が期待される。

2 操作空間慣性逆行列

操作空間慣性逆行列 [6] とは、エンドリンクに作用する力とその結果発生する加速度の関係を表す行列であり、複数のエンドリンクにも拡張されている [7]。文献 [5] の順運動学計算法では $O(N)$ の計算複雑性を実現するために運動方程式を関節ごとに分解するが、ここで同様の物

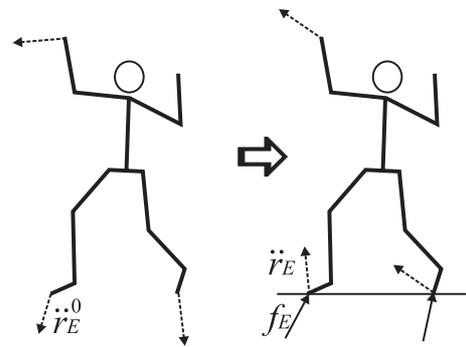


Fig.1: Relationships between the forces and motions of end links

理量を使う。

複数のリンク間の操作空間慣性逆行列を Λ_E とし、これらのリンクの加速度をまとめたベクトルを \ddot{r}_E 、リンクに作用する力を f_E 、 f_E が作用しないときの加速度を \ddot{r}_E^0 とすると、次式が成り立つ。

$$\ddot{r}_E = \Lambda_E f_E + \ddot{r}_E^0 \quad (1)$$

Λ_E の使用例を Fig.1 に示す。両足・右手をエンドリンクとし、 f_E の両足に対応する成分をバネ・ダンパモデルにより計算される接触力、右手に対応する成分をゼロとすれば、接触を考慮する前後の加速度変化を計算することができる。

3 力学的整合性を満たすピン/ドラッグ拘束

\ddot{r}_E^0 はフィギュアが空中に浮遊していると仮定したときのエンドリンクの加速度であり、各関節の運動に依存する。関節加速度を \ddot{q} とすると、この関係は線形項の係数行列 Φ_E と非線形項のベクトル ϕ_E を用いて次式のように表される。

$$\ddot{r}_E^0 = \Phi_E \ddot{q} + \phi_E \quad (2)$$

Φ_E と ϕ_E は関節ごとの漸化式的な計算により求めることができる。

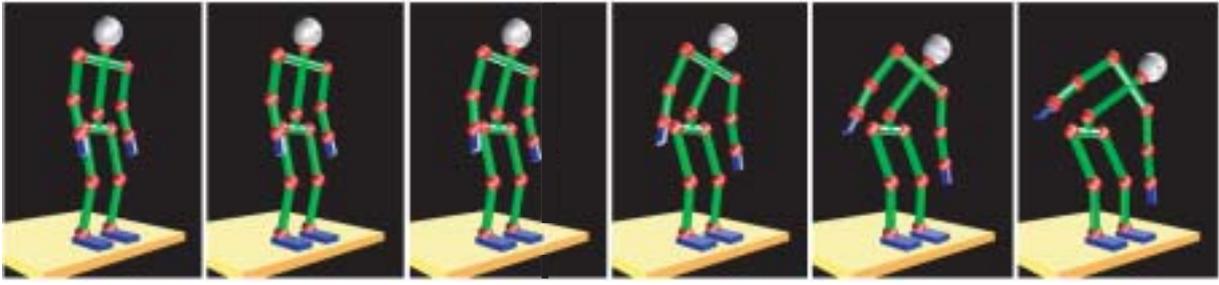


Fig.2: A motion generated by pin-and-drag interface with dynamics

式 (2) を式 (1) に代入すると、次のような関節加速度とエンドリンク加速度の関係が得られる。

$$\Phi_E \ddot{q} = \ddot{r}_E - \Lambda_E f_E - \phi_E \quad (3)$$

ピン・ドラッグリンクをエンドリンクとし、それらの目標位置・速度と現在の位置・速度から目標加速度を計算すると、式 (3) から関節加速度を満たすべき拘束条件が得られる。この式はリンク間の力学的な干渉を考慮しているから、力学的整合性を満たすピン/ドラッグ拘束と考えることができる。参考までに、運動学のみを考慮したときの拘束条件は次式ようになる。

$$-J_E \ddot{q} = \ddot{r}_E - \dot{J}_E \dot{q} \quad (4)$$

ここで J_E はエンドリンク位置の関節角に関するヤコビアンである。

その他の拘束条件 (関節可動域, 目標関節値) はすべて関節角の目標加速度として表される。文献 [3] では、拘束条件を 2 段階の優先順位に分け、上位の優先順位を与えられた拘束を満たす運動の中から下位の拘束条件をできるだけ満たす拘束条件を探す。力学を考慮する場合は力学的整合性が上位の優先順位となるので、式 (3) の一般解の中から他の拘束条件をできるだけ満たすものを探ることになる。

4 生成例

本論文で述べた計算法を用いて生成された運動の例を Fig.2 に示す。フィギュアが床に両足で直立した状態から左手を下方向へドラッグした。接触力は文献 [8] の方法に従って計算した。その結果、腰を右方向へずらしつつ左手を下げる運動が生成された。文献 [3] の方法と同様な操作をしても腰を動かす運動にはならない。本質的にはバネ・ダンパモデルに基づく動力学シミュレーションであるため、サンプリングタイムを 1–2[ms] 程度にする必要がある。計算時間は実時間の 10 倍から 20 倍程度かかる。また、時間的にローカルな最適化を行っているため、一度バランスを崩すと復帰できないという問題点がある。これを解決するためには何らかのコントローラを追加する必要があると考えられる。

5 おわりに

ピン/ドラッグの直感的なインタフェースでリアルタイム・インタラクティブに力学的整合性を満たす運動を生成する方法を提案した。この方法は、操作空間慣性逆行列を用いて力学的整合性を満たすピン拘束を求め、これと関節可動域、目標関節値などの運動学的拘束条件を満たす運動を計算する。計算時間を短縮してリアルタイムの運動生成を実現すること、コントローラの拡充により適用範囲を広げることが今後の課題である。

謝辞 本研究は科学技術振興事業団の戦略的基礎研究推進事業「自律的行動単位の力学的結合による脳型情報処理機械の開発」の支援を受けた。また本研究を行ったとき第一著者は日本学術振興会の特別研究員であった。

参考文献

- [1] K. Nishiwaki, T. Sugihara, S. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue: "Online Mixture and Connection of Basic Motions for Humanoid Walking Control by Footprint Specification," *Proc. IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation*, pp.4110–4115, 2001.
- [2] W.L. Wooten and J.K. Hodgins: "Simulating Leaping, Tumbling, Landing, and Balancing Humans," *Proc. IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation*, pp.656–662, 2000.
- [3] 山根, 中村: "ヒューマンフィギュアの全身運動生成のための協応構造化インタフェース," 日本ロボット学会誌, vol.20, no.3, 2002 (掲載予定).
- [4] 丹下, 山根, 中村: "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," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集, 2002 (掲載予定).
- [5] 山根, 中村: "O(logn) 並列順動力学計算法とそのヒューマノイドシミュレータへの応用," 第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1A14, 2001.
- [6] K.W. Lilly and D.E. Orin: "Efficient O(n) Recursive Computation of the Operational Space Inertia Matrix," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, vol.23, no.5, pp.1384–1391, 1993.
- [7] K.S. Chang and O. Khatib: "Efficient Algorithm for Extended Operational Space Inertia Matrix," *Proc. IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation*, pp.350–355, 1999.
- [8] 山根, 中村: "O(N) 順動力学計算法と陰積分による衝突・接触の高速シミュレーション," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集, 2002 (掲載予定).