

論文の内容の要旨

論文題目 Realtime Interactive Dynamics Computation of
Structure-Varying Kinematic Chains and Its Application
to Motion Generation of Human Figures
(和訳 構造可変リンク系のインタラクティブな実時間動力
学計算とそのヒューマンフィギュアの運動生成への応用)

氏 名 山 根 克

1. はじめに

ヒューマノイド研究の進展, 人間のキャラクタを含むアニメーションのコンピュータグラフィクス(CG)化の進行などを背景に, 人間をリンク機構としてモデル化したヒューマンフィギュアの運動計算・運動生成を効率良く行うことが求められている。しかし, ヒューマンフィギュアは従来から盛んに研究されてきたロボットマニピュレータとは大きく異なった性質を持っているため, 従来の手法をそのまま適用することはできない。ヒューマンフィギュア特有の性質として以下のようなものがあげられる。

- 非常に多くの自由度を持ち, 動力学・運動学の計算コストが大きい。また, 運動生成においては考慮すべきパラメータが多くなる。
- 慣性座標系に固定されたリンクがないため, 不安定で制御が困難である。
- 環境との衝突や接触が頻繁に発生するだけでなく, 運動によってはそれらの現象を積極的に活用している。
- リンクの結合状態が時間変化する。本論文ではこのようなリンク系を構造可変リンク系と呼ぶ。
- ヒューマノイド・CGへの応用ではインタラクティブ性が求められる。

本研究では, このような性質を持つヒューマンフィギュアの動力学計算・運動生成を高速

に行うための計算法を確立することを目的として、各種のアルゴリズムを開発・実装した。

動力学計算においては、特に構造可変リンク系の動力学計算を高速・シームレスに行うことを目指した。また運動生成においては、高速な動力学・運動学計算を利用してインタラクティブな操作を可能とすることを主な目標とした。以下、それぞれの成果をまとめる。

2. ヒューマンフィギュアの動力学計算

リンク系の動力学計算法の研究はロボットマニピュレータを対象として盛んに行われ、高速なアルゴリズムが多数知られているが、ヒューマンフィギュアのようなリンク系を扱うには必ずしも適していない。本研究では、一般の構造可変リンク系の動力学計算をシームレスに行う計算法およびリンク機構表現法を開発した。このリンク機構表現法は、任意の開リンク・閉リンク機構を表現できるだけでなく、構造を変化させるのに必要な処理が高速であるため、頻繁に構造が変化する場合でもオーバーヘッドが小さい。開発した動力学計算法はリンク構造の内部表現を読み取って任意の開リンク・閉リンク機構の運動方程式をオンラインで構成し、解くことができる。

これを用いたシミュレーションの例を図 1 に示す。この例では、ヒューマンフィギュアが初め両手で鉄棒をつかんでいるが、時間の経過とともに右手・左手の順に手を放していく。従来このようなシミュレーションを行うためには、3種類のモデルデータをあらかじめ用意しておき、手を放すたびに切り替える必要があった。しかし、ヒューマンフィギュアのように複雑な運動を行うリンク系では、どのようなモデルが必要になるかを予測するのは難しい。本研究で提案した手法を用いると、基本となるヒューマンフィギュアのモデルさえ用意しておけば、環境や自分自身との結合状態がどのように変化しても、対応する内部データを容易に生成することができる。

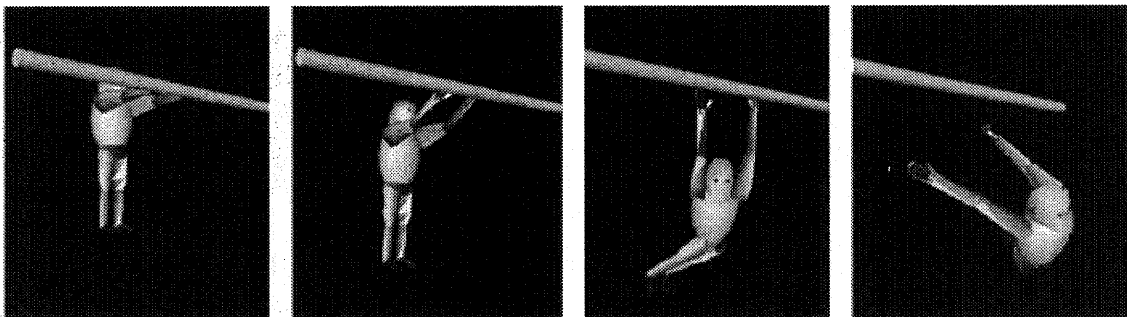


図 1 構造可変リンク系のシミュレーション例

多自由度のリンク系の動力学計算を行う際には、計算量のオーダも問題になる。前節で述べた動力学計算法は、リンク系の自由度数が N のとき $O(N^3)$ の計算量が必要であるため、

多数のヒューマンフィギュアがある系などでは計算時間が非常に長くなると予想される。この問題点を解決するため、計算量が $O(N)$ となるようにアルゴリズムを改良した。このアルゴリズムは、関節の処理順序を変更するだけで任意の数のプロセス上の並列計算に最適化することができるという特徴も持つ。特に、 N 自由度のリンク系に対して $O(N)$ 個のプロセスを使ったときの計算時間は $O(\log N)$ となる。

この計算法によるシミュレーションの例を図 2 に示す。衝突・接触を含む 40 自由度のヒューマンフィギュアの動力学シミュレーション、環境との干渉チェック、歩行コントローラの計算を合わせた全体の計算時間は、通常の PC (PentiumIII 1GHz) 上で実時間の 5-6 倍程度であり、ほぼ実時間で動力学シミュレーションが可能である。

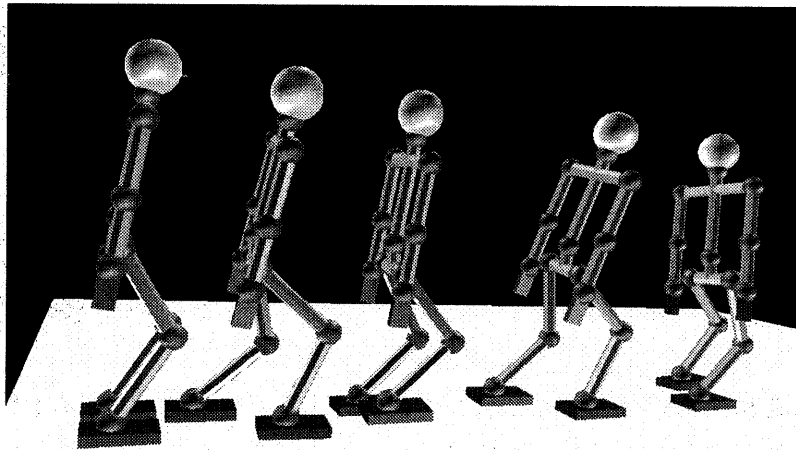


図 2 高速動力学計算による歩行のシミュレーションの例

3. ヒューマンフィギュアの運動生成

ヒューマンフィギュアの運動生成は、考慮すべきパラメータの多さ、機構の不安定さなどから、オフラインで行われることがほとんどであった。しかし、ヒューマンフィギュアの応用分野を考慮すると、運動生成中に任意に入力を与えることのできるインタラクティブ性が不可欠である。本研究では、前節で述べた高速な動力学計算法を応用して、インタラクティブ性を持った運動生成法を開発した。

ヒューマンフィギュアの人間らしい運動を生成する方法として考えられるのがモーションキャプチャデータをもとにする方法である。このとき、被験者とヒューマンフィギュアの力学特性が異なるために、キャプチャされたデータが対象とするヒューマンフィギュアに対して必ずしも力学的に実現可能であるとは限らない。また、実際にキャプチャされた運動だけでなく、それらを組み合わせて多様な運動を生成する必要がある。

そこで本研究では、与えられた参照運動を対象とするヒューマンフィギュアに対して力

学的に実現可能な運動に変換するための“力学フィルタ”の概念を提案し、プロトタイプを実装した。力学フィルタは、現在の状態と参照運動をもとにコントローラが計算した目標運動を運動方程式に基づく最適化により修正し、力学的に正しい運動を生成する。その特徴は、参照運動全体の情報を使わないため、参照運動をオンラインで随時入力できることである。これにより、あらかじめ決められた運動ではなく、ユーザからの入力に応じて生成された運動を力学的に実現可能な運動に変換でき、インタラクティブな運動生成が可能となる。

図 3 に力学フィルタにより生成された運動の例を示す。直進歩行運動をキャプチャしたのち、腰の軌道のみを右へ 30 度旋回するように変更し、力学フィルタに入力した結果出力された運動である。この例では腰の軌道変更をオフラインで行ったが、ジョイスティックなどのからの入力によりインタラクティブに軌道を決定し、力学フィルタに入力することも可能である。しかし、現状では簡単なコントローラを使っているため、さまざまな運動に適用するためにはパラメータを高精度に調整する必要がある。

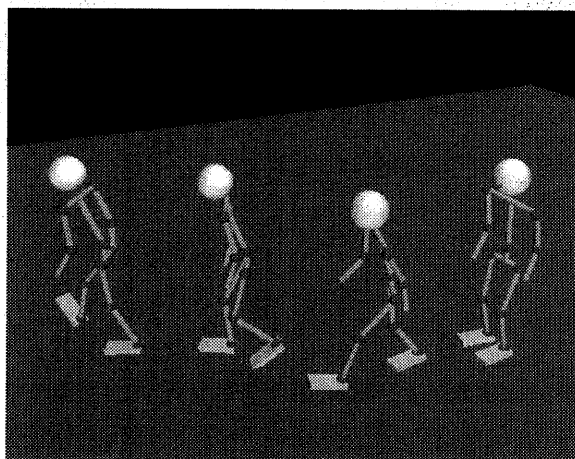


図 3 力学フィルタにより生成された運動の例

モーションキャプチャは高価な設備を必要とし、必要なデータを手軽に取得できるわけではない。また、高度な技術を必要とする運動や、人間以外の生物の運動をキャプチャするのは難しい。本研究では、運動学的な拘束条件を考慮することにより、ピン/ドラッグインタフェースと呼ぶ直感的なインタフェースでヒューマンフィギュアの全身運動を生成できる方法を開発した。このインタフェースのイメージを図 4 に示す。特定のリンクをピン止めする拘束のほか、関節可動域、目標関節値の拘束条件が考慮された運動をリアルタイムで生成することができる。また、特異姿勢をとったり、拘束条件間に矛盾が生じたりした場合でも極端に高速な運動を出力しない工夫がなされている。

生成された運動の例を図 5 に示す。この例では、両つま先・かかと、左手にピンを設定

し、右手をドラッグすることにより、床からものを拾うような運動を生成している。このように、モーションキャプチャデータを使うことなく簡単な操作で全身の運動を生成できる。また、関節可動域を考慮することにより、ある程度人間らしい運動が実現されている。

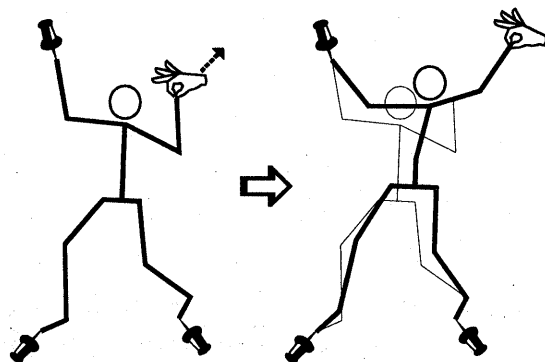


図 4 ピン/ドラッグインタフェースのイメージ

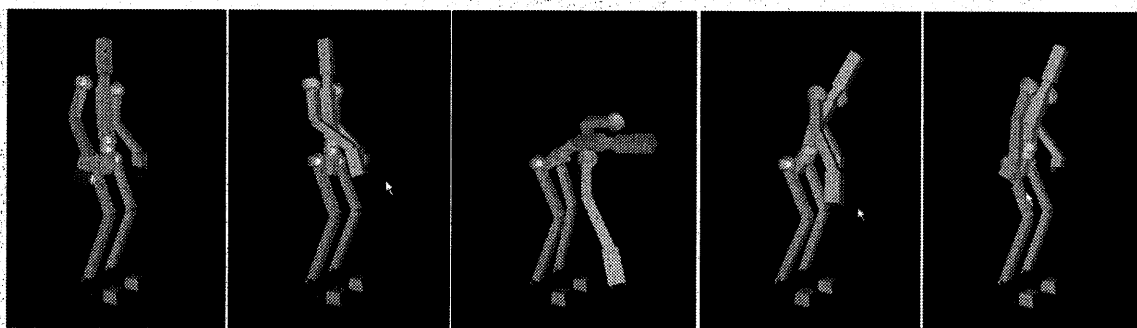


図 5 ピン/ドラッグインタフェースにより生成された運動の例

4. おわりに

動力学・運動学の基礎的な計算法の効率化は、さまざまなアプリケーションにおける機構設計、制御アルゴリズムの開発、運動生成などの効率を左右するため、本研究で開発した高速な計算法はヒューマノイド・CGアニメーションの両分野における開発ツールとして有用である。実際、本論文の後半ではこれらの動力学計算法に基づくヒューマンフィギュアの運動生成法を提案している。

ヒューマンフィギュアの全身運動の生成に関する研究をインタラクティブ性と力学的な実現性の両方の観点から扱った研究は少ない。本研究で提案した力学フィルタの概念は、コントローラの作成法に課題が残っているが、インタラクティブに実現可能な運動を生成するための枠組みを提案したという意味で重要である。