

# キャラクターとの物理的なインタラクションのための剛体モデルと 多次元キーフレームアニメーションの連動による動作生成法

A Motion Generation Method for Physical Interaction with Characters with Multi Dimensional Key Frame Animation Linked to a Rigid Body Model

三武裕玄<sup>1)</sup>, 青木孝文<sup>1)</sup>, 浅野一行<sup>2)</sup>, 遠山喬<sup>2)</sup>, 長谷川晶一<sup>3)4)</sup>, 佐藤誠<sup>1)</sup>

Hironori MITAKE, Takafumi AOKI, Kazuyuki ASANO, Takashi TOYAMA, Shoichi HASEGAWA and Makoto SATO

1) 東京工業大学 精密工学研究所

(〒 226-8503 横浜市緑区長津田町 4259-R2-13, {mitake, aoki, msato}@hi.pi.titech.ac.jp)

2) 東京工業大学 工学部

(〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

3) 電気通信大学 知能機械工学科

(〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, hase@hi.mce.uec.ac.jp)

4) 科学技術振興機構 さきがけ 研究員

**Abstract :** Various forms of art and entertainment involve many different characters, and advances in human interfaces have necessitated physical interactions in order to develop an improved sense of reality. In this paper we propose a method for generating the motions of characters using multidimensional keyframe animation in parallel with real-time physical simulation. The method generates characters capable of physical interaction, and also allows animators to use traditional methods for designing character motion. We have confirmed its effectiveness experimentally.

**Key Words:** *Motion Generation, Physically Realistic Interaction, Dynamics Simulation*

## 1. 背景と目的

バーチャル世界に登場するキャラクターは、インタラクションや感情移入の対象となり、魅力的なコンテンツを制作する上で重要な要素である。インタラクションの対象としてリアリティが高く、感情移入しやすいキャラクターを実現することが、魅力的な体験を提供するために重要になっている。

近年のヒューマンインタフェースの進歩により、現実世界と同様に身体を使ってバーチャル世界と直接的・物理的な(=フィジカルな)インタラクションができるようになったため、身体を使った物理的なインタラクションに対して、キャラクターが力学に従った反応動作をすることが、キャラクターのリアリティを高めるために必要となっている。

また、体験者がキャラクターに感情移入するためには、キャラクターの感情や意図を体験者に伝える必要がある。キャラクターモーシオンのデザインは、キャラクターの個性とキャラクターが置かれている状況・シナリオやストーリーの進行にあった動作を作ることが求められるが、デザイナーがキャラクター毎に膨大なモーシオンを制作しなければならず、少ないモーシオンから多様な動作を生み出すなどすることで、コ

ンテンツの生産性を高めることが求められている。

本研究では、魅力的なバーチャル世界を構築するために、リアリティのあるフィジカルなインタラクションが可能で、感情移入に必要なキャラクターの個性と状況に応じた動作のデザインが可能なキャラクターを、低い制作コストで実現することを目的とする。

以降の章では、従来までの関連研究を述べ、本研究の提案手法を説明し、評価実験を通し本手法の有効性を評価する。

## 2. 関連研究

フィジカルなインタラクションが可能なキャラクターについては、これまでも様々な研究が行われている。

モーシオンデータを用いる手法では、キーフレームアニメーションやモーシオンキャプチャ等であらかじめ準備しておいたモーシオンデータから、状況にあわせて、切り替え再生 [1]・加工 [2][3]・最適化 [4] などを行うことで動作を生成する。しかし、大量のモーシオンデータを準備する必要がある、物理法則から逸脱した動作が生成されることがある、最適化をリアルタイム動作させることが難しい、など

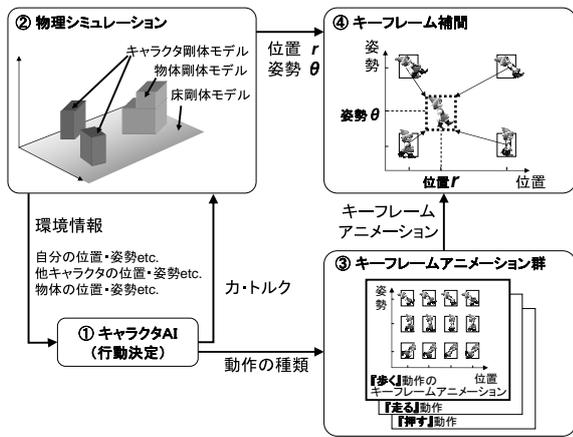


図 1: 提案手法の全体像

の問題がある。

一方、物理シミュレータを用いて実行時に状況に応じて動作を生成する手法 [5] [6] は、作品で求められる動作を行わせるための制御モデルの構築と多数のパラメータの調整が容易ではない。また、従来のキャラクターの動作のデザイン手法とは大きく異なっており、デザイナーに新たな知識や技術の習得を要求してしまう問題もある。

モーションデータに基づいて多関節剛体モデルを制御する [7][8] など、モーションデータと物理シミュレーションとを組み合わせた手法も提案されているが、多関節剛体モデルのシミュレーションを用いるため、やはり多数のパラメータの調整が容易でない。一方、ゲームキャラクターには、重心運動と当たり判定といった簡単な物理シミュレーションに、モーションデータを連動させるものがあるが、表現上重要な動作であるキャラクターの回転動作をシミュレーションしていないため、動作の多様性に限界がある。

### 3. 提案手法

提案手法では、キャラクターをひとつの剛体としたシミュレーションモデルを用い、リアルタイム物理シミュレータを用いて力学にしたがった多様な全身動作を生成し、フィジカルなインタラクションを実現する。さらに、シミュレーションされた剛体にキーフレームアニメーションを連動させることで、多様な動作の生成を行う。

提案手法の全体像を図 1 に示す。①キャラクター AI は、キャラクターを表す剛体に加える力・トルクと行動の種類を決定する。②物理シミュレーションにより剛体の運動を剛体に加わる力・トルクに基づいて計算する。③行動の種類にしたがって、使用するキーフレームアニメーションの種類を選択する。④剛体のシミュレーション結果にしたがって、キーフレームの補間を行い、キャラクターのポーズを得る。

#### 3.1 キャラクターのシミュレーションモデル

物理シミュレータ内では、キャラクターは、関節等を持たないひとつの剛体として表現し、キャラクターの全身の移動・回転を計算する。シミュレーションモデルをひとつの剛体

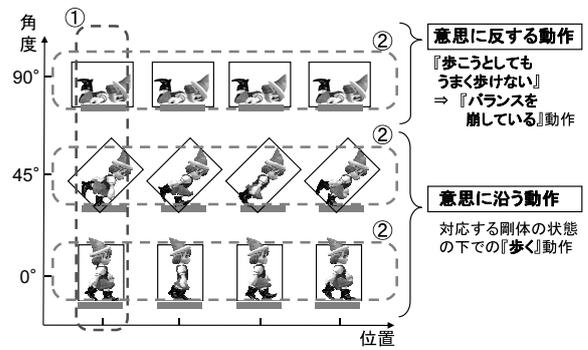


図 2: 提案手法で用いるキーフレームアニメーション

にすることで制御が簡単になるため、高度な制御の知識がなくても動作をデザインする事ができる。

剛体モデルの形状は、所望の挙動が得られるようにあらかじめ調整しておく。キャラクターの形状と剛体モデルの形状が大きく異なると、キャラクターが他の物体に侵入したり隙間が空いたりしてしまうので、できるだけ近い形状にする。

また、剛体の形状はキャラクターの挙動を簡単に調整するためにも利用できる。例えば、底面の形状を調節することで回転の支点や転倒しやすさを調節するなど、簡単な動作であれば、多数のパラメータを持つ制御器を用いるよりも直観的に同様の動作を実現できる。

剛体の質量・重心・慣性テンソルは、作品におけるキャラクターの設定にあわせ、目的の動作が得られるよう調整する。

#### 3.2 キーフレームアニメーション

提案手法では、キーフレームアニメーションを用いてキャラクターの詳細な動作を表現する。キーフレームアニメーションはキャラクターの動作を記述する手法として従来から広く用いられているため、キャラクター動作のデザイナーが持つスキルをそのまま活かせる。

剛体の状態と連動してフレームを進める事ができるように、多次元空間にキーフレームを配置したキーフレームアニメーション (図 2) を用いる。本稿では、これをキーフレームセット、キーフレームを配置する多次元空間をキーフレーム空間と呼ぶ。

剛体の状態を表すベクトル空間から、キーフレーム空間上の一点へ変換する関数を定義する。物理シミュレーションによって剛体の状態が決定した後、変換関数によってキーフレーム空間上の一点を決定し、キーフレームの線形補間によって対応するキャラクターのポーズを得ることで、剛体に連動するキーフレームアニメーションが実現する。

さらに、キーフレームセットを複数用意し、切り替える事で、キャラクターに様々な動作を行わせる。また、キャラクターごとに異なるキーフレームセットを用意すれば、キャラクターの動作に個性を与える事ができる。

##### 3.2.1 キャラクターの動作とキーフレームセット

提案手法ではキャラクターの動作を、「意志に沿う動作 (歩く・走る・物を押すなど)」と、意志に沿う動作が物理的制

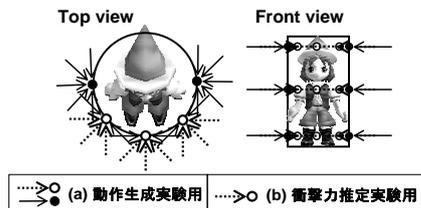


図 3: キャラクタに加える力

約によって実行できないときに現れる「意志に反する動作(転ぶなど)」に分けて考える。

提案手法では、キャラクターに行わせたい「意志に沿う動作」の種類の数だけキーフレームセットを用意する必要がある。剛体の様々な状態に対応するキーフレームを用意しなければならないため、転倒状態での歩行など「意志に沿う動作」の遂行が不可能な状態でも動作を考える必要が出て来る。そのような場合には、該当する状態でどのような「意志に反した動作」が出現するかを考え、それを表現するキーフレームを用意する。例えば図 2 では、90 度の姿勢では、歩く動作は実現不可能なので、「歩く」という意志に反して、床に伏している。剛体が前方に転倒する場合には、図 2 左下、中央、右上の順にキーフレームが用いられ、補間されてアニメーションが生成されることになる。

#### 4. 評価

提案手法の有効性を確かめるために評価を行った。

##### 4.1 実験に使用したキャラクタ

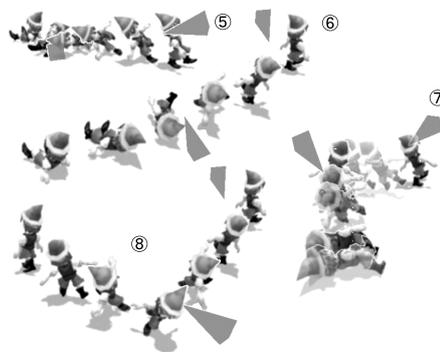
提案手法によるキャラクタ動作生成システムを実装した。物理シミュレータとして Springhead[9] を用い、歩行しようとする動作(一次元キーフレーム 7 種類に相当、総キーフレーム数 37) および転倒状態から起き上がろうとする動作(一次元キーフレーム 2 種類に相当、総キーフレーム数 14) の 2 種類のキーフレームセットを用意した。ラップトップ PC(Intel(R) CoreDuo プロセッサ T2300 搭載)、Windows XP 上で、30fps の更新周期でキャラクタ動作生成を実行した。詳しくは [10] を、また、提案手法を用いた作品“Kobito-Virtual Brownies-”については [11] を参照されたい。

##### 4.2 動作生成実験

キャラクタとのフィジカルなインタラクションを想定してキャラクタに様々な方向から力を加え、その際に生成される動作を記録する。

**実験条件** 直立・静止状態のキャラクタに対し、図 3(a) の作用点  $3 \times 5$  通り・力の方向 5 通り、及び力の強さが強弱 2 通りの、計  $3 \times 5 \times 5 \times 2$  通りの異なる力を、1 回、もしくは間隔をあけて 2 回加え、その際に生成される動作を、キャラクタが再び静止するまで記録する。

**結果** 生成された動作を、類似するパターンごとに分類した場合、力を 1 回加えた場合で 17 通り、2 回加えた場合で



⑤⑥横転ののち 2 回目の力で回転 ⑦バランスを崩したのち 2 回目の力で別方向に転倒 ⑧バランスを崩したのち 2 回目の力で回転しつつ姿勢復帰

図 4: 提案手法によって生成された動作

表 1: 衝撃力推定実験 結果

被験者	力の強さ	作用点横位置	作用点縦位置	力の方向
A	18	9 <sub>(19)</sub>	12 <sub>(20)</sub>	12 <sub>(18)</sub>
B	20	20 <sub>(20)</sub>	13 <sub>(20)</sub>	20 <sub>(20)</sub>
C	17	9 <sub>(20)</sub>	7 <sub>(18)</sub>	11 <sub>(14)</sub>
D	15	15 <sub>(20)</sub>	9 <sub>(19)</sub>	17 <sub>(20)</sub>

数字は試行 20 回中の正答数(カッコ内は選択肢一つ分の誤差を許容した場合の正答数)

更に 13 通りの異なる動作に分類できた。同じパターンに分類した動作でも、実際には移動量や傾きの大きさなどが少しずつ異なっている。図 4 に、2 回力を加えた場合に生成された動作の中でも特徴的なものを示す。

##### 4.3 衝撃力推定実験

**実験条件** 直立・静止状態のキャラクタに対し、図 3(b) の作用点  $3 \times 3$  通り・力の方向 3 通り、及び力の強さが強弱 2 通りの計  $3 \times 3 \times 3 \times 2$  通りの異なる力からランダムに選択された力を 1 回加え、その際に生成される動作を被験者に見せる。被験者は、動きを様々な向きから繰り返し見てキャラクタに加えられた力を  $3 \times 3 \times 3 \times 2$  通りの選択肢の中から推定し、回答する。これを 20 回行う。

**結果** 結果を表 1 に示す。力の強さ・作用点の横方向の位置・力の方向について、いずれの被験者もほぼ半分以上の試行において正しく推定できた。選択肢一つ分の誤差を許容した場合、作用点の縦位置・横位置についてはいずれの被験者も 9 割以上の試行において正しく推定できた。

また、実験後、被験者の 1 名からキャラクタの動作について「丸太のような(重い)ものでつついたイメージ」との感想を得た。

##### 4.4 キーフレームセット製作時間の見積もり

4.2 節 動作生成実験で生成された全 30 種類の動作の制作時間について、動作生成実験で使用したキーフレームアニメーションの製作者の予想によると、mikoto[12] を使用し

てキーフレームアニメーションを製作したとして、提案手法を使用する場合1動作あたり15分×9動作、一方、提案手法を使用せず30通りの動作を作成する場合、提案手法の場合に比べ個々の動作が長く複雑である(=キーフレームが多い)ため1動作あたり30分×30動作とのことであった。

## 5. 考察

### 5.1 実験結果について

4.2節 動作生成実験の結果から、提案手法が多様な動作を生成できることがわかる。また、力を2回加えた場合、2回目の力を加えられた時点のポーズから連続的に次の動作へ遷移している。このように任意の状態で任意の力の入力に対応できることから、フィジカルなインタラクションを実現できることがわかる。

4.3節 衝撃力推定実験の結果、各被験者とも動作の原因となった力を大まかに推定できたこと、及び、キャラクターに加えた力の原因をイメージできた被験者が居たことから、提案手法によるキャラクター動作は被験者にとって力学的に正しく認識されたと考えられる。

また、製作コストの点から考えると、9種類のキーフレームアニメーションから30通り以上の動作を得ることができ、製作すべきキーフレームアニメーション数の大幅な削減が実現したといえる。

### 5.2 提案手法の適用可能範囲と今後の展望

提案手法は、全身を使ったフィジカルな反応動作の生成に特に有効である。例えば、3Dで表現されたフィールドを自在に動き回るようなキャラクターに用いると、全身を移動させる動作(歩く・走る・飛び跳ねるなど)、全身で力を発生させたり全身で力を受ける動作(体当たり・衝突・物を押すなど)を動力的にリアルなものにすることができる。

今後の展望として、実現したいインタラクションに必要なとなる最低限の部分のみ多関節剛体モデルを用い、形状・重心位置・慣性テンソルの変化を重視した動作を行うキャラクターや、より精密な衝突判定を実現することが挙げられる。この手法は、剛体の数の増加に従って、物理シミュレーションのみによるキャラクター動作生成に近づく。将来、技術の進展等により製作コストや制御の困難さの問題が緩和されれば、徐々に剛体の数を増やす事でより多様なインタラクションが可能なキャラクターを実現できると考えられる。

## 6. まとめ

本論文では、フィジカルなインタラクションが可能で、動作のデザインが可能なキャラクターを、低い製作コストで実現する方法として、物理シミュレーションによる剛体運動シミュレーションに多次元キーフレームアニメーションを連動させる動作生成手法を提案した。また、評価実験等により提案手法の有効性を確認した。

### 参考文献

[1] L. Kovar, M. Gleicher, and F. Pighin. Motion graphs. In *SIGGRAPH '02: Proc. of the 29th annual*

*conf. on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 473–482, New York, NY, USA, 2002. ACM Press.

- [2] M. Gleicher. Retargetting motion to new characters. In *SIGGRAPH '98: Proc. of the 25th annual conf. on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 33–42, New York, NY, USA, 1998. ACM Press.
- [3] A. Bruderlin and L. Williams. Motion signal processing. In *SIGGRAPH '95: Proc. of the 22nd annual conf. on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 97–104, New York, NY, USA, 1995. ACM Press.
- [4] C. Rose, B. Guenter, B. Bodenheimer, and M. F. Cohen. Efficient generation of motion transitions using spacetime constraints. In *SIGGRAPH '96: Proc. of the 23rd annual conf. on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 147–154, New York, NY, USA, 1996. ACM Press.
- [5] S. Hasegawa, I. Toshiaki, and N. Hashimoto. Human scale haptic interaction with a reactive virtual human in a realtime physics simulator. In *ACE '05: Proc. of the 2005 ACM SIGCHI Intl. Conf. on Advances in computer entertainment technology*, pp. 149–155, New York, NY, USA, 2005. ACM Press.
- [6] J. K. Hodgins, W. L. Wooten, D. C. Brogan, and J. F. O'Brien. Animating human athletics. In *SIGGRAPH '95: Proc. of the 22nd annual conf. on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 71–78, New York, NY, USA, 1995. ACM Press.
- [7] M. Oshita and A. Makinouchi. A Dynamic Motion Control Technique for Human-like Articulated Figures. *Computer Graphics Forum*, 20(3):192–203, 2001.
- [8] V. B. Zordan and J. K. Hodgins. Tracking and modifying upper-body human motion data with dynamic simulation. In *Proc. of Eurographics Workshop on Animation and Simulation '99*, 1999.
- [9] S. Hasegawa and M. Sato. Real-time Rigid Body Simulation for Haptic Interactions Based on Contact Volume of Polygonal Objects. *Computer Graphics Forum*, 23(3):529–538, 2004. <http://springhead.info/>.
- [10] 三武, 青木, 浅野, 遠山, 長谷川, 佐藤. キャラクターとの物理的なインタラクションのための剛体モデルと多次元キーフレームアニメーションの連動による動作生成法. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 12(3), 2007.
- [11] 青木, 三武, 浅野, 栗山, 遠山, 長谷川, 佐藤. 実世界で存在感を持つバーチャルクリチャーの実現 kobito-virtualbrownies-. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 11(2):313–322, 2006.
- [12] ポーズ&モーショ編集ツール mikoto. <http://sasakingdom.com/mikoto.html>.