

キャラクタ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

三武 裕玄^{*1} 青木 孝文^{*1} 浅野 一行^{*2} 遠山 喬^{*2}
長谷川 晶一^{*3} 佐藤 誠^{*1}

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

Hironori Mitake^{*1}, Takafumi Aoki^{*1}, Kazuyuki Asano^{*2}, Takashi Toyama^{*2},
Shoichi Hasegawa^{*3}, and Makoto Sato^{*1}

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 applied the method to a project entitled “Kobito -Virtual Brownies-” and confirmed its effectiveness experimentally.

Keywords : Character, Motion Generation, Physically Realistic Interaction, Dynamics Simulation, Keyframe Animation

1 背景と目的

近年のヒューマンインタフェース、コンピュータグラフィックスの進歩により、ゲームやエンタテインメント、メディアアートなどに用いられるバーチャル世界を取り巻く環境は大きく変化している。力覚インタフェースやモーションセンサなどのヒューマンインタフェースや、コンピュータグラフィックス、3次元映像、高解像度映像などの映像提示技術は、体験者とバーチャル世界の間を行き交う情報の量を飛躍的に増大させた。また、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、物理的なインタラクションをすること(=フィジカルなインタラクションをすること)ができるようになった([4][9])。

この点において、体験者がバーチャル世界に対しリアリティを感じたり感情移入したりすることが容易になったと言える。そしてその結果、体験者に魅力的な

体験を提供するには、バーチャル世界自体の魅力を高めることがより重要になってきている。バーチャル世界には、物体、キャラクタ(動物、人物など)といった構成要素があるが、中でもキャラクタは、体験者の注目を集め、インタラクションの対象となり、体験者の感情移入や情動の対象にもなるもので、魅力的なコンテンツを制作する上で重要な要素である。このため、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。

前述したようにヒューマンインタフェースの進歩により、バーチャル世界とフィジカルなインタラクションが行われるようになった。このため、体を使った物理的なインタラクションに対して、キャラクタが力学に従った反応動作をすることが、キャラクタのリアリティを高めるために必要となっている。現実世界は力学に従うので、バーチャル世界も力学に従うようにすることで、体験者は現実世界でのスキルや経験をバーチャル世界で生かせ、バーチャル世界の振る舞いを容易に理解でき、操作や予測が容易になる。例えば、キャラクタが物を押す場合、物の重さによって押し方や移動量に違いがあれば、体験者は物の重さをキャラクタの動きから推測することができる。

一方、体験者がキャラクタに感情移入するためには、

^{*1}東京工業大学 精密工学研究所

^{*2}東京工業大学 工学部

^{*3}電気通信大学 知能機械工学科, 科学技術振興機構 さきがけ 研究員

^{*1}Tokyo Institute of Technology Precision and Intelligence Laboratory

^{*2}Tokyo Institute of Technology

^{*3}The University of Electro-Communications Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, Japan Science and Technology Agency

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。ゲームでは、吹き出しや記号で感情を表現することもあるが、演劇や映画の俳優のように動作で表現することにより、より多様な感情や意図の表現が可能になり、体験者の感情移入を助けることができる。キャラクターモーションのデザイナーはこのようなキャラクターを作り出すため、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にあった動作を作ることが求められる。また、シナリオやストーリーを進行させるため、特定の姿勢や動作をすることが求められることもある。

以上のように、インタラクションの対象としてリアリティが高く、感情移入のしやすい魅力的なキャラクターを実現するには、デザイナーがキャラクター毎に膨大なモーションを制作しなければならない。しかし、これらすべてを人の手によって制作するのでは制作コストが非常に高くなってしまう。そのため、少ないモーショ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。また、従来のデザイナーのスキルにあわせて、制御やプログラムなどの専門知識を要求するのは極力さなければならない。

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、これまでに様々な研究が行われている。

[12] では、モーションデータをあらかじめ準備しておき、状況に応じて再生するモーションを切替える手法が用いられている。モーションデータは、キーフレームアニメーションや、モーションキャプチャ等により用意される。この手法は、現在でもゲーム等のキャラクター動作に多く用いられているが、インタラクションにおいて起こりうる状況を全て想定してあらかじめモーションを準備しておく必要があるため、キャラクターがバーチャル世界で行える行動が増えたり、より入力のバリエーションの多いインターフェースを用いたりするなど、想定すべき状況が増大するにしたがって、準備しておくべきモーションデータの量が急増してしまい、製作コストの増大を招くという問題がある。

これに対し、モーションリターゲッティング [3] やモーションブレンディング [2] といった手法は、あら

かじめ準備したモーションデータを実行時に加工することによって、状況にあった動作に作り変えることを可能にした。これにより、想定すべき状況をすべて見越したモーションデータを準備しなくても、基本的な動作に対して準備しておくだけで様々な状況に対応できるキャラクターを実現できるようになった。しかし、これらの加工は物理法則に則って行われるわけではなく、加工の結果として物理法則から逸脱した動作が生成されてしまう事があるという問題があった。加工の後に物理法則に従うよう最適化を行う事で、物理法則に則った動作生成を行う手法 ([11][15]) も提案されているが、これらは最適化に要する計算量が多く、リアルタイム動作させる事が難しい。

一方、モーションデータを用意せず、実行時に状況に応じて動作を生成する手法も提案されている。[6][7] は、キャラクターの身体を多関節剛体モデルで表現し、物理シミュレーションを用いてキャラクターの動作を生成する手法であり、物理法則をシミュレーションするため、キャラクターがどのような状況にあっても、物理法則に従った動作を生成する事ができる。しかし、モデルの各関節に加えるトルクの制御を行う必要があり、その制御モデルは複雑で、多数のパラメータを持つ事が多い。また、多関節剛体自身も、各剛体の質量や各関節の摩擦・可動範囲など多くのパラメータを持つ。物理シミュレーションされたキャラクターに作品で求められる動作を行わせる事は、これらの多数のパラメータの調整を行ってはじめて実現されるが、目的の動作を得るための制御モデルの構築と調整は容易ではない。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。

あらかじめ準備した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。[14][16] は、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手法である。これらの手法は多関節剛体モデルのシミュレーションを用いるため、物理シミュレーションのみを使用する場合と同様、多数のパラメータの調整が容易でない。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、キャラクターの回転運動はシミュレーションしていない。キャラクターの回転は、キャラクターが全身を使って運動する目立つ動作であり、方向転換や姿勢変化・転倒といった表現上重要な動作を含む。そのため、重心運動のみをシミュレーションする手法では、動作の多様性に限界がある。

3 提案手法

1節で説明したキャラクタの動作生成手法に関する要求は、次のようにまとめることができる。

- キャラクタとのフィジカルな（体を使った、物理的な）インタラクションを実現するために、キャラクタが力学にしたがった動作や多様な反応動作をリアルタイムで行うこと。
- 作品に登場するキャラクタを実現するために、個性のある動作やシナリオに沿った動作などを指定可能なこと。例えば、特定のポーズや動作をとらせられること。
- 製作コスト削減のため、製作・調整すべきものが少なく、従来のスキルを利用でき、新たなスキルを必要としないこと。

これらの要求を満たすため、剛体の運動をシミュレーションするリアルタイム物理シミュレーションと、キャラクタの関節の動作をあらかじめ記述しておいたキーフレームアニメーションの組合せによってキャラクタの動作生成を行うことを提案する。

提案手法では、キャラクタをひとつの剛体として物理シミュレーションすることで、力学に従った全身動作を生成し、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。連動させるキーフレームアニメーションを変更することで、キャラクタの動作をデザインすることができる。たとえば、キャラクタごとに異なるキーフレームアニメーションを用意すればキャラクタの動作に個性を与える事が可能である。また、特定のポーズを記述したキーフレームを挿入しておけば、キャラクタに特定のポーズをとらせることも可能である。

また、提案手法は、製作コストを大幅に削減する。提案手法は、剛体運動シミュレーションとキーフレームアニメーションの組合せによって多様な動作を自動生成するため、あらかじめ用意するキーフレームアニメーションの数が少なくできる。また、キャラクタをひとつの剛体として物理シミュレーションするため、制御が容易であり、運動制御のために調整すべきパラメータが少なく、高度な制御の知識を必要としない。さらに、キーフレームアニメーションはキャラクタ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、キャラクタ動作のデザイナーが持つスキルをそのまま活かせる。

3.1 全体像

提案手法の全体像を図1に示す。

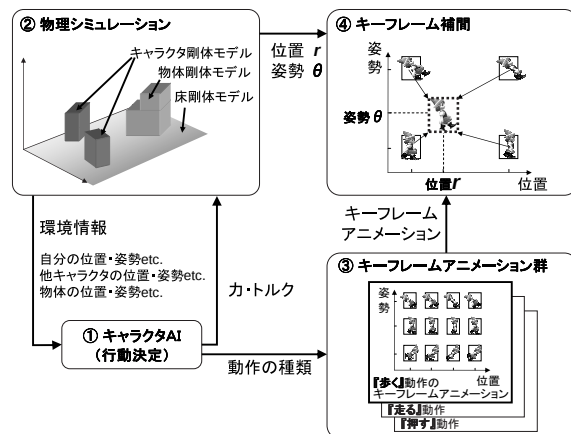


図1 提案手法の全体像

Fig.1 Overview of the proposed method

①キャラクタ AIは、キャラクタ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、キャラクタのポーズを得る。

以下、各構成要素について詳述する。

3.2 物理シミュレーション

3.2.1 物理シミュレータ

提案手法では、リアルタイム物理シミュレータを用いる。このシミュレータは、複数の剛体の衝突・摩擦等を計算し、剛体の移動・回転をシミュレーションするものであり、キャラクタに力学にしたがった多様な動作を与え、フィジカルなインタラクションを実現する。

3.2.2 キャラクタのシミュレーションモデル

物理シミュレータ内では、キャラクタは、関節等を持たないひとつの剛体として表現する。これは、キャラクタの全身の移動・回転を計算するための力学モデルである。多関節モデルはパラメータが多く複雑な制御を必要とする上、目的の動作を得るための調整も難しい。そこで、関節の動作には力学モデルを用いず、より調整・デザインのしやすいキーフレームアニメーションで表現する。また、シミュレーションモデルをひとつの剛体にする事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。

剛体モデルは、形状・質量・重心・慣性テンソルをパラメータとして持つ。

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

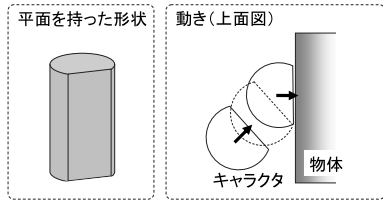


図2 剛体形状による動きの作成
Fig.2 Control motion by rigid body shape

だけ近い形状にする。また、剛体の形状はキャラクタの挙動を簡単に調整するためにも利用できる。例えば、形状に平面部分を作ること、図2のような接触においてキャラクタが自動的に物体の方を向く。また、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できる。このように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。さらに、不都合な動作が生じないように、形状を工夫することも必要となる。たとえば、上部を錐形することで逆立ち状態での静止を防いだり、角を落とすことで不自然な干渉をなくしたりする必要がある。

剛体の質量・重心は、作品におけるキャラクタの設定にあわせて決定する。また、剛体の慣性テンソルは、形状・質量・材質から計算することができる。しかし、提案手法での剛体のシミュレーションは、剛体の動作を精密にシミュレーションすることが目的ではなく、力学に従ったキャラクタの全身動作を生成するためのものなので、目的の動作が得られるように調整する。

3.2.3 環境の剛体モデル

床・壁・物体などが該当する。キャラクタと接触しうする物体はすべて、剛体モデルとしてシミュレーションの対象とする。

3.3 キーフレームアニメーション

提案手法では、キャラクタの詳細な動作は、キーフレームアニメーションで表現し、キャラクタのシミュレーションモデルである剛体の運動に連動させる。

例えばキャラクタが転ぶ様子をアニメーションで表現し、剛体の角度と連動するようにフレームを進めれば、キャラクタが力学に従って転ぶような動作を生成できる。提案手法では、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を用いる。さらにキーフレームのセットを複数用意する事で、キャラクタに様々な動作を行わせる。

キーフレームアニメーションは実現したいポーズ(キーフレーム)を並べるという方法で製作できるので、力学モデルの制御パラメータの調整に比べて動作作成の方法として直観的で調整もしやすい。

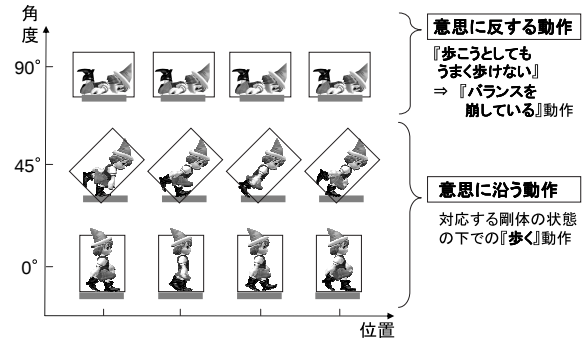


図3 提案手法で用いるキーフレームアニメーション
Fig.3 Keyframe animation for the proposed method

3.3.1 提案手法で用いるキーフレームアニメーション

通常のキーフレームアニメーションでは1次元の時間軸に対してキーフレームを割り当てるが、提案手法では多次元空間内にキーフレームを複数配置したものを用いる。本稿では、これをキーフレームセットと呼ぶ。また、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。このようなキーフレーム空間は、空間的キーフレーム法 ([8]) でも利用されている。

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のポーズを得る。得られたキャラクタのポーズを、剛体に固定された座標系において表示することで、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。

3.3.2 キャラクタの動作とキーフレームセット

提案手法ではキャラクタの動作を「意志に沿う動作」と「意志に反する動作」に分けて考える。意志に沿う動作には、「歩く」「走る」「物を押す」「起き上がる」などが、一方、意志に反する動作には、「転ぶ」「バランスを崩す」などがある。すなわち、物理的制約によって動作が実行できない時に「意志に反した動作」が現れると考える。

提案手法では、キャラクタに行わせたい「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3では、90度の姿勢では、歩く動作は

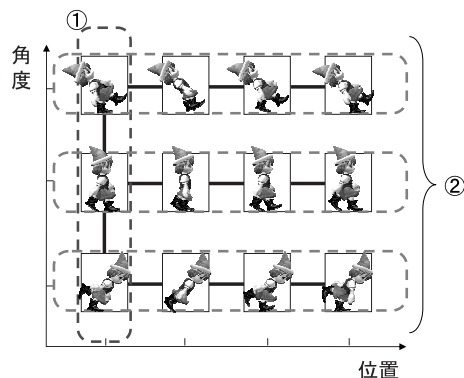


図 4 多次元空間内にキーフレームを配置する方法

Fig.4 How to put keyframes in multi-dimensional space

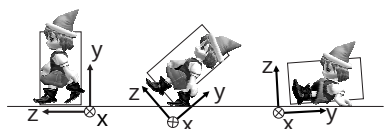


図 5 各キーフレームの座標系

Fig.5 Coordinate of each keyframes

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 3 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。

3.3.3 キーフレームセット作成上の注意点

多次元空間に配置されるキーフレームは，次のように作成する．最初に特定の 1 次元のみが変化するアニメーションをひとつ作成し，その各キーフレームから別の次元を変化させたアニメーションを作成する．これにより，1 次元キーフレームアニメーションを複数作成する作業に帰着できる．たとえば，図 4 のように，①まず転倒するアニメーションを作り，②その各キーフレームから，倒れた姿勢を保って移動するアニメーションを作る．

剛体の運動と表示されるポーズが解離しないよう，キーフレーム作成において次の制約を満たす必要がある．第一に，各キーフレームの座標系は，キーフレーム空間上の点を介してそれぞれ対応する剛体に固定されたものを用いる (図 5)．第二に，キャラクタが，対応する姿勢の剛体からできるだけはみ出さないようにする．剛体からはみ出した部分は衝突判定の範囲を超えるため，他物体に侵入してしまう可能性がある．

さらに，自然な動作を実現するためには，従来のキーフレームアニメーションと同様に，デザイナーが動作を確認してキーフレームを調整する作業も必要となる．具体的には，まず剛体の典型的な挙動について



図 6 Kobito -Virtual Brownies-
Fig.6 Kobito -Virtual Brownies-

前述の手法で多次元キーフレームを作成する．ここで考慮しなかった挙動については補間によってアニメーションが生成されることになる．次にインタラクションを行って実際に生成される動作を確認しながらキーフレームの調整を行う．デザイナーは，剛体の挙動についての知識から，生成されるアニメーションを想像できるので，効率よく調整を行うことができる．

3.4 キャラクタ AI

キャラクタ AI は，キャラクタの行動を決定する．提案手法と組み合わせるため，行動決定のために必要となる環境に関する情報の入力 (壁・物体・他キャラクタの位置や状態，自キャラクタの状態など) は，物理シミュレータから得る．そして，物理シミュレータ内のキャラクタを表す剛体を制御するための力とトルクを決定し，キャラクタの行動にあわせてキーフレームセットを選択する．なお，キャラクタ AI のキーフレームセット選択の出力が変化する際に滑らかに動作を変化させるため，変化する前のキーフレームセットを用いて生成したポーズから変化した後のキーフレームセットを用いて生成したポーズへ，補間を用いて徐々に変更する．

4 実装例

提案手法の実装例として，作品 “Kobito -Virtual Brownies-” ([17], 図 6) のキャラクタ “Kobito” の動作生成を挙げる．この作品では，テーブルの上の紅茶缶が，触れてもいないのに動き出す．ディスプレイ “Kobito Window” を通して見ると，キャラクタ “Kobito” が紅茶缶を押して運んでいる様子が見える．紅茶缶を手に取り，“Kobito” を紅茶缶で押し返したり “Kobito” に紅茶缶をぶつけて転倒させたりするなど，紅茶缶を介して “Kobito” とのフィジカルなインタラクションができる．

開発は Microsoft Visual C++ 7.1, DirectX 9.0 を用いて行い，ラップトップ PC (Intel(R) CoreDuo プロ

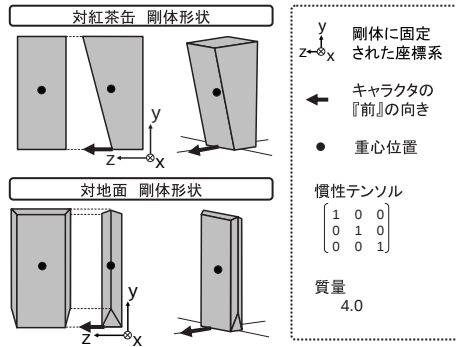


図7 Kobito - キャラクタ剛体モデル
Fig.7 Kobito - rigid body model



図8 Kobito - キャラクタモデル
Fig.8 Kobito - Charactor model

セッサ T2300 搭載), Windows XP 上で動作させた。また, キャラクタ動作生成は 30fps の更新周期で実行した。

4.1 物理シミュレータ

物理シミュレータには, Springhead[5]を用いた。Springhead は, 一般的な PC 程度の計算資源でリアルタイム動作する剛体運動シミュレータであり, ペナルティ法による衝突計算を備えている。

4.2 キャラクタ剛体モデル

キャラクタの剛体モデルを図7に示す。剛体モデルの形状はキャラクタとほぼ同サイズとした。また, 紅茶缶との衝突判定と床との衝突判定とで異なる形状を用いた。

紅茶缶との衝突判定形状は, 前面部分を斜めにした。こうすることで, キャラクタを紅茶缶でつづいた時にキャラクタを後ろに傾けるトルクが発生し, ユーザが紅茶缶で“Kobito”をつづくことによって“Kobito”が転ぶ様子を提示したいという要求を実現した。

床との衝突判定形状は, 同じく“Kobito”を転びやすくするため, 前後方向に倒れやすくなるよう底面が狭い形状を用いた。また, 左右及び上面を山型とし, 左右に倒れた時や倒立してしまった時, その状態で安定せず必ず仰向けかうつぶせの姿勢で安定するようにした。これにより, 起き上がる動作が必ず仰向けかうつぶせの状態から開始するようになり, 必要なモーション数が削減できた。

4.3 環境剛体モデル

この作品では, 環境モデルは床と紅茶缶である。床は床面と同じ広さの面を持つ直方体形状の剛体, 紅茶缶は立方体形状の剛体で表現した。

4.4 キーフレーム空間

“Kobito”のキーフレーム空間 K を式(1)のように定義した。

$$K = \{(x, z, \theta_x, \theta_z) | x, z \in [0.0, 1.0], \theta_x \in [-\pi, \pi], \theta_z \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]\} \quad (1)$$

また, 剛体の位置・速度・向きから, キーフレーム空間上の1点に変換する関数 F を, 式(2)のように定義した。時刻 t における剛体の位置を $\mathbf{r}(t)$, 速度を $\mathbf{v}(t)$, 向きを表す回転行列を $R(t)$ とする。

$$(x, z, \theta_x, \theta_z) = F(\mathbf{r}(t), \mathbf{v}(t), R(t), \boldsymbol{\omega}(t)) \quad (2)$$

x, z :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \sum_{\tau=0}^t R(\tau)^{-1} \mathbf{v}(\tau) \Delta t - \left[\sum_{\tau=0}^t R(\tau)^{-1} \mathbf{v}(\tau) \Delta t \right]$$

θ_x, θ_z :

$$R(t) = Rot_x(\theta_x) Rot_z(\theta_z) Rot_y(\theta_y) \text{ を満たす } \theta_x, \theta_z$$

ただし

Δt : シミュレーションの時間刻み

$Rot_x(\theta), Rot_y(\theta), Rot_z(\theta)$:

x, y, z 軸周りの角度 θ の回転を表す 3×3 行列

$$[\mathbf{a}] := ([a_x], [a_y], [a_z])^t$$

4.5 キーフレームアニメーション

キャラクタの 3D モデルとして, 図8のようなモデルを用いた。“Kobito”が環境内を歩行・走行して紅茶缶の所へ向かい, 紅茶缶を押して運ぶ動作を実現するため, 表1に示すキーフレームアニメーションを作成した。

キーフレームの補間は, キーフレーム空間の各次元ごとに近傍の2点を求め, 線形補間を行うものとした。

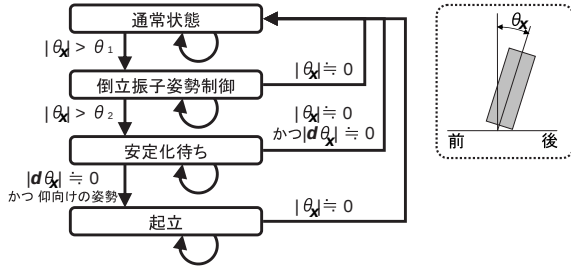
4.6 キャラクタ AI

キャラクタ AI には, 剛体シミュレータから得たキャラクタの位置と姿勢・紅茶缶の位置・紅茶缶に接触しているかどうかの情報に基づき, 次のような規則で行動を決定するものを用いた。

- 図9に基づき, 姿勢制御状態を決定し, 状態に対応する姿勢制御を行う。
- 図9に示す姿勢制御の状態が“通常状態”の場合, さらに移動制御を行う。

表 1 Kobito - キーフレームアニメーション
 Table 1 Kobito - Keyframe animation

動作名 (キーフレーム数)	キーフレーム空間内の配置 (x, z, θ_x, θ_z)
後 90° 歩行 (1)	(0, 0, -90°, 0°)
後 45° 歩行 (8)	(0, $z, -45^\circ, 0^\circ$) $z \in \{0, 1/12, 1/4, 5/12, 1/2, 7/12, 3/4, 11/12\}$
0° 歩行 (8)	(0, $z, 0^\circ, 0^\circ$) $z \in \{0, 1/12, 1/4, 5/12, 1/2, 7/12, 3/4, 11/12\}$
前 45° 歩行 (8)	(0, $z, 45^\circ, 0^\circ$) $z \in \{0, 1/12, 1/4, 5/12, 1/2, 7/12, 3/4, 11/12\}$
前 90° 転倒 (1)	(0, 0, 90°, 0°)
180° 転倒 (1)	(0, 0, 180°, 0°)
左 90° 歩行 (1)	(0, 0, 0°, -90°)
左 45° 歩行 (4)	($x, 0, 0^\circ, -45^\circ$) $x \in \{0, 7/30, 1/2, 23/30\}$
左 45° 歩行 (4)	($x, 0, 0^\circ, 45^\circ$) $x \in \{0, 7/30, 1/2, 23/30\}$
左 90° 転倒 (1)	(0, 0, 0°, 90°)
起立 1 (8)	(0, 0, $A^\circ, 0^\circ$) $A \in \{0^\circ, 15^\circ, 25.5^\circ, 37.5^\circ, 48^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ\}$
起立 2 (6)	(0, 0, $A^\circ, 0^\circ$) $A \in \{-90^\circ, -72^\circ, -54^\circ, -36^\circ, -18^\circ, 0^\circ\}$
走行 (10)	(0, $z, 0^\circ, 0^\circ$) $z \in \{0, 1/12, 1/6, 1/4, 1/3, 1/2, 7/12, 2/3, 3/4, 5/6\}$
押す (12)	(0, $z, 0^\circ, 0^\circ$) $z \in \{0, 1/12, 1/6, 1/4, 1/3, 5/12, 1/2, 7/12, 2/3, 3/4, 5/6, 11/12\}$


 図 9 Kobito - 姿勢制御
 Fig. 9 Kobito - posture control

- 紅茶缶の方向を向いていなければ、左右に回転して紅茶缶の方向を向く
- 紅茶缶に向かって歩く。紅茶缶から遠い位置に居れば走る
- 紅茶缶に接触しているなら、押す

決定された行動に従い、キャラクタの剛体に加える力・トルクを決定する。剛体の位置を $\mathbf{r}$ 、速度を $\mathbf{v}$ 、回転行列を R 、角速度を $\boldsymbol{\omega}$ とする。

 表 2 Kobito - 運動制御の定数
 Table 2 Kobito - Constants for control

動作種別	v_0	ω_0	F_0	N_0
前進	3	0	12.0	12.0
左回転	0	3	12.0	12.0
右回転	0	-3	12.0	12.0
押す	3	0	24.0	12.0

姿勢制御の力 $\mathbf{F}_p$ ・トルク $\mathbf{N}_p$ は式(3)～(6)に従って決定する。

通常状態：

$$\mathbf{F}_p = \mathbf{0}, \mathbf{N}_p = R(-75\theta_x, 0, 0)^t \quad (3)$$

倒立振子姿勢制御状態：

$$\mathbf{F}_p = (456.9\theta_x 7.93v'_z + 161.76\omega_x)\mathbf{e}_z$$

$$\mathbf{N}_p = \mathbf{0} \quad (4)$$

安定化待ち状態：

$$\mathbf{F}_p = -70.0\mathbf{v}, \mathbf{N}_p = \mathbf{0} \quad (5)$$

起立状態：

$$\mathbf{F}_p = \mathbf{0}, \mathbf{N}_p = 200.0\theta_x\mathbf{e}_x - 20.0\boldsymbol{\omega} \quad (6)$$

ただし

$\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_z : R = (\mathbf{e}_x \mathbf{e}_y \mathbf{e}_z)$ なるベクトル

θ_x : 式(2)における $\theta_x, v'_z : R^{-1}\mathbf{v}$ の z 成分

バランスを崩した状態の一つである倒立振子姿勢制御状態では、人間に近い姿勢回復動作を行わせるため、姿勢維持動作における人間のモデルとしてよく用いられる([10][13])倒立振子のモデルに従った安定制御を用いた。また、力の作用点は剛体最下部とした。これは、キャラクタが足で力を発生するためである。

移動制御を行う場合、力 $\mathbf{F}_m$ ・トルク $\mathbf{N}_m$ は式(7)～(8)及び表2に示すPD制御を用いて決定する。

$$\mathbf{F}_m = \begin{cases} K_{pf}(\mathbf{v}_0\mathbf{e}_z - \mathbf{v})(K_{pf}\|\mathbf{v}_0\mathbf{e}_z - \mathbf{v}\| < F_0) \\ F_0 \frac{\mathbf{v}_0\mathbf{e}_z - \mathbf{v}}{\|\mathbf{v}_0\mathbf{e}_z - \mathbf{v}\|} (\text{それ以外}) \end{cases} \quad (7)$$

$$\mathbf{N}_m = \begin{cases} K_{pn}(\boldsymbol{\omega}_0\mathbf{e}_y - \boldsymbol{\omega})(K_{pn}\|\boldsymbol{\omega}_0\mathbf{e}_y - \boldsymbol{\omega}\| < N_0) \\ N_0 \frac{\boldsymbol{\omega}_0\mathbf{e}_y - \boldsymbol{\omega}}{\|\boldsymbol{\omega}_0\mathbf{e}_y - \boldsymbol{\omega}\|} (\text{それ以外}) \end{cases} \quad (8)$$

ただし

$\mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z : R = (\mathbf{e}_x \mathbf{e}_y \mathbf{e}_z)$ なるベクトル

$$K_{pf} = 8.0, K_{pn} = 20.0$$

$\mathbf{F}_0, \mathbf{N}_0, \mathbf{v}_0, \boldsymbol{\omega}_0$: 表2に示す定数

“Kobito”が紅茶缶を押す際には、図7に示す対紅茶缶用の剛体形状のため“Kobito”を後向きに倒すトルクが発生する。転倒せずに押す動作を行わせるため、力の作用点を剛体の上から四分の一の高さに設定することで姿勢を乱すトルクを抑えた。それ以外では、力の作用点は姿勢制御と同じく剛体最下部とした。

5 評価

提案手法の有効性を確かめるために評価を行った。

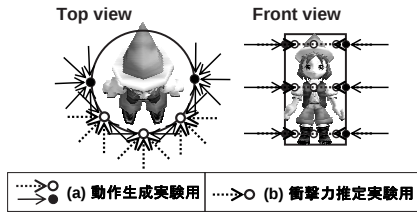


図 10 キャラクタに加える力
Fig. 10 Variation of forces in the experiment

表 3 衝撃力推定実験 結果
Table 3 Result of Impact force estimation task

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 ₍₁₉₎	12 ₍₂₀₎	12 ₍₁₈₎
B	20	20 ₍₂₀₎	13 ₍₂₀₎	20 ₍₂₀₎
C	17	9 ₍₂₀₎	7 ₍₁₈₎	11 ₍₁₄₎
D	15	15 ₍₂₀₎	9 ₍₁₉₎	17 ₍₂₀₎

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。ただし強さに関しては選択肢が 2 つしか無く誤差を許容すると全て正答となるため省略)

5.1 動作生成実験

4 節で説明したキャラクタ “Kobito” の動作生成システムを用いて、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、 $3 \times 5 \times 5 \times 2$ 通りの異なる力を、1 回、もしくは間隔をあけて 2 回加える。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。力の内訳は、図 10(a) の作用点 3×5 通り・力の方向 5 通り、及び力の強さが強弱 2 通りの組み合わせである。

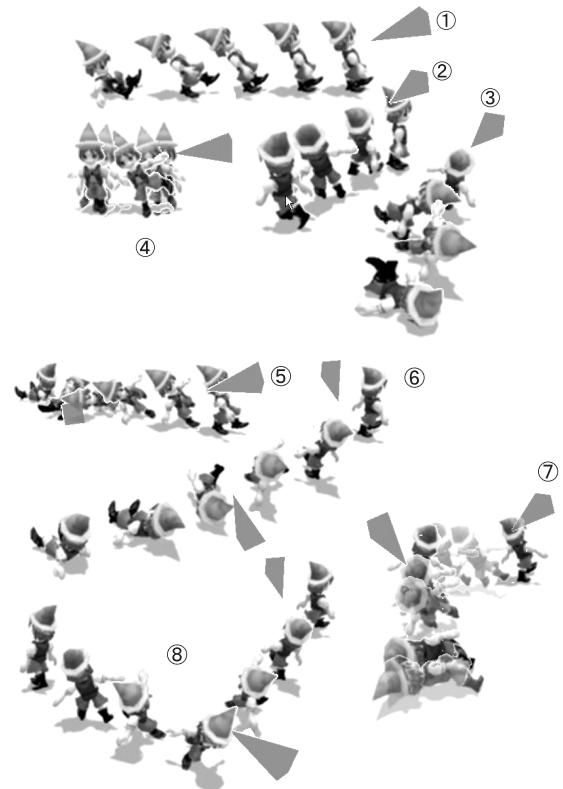
結果

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 11 に、生成された動作の中でも特徴的なものを示す。

5.2 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、 $3 \times 3 \times 3 \times 2$ 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ることが出来る。被験者は、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。力の内訳は、図 10(b) の作用点 3×3 通り・力の方向 3 通り、及び力の強さが強弱 2 通りである。



力を 1 回加えた場合：①真後ろに転倒 ②バランスを崩し斜め後ろに移動 ③回転しながら転倒 ④バランスを崩し真横に移動
力を 2 回加えた場合：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 11 提案手法によって生成された動作
Fig. 11 Generated motion with the proposed method

結果

結果を表 3 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。

5.3 キーフレーンセット製作時間の見積もり

5.1 節 動作生成実験で生成された全 30 種類の動作について、提案手法を使用する場合と使用しない場合でキーフレーンセットの製作にかかる時間を見積もった。動作生成実験で使ったキーフレーンアニメーションの制作者に予想してもらったところ、mikoto[1] を使用してキーフレーンアニメーションを製作したとすると、両者の製作にかかる時間の見積もりは、提案手法を使用する場合 1 動作あたり 15 分 $\times$ 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。

6 考察

6.1 実験結果について

5.1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、予測不能かつ多様な力が入力される可能性のある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。

5.2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ており、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。

さらに、動作生成実験において、キーフレームアニメーションで表現した動作のもつ特徴が、生成された動作にも反映されている。また、うつぶせになる・座る・起き上がるなど、キーフレームアニメーションで表現した動作そのものを行わせることも可能であった。これらの動作や動作の特徴は製作したキーフレームアニメーションの内容と直感的に対応しているため、実際に再生して確認したり、調整を行ったりといった作業が行いやすくなると考えられる。

同様のことが剛体の形状と運動制御の関係についてもいえる。実装例では剛体の形状によって剛体の運動を調整しているが、底面を小さくすることで剛体を倒れやすくするなど、剛体形状の工夫に対して直感的な効果が伴っており、製作における動作の調整が行いやすくなると考えられる。

6.2 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。また、低製作コストであることや、キャラクター体につき剛体一つであるため計算コストが少ないことから、背景の群衆など多数登場するキャラクタ全てを物理動作させることが可能になると考え

られる。これにより、バーチャル世界のリアリティを底上げする事ができると考えられる。

一方、提案手法は剛体モデルの形状・重心位置・慣性テンソルの変化が無視できない状況には対応できない。形状変化の影響が無視できない例には、キャラクタの腕を掴んで動かす動作や、バッターが体をそらしてボールをよける動作などがある。重心位置・慣性テンソルの変化が無視できない例には、綱渡りで手足の動きによる重心位置の変化によってバランスを崩す動作や、フィギュアスケートの回転において腕を動かす事で慣性テンソルを変化させ回転の速さを変える動作などがある。また、衝突判定形状として表示されるキャラクタより大きめの形状を用いるため精密な衝突判定ができず、キャラクタに比べて相対的に小さい物体との干渉では誤差が目立つ事がある。

解決法として、キャラクタのシミュレーションモデルに多関節剛体モデルを用いる事が考えられるが、多関節剛体モデルの使用は製作コストの増加や制御の困難さを招くことから、実現したいインタラクションに必要な最低限の部分のみを別剛体とすることが必要であろう。例えば腕を自在に動かす事のできるキャラクタが必要であれば、腕のみを別の剛体で表現して胴体と関節で繋げるなどである。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動作生成に近づく。将来、技術の進展等によって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を実現できると考えられる。

7 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、提案手法による動作生成の実装例として作品“Kobito -Virtual Brownies-”を挙げ、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] ポーズ&モーショ編集ツール mikoto. <http://sasakingdom.com/mikoto.html>.
- [2] 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.
- [3] M. Gleicher. Retargeting motion to new characters. In *SIGGRAPH '98: Proc. of the 25th an-*

- nual conf. on Computer graphics and interactive techniques, pp. 33–42, New York, NY, USA, 1998. ACM Press.
- [4] S. Hasegawa, Y. Dobashi, M. Kato, M. Sato, T. Yamamoto, and T. Nishita. Virtual canoe: Real-time realistic water simulation for haptic interaction. <http://springhead.info/~hase/vcanoe/vcanoe.html>.
- [5] 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/>.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] T. Igarashi, T. Moscovich, and J. F. Hughes. Spatial keyframing for performance-driven animation. In *SCA '05: Proc. of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pp. 107–115, New York, NY, USA, 2005. ACM Press.
- [9] S. Jeong, N. Hashimoto, and S. Makoto. A novel interaction system with force feedback between real - and virtual human: an entertainment system: "virtual catch ball". In *ACE '04: Proc. of the 2004 ACM SIGCHI Intl. Conf. on Advances in computer entertainment technology*, pp. 61–66, New York, NY, USA, 2004. ACM Press.
- [10] R. Johansson and M. Magnusson. Identification of human postural dynamics. *Control and Applications, 1989. Proceedings. ICCON'89. IEEE International Conference on*, pp. 875–880, 1989.
- [11] T. Komura, Y. Shinagawa, and T. Kunii. Creating and retargeting motion by the musculoskeletal human body model. *The Visual Computer*, 16(5):254–270, 2000.
- [12] 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.
- [13] C. Maurer and R. J. Peterka. A new interpretation of spontaneous sway measures based on a simple model of human postural control. *Journal of Neurophysiology*, 93:189–200, 2005.
- [14] M. Oshita and A. Makinouchi. A Dynamic Motion Control Technique for Human-like Articulated Figures. *Computer Graphics Forum*, 20(3):192–203, 2001.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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ーチャの実現 kobito-virtualbrownies-. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 11(2):313–322, 2006.

(2007 年 1 月 26 日受付)

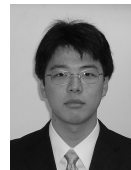
[著者紹介]

三武 裕玄



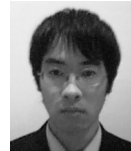
2006 年 東京工業大学 工学部 情報工学科卒業。現在 同大学大学院 総合理工学研究科 知能システム科学専攻 修士過程在学中。バーチャルヒューマンの動作生成に関する研究に従事。

青木 孝文 (学生会員)



2005 年 東京工業大学 理学部 情報科学科卒業, 2007 年同大学大学院知能システム科学専攻修士修了, 同年 日本学術振興会特別研究員, 現在 同専攻 博士後期課程在学中。バーチャルクリーチャ, バーチャルリアリティ, 複合現実感, エンタテインメントコンピューティングの研究に従事。

浅野 一行



現在, 東京工業大学 工学部 情報工学科在学中。本研究では, 多次元キーフレームの補間及び描画処理, “Kobito” のキーフレームアニメーション作成などを担当。

遠山 喬



現在, 東京工業大学工学部電気電子工学科在学中。本研究では, “Kobito” ポリゴンモデルの製作などを担当。

長谷川 晶一 (正会員)



1997 年東京工業大学工学部電気電子工学科卒業, 1999 年同大学大学院知能システム科学専攻修士修了, 同年ソニー株式会社入社, 2000 年東京工業大学精密工学研究所助手, 2007 年電気通信大学知能機械工学科准教授, 現在に至る。バーチャルリアリティ, 力覚インタフェース, ヒューマンインタフェースの研究に従事。工学博士。

佐藤 誠 (正会員)



1973 年東京工業大学工学部電子物理工学科卒業, 1978 年同大学院博士課程修了, 同年, 同大学工学部助手, 現在, 同大学精密工学研究所教授, 現在に至る。パターン認識, 画像処理, ヒューマンインタフェースの研究に従事。工学博士。