

## キーフレーム及びイベント駆動を用いたバーチャルヒューマンの歩行

伊藤 淳 吉田 典正\* 北嶋 克寛\*

東京農工大学 大学院工学研究科 電子情報工学専攻  
\*東京農工大学 工学部 情報コミュニケーション工学科

〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

E-mail: {yashok, norimasa, kitajima}@cc.tuat.ac.jp

本研究では、キーフレームとイベント駆動の考えを用いたバーチャルヒューマンの動作生成のための手法を示す。一般的に、バーチャルヒューマンの動作はモーションキャプチャ装置によって作成されるが、それは役者を必要とし、また高価である。古典的なキーフレームでは、バーチャルヒューマンのリアルな動作の作成に多くの労力を必要とする。本論文では、バーチャルヒューマンの動作を作成するために、地面に足が触れるというようなイベントとキーフレームの考えを用いた簡潔な手法を提案する。本論文では、バーチャルヒューマンの歩行に、提案する手法を適用し、非常に少ないキーフレームを用いて歩行動作が作成できることを確認した。

キーワード：バーチャルヒューマンの動作、コンピュータグラフィックス、キーフレーム、拘束

## The Virtual Human Animation Based on Key Frames and the Event Driven Approach

Jun Ito, Norimasa Yosida, and Katuhiro Kitajima

Tokyo University of Agriculture and Technology, Department of Computer Science

2-24-16 Naka-cho Koganei-shi Tokyo, 184-8588 Japan

E-mail: {yashok, norimasa, kitajima}@cc.tuat.ac.jp

This paper presents a method for motion generations of a virtual human based on the concepts of key frames and the event-driven approach. Generally, the motion of a virtual human is generated by a motion capture machine, which requires an actor/actress and is costly. The use of classical key frames requires a lot of effort to generate the realistic motion of a virtual human. For easy creation of virtual human motion, we present a method that combines the concepts of key frames and events, such as the contact of the foot to the ground. We have implemented our approach for the walking of a virtual human and confirmed that the walking motion was generated using a very small number of key frames.

Keywords: Virtual human motion, Computer graphics, Key-frame, Constraint

## 1. 本研究の目的

バーチャルヒューマン（コンピュータ上で表現される人体モデル）は映画やゲームなどだけでなく、様々な分野で利用されることが望まれている。たとえば、バーチャルモデルなどは二次元画像と文字で構成されてきたが、実際に買い物をするように、仮想空間上を歩き回ることが望まれている。また、コンピュータ内でファッションショーを行う際にも利用できる。

バーチャルヒューマンの動作を扱う方法の代表的なものとしては、以下の三つの方法が一般的に用いられている。

- a) モーションキャプチャ
- b) キーフレーム
- c) 力学的シミュレーション

現在、もっとも望ましい動作を得ることができる方法は、モーションキャプチャを用いたもの[3]であるが、役者や高価な装置を必要とするため、個人で扱うことは非常に困難である。

キーフレームは古典的な方法であり、直感的に扱うことができ、データ量が少ないという点で優れているが、バーチャルヒューマンの動作といった複雑なものには向かない。

力学的シミュレーションは、力学的なモデルとして人間をとらえ、物理現象として人間の動きを仮想空間上でシミュレーションするものである。様々な研究が行われているが、特定の動作に特化したもの[1][4][5]がそのほとんどで、バーチャルヒューマンの一般的な動作の生成にはいたっていない。

本研究では、バーチャルヒューマンの自然な動作を、直感的な操作により作成できるような仕組みとして、バーチャルヒューマンの歩行を例にとり、キーフレームとイベント駆動を用いたシステムを提案する。

具体的には以下のことを実現する。

- a) 自然な動作の作成を簡単に行う
- b) 動作の分割による生産効率の向上
- c) モーションキャプチャの代替

なお、本研究では動作に主眼をおいているため、バーチャルヒューマンには筋肉、脂肪、皮膚、衣服などは付加せず、骨格モデルのみで扱うこととした。

## 2. バーチャルヒューマンの動作

人間の歩行を考えた場合、常に片足が地面に接している。しかし、歩行を行う人間は、足を交互に出すことを意識することはあっても、地面に足が密着するように関節の角度を制御しようとは意識してはいない。つまり、人間の動作には意識して行う部分と、無意識に行われる部分の二つがあると考えられる。

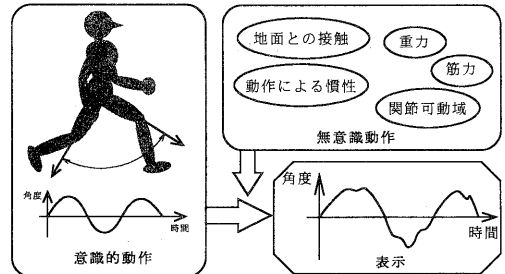


図1：意識的動作と無意識動作の関係

このような動作は、人間の動作をキーフレームで扱うことを困難にする。なぜなら、足と地面の密着状態を維持しようとしたとき、複数の関節の角度変化の影響を吸収しなければならない、さらに補間の方法までも考慮しなければならないからである。また、動作の変更及び修正を行おうとすれば、それらをすべて調整し直さなければならない。

そこで、本研究では、バーチャルヒューマンの動作を意識的動作と無意識動作の二つに分けることを提案する。以下に、それぞれの役割と処理方法を述べる。

### 2.1 意識的動作と無意識動作

人間の動作は、各部位に注目した場合、振り子のような往復回転運動の組合せのように見える。しかし、バーチャルヒューマンを振り子のような往復回転運動の組合せとして動作させた場合、人間の目には、ロボットの動作のように不自然に映ってしまう。なぜなら、人間は地面や重力、自身の運動により発生する慣性など、様々な影響が複雑に絡み合う中で動作しているため、大まかには振り子のような往復回転運動に見えても、実際には、より複雑な動きをしているからである。もちろん、これらを人間は無意識のうちに処理し調整を行っている。

そこで、大まかに見た単純な動きを、人間が意識的に行おうとしている動作として「意識的動作」、様々な影響(力学的拘束など)による動きを意識的動作の逸脱としてとらえ「無意識動作」とし、意識的動作は再生以前にキーフレームにより用意し、再生時に無意識動作による逸脱を加えることとした(図1)。

また、従来のバーチャルヒューマンアニメーションでは、動作データは再生を行う以前に完全に作成されていることがほとんどである。しかし、このように動作を二つに分け、無意識動作を実時間で処理することにより、再生時のバーチャルワールドの環境(たとえば、傾斜や段差など)に応じて動作を変えることも可能になる。

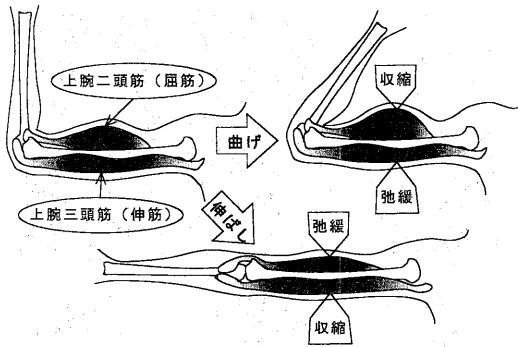


図2：腕の屈伸と筋肉の関係

## 2.2 意識的動作とキーフレーム

3次元モデルをアニメーションさせる際に古くから利用されている方法として、キーフレーム補間法がある。キーフレームの位置及び角度情報を補間するものが一般的で、現在でも無機物(例えば、戦闘機など)のアニメーションには有効な方法とされている。この方法のメリットは、必要な情報が非常に少なくアニメーションが直感的に作成できることである。しかし、複雑な多関節モデルを自然に動かそうとした場合、キーフレームの数を大幅に増やさなければならない。それではキーフレームのメリットが失われてしまうので、このような場合において、この方法はあまり適していない。

本研究では、バーチャルヒューマンの動作を意識動作と無意識動作の二つに分け、動きの概要である単純な意識的動作の作成にのみキーフレーム適用することで、そのメリットを活かすことを可能にした。また、補間を線形に行うのではなく B スプラインを用いて行うことにより、より人間らしい動作を作成できる。

## 2.3 意識的動作の逸脱

動作の概要として作成された意識的動作は、非常に理想的な状態でイメージされた動作の根幹である。実際に動作する際には、地面や重力、動作者の身体能力などの拘束が発生する。このような動作に対する制限のある環境では、意識的動作がそのまま動作になるわけではなく、環境によって意識的動作を逸脱したものが実際の動作として現れる。

以下に、環境による様々な逸脱の中で、今回の歩行に適用したものをあげ、説明する。

### 2.3.1 バーチャルヒューマンの筋力による逸脱

バーチャルヒューマンの動作は基本的に筋肉の働きによっておこる。したがって、動作者の筋力を越えるような高速な関節角度の変化を行うことは不可能にするべきである。そのためには、関節角度の前

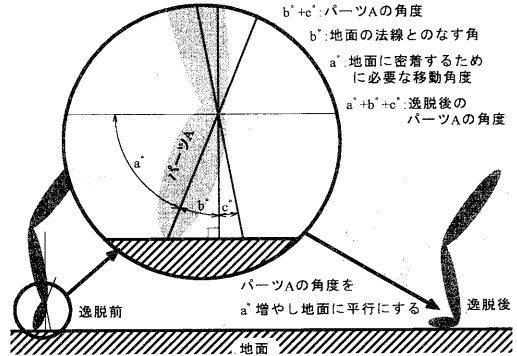


図3：接地による脚部の逸脱

回と今回のフレームでの変化量から角速度の差を求め、さらにそこから角加速度を算出し、筋力を越えるような場合は越えない範囲に制限する必要がある。

また、筋肉はいつでも一定の力を発揮できるわけではない。関節の曲がる仕組み[6]を考えれば当然である。

人間の関節は、筋肉が神経繊維の興奮により刺激を受け、収縮を行うことにより屈伸運動をする。しかし、筋肉は刺激を受けたときに収縮し、刺激がないときに弛緩するだけである。そのため、屈伸運動をするには、曲げるための屈筋と伸ばすための伸筋の二つの筋肉が必要になる(図2)。それぞれの筋肉の筋力が異なれば、「曲げ」と「伸ばし」の筋力は異なる。

### 2.3.2 関節可動域(Range Of Motion/ROM)による逸脱

人間の関節可動域は関節の構造や筋により制限される[7]。もし関節可動域を越えるような動作をしようとした場合、人間ならば筋を痛めてしまう。したがって、人間は無理な動きによって体を痛めないように関節可動域内で行動する。

バーチャルヒューマンの場合は、怪我をすることはないが、人間と同様に、設定された関節可動域を越えないようにしなければならない。もし、関節可動域を越えるような動作をしようとした場合は、越えない範囲に制限する必要がある。

### 2.3.3 接地による逸脱

歩行を例にとっても、足が地面に接した場合、足の裏が地面に密着しようとしたり(図3)、着地時の衝撃などの、筋肉による姿勢変化とは別の力によって関節の角度が変化する。このような外部から受ける力による動作の拘束は、キーフレームとして指定することが非常に難しい。モーションキャプチャが利用される背景には、このような拘束を手軽に正

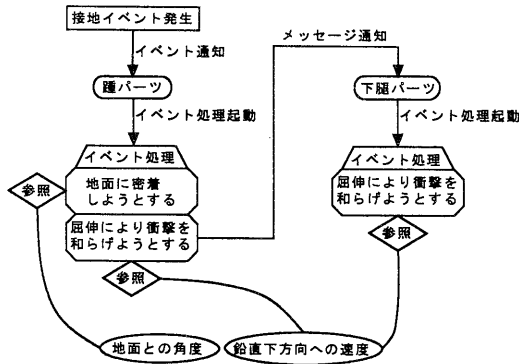


図4：接地のイベント処理の流れの例

確に得られるということがある。

そこで、バーチャルヒューマンの各部位が接地した際は、より自然な姿勢変化を行うようにキーフレームの補間結果を逸脱してやる必要がある。

#### 2.3.4 重力による逸脱

人間は、常に重力の影響を受けている。しかし、普段の動作では無意識のうちに筋力でその影響を打ち消しているので、それを意識することはあまりない。しかし、実際には腕を振り上げるよりも振り下げの方が高速な動作が可能である。この影響は、動作が高速になるほど顕著に現れてくる。また、跳躍などを行ったあとの接地時姿勢にも大きな影響を与える。

#### 2.4 無意識動作とイベント駆動

無意識動作は、意識的動作の拘束として考える。接地、重力、慣性、筋力など様々な要因があるが、それらは意識的動作であるキーフレームの逸脱で実現することが可能である。接地ならば、地面と平行になるようにパーツの角度を拘束し、重力ならばパーツが鉛直下向きになるような力を加える。パーツの角速度を維持しようとするれば慣性を、角加速度を制限することで筋力による拘束を行うことができる。

これらのキーフレームの逸脱を実現する方法として、本研究ではイベント駆動による方法を提案する。イベント駆動とはウィンドウシステムなどで一般的に知られているものと同様なもの[8]である。バーチャルヒューマン全体をウィンドウシステム、身体各パーツを独立したアプリケーション、内外からの刺激をマウスのクリックなどと同様にとらえれば、イベント駆動という方法を用いることは自然である。

例えば、足が地面に接したとき、システムは足が地面に接したのでそれに対する処理を行うように足パーツに要求（イベント発生を通知）する。足パー

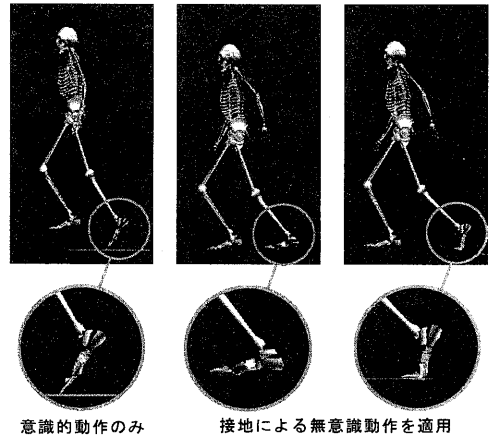


図5：接地による意識的動作と無意識動作

ツは、そこではじめて接地に対してあらかじめ用意されていたイベント処理（図4）を行う。必要ならば、そこで他のパーツにメッセージを送り、関係した動作を行うことも可能である。

イベントに対する処理の実装の仕方によって、厳密な計算処理から簡略的な処理まで、パーツごとにそれぞれ設定することが可能になる。これにより、イベントにまったく反応しないで、ただキーフレームの補間結果の通りに動作するパーツや、いくつかの特徴的なイベントにのみ反応するようなパーツ、または、すべてのイベントに反応し、様々な要因から複雑な影響を受けるようなパーツなど、バーチャルヒューマンの動作におけるパーツの役割に応じて無駄のない効果的な逸脱処理を行うことができる。そして、反応するイベントの種類やそれに対する処理を自由に変えられることにより、バーチャルヒューマンの動作に対するユーザの制御性が向上する。

### 3. バーチャルヒューマンへの歩行の適用

実際に作成したシステムにより、バーチャルヒューマンの歩行動作を作成した。

意識的動作は各パーツごとに最大2つのキーフレームを用い、腕の振りは上体のねじれから無意識動作として生成した。また、爪先にも意識的動作を与えず、接地中は地面と平行になるような無意識動作を生成した。図5の左は無意識動作のない状態である。腕はまったく振られておらず、爪先も伸びたままであるが、無意識動作を追加することで右二つのように、腕は振られ、爪先は地面と平行になる。

#### 3.1 歩行のメカニズム

バーチャルヒューマンの歩行は大きく4つのフェーズに分けられる[2]。足の動きに注目してみると、

- 第1フェーズ：地面を後方に蹴る
- 第2フェーズ：浮いた状態で前方へ送る
- 第3フェーズ：地面に踵が接する
- 第4フェーズ：体を支え(接地し)ながら後方へ送る

という状態変化を繰り返すことにより前進している。その様子をグラフにしたものを図6に示す。グラフの角度は親パーツに対する相対的なもので、直立状態が0°となる。

グラフから、大腿部は歩行において滑らかな単振動を繰り返していることがわかる。下腿部と踵は、その滑らかな動きを阻害しないように、接地による影響を吸収している。このことから、下腿部と踵の無意識動作が歩行において重要な位置を占めることがわかる。そこで、この二つについて、フェーズごとに詳しく考察する。

a) 下腿部

第1フェーズでは、地面を蹴るために大腿に対しての角度が大きくなり始める。第2フェーズの初期に比べて角度変化が小さいのは、まだ地面に接しているためである。

第2フェーズになり、地面を蹴る抵抗がなくなったため、第1フェーズに比べて大きな角度変化になる。その後、第3フェーズでの接地に向け、大腿に対する角度を小さくしていく。第3フェーズ直前に大腿に対する角度が増加するのは、Ground Speed Matching<sup>\*1</sup>である。

第3フェーズでは、Ground Speed Matchingの流れと重心移動によって、多少大腿に対する角度が大きくなる。

第4フェーズは、体重を支えるためと、逆足の前方移動を妨げないための高さを得るために、大腿との角度を小さく保ち第1フェーズでの蹴りに備えている。

b) 踵

第1フェーズでは、地面を蹴るために下腿に対しての角度が大きくなる。踵は既に地面から離れており、爪先が接地している状態である。

第2フェーズの頭では、足全体の前方移動を妨げないように素早く伸ばす<sup>\*2</sup>。第3フェーズまでの間その状態を維持する。

第3フェーズでの着地の直前では爪先が地面

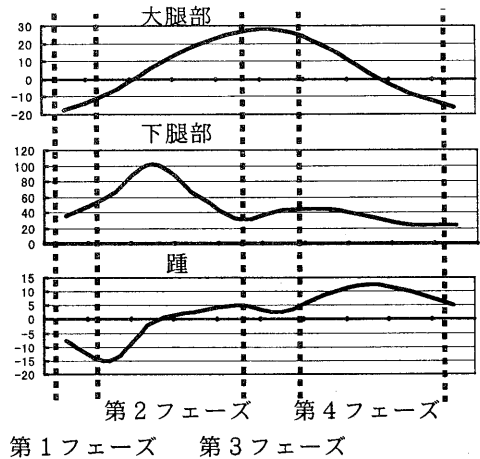


図6：人間の脚部関節の角度と歩行フェーズの関係<sup>\*3</sup>

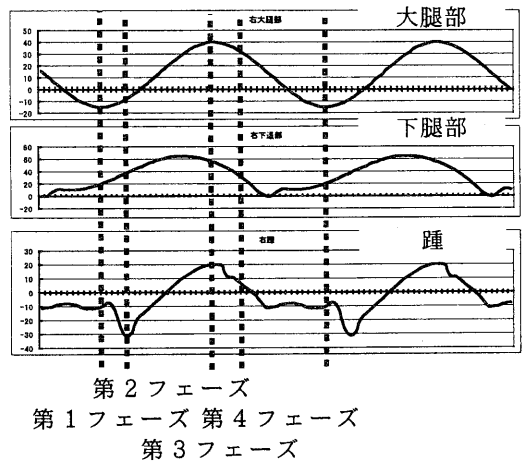


図7：バーチャルヒューマンの歩行の角度と歩行フェーズの関係

に対してやや上を向いているため、着地のあと、地面と平行になるように角度が変化する。

第4フェーズ前半は、地面に密着した状態のため大腿の角度変化にあわせて角度が大きくなるが、後半は踵から爪先の方へ接地点が移って

\*1：前進動作中は地面は後ろに移動し、下腿部を伸ばすことで足は前に移動していると考えられる。もしこのまま地面に着地した場合、地面と足の相対速度が大きいため、膝などに大きな負担が掛かってしまう。この衝撃をやわらげるために、着地直前に下腿部を曲げ、地面と足の速度をあわせようとする動きのこと[1]。

\*2：直立状態を伸びているとしているので、下腿に対してほぼ直角の状態をさす。

\*3：資料[2]のグラフを再構成した

いき、踵が浮くために角度が小さくなる。

これらの歩行動作の特徴を作成した歩行動作(図7)の特徴と比較することで、人間の歩行の特徴を本システムで再現できることを確認した。

#### 4. 研究の成果

本研究では、バーチャルヒューマンの動作を意識的動作と無意識動作に分割することと、それらをキーフレームとイベント駆動という考えで実現するという基礎的な提案を行った。また、実際に作成したシステムでのバーチャルヒューマンの歩行動作作成を通じて、その有用性を確認した。本研究の成果を次に述べる。

##### a) キーフレームによる意識的動作の感覚的な作成

バーチャルヒューマンの動作を意識的動作と、無意識動作の二段階に分けることにより、バーチャルヒューマンの歩行動作を直感的に作成することが可能になった。また、B スプラインによる補間を用いることで、滑らかな動作を作成するために必要なキーフレームの数を減らすことができた。

##### b) イベント駆動による無意識動作の実現

イベント駆動による無意識動作を導入したことにより、モーションキャプチャなどの高価な装置を使用することなく、動作の概要である意識的動作から、自然な歩行動作を作成することができた。また、その動作をキャプチャすることで、役者を用いずにキャプチャデータを得ることができる。

##### c) 意識的動作と無意識動作に分けたことによる動作の制御性、再利用性の向上

動作の概要を意識的動作、詳細を無意識動作としたことで動作の修正が容易になる。また、一般的な無意識動作を作成しておけば、様々な意識的動作に適用することができ、動作の再利用性が高まる。

#### 5. 今後の課題

本研究で提案したバーチャルヒューマンの動作に関する基礎的な仕組みを、さらに有用なものとするためには、まだ様々な研究を行う必要がある。

##### a) 人間の動作のさらなる研究

人間の動作に関する研究は、モーションキャプチャ、筋肉の活動電位、床反力の測定など様々な方法によっているが、これらの研究を個々に扱うのではなく、複合して用いることが必要である。

##### b) 様々な環境への適応

意識的動作と無意識動作をわけ、再生時に動作を生成することのメリットは、起伏に富んだ地形などの存在によりより大きく現れるはずである。

##### c) イベント用簡易言語の策定

イベント処理を記述するための簡易言語やその命令群、またはそれに類する仕組みなどを考える必要がある。

##### d) 上位階層の追加

本研究では骨格だけを扱ったが、筋肉、脂肪(皮膚)、衣服などを追加できるようにする必要がある。

#### 参考文献

- [1] Jessica K. Hodgins and Nancy S. Pollard : Adapting Simulated Behaviors For New Characters, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pp. 153-162, (1997).
- [2] Shiro Kondo : Primate Morphophysiology, Locomotor Analyses and Human Bipedalism, University Of Tokyo Press, (1985).
- [3] Prem Kalra, Nadia Magnenat-Thalmann, Laurent Moccozet, and Gael Sannier : Real-Time Animation of Realistic Virtual Humans, IEEE Computer Graphics and Applications, pp.42-56, (September/October 1998).
- [4] 筒口拳, 末永康仁, 渡部保日児, 曾根原登 : 人物歩行アニメーションにおける腕の動作生成方法, グラフィクスとCAD 81-10, pp. 55-60 (1996. 8. 23).
- [5] 筒口拳, 末永康仁, 渡部保日児, 下原勝憲 : 3次元シーン内の人物歩行動作生成システム, 情報処理学会論文誌 Vol. 38 No 4, pp. 787-796 (Apr. 1997).
- [6] 日野原重明 : 新看護学 1 専門基礎 1 - 解剖生理 -, 医学書院, pp. 3-43.
- [7] 和知孝雄, 油谷安孝, 朴勤植 : 関節可動域表示の立体動的シミュレーション・モデルの基礎研究, 第 17 回医療情報学連合大会, 1-G-2-2, (1997).
- [8] Naba Barkakati : プログラミング X Window, 株式会社インプレス, (1993).