

関節可動域を考慮した人体転倒動作シミュレーションの研究

趙 航[†] 周 輝[‡] 蔡 東生[‡]

CGにおける人体の動きの生成には、多くの手間と時間がかかる。また、人間の転倒動作は危険で、モーションキャプチャを用いても目的の動作を得ることは難しい場合がある。本研究では、人体の転倒動作に着目し、年齢層によって関節可動域を考慮し、動力学シミュレーションとPD制御を用いてヒューマンフィギュアを動作させ、転倒動作を作成する。その際、ダメージが小さくなるよう、遺伝的アルゴリズムによって動作を進化させ、転倒動作を自動生成する。本研究では、人体モデルをより詳細なモデルにすれば、将来バリアフリー設備評価などに応用できる可能性があると考えられる。

Simulation of Human Falling Action Considering the Movable Ranges of Body Joints

Hang ZHAO[†] Hui ZHOU[‡] Dongsheng CAI[‡]

In this paper, we find a new method to simulate the human falling actions in computer, as this kind of actions are very dangerous and are difficult to be measured by motion capture system. As we know, people in different ages have different movable ranges of body joints. Considering these differences, we built a humanoid model, and simulate the actions of the model with dynamics calculations and PD controller. And we also used the GA(Genetic Algorithm) to evolve the simulation towards less damages of the whole body.

1、研究の背景と目的

近年、三次元コンピュータ・アニメーションの発達と普及は目指すとともに、エンターテインメント、教育分野、医療分野及びCADなどの領域にCGアニメーションが重要な役割を果たしてきている。そして、CGアニメーションに求められる映像の高品質化に伴い、人体に代表される多関節モデルを、現実感溢れる動きで表現したいという要求が高まっている。一般にCGにより動きの生成する手法には、キーフレーム間を適当な補間法[1]、モーションキャプチャシステム[2,3]、力学シミュレーションによる方法[4]、進化的な手法[5,6]などがある。しかし、キーフレーム法は自然な動きを得るために多大な労力がかかる。モーションキャプチャ法は実際に人が入るのが

難しい空間或いは危険な動作に対して、三次元アニメーションの生成は困難なものとなる。

そこで本研究では遺伝的なアルゴリズム[7]を用い、年齢層によって関節可動域を考慮し、動力的なシミュレーションと物理的なモデルにより、ヒューマンフィギュアの動きを自動的に生成し、その生成したアニメーションを分析、比較する。ただしヒューマンフィギュアとはヒトに似た、ヒトに近い自由度を持った多リンク系からなる計算機上の力学系で、CGの世界の中で動き回る。

2、人体のモデルとデータ構造

人体の関節は非常に複雑であり、その全てを正確にシミュレーションすることは困難である。本研究では図1のような、14個所の可動関節、21自由度(DOF)を持つ階層構造骨格モデルを用いてシミュレーションを行った。各関節はそれぞれPin Joint、Universal Joint、Ball Jointのような関節モデルとした。また、人間は移動するためモデルは浮遊リンク系にする必要がある。モデルのベースリンク(本研究では腰のリンク)を地上から6自由度の仮

[†] 筑波大学理工学研究科

Master's Program in Science and Engineering,
University of Tsukuba

[‡] 筑波大学電子情報工学系

Institute of Information Sciences and Electronics,
University of Tsukuba

想的な関節でつなぐ。腰のリンクをルートとして、上半身、手足に分岐しており、各関節の幾何学変換は、この構造に従って親から子へと継承される。

このようなモデルにより、シミュレーションの要求が高いと思われる人間の転倒動作に関して、年齢や性別、更に個性や精神状態といった様々なパラメータに対して、本研究では、特に男性の高齢者と壮年者関節可動域の制限がどのように変化するのかを考察した。高齢者の関節可動域は表1のように示す。

「BVH」は、現在普及している一つのデータ形式である。BVH ファイルには、モーションデータとともに、オブジェクトの階層構造や、それら関節の初期状態が定義される。本研究では動力

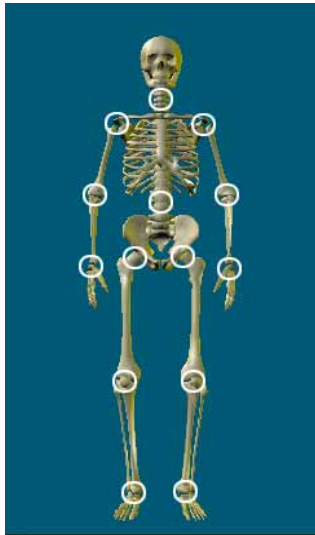


図1. 人体の骨格モデル

Joint Name	DOF	Movable Range
Neck	3dof	X: -13.00 ~ 15.00
		Y: -21.00 ~ 30.00
		Z: -30.00 ~ 35.00
Shoulder (right)	2dof	Y: -109.00 ~ 4.00
		Z: -1.00 ~ 109.00
Elbow (right)	1dof	Y: 28.00 ~ 110.00
Wrist (right)	1dof	X: -48.00 ~ 40.00
Waist	2dof	Y: -13.00 ~ -1.00
		Z: -6.00 ~ 7.00
Hip (right)	2dof	X: -5.00 ~ 19.00
		Y: 4.00 ~ 70.00
Knee (right)	1dof	Y: -127.00 ~ -32.00
Ankle (right)	1dof	Y: -1.00 ~ 28.00

表1: 65 ~ 85 歳の高齢者関節可動域 [10]

学計算により生成したモーションデータを BVH ファイルの形式でセーブする。

3. 力学計算

3.1. SD/FAST[8]の利用

本研究において、動力学計算のコード生成に SD/FAST を用いている。SD/FAST は動力学的シミュレーションの汎用的なコード生成ツールであり、物体の構造を記述すれば、その物体の物理シミュレーションのためのプログラムコードを自動生成してくれる。

SD/FAST では、運動方程式の生成に Kane's method を用いており、また数値積分に 4th order Runge-Kutta 法を用いている。

生成されたコードでは Lagrange 方程式に基づき、一般化座標を用いて運動方程式が記述される。Lagrange 方程式は以下ようになる。

$$F_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad \dots (3.1)$$

ただし、 F_i は座標軸 i における一般力、 q_i は一般変位であり、 L はラグランジアンと呼ばれる値である。

ラグランジアンは

$$L = K - P \quad \dots (3.2)$$

で定義され、 K は運動エネルギーの総和であり、 P は位置エネルギーの総和である。

このようにして導かれたロボットマニピュレーターなどの動力学方程式は、次のようになる。

$$\tau = \mathbf{M}(\theta)\ddot{\theta} + \mathbf{V}(\theta, \dot{\theta}) + \mathbf{G}(\theta) \quad \dots (3.3)$$

ここで、 θ と $\dot{\theta}$ と $\ddot{\theta}$ は関節角度、角速度、角加速度で、 $\mathbf{M}(\theta)$ は $n \times n$ の質量行列、 $\mathbf{V}(\theta, \dot{\theta})$ は遠心力やコリオリの項を表す $n \times 1$ のベクトル、 $\mathbf{G}(\theta)$ は重力項を表す $n \times 1$ ベクトルであり、 τ はトルクを表す $n \times 1$ のベクトルである。

3.2. 関節の力学特性

人間の関節は粘弾性などの力学特性を持つ。各関節が可動範囲内で動くとき、粘性摩擦

$$\tau = -k_v \dot{\theta} \quad \dots (3.4)$$

を適応する。ここで τ はトルク、 k_v は粘性係数、 $\dot{\theta}$ は現時点での角速度である。

また、関節角度制限を越えた場合は、復元トルク

$$\tau = k_p (\theta_{lim} - \theta) - k_v \dot{\theta} \quad \dots (3.5)$$

を与えるものとする。ここで、 τ はトルク、 k_p は角度に対応したバネ定数、 k_v は速度に対応した摩擦係数、 θ と $\dot{\theta}$ は現時点での角度、角速度であり、 θ_{lim} はその関節の限界角度である。

3.3. 床との衝突

本研究では、人体の各部分に直方体の Bounding box を設定し、床との衝突を検出する。リンク同士の衝突は検出しない。リンクが床と衝突した場合は、床の抗力

$$f = k_p (z_{lim} - z) - k_v \dot{z} \quad \dots (3.6)$$

を与えるものとする。ここで、 f は床からの垂直抗力、 k_p は床にめり込んだ位置に対応するバネ定数、 k_v は速度に対応する摩擦係数、 z と \dot{z} は垂直方向に対するリンクの位置であり、 z_{lim} は床の高さである。

4. PD制御

PD (Proportional-Derivative) 制御はロボットアームの姿勢制御などによく用いられる制御系である。

まず、動作のキーフレームとなる姿勢と、その姿勢での関節角や角速度を設定する。

トルクは、

$$\tau = k_p (\theta_d - \theta) + k_v (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \quad \dots (4.1)$$

で計算される。ここで、 θ_d と $\dot{\theta}_d$ は次のキーフレームにおける角度と角速度であり、 θ と $\dot{\theta}$ は現時点での角度と角速度である。つまり、指定された動きとどれだけずれているかに応じてトルクを発生させるわけである。 k_p と k_v は関節の強さを表し、gain constants と呼ばれる。本研究では、ヒューマンフィギュアが、転倒時にとっさにあるポーズをとる、と仮定し、1つのキーフレームをあたえるものとする。

5. 遺伝的アルゴリズム[7]

5.1. 遺伝的アルゴリズムとは

遺伝的アルゴリズム (GA) とは、生物進化の原理に着想を得たアルゴリズムであり、解の探索、最適化問題などに対して幅広く用いられる方法である。GA では候補解を染色体として捉え、染色体の集団に対して大域的検索を行っていくため、他の解法を用いた時に障害となる解空間の増加による解候補の爆発的増加に対しても有効であり、比較的高速に解を発見できるという特徴がある。GA の処理手順は以下ようになる。

- (1) 初期集団の生成
- (2) 終了条件が満たされるまでループ
 - (A) 適応度の評価
 - (B) 淘汰と選択
 - (C) 遺伝的操作

まず、決められた個体数の染色体をランダムに生成し、初期集団とする。その後、それぞれの個体が制約をどれほど満たしているかを求め (適応度)、それに応じて親との選択と交叉を行う。適応度の高い個体により多くの子孫を残す。また、初期の解空間外の探索、局所解からの脱出のために、変異率に応じて染色体の一部の値をランダムに変える (突然変異)。

5.2. 本研究で用いた遺伝的アルゴリズム

PD 制御のパラメータ k_p 、 θ_d をそのまま遺伝子型とする実数値表現をとる。また、 k_v 、 $\dot{\theta}_d$ は定数とし、経験的な値として設定している。自由度は 21 であるから、遺伝子は 42 個の実数値からなる。これをヒューマンフィギュアに適応し、動力

学計算によって、床との衝突により転倒ダメージを決定する。ダメージが低いほうが適応度が高いものとする。

ダメージの計算は、各リンクにダメージの重み w_i を設定し、以下の式で与えられる。

$$D = \sum_{i=1}^{15} w_i \times f_i \quad \dots (5.1)$$

ただし、 f_i は i 番目のリンクが床に与える瞬間の垂直抗力の最大値である。

6、実行結果と結論

本研究では、高齢者と壮年者に対して以下の条件で実験を行った。シミュレーションの表示には Poser 4 [9]を用いる。

- : 0.1 秒間、前方から胴に 1000N の打撃
- : 染色体 30 個、世代数の上限 500 世代

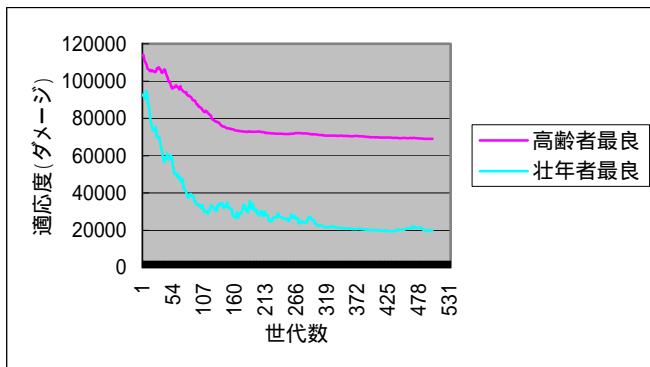


図2 GAによる適応度の変化

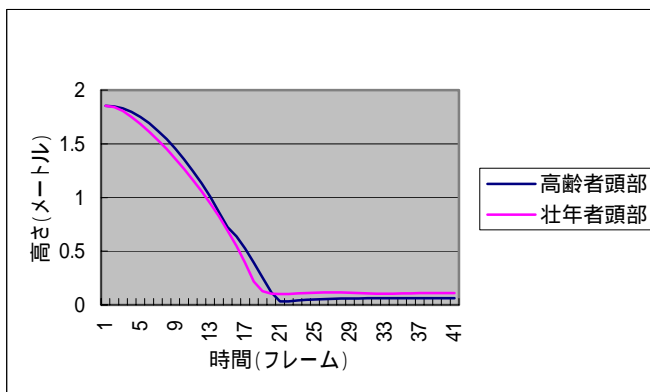


図3 時間による頭部位置の変化

実験の結果から、以下の結論を得られた：

- 、 GA によるより適応度の高い (ダメージが低い) 動作へ進化させ、自動生成した。
- 、 高齢者と壮年者を比べ、初期適応度はほぼ同じ水準だが、500 世代後に大きく違いがあった。
- 、 関節可動域が人体の転倒動作に著しく影響を与えることを分かった。

7、まとめと今後の課題

本研究では、人間の 14 関節、21 自由度の階層構造骨格モデルを構築した。また、遺伝的なアルゴリズムを用い、関節可動域を制限した高齢者と壮年者の転倒動作を進化させ、自動的に生成した。その転倒動作の適応度を量的に評価した。今後の課題としては、より詳細なモデルを構築する。また、この手法を他の人間動作生成への応用も考えている。

参考文献：

- [1] Gomez, J. E. (1985). TWIXT: A 3D animation system. Computers and Graphics, 9(3):291-298
- [2] 岡本庄司 「モーションキャプチャデータからのヒューマンフィギュアの運動生成」卒業論文 (1998)
- [3] Unuma.M., Andyo.K., and Ryozo Takeuchi: "Fourier Principle for Emotion-based Human Figure Animation", Proc. SIGGRAPH 95, pp.91-96(1995)
- [4] J.K.Hodgins, W.L.Wooten, D.C.Brogan, J.F.O'Brogan. Animating Human Athletics. In SIGGRAPH 95 Proceedings, Annual Conference Series, pages 71-78, ACM SIGGRAPH, August 1995
- [5] Larry Israel Gritz, Evolutionary Controller Synthesis for 3-D Character Animation, 1999, Doctor Dissertation
- [6] P. Faloutsos, M. van de Panne, D. Terzopoulos, Composeable Controllers for Physically-based Character Animation, Computer Graphics(SIGGRAPH 2001, pages 251-260,2001)
- [7] 北野宏明 遺伝的アルゴリズム 産業図書、1993
- [8] Dan Rosenthal, Michael Sherman: SD/FAST, Parametric Technology Corp.
- [9] POSER4, Curious Labs, Inc.
- [10] 「製品評価技術基盤機構」の人間特性データ。
<http://www.meti.go.jp/policy/human-design/>



図4 高齢者初期世代の転倒動作



図5 高齢者 500 世代後の転倒動作



図6 壮年者初期世代の転倒動作



図7 壮年者 500 世代後の転倒動作