

# 物理シミュレーションによる 人型キャラクターの歩行アニメーションに関する研究

2004MT116 山田 大樹

指導教員

2004MT123 山北 裕太

金 知俊

## 1 はじめに

近年, IT 技術の発達により CG は飛躍的な発展を遂げてきた. その用途は映画やゲーム, アニメーションなど多岐に渡っており, その仮想空間で表現される人物や車の動作, あるいは爆発シーンなどの物理現象は本物と区別がつかないほどリアルに再現されている. その中でもキャラクターアニメーションはエンターテインメントから教育まで非常に幅広い分野で用いられているが, 映画やゲームでは物理計算が省かれることが多い. またその生成には, モーションキャプチャという高価な設備が用いられるのが一般的であるが, 個人で使用するのは難しい. そこで本研究では, 無償で使用できる物理計算エンジンを用い, 物理計算に基づいて自律的に歩行運動のできる人型キャラクターを実装し, 3次元仮想空間内での安定した直進歩行, 目標地点までの歩行や障害物を回避する歩行を再現することを目標としている.

なお, 山北は主に歩行アルゴリズムを, 山田は主に経路決定アルゴリズムを担当した.

## 2 二足歩行

二足歩行とは, 一方の脚を上げて前方で着地し, もう一方の脚を上げてさらに前方へ着地する運動の反復動作である. この動作の中には, 右脚を上げている状態を例にすると, 地面から離れている右脚の時期である遊脚期, 身体を支えている左脚の時期である立脚期, この他に, 両脚とも地面と接している二重支持期とよばれる時期が存在する. また, 歩行には必ず二重支持期が存在し, これを歩行の定義とする. さらに本研究では, 運動をする中でキャラクターが不安定にゆれてしまったり転倒することなくこのような運動を続けて前進できる状態を目指す.

## 3 関連研究

物理現象を考慮した3次元の仮想空間で自律的に歩行運動をする人型キャラクターを実装するにあたり, 本研究では物理計算エンジンとして ODE を使用した [1],[2].

また, 文献 [3],[4] を参考に, 実際の人間の身体の各部位の質量比や, 重心位置などの具体的なデータを取り入れた.

Pei-Feng Chen らは, 効率よく歩くためのエネルギー消費モデルを紹介している [5]. その中でもタイミングアレンジメントと呼ばれる人間の歩行運動における特徴的な時間配分を本研究でも取り入れ, より人間に近い歩行動作を生成した.

Paul S.A.Reitsma らは文献 [6] で, 複雑な環境でユー

ザが操作する場合の素早い応答や動作とモデルデータを一致させることを可能にするためのモーション間の編集や連結の増加などの手法を紹介している.

また, 文献 [7] を参考に, 最小努力の原理や快適様式など人間の一般的な行動基準を取り入れた. 加えて文献 [8] を参考に, 障害物回避を含む歩行運動における安定な動作を定義した.

## 4 人型キャラクター

### 4.1 モデル

本研究では, 仮想空間内ではあるが物理シミュレーションに基づいた歩行アニメーションを実現するため, 人型キャラクターの質量比, 重心位置を文献 [3],[4] のデータに基づいてモデルを作成した. また, 人型キャラクターの表現方法として, 頭と胴体部分はカプセル形状, 首と腕と脚は円柱, 各関節は球を使用して表現した (図 1).

### 4.2 関節機構と階層構造

本研究で使用する人型キャラクターは複数の身体部位と関節から構成され, 自由度の合計は 20 自由度である. また,  $x, y, z$  軸をロール, ピッチ, ヨーといい, 本研究で使用するキャラクターの股関節はロール, ピッチ, ヨーの三つの自由度をもち, 膝関節はピッチ, 足関節はロール, ピッチの二つの自由度をもつような仕様となっている (図 2). さらにキャラクターの階層構造を考慮し, 胴体部分をルートとして設定した.

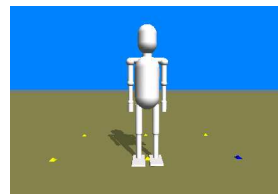


図 1 人型キャラクター

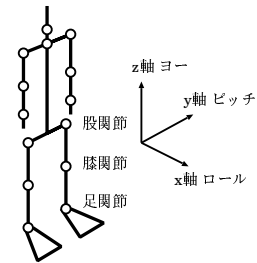


図 2 関節機構

## 5 歩行動作生成手法

### 5.1 順運動学と逆運動学

多関節オブジェクトの関節運動を制御する方法として, 順運動学と逆運動学が挙げられる. 各関節にあらかじめ指定した角度を与えキャラクターの姿勢を決定する方法が順運動学であり, それとは逆にキャラクターのリンク先端の位置座標を与えることによって各関節の角度を算出し, キャラクターの姿勢を決定する方法が逆運動学であ

る [9]. 本研究では脚の動作を逆運動学で求め、腕の動作を順運動学で求める。

## 5.2 逆運動学 (角度計算手法)

本研究で使用する人型キャラクタの片脚を例に逆運動学の角度計算手法を説明する。片脚の各関節の中心位置、各身体部位の長さ、 $l_3$  と直交するベクトルをそれぞれ図 3 に示す。

### 5.2.1 足関節位置 $P_3$

足関節位置  $P_3$  の  $x$  軸座標を  $P_{3x}$ 、 $y$  軸座標を  $P_{3y}$ 、 $z$  軸座標を  $P_{3z}$  とする。また、この位置座標  $P_3$  を先端位置として、各関節の角度の値を以下の方法で算出する。

### 5.2.2 股関節 $\theta_1$ (ヨー角)

股関節  $\theta_1$  は、 $z$  軸まわりの自由度をもち、ベクトル  $a$  が与えられれば  $\theta_1$  を求めることができる。図 4 に示すとおり、 $a$  の  $x$ 、 $y$  成分をそれぞれ  $a_x$ 、 $a_y$  とする。

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{a_y}{a_x}\right) \quad (1)$$

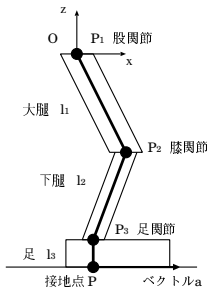


図 3 キャラクタの関節位置

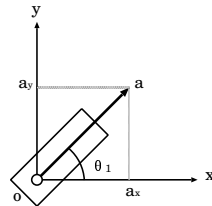


図 4 キャラクタの真上から見た足 ( $\theta_1$ )

### 5.2.3 股関節 $\theta_2$ 、膝関節 $\theta_3$ 、足関節 $\theta_4$ (ピッチ角)

$y$  軸まわりの自由度をもつ股関節のピッチ角  $\theta_2$ 、膝関節のピッチ角  $\theta_3$ 、足関節のピッチ角  $\theta_4$  を求める。 $\overline{P_1P_3}$  の距離と三角形  $P_1P_2P_3$  と三角形  $P_1P_3Q$  で求めた  $\cos \alpha$ 、 $\cos \beta$ 、 $\phi$  により逆関数を用いて  $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$  の角度の値を決定する (図 5)。

$$\begin{aligned} \theta_2 &= \phi + \alpha \\ &= \arctan\left(\frac{\sqrt{P_{3x}^2 + P_{3y}^2}}{P_{3z}}\right) \\ &\quad + \arctan\left(\frac{\sqrt{1 - \cos^2 \alpha}}{\cos \alpha}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \theta_3 &= \pi - \beta \\ &= \pi - \arctan\left(\frac{\sqrt{1 - \cos^2 \beta}}{\cos \beta}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

足関節のピッチ角である  $\theta_4$  は、安定した歩行動作を生成するうえでとても重要な角度である。本研究で使用するキャラクタの足に関節は無く、長方形の剛体であるので、足だけの複雑な姿勢をとることはできない。よって  $\theta_4$  の値は足底の面と地面とを平行に制御することによって安定した歩行動作を生成する。

$$\theta_4 = \theta_2 - \theta_3 \quad (4)$$

### 5.2.4 股関節 $\theta_5$ 、足関節 $\theta_6$ (ロール角)

最後に、 $x$  軸まわりの自由度をもつ股関節  $\theta_5$  と足関節  $\theta_6$  を求める。 $h$  は足関節  $P_3$  から地面への垂線と地面との交点である。図 6 より、 $\sin \theta_5$  と  $\cos \theta_5$  を求め、逆関数を用いて  $\theta_5$  と  $\theta_6$  の値を決定する。

$$\begin{aligned} \theta_5 &= \arctan\left(\frac{\sin \theta_5}{\cos \theta_5}\right) \\ &= \arctan\left(\frac{P_{3y}}{l_1 + l_2 \cdot \cos \beta}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

足底の平面を地面と平行に制御するため、足関節のロール角  $\theta_6$  は図からも明らかなように以下のようになる。

$$\theta_6 = \theta_5 \quad (6)$$

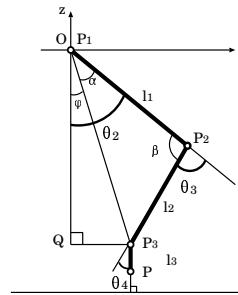


図 5 横から見たキャラクタの片脚 ( $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$ )

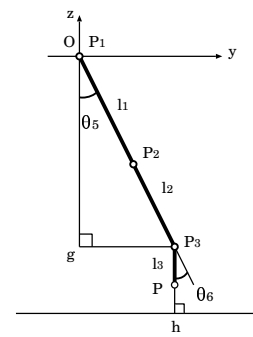


図 6 正面から見たキャラクタの片脚 ( $\theta_5$ 、 $\theta_6$ )

## 5.3 歩行制御アルゴリズム

歩行アニメーションを生成するために本研究では次のような手順で歩行制御を行う。

- step1: 脚先位置の代表点の決定
  - 連続的な歩行を生成するために脚先位置の代表点を 13 個設定
- step2: 逆運動学により関節角度を算出
- step3: 算出した関節角度になるよう各関節を制御
  - 片脚が地面から離れて最初の姿勢に戻るまでの間には代表点に対応するキャラクタの姿勢が 13 個存在
  - 時間を細かくを刻みながら次の姿勢の関節角度になるよう各関節を制御し、そのつどキャラクタを描画

## 5.4 歩行の時間配分

人間の歩行の時間配分には図 7 のような特徴がみられる。これは歩行 1 歩あたりの各時間配分であり、その割合を示している [5]。本研究では、より人間に近い歩行動作を生成するためにこのような特徴を考慮し、歩行制御を行う。

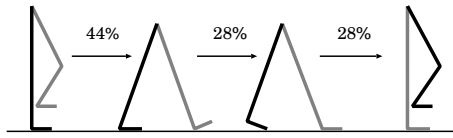


図7 歩行の時間配分

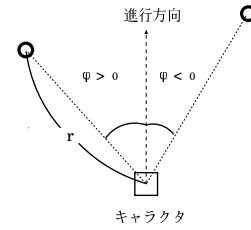


図8 仮想センサ

## 6 経路決定

### 6.1 人間の歩行における経路決定

本研究では、3次元仮想空間で人型キャラクターが障害物を避けながら目標地点を目指して歩行していくというケースを考えるが、最適なルートを自ら考えてその都度選択することのできる人間や人工知能をもったキャラクターを扱うわけではない。したがって、文献 [7], [8] を参考に、キャラクターが安定した自律的行動を取ることができ、不自然な動作をしない範囲内で障害物を避けつつなるべく短い経路を選択するというアルゴリズムで経路決定歩行を実現することとした。

### 6.2 経路決定アルゴリズムの概要

キャラクターが安定した動作ができる範囲内で障害物を避けつつなるべく短い経路を選択する経路決定歩行を実装するにあたって、以下のようなアルゴリズムを考える。

1. 目標地点がキャラクターに設定された視野内にある場合は、なだらかな曲線を描いて目標地点へ進行
2. 目標地点が視野内でない場合は、キャラクターが転倒しないように目標地点の方向へ進行
3. その過程で進行方向に障害物がある場合、より避けやすい方向を選んで障害物を避け、その後1へ戻って目標地点への進行を再開

ここで、運動するキャラクターが自律的に行動するためには自分を取り巻く環境を認識していなければならない。キャラクターを仮想空間内に表示させるためには仮想空間に固定されている絶対座標系を使うことになり、キャラクターがそれ自身の移動に用いる情報はキャラクターを中心としているので相対座標系になる。本研究では、絶対座標系と相対座標系を相互に変換する座標変換をプログラム中で実装した。

### 6.3 仮想センサ

座標変換に加えて、キャラクターが仮想空間内に存在する物体の位置を認識するための仮想センサを実装することによって経路決定アルゴリズムを完成する。本研究での仮想センサとは図8のように、キャラクターの相対座標系における物体とキャラクターの進行方向が成す角  $\phi$  と物体とキャラクターの距離  $r$  を取得して、キャラクターの動作に用いる仮想的なセンサのことである。

まず目標地点への進行では、キャラクターの進行方向を中心に広がる視野を設定し、目標地点がその視野内に入っているうちは直進を続ける。直進を続けているうちに目標地点が視野から外れた場合、目標地点と進行方向

の成す角  $\phi$  の値を利用し、左側にあれば、目標地点が視野内に入るまでゆるやかに左へ曲がって進む。  $\phi$  の値が負ならばゆるやかに右に曲がって行く。そして目標地点が再び視野内に入ったなら直進を続ける。これを繰り返すことにより、なだらかな軌道で目標地点へ進行する。

次に障害物回避であるが、障害物との距離  $r$  が設定しておいた任意の値より小さくなった場合に障害物を発見したとみなし、回避行動を開始する。上記の目標地点への進行の場合と同様にキャラクターの相対座標系での進行方向と障害物の成す角  $\phi$  の値を利用し、障害物が進行方向に対して右側にあるか左側にあるかを判断し、避けやすい方を選択して回避する。

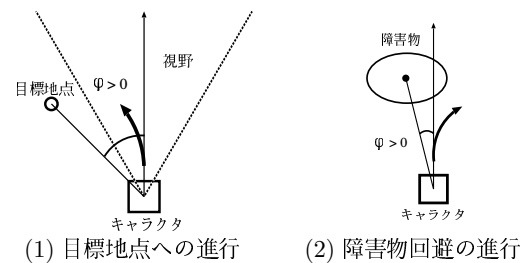


図9 経路決定の説明図

## 7 シミュレーション結果と考察

### 7.1 直進歩行

順運動学と逆運動学により歩行時の腕と脚の姿勢を決定し、13個の代表的な姿勢を5章で述べた歩行制御アルゴリズムで制御することによって、連続で安定した歩行動作の生成に成功した(図10)。また、歩行時の時間配分を考慮することにより人間らしい歩行動作に近づけることができた。さらに人間らしい歩行動作に近づけるためには、本研究で使用した人型キャラクターの関節数よりも多いキャラクターを用意し、より複雑な姿勢をとることのできる計算を考える必要がある。しかし、関節数を増やすことで、計算の負荷が増して高速なシミュレーションを生成することができなくなる可能性があるため今回は採用しなかった。

### 7.2 経路決定歩行

6章で述べた経路決定法により、目標地点の位置を変えながらシミュレーションを行った。キャラクターと目標地点の成す角度がある程度小さい場合は最短距離に近い

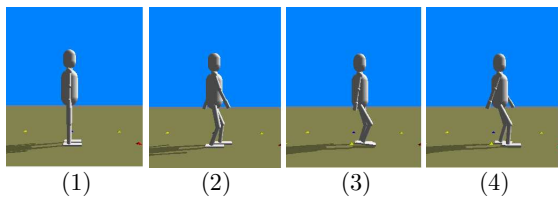


図 10 直進歩行の実行画像

なだらかな軌道を描いて歩行することができる (図 11). また、障害物を回避する歩行では不自然な方向変換をしないでなだらかな曲線軌道を描いて目標地点に到達するような歩行をする (図 12). しかし、目標位置がキャラクターの真横に近い位置にある場合や、それ以上の角度を成すような位置にある場合、実際の人間はその場で旋回してから目標地点に向けて歩行を開始するが、本研究のキャラクターは急旋回するような股関節の値を与えるとバランスをくずして倒れてしまい、目標地点にたどり着けない場合があるので、大きな円弧軌道を描いて歩行するようにした (図 13). また、障害物が極端に大きかったり、スタート地点や目標地点に極端に近いような場合は、キャラクターが障害物に衝突して転倒してしまったり目標地点に到達できないことがある (図 14). その場で急旋回できるようなキャラクターの動きを実装できれば、より実際の人間に近い経路決定歩行を再現することができる.

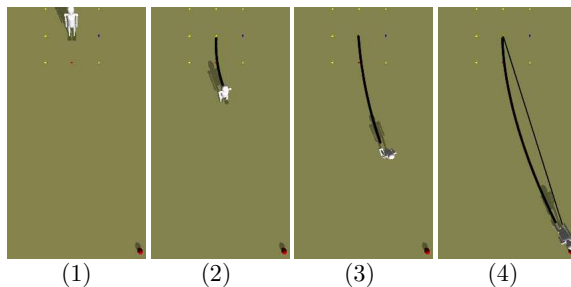


図 11 経路決定歩行の実行画像

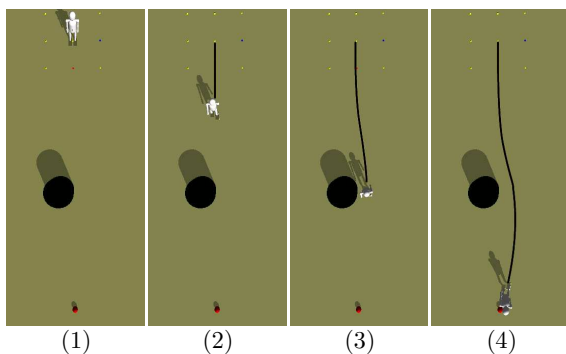


図 12 障害物回避歩行の実行画像

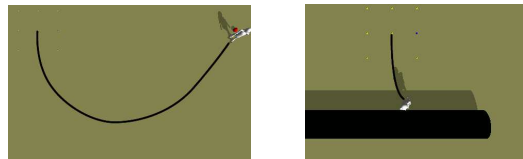


図 13 目標地点が真横の場合 図 14 障害物が大きい場合

## 8 おわりに

本研究では、3次元の仮想空間内で人型をしたキャラクターに障害物を避けつつ目標地点まで自律的に歩行運動をさせるアニメーションを生成することを目的としている。手法として、統計データに基づいた本物の人間に近い構造の人型キャラクターを生成した。そして腕の動作を順運動学で、脚の動作を逆運動学で算出した。さらに、相対座標系でのキャラクターと目標地点の成す角と障害物の成す角、加えてキャラクターと障害物との距離の値を利用して経路決定を行った。これらの手法により、人型キャラクターが転倒しない安定した姿勢で障害物を避けつつ目標地点まで歩行運動をするアニメーションが生成できた。現状の問題点として、障害物が複数の場合や障害物が大きい場合に対応できないことや、キャラクターが不安定で急激に曲がることのできないことが挙げられる。歩行運動の重要な要素として床からの反力が挙げられるが、これが考慮できればキャラクターの安定度が増し、より本物の人間の歩行に近い動的な歩行の実装や様々な環境に対応した経路決定歩行が可能になると考えられる。

## 参考文献

- [1] 出村公成: ロボットシミュレーション, 森北出版 2007.
- [2] Russell.Smith: OPEN DYNAMICS ENGINE, <http://ode.org/>.
- [3] 斎藤宏、中村隆一: 基礎運動学, 医歯薬出版株式会社 1992.
- [4] 浅見俊雄、石井喜八、宮下充正、浅見高明、小林寛道: 身体運動学概論, 大修館書店 1976.
- [5] Pei-Feng Chen and Tsai-Yen Li: Planning Efficient Walking Gaits in Real-Time for Human Characters, Computer Science Department National Chengchi University 2003.
- [6] Paul S.A.Reitsma and Nancy S.Pollard: Evaluating Motion Graphs for Character Animation, ACM Transactions on Graphics, Vol26, No.4, Article 17, October 2007.
- [7] W.A. Sparrow: 身体運動学 -行動選択の基準と運動の経済性, 大修館書店 2006.
- [8] 永田辰: バイオキネティクス -運動力学からリハビリテーション工学-, 杏林書院 1991.
- [9] 栗原恒弥、安生健一: 3DCG アニメーション, 技術評論社 2003.