

2005年度 卒業論文

3DCG における馬の代表的な 4 種の走法の  
なめらかな移り変わりの表現

指導教員：渡辺 大地講師

メディア学部 3DCG コンポーネントプロジェクト

学籍番号 M0102244

滝沢 崇

2005年度 卒業論文概要

論文題目

3DCG における馬の代表的な 4 種の走法の  
なめらかな移り変わりの表現

メディア学部

学籍番号：M0102244

氏名

滝沢 崇

指導  
教員

渡辺 大地講師

キーワード

3DCG、循環座標降下、Inverse Kinematics  
歩行パターン、走行シミュレーション

今日、コンピュータの進歩により複雑な計算処理を高速におこなえるようになった。それとともに、3DCGによる表現の幅は広がり、リアリティの高いグラフィック表現が可能となった。リアリティを高めることは見る側に没入感を与えるので、3DCGによるアニメーションにおいて重要な役割をもつ。また一方で、動物の歩行や走行を3DCGで再現しようとする研究も多くなされ、馬のアニメーションに関しても映画やアニメ等で利用される頻度は高まり、ゲーム等ではリアルタイムに動きを生成するアニメーションが用いられている。実際の馬は速度が変化すると、歩幅をそれに合ったものへと変化させている。また大きな速度変化をとまなう場合には、走り方を速度に応じた歩行パターンへと変化させている。歩行パターンとはある特徴ごとに分けられた走法の種類のことである。そこで本研究では、リアルタイム3DCGにおいて、速度変化をとまなう馬の走行をよりリアルに見せるための手法を考案した。速度に応じた歩幅をとらせ、速度に応じた歩行パターンへとなめらかに変化させる手法を示している。

# 目次

第1章	序章	1
1.1	はじめに . . . . .	1
1.2	本論文の構成 . . . . .	2
第2章	馬の走行について	3
2.1	速度変化の仕方 . . . . .	3
2.2	馬の歩行パターン . . . . .	4
2.2.1	WALK . . . . .	5
2.2.2	TROT . . . . .	6
2.2.3	CANTER . . . . .	7
2.2.4	GALLOP . . . . .	8
第3章	速度変化手法の解説	9
3.1	歩幅の算出 . . . . .	9
3.2	関節角の決定 . . . . .	11
3.3	歩行パターン変化手法 . . . . .	17
第4章	評価	19
4.1	骨の動き . . . . .	20
4.2	歩幅の変化 . . . . .	21
4.3	歩行パターン変化 . . . . .	22
第5章	まとめ	26
	謝辞	27
	参考文献	28

# 第 1 章

## 序章

### 1.1 はじめに

今日、コンピュータの進歩により複雑な計算処理を高速におこなえるようになった。それにともない、3DCGによる表現の幅は広がり、リアリティの高いグラフィック表現が可能となった。リアリティを高めることは見る側に没入感を与えるので、3DCGによるアニメーションにおいて重要な役割をもつ。

また、今日では動物の歩行や走行を3DCGで再現しようとする研究[1,2]も多くなされ、馬のアニメーションに関しても映画やアニメ等で利用される頻度は高まり、ゲーム等ではリアルタイムに動きを生成するアニメーションが用いられている。

現在インタラクティブなアプリケーションで使われるアニメーションの多くは、モーションキャプチャ[3]で測定されたデータや、手作業により各時間ごとの関節角を設定し、作られたものである。今日、ゲーム[4,5,6]などに登場する馬はこれらをそのまま用いたものである。走行は速度によらず一定のアニメーションの繰り返しであるし、走法の変化は見られない。実際の馬は速度が変化すると、歩幅をそれに合ったものへと変化させている。また大きな速度変化をとまなう場合には、走り方を速度に応じた歩行パターンへと変化させている。歩行パターンとはある特徴ごとにわけられた走法の種類のことである。このことから、3DCGにおい

て速度変化をともなう馬の走行を再現しようとするとき、常にその速度にあった動作を作成しなければならない。

複数の動作を連続的に用いたいとき、モーシヨンプレンド [3] という手法を用いてなめらかに接続することが可能である。このモーシヨンプレンドは2つの動作における各関節角度を混合することで、その中間の動きを作成するものである。混合率を一方の動作から、もう一方の動作へと比重を変化させることで2つの動作をなめらかに接続して見せることが可能である。しかし、この手法では馬の速度変化をともなう走行はリアルに表現できないと考えられる。たとえば足先が静止している脚に対して、2つの関節角を混合すると、足先位置は静止するとは限らない。また歩行パターンごとに周期時間も異なるため、足先の離地、着地の瞬間が合わない、といった問題が考えられる。

そこで本研究では、上記の問題を解消した馬の速度変化をともなう走行アニメーションを作成するための手法を考案した。速度や接地率や遊脚時間といったデータから歩幅の長さをリアルタイムで算出し、その足先位置にあった関節角度を求めた。関節角度を決めるのには、足先の位置から各間接角度を算出する手法の1つである、循環座標降下を用いている。また、より馬の走行に近づけるため、関節角度の可動範囲を設定したり、関節の硬さを設定することで、関節が動く優先度を設定できるようにした。また、各脚ごとにタイミングや位置を変化させることで、歩行パターンをなめらかに変化させる手法を示した。

## 1.2 本論文の構成

2章では実際の馬の速度変化や歩行パターンについて説明する。3章では本研究に用いる手法について説明する。4章では、馬のアニメーションを作成し、その検証をおこない、考察を述べる。最後に5章で、本研究の成果と今後の課題を述べる。

## 第 2 章

# 馬の走行について

### 2.1 速度変化の仕方

馬には速度を変化させる様々な状況が考えられるが、馬の意思によって自身の速度を変化させることをここでは速度調節と呼ぶ。馬の速度調節には2通りの方法がある [7]。

まず1つ目は歩幅を変化させることによって速度調節をおこなうものである。ここでいう歩幅とは各足ごとの着地した地点から、次の着地点までの距離のことを指すものとする。速度を上げるには歩幅を大きくし、速度を下げるには歩幅を小さくする。小さな速度調節はこれによっておこなうことになる。

2つめは歩行パターンを変化させるものである。歩行パターンとは歩行や走行における、脚の動かす順番やタイミングなど、ある特徴をもった型のことである。人間でいうと、歩きと走りは別の歩行パターンであるといえる。また通常の動作ではないが、スキップなども歩行パターンの1つである。馬には大きくわけて4種の歩行パターンが存在する。人間が速度をあげる際に歩きから走りへと変化させるように、馬も4種の歩行パターンを変化させ、速度調節をおこなっている。歩行パターンが変化する際には大きな速度変化がともなうことになる。

## 2.2 馬の歩行パターン

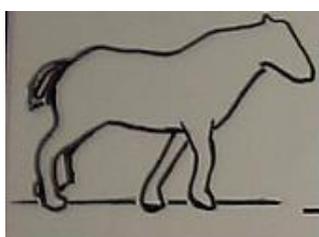
動物の歩く様子は、各脚の動く順序や接地率、各脚のタイミングなどによって分類されている。本研究では馬の歩き方の違いを歩行パターン [8,9,10] と呼ぶ。また、左後脚が地面から離れる瞬間から、着地し再度離れる瞬間までを1完歩と呼ぶ。どの歩行パターンをとるかは歩行速度によって決まり、速度に対しての消費エネルギーが最小となる歩行パターンに切り替わるものと考えられている [11]。馬には大きくわけて4種の歩行パターンが存在し、WALK、TROT、CANTER、GALLOPと分別する。WALKからGALLOPへと順に速さが増していく。CANTERとGALLOPは違いが少ないので見た目では区別することは難しい。だがWALK、TROT、GALLOP (CANTER) の3つではあきらかに脚の運びが違うため見た目にも容易に区別できる。

また、各歩行パターンごとに、周期時間や各脚ごとの動かす順番やタイミングなどが異なる。ここでいう周期時間とは1完歩の動作における時間であり、足の遊脚時間と接地時間を合わせたものになる。遊脚とは足が地面から離れている間の状態のことである。ただし周期時間が変化しても遊脚時間は変化しない。遊脚時間は個体によって常に一定である [12,13] と言われている。よって接地時間の変化により周期時間が変化しているといえる。接地時間を周期時間で割った値を接地率というが、周期時間の変化により接地率も変化することになる。前後の脚で接地率の違う走りもおこりうるが、本研究では接地率はすべての脚で等しいと仮定する。

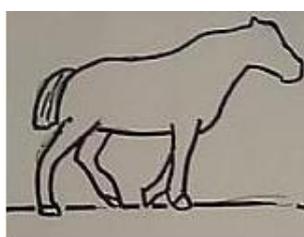
また、本研究では各脚の順序やタイミングなどの特徴の他に、各歩行パターンごとの速度や歩幅など多くの情報が必要となる。これらは3DCGで実装するうえで参照し、各歩行パターンごとの速度や歩幅の範囲の決定や、関節角を決定する要素として利用する。これらの情報は競走馬として用いられるサラブレッドのデータ [13,14] を使用している。

## 2.2.1 WALK

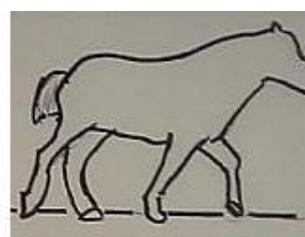
日本語の常歩（なみあし）にあたる。ゆったりと歩いている状態である。速度は時速 6.4～7.2 キロ程度で、歩幅は 1.5m 前後、周期時間は約 1 秒、接地率は 0.5～0.75 である。脚の運びは、左後、左前、右後、右前の順で 4 拍のリズムで離地と着地を繰り返す。図 2.1 は脚の動く様子を時間ごとにスケッチしたものである。1～6 の順に時間の経過に沿った状態を表している。1 つの足が着地する直前に次の足が離地する。よってほとんどの瞬間で 1 つの足が遊脚状態にある。



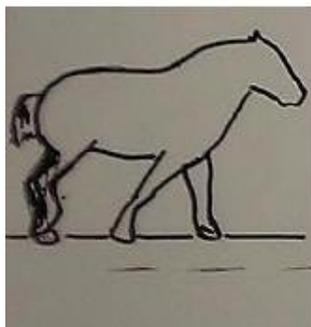
①



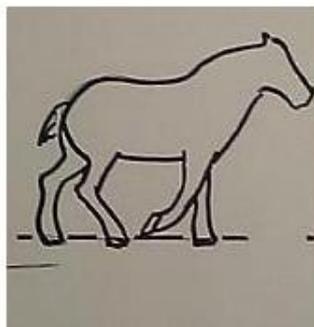
②



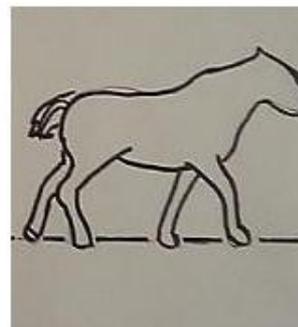
③



④



⑤



⑥

図 2.1: WALK

## 2.2.2 TROT

日本語の速歩（はやあし）にあたる。人間で言うジョギングしているような状態である。WALK よりも速く、飛び跳ねるように進むので上下動が大きい歩様である。速度は時速 14～48 キロ程度で、歩幅は 1.8～3.0m、周期時間は約 0.6 秒、接地率は約 0.5 である。対角線上の脚をペアにして動かす歩様であり、左後と右前、右後と左前と交互に離地と着地を繰り返す。図 2.2 は脚の動く様子を時間ごとにスケッチしたものである。1～6 の順に時間の経過に沿った状態を表している。2 つのペアの足が着地する瞬間に次のペアの足が離地する。よって常に 2 つの足が遊脚状態にある。

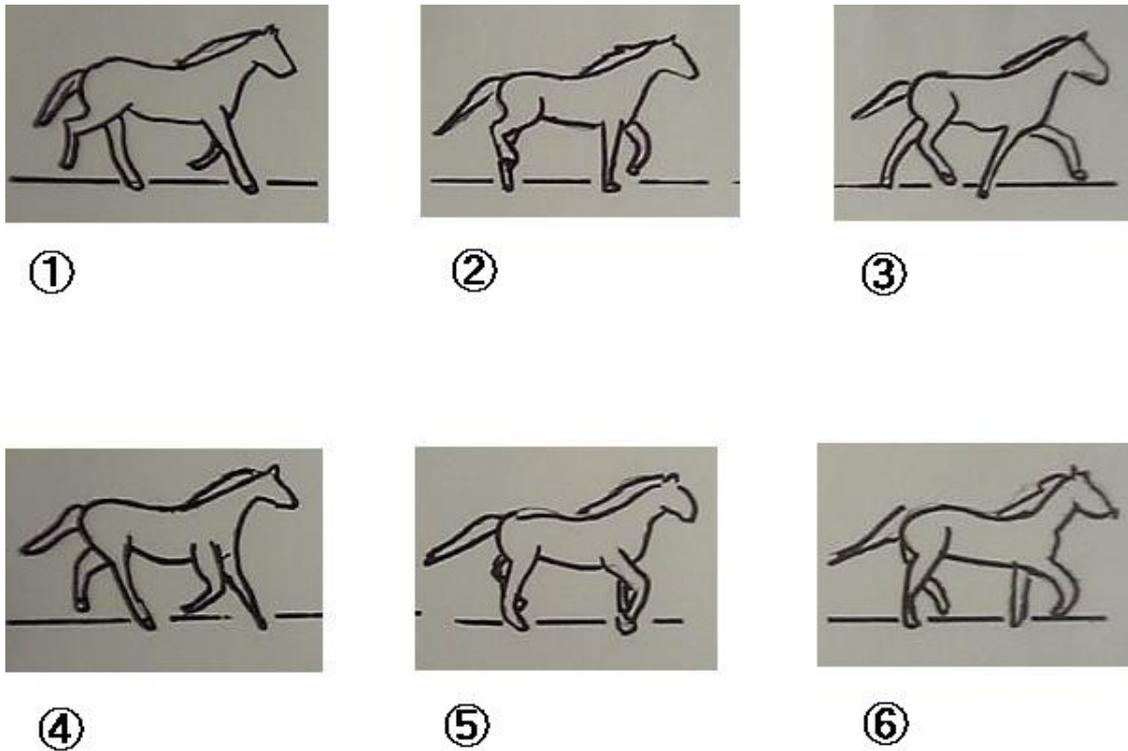


図 2.2: TROT

### 2.2.3 CANTER

日本語の駆歩（かけあし）にあたる。軽いスピードで走っている状態である。4つの脚が宙に浮く瞬間が存在する。速度は時速 20～40 キロ程度で、歩幅は 4.0～5.5m、周期時間は約 0.4～0.5 秒、接地率は約 0.25～である。左後、右後と左前、右前の順で離地と着地を繰り返し、3 拍のリズムで走る。図 2.3 は脚の動く様子を時間ごとにスケッチしたものである。1～5 の順に時間の経過に沿った状態を表している。

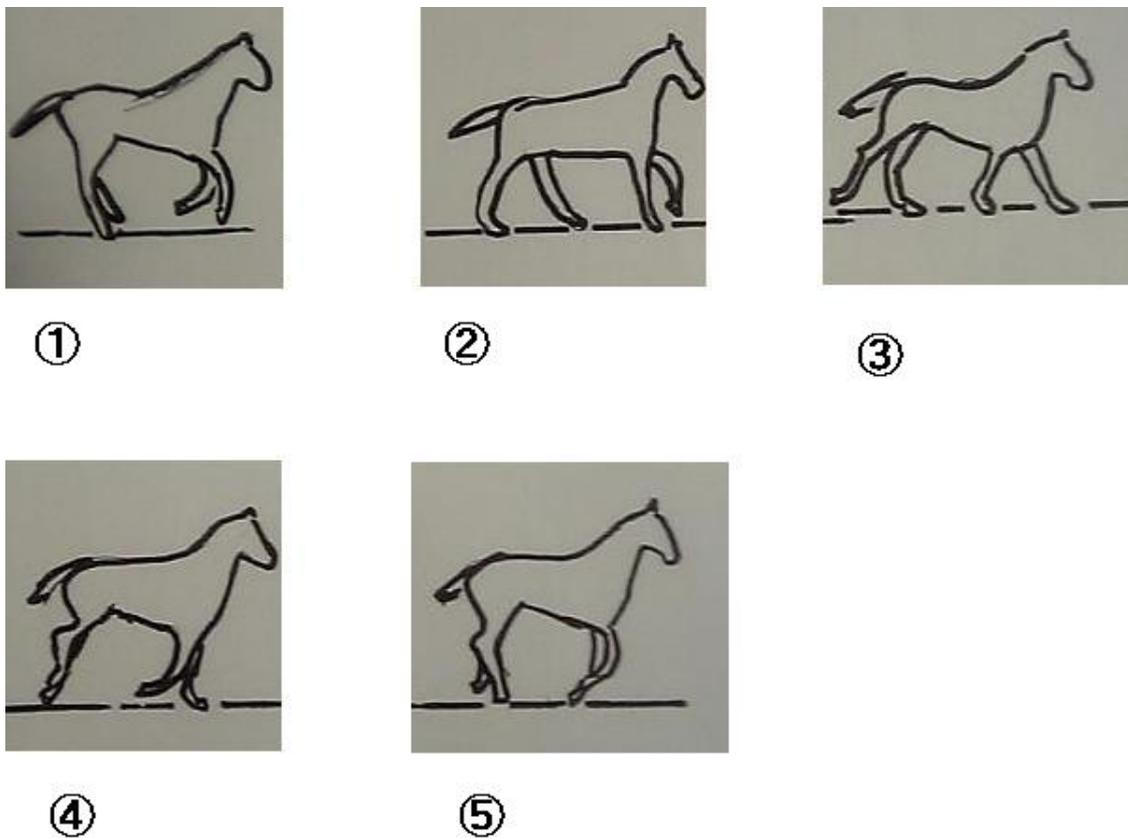


図 2.3: CANTER

## 2.2.4 GALLOP

日本語の襲歩（しゅうほ）にあたる。馬のもっとも速く走れる歩様である。競馬などで見られる走りもこれである。CANTER 同様、4つの脚が宙に浮く瞬間が存在する。速度は時速60キロ前後で、歩幅は7mをこえる。周期時間は約0.4~0.45秒、接地率は約0.25である。脚の運びは左後、右後、左前、右前の順で4拍のリズムで離地と着地を繰り返す。図2.4は脚の動く様子を時間ごとにスケッチしたものである。1~6の順に時間の経過に沿った状態を表している。

脚の動く順が交差するようなので交叉襲歩とも呼ばれる。これに対し、左後、右後、右前、左前の順で離地と着地をおこなう歩様は回転襲歩と呼ばれる。馬はスタートの加速時や手前を変える際などにこの回転襲歩と呼ばれる歩様で走る。しかし、本論文では馬の通常時の走りである交叉襲歩を GALLOP とする。

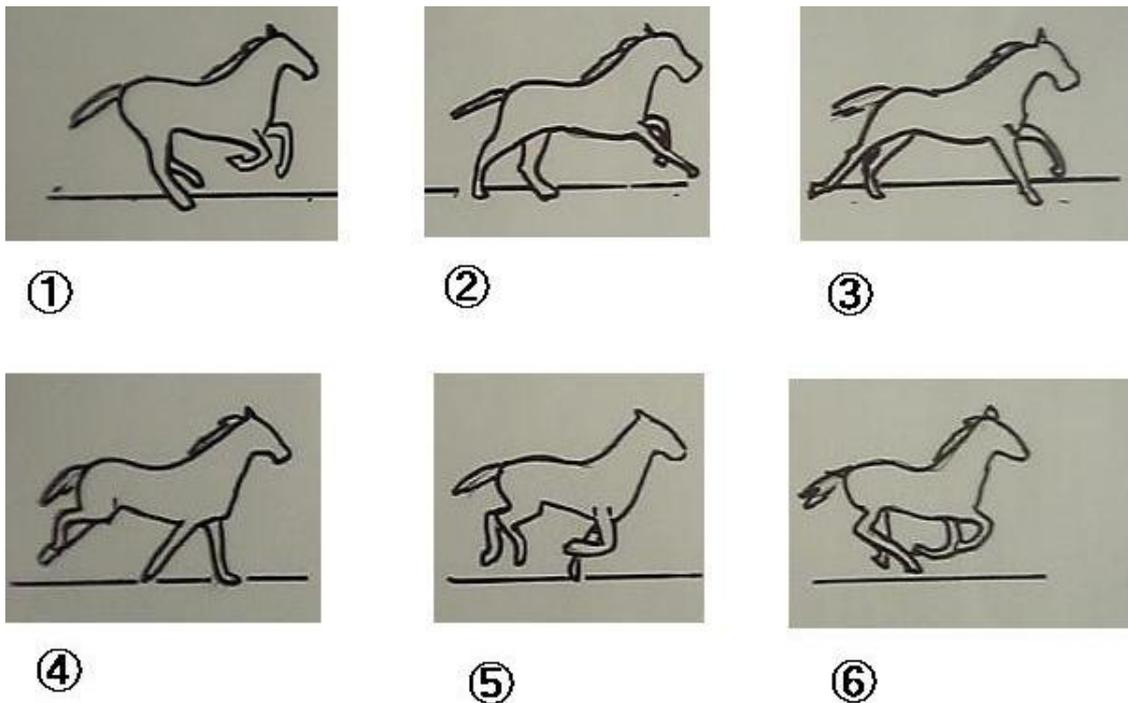


図 2.4: GALLOP

## 第 3 章

# 速度変化手法の解説

本研究では 3DCG の馬のアニメーションでリアルな速度変化をおこなわせる為に、速度が変化すると共にその速度に応じた歩幅をとり、速度に応じた歩行パターンへなめらかな変化をおこなわせる。歩幅を正確にとるには、速度に合う歩幅を求め、その値をもとに関節角を決定している。3.1 節では歩幅を算出する方法を示し、3.2 節では関節角度を決定する手法を示す。3.3 節では歩行パターンをなめらかに変化させる手法を示す。

### 3.1 歩幅の算出

本研究では与えられた速度から、適する歩幅を算出し、その分だけ脚を動かすという手法を用いている。歩幅と遊脚中の足先の位置を決める必要がある。

ここでは以下のことを仮定する。

- 脚は地面を滑らない。
- 脚は接地時は一定の高さにあるものとし、地面にめり込んだりしない。
- 接地率はすべての脚で等しいとする。
- 一定の速度で進むとき、1 完歩に馬が進む距離と、各脚の歩幅は等しい。

ここでは馬の足先が速度に応じて、遊脚中に進む距離を算出する方法を示す。また、遊脚時間は初期に設定し、接地率は歩行パターンに合った既定の値を使用するので、速度  $V$ 、遊脚時間  $P$ 、接地率  $\alpha$  は既知とする。

馬が1完歩に進む距離は馬の走行する速度と周期時間によって以下のように求められる。

$$M = VT \quad (3.1)$$

$M$  : 馬が1完歩に進む距離 (m)       $V$  : 走行する速度 (m/秒)

$T$  : 周期時間 (秒)

また以下の関係が成り立つ。

$$P = T(1 - \alpha) \quad (3.2)$$

$P$  : 遊脚時間 (秒)       $\alpha$  : 接地率

よって、遊脚中に足先が進む距離  $S$  は以下ようになる。

$$S = \frac{VP}{1 - \alpha} \quad (3.3)$$

各パラメータには個体差があるが、ここでは遊脚時間が0.3秒、GALLOPで接地率が0.25のモデルを仮定すると、秒速15m(時速54km)のとき、歩幅が6m、遊脚中の足先の前方への平均速度は秒速20mとなる。これをモデルの動きに適用する。脚の付け根、胴体を常に  $V$  の速さで前方へ進める。足先の位置を接地時は固定し、遊脚時には前方へ距離  $S$  の分だけ進ませる。

また速度を変化させたとき、歩幅と足先の前方への速度が変化するわけだが、各脚のタイミングの違いが次に述べるような問題を引き起こす。ある時間において

速度変化が開始されるとするとき、接地している脚もあれば、遊脚中の脚もある。よって同じタイミングで足先の前方への速度を変化することはできない。そこでどの脚も次の遊脚時にうつる瞬間にその後の足先の移動量を変化させる。また違うタイミングで足先の速度を変化させれば、各足と胴体との位置関係がずれることになる。そこで、速度変化が起こった次の各脚の歩幅はずれの分だけ修正を加えている。ずれの大きさはずらしたタイミングの大きさに比例する。速度が  $V$  から  $V'$  へ変化したとき、ずれの大きさを  $A$ 、速度変化が起こってから足が動き始めるまでの時間を  $C$  とすると、ずれの大きさは以下のようなになる。

$$A = (V' - V)C \quad (3.4)$$

よって、速度変化が起こるとき遊脚中に足先が進む距離  $S$  は以下のようなになる。

$$S = \frac{V'P}{1 -} + (V' - V)C \quad (3.5)$$

本研究での馬本体の加速は、1 完歩ごとに等速に加速するものである。また各足先ごとに、前方への速度が上がるタイミングが異なるので、足先と体との相対的な位置関係にずれが生じる。このずれは次の遊脚時に修正するが、速度の変化量が大きいとき、ずれが大きくなることで正常な動作をおこなわないということが考えられる。そこで本研究では、WALK、TROT では秒速 0.5m、CANTER、GALLOP では秒速 5m の加速で速度変化をおこなった。この範囲内では脚が正常に動作することを確認している。

## 3.2 関節角の決定

本節では馬の生態 [15,16,17] について述べる。馬は人でいう腕の肘の部分までと足の膝の部分までが体の中に隠れている。前後脚がよく発達し、長く伸びた結果大きな歩幅を得ることが可能となっている。肉食動物の多くは指向型といわれるつま先立ちの状態である。これに対し、馬を含む草食動物の多くは蹄行型といわ

れる指先で立っている状態である。第1及び第5指が消失し、第2第4指が退化した。第3指が著しく発達し、この指によって体を支えている。また人間の肩甲骨は鎖骨によって脊椎に固定されているが、馬には鎖骨がないため、肩甲骨と脊椎は靭帯で繋がれているだけである。このため馬の肩甲骨は走行中も脚の動きに連動して動いている。肩甲骨の可動性や蹄行型であることから、人間のモデルと比べると各脚において骨、及び関節数の多いモデルが必要になる。本研究では図3.1で示されるような階層構造をもつ骨格モデルを作成した。また、馬の脚の骨格は前から見るとまっすぐであり、とう骨、けい骨は前後運動だけに固定され、左右には回転しない仕組みとなっている。足先も基本的にはまっすぐに進む。

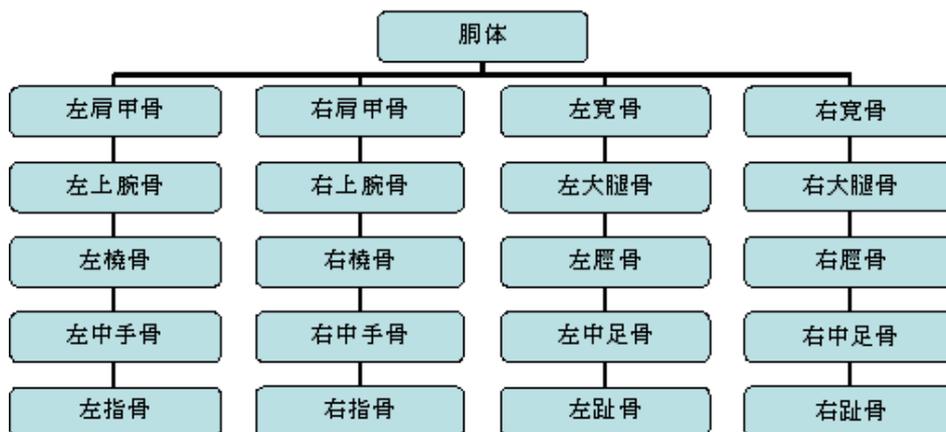


図 3.1: 骨格モデル階層図

速度と歩幅は密接な関係にあるので、速度の変化を表現するためには、歩幅を速度に適した長さへと変化する必要がある。また歩幅を正確にとるには、指定した位置に正確に足先を配置する必要がある。足先の位置は各足の骨の長さとそれらをつなぐ関節の角度によって決まる [3,18]。もし一定の歩幅での走行であれば、アニメーションにおける各フレーム、またはキーとなるフレームをその歩幅で走行するように、あらかじめ関節角度を調節したものを用意すればよい。しかし、リアルタイムで歩幅が変化していく場合、関節角をその都度歩幅にあった角度へと調節していかなければならない。

そこで本研究では脚の付け根と足先の位置から、その間の関節角を求める [19] といった考え方をを用いる。つまり先に足先の位置を決定し、その後で足先がその位置にくる関節角を求めていくものである。先に足先の位置が決定できるため、正確な歩幅で走る馬を作ることができる。また接地している足の位置を固定することができるため、足が地面を滑るといった挙動が起きることはない。

骨格の先端の位置から、その間の各間接角度を求めるための技術を一般的に Inverse Kinematics といい、ロボット工学やCGの世界で用いられている。しかし、多関節体の場合両端の位置を決定しても間の関節角の大きさは一意に定まらず、解は無限に存在してしまう。そこで無数の解の中から、条件に合った解を得るための多くの手法が考案された。本研究では循環座標降下 [19] と呼ばれる手法を用いる。循環座標降下とは Inverse Kinematics に関する手法の1つであり、比較的簡単な計算を何度か繰り返すことで近似的な解を求めるものである。計算自体も単純で、繰り返しの回数も少なく済むので、本研究のようなリアルタイムで動作させる際に用いるには適していると考えられる。

図 3.2 は4つの骨で構成されたモデルの先端が目的地（青球）に位置する解を求めるまでの手順を示すものである。ただし、ここでは4つの骨で構成されるモデルとし、直線上に配置した状態から始まるとする。また骨を左からボーン1、ボーン2、ボーン3、ボーン4とし、また移動前における各ボーンの左側を始点、右側を終点とする。

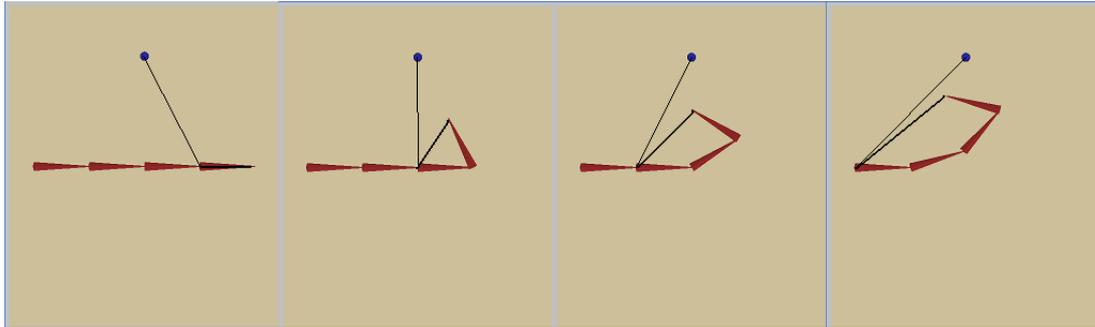


図 3.2: 循環座標降下手順

まず、最も右に位置するボーン 4 が目的地を指すように回転する。次にボーン 3 の始点から、ボーン 4 の終点への仮想の線が目的地を指すように回転する。さらに、ボーン 2 の始点からボーン 4 の終点への仮想の線が目的地を指すように回転する。さらに、ボーン 1 の始点からボーン 4 の終点への仮想の線が目的地を指すように回転する。これらの操作を複数回くりかえすことで近似な解をもとめる。図 3.3 は繰り返しを 4 回おこない、目的地に到達した図である。

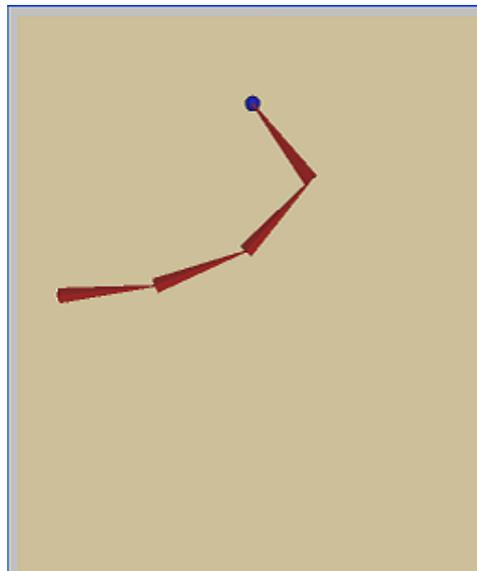


図 3.3: 目的地に到達した図 (繰り返し回数 4)

この手法は先端が目的地へ到達しない場合でも、振動したり不安定になったりせずに安定した結果が得られる。本研究では 1 つの脚に 4 つの骨が存在している。

骨の数が増えたり減ってもすべての骨に同様の操作をおこなうことで解を得ることができる。

本研究では、これに関節角度の可動範囲を設定している。これにより、馬には不可能な状態を作り出すことは避けられる。可動範囲は、GALLOP 時における脚が最も伸びている状態と、最もたたんでいる状態の関節角度を最大、最小と仮定し、実際の馬の走りから観測した値を使用している。また、各繰り返しは前の時間における関節角度から始めている [19]。

しかし、これらの手法を用いても期待する解が得られるとは限らない。図 3.4 は同じ目的地までの 3 つの解である。これらのように無数に存在する解から 1 つの解を得たにすぎず、それが馬の走行に適する解であるとは限らないからである。とくに循環座標降下では先の位置にある関節の計算が先におこなわれる。仮に先の位置にある関節角を変化させた際に、足先が指定の位置により近づいてしまうと、根元に近い関節の変化する角度が小さくなってしまう。馬の脚のような多関節体の場合、足先に近い関節が優先的に動き、根元に近い関節はそれを補助するように動くような挙動となることが確認できた。

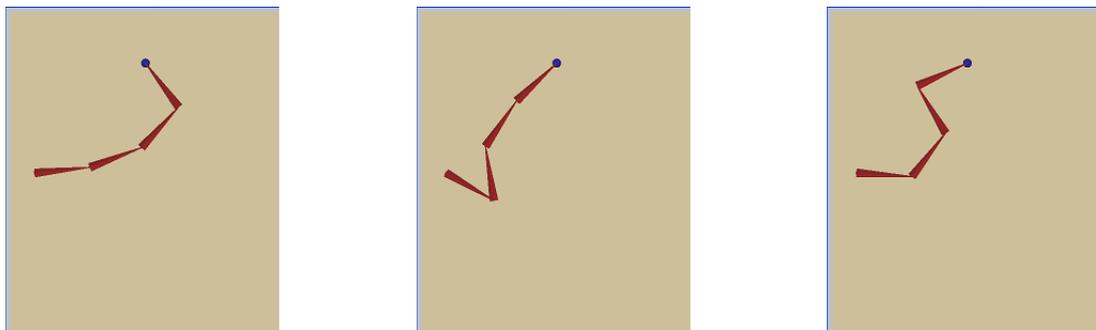


図 3.4: 同じ目的地の異なる解

そこで本研究では、得られた回転角度にある割合を設定し、回転の大きさを調節した。これにより、上記の問題を回避し、好きな関節を優先的に動かせるようにした。本論文ではこの割合を関節の硬さと呼ぶ。循環座標降下では回転させた骨の始点から先端の骨の終点への線が目的地を指すように回転している。本研

究では、各関節ごとに割合を設定し、得られた角度に対し、その割合分だけ回転させている。たとえば、ボーン4の割合を0.5に設定すると、ボーン4の回転角度が半分になる。ボーン3以下はその先端をもとに回転角が決める。これによりボーン4の回転の優先度を下げることができる。図3.5はその手順を示したものである。

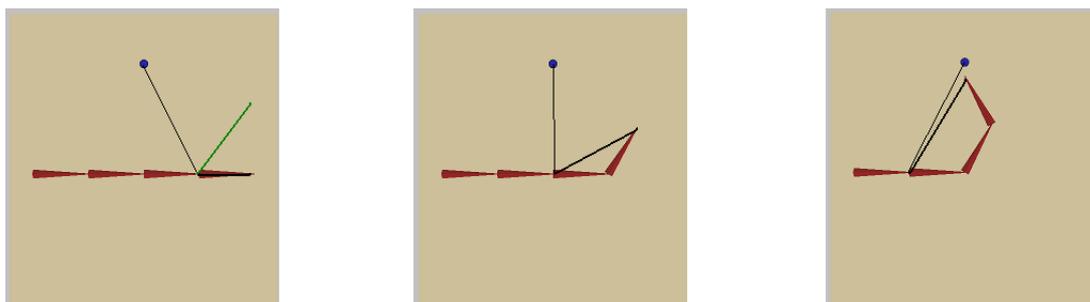


図 3.5: 硬さ設定の手順図

図3.6はボーン1～4の割合を(0.1, 0.3, 0.5, 1.0)。図3.7はボーン1～4の割合を(0.02, 0.1, 1.0, 0.1)に設定して、まっすぐに並んだ状態から繰り返しをおこなったものである。

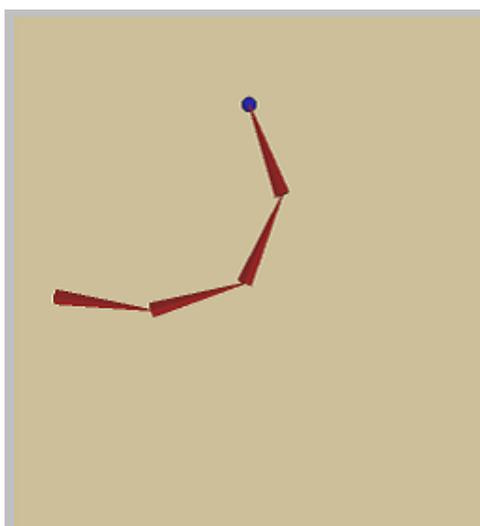


図 3.6: (0.1, 0.3, 0.5, 1.0)

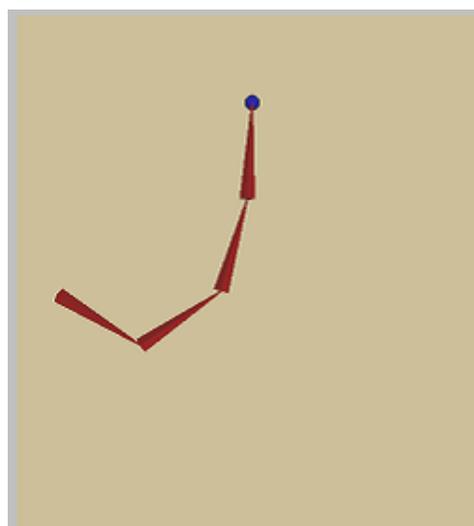


図 3.7: (0.02, 0.1, 1.0, 0.1)

本研究では3.1節で示した方法で得られた歩幅をもとに決まる足先の位置に、この手法を用いて関節角を決定する。なお、遊脚時における足先の軌道や体の上下動にはあらかじめ入力した値を用いる。

### 3.3 歩行パターン変化手法

歩行パターンを変化させるには、それぞれの歩行パターンの特徴を変化後のパターンの特徴へと変化させ、なおかつ変化する瞬間を違和感なく自然なものへとしなければならない。実際の馬が歩行パターンを変化させる様子を観察すると、前後の歩行パターンの間にこれらをつなぐ中途半端な動きをする時間が約1完歩ほどある。この間に脚の動きだすタイミングをずらし、次の歩行パターンのタイミングに近づけている。また各足ごとに動く距離を調節して、次の歩行パターンに適した位置へと移動しているように見える。

本研究では、まず歩行パターンごとの大きな特徴を速度、接地率、各脚の動くタイミングとする。ただし、歩幅や周期時間は速度や接地率の大きさによって決まるのでこれに含まれるとする。よって、本研究では歩行パターンの変化は速度、接地率、各脚のタイミングの変化によって定義する。また速度は $V$ 、接地率はとする。各脚のタイミングは、左後脚を基準としたタイミングの違いを1完歩における割合で表し、これを位相差とする。本研究では前後脚の位相差と左右脚の位相差にわけて定義し、前後脚の位相差は左右に、左右脚の位相差は前後によらず一定であると仮定する [16]。接地率は WALK から GALLOP まで、0.7、0.5、0.3、0.25 とする。また、前後脚の位相差、左右脚の位相差を WALK から GALLOP まで、(0.2, 0.5)、(0.5, 0.5)、(0.2, 0.2)、(0.35, 0.2) とする。

歩行パターンを変化させる操作では、まずその瞬間に速度を変化させる。各脚ごとに、接地中ならその接地時間に、遊脚中であれば次の接地時間に増減を加えることで各脚のタイミングを合わせる。次の遊脚では変化後の速度と接地率をもとに歩幅を算出する。この際、タイミングをずらしたことと、速度が変化したことによって、体と足先との相対的な位置にずれが生じる。よって、遊脚中に移動

する距離を調節することでこれを修正する。これらの操作について以下で詳しく述べる。

WALK(時速  $V$ km) から TROT(時速  $V'$ km) への変化の場合、以下のようになる。

まず各脚のタイミングを合わせる操作について述べる。前後の脚の位相差を  $D_1$ 、左右の脚の位相差を  $D_2$  とする。このとき、左後の脚が動き出す瞬間を 0 とすると、左前、右後、右前の脚が動き出すまでの時間は周期時間を  $T$  として、 $TD_1$ 、 $TD_2$ 、 $T(D_1 + D_2)$  となる。よって、WALK では各脚の動き出すタイミングは左後、左前、右後、右前の順に 0 秒、0.2 秒、0.5 秒、0.7 秒になる。TROT でも同様に、0 秒、0.3 秒、0.3 秒、0.6 秒になる。したがって、WALK から TROT への変化の場合は各脚が動き出すまでの時間にそれぞれ 0、0.1、-0.2、-0.1 だけ加える。

次にタイミングをずらしたことによる足先位置の修正について述べる。タイミングは接地時間により調節するが、これにより足先が動き出すときの足先の位置と体との相対的な距離がずれてしまう。そこで次の遊脚時において歩幅に増減を加えることでこれを修正する。位置のずれは、走行速度  $V'$  とずらした時間  $t$  (加えた場合を正) により、 $V't$  になる。さらに速度変化がおこなわれたことによる修正をおこなう。これについては数式 (3.5) で示したとおりで、歩行パターンの変化が開始されてからの時間を  $C$  とすると、ずれの大きさは  $(V' - V)C$  である。よって次の遊脚時に足先が進む距離  $S$  は以下のようになる。

$$S = \frac{V'P}{1 -} + (V' - V)C + V't \quad (3.6)$$

遊脚時の足先の高さの軌道は変化後の歩行パターンのものを使用する。

## 第 4 章

### 評価

本章では、3章で提案した手法に沿って作成したプログラムを使用し、その有用性を検証する。プログラムの作成には、3DCG ツールキットである FK Toolkit System[20] を用いた。まず歩幅の変化の様子を検証し、次に関節の硬さを設定したものとそうでないものを比較していく。最後にパターンが変化する様子を検証する。なお、モデルは競走馬であるサラブレッドとし、各値についてもサラブレッドを参考にしたものとする。関節の可動範囲は、実際にサラブレッドが GALLOP で最高速で走る様子を参考にし、値を決定した。馬が画面左に向かって走るときの反時計回りを正方向と考えると、各関節の可動範囲は後脚の上から ( $55^{\circ} \sim 65^{\circ}$ )、( $-100^{\circ} \sim -70^{\circ}$ )、( $15^{\circ} \sim 100^{\circ}$ )、( $-130^{\circ} \sim -20^{\circ}$ ) とし、前脚の上から ( $-38^{\circ} \sim -32^{\circ}$ )、( $79^{\circ} \sim 81^{\circ}$ )、( $-135^{\circ} \sim -20^{\circ}$ )、( $0^{\circ} \sim 120^{\circ}$ ) とした。ただし、デフォルトの状態では骨は上から下に伸びているものとする。また実装例については、遊脚時間 0.3、接地率は WALK から GALLOP まで順に、0.7、0.5、0.3、0.25 とした。なお胴体の上下動や遊脚時の足先の軌道は実際の馬から 1 完歩分計測し、繰り返し用いている。

## 4.1 骨の動き

骨の硬さを設定したことで、馬の動きに近づけることができた。図 4.1 は循環座標降下をそのまま用いた動きである。図 4.2 は後ろの脚に関節の硬さを設定したものである。おもに上から 2 つ目の骨の動きの優先度を高め、下位の脚の優先度を下げたものである。左後脚が遊脚中に前方へ動く際、硬さを設定しないときは最も下位の骨が優先的に動き、他の骨は上位にいくほど動きが小さい。上から 2 番目と 3 番目の骨がまっすぐに並び、後に前方へ動くような挙動を確認した。これに対し硬さ設定をおこなった場合は上から 2 つ目の骨である大腿骨が優先的に動き、各骨の動きの度合いを実際のものに近づけることができた。図 4.3 は GALLOP 時のものである。上段が実際の馬をスケッチしたものの、下段が実装したものである。



図 4.1: 通常

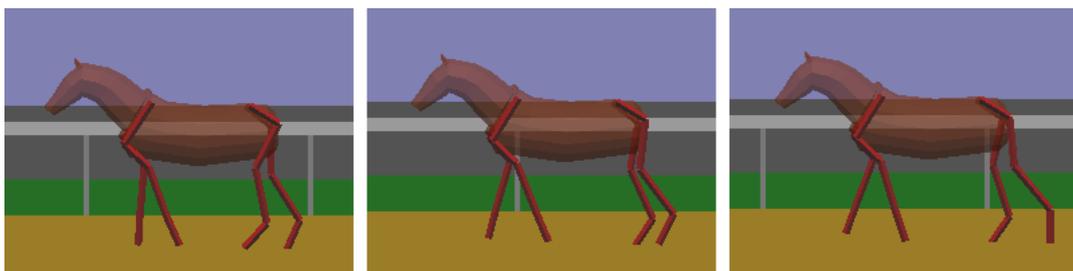


図 4.2: 硬さ設定

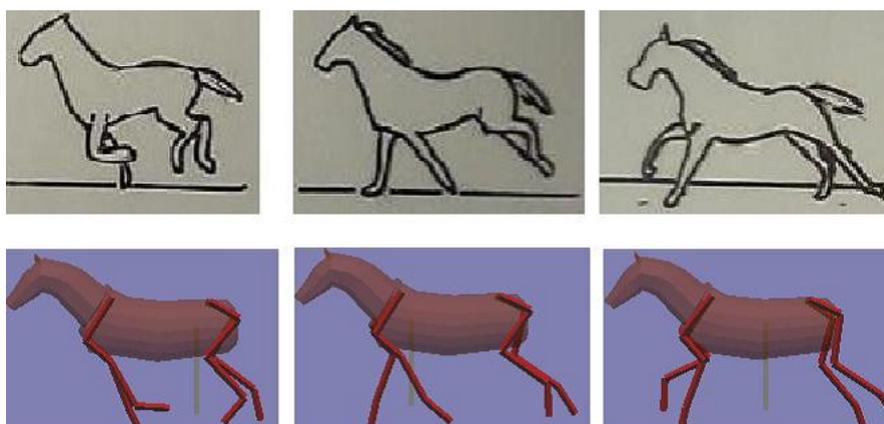


図 4.3: スケッチとの比較

## 4.2 歩幅の変化

速度が大きくなると、その分脚の動きが早く大きくなり、速度による動きの違いを表現できた。また速度を変化させても、違和感なく動くことを確認できた。図 4.4 と図 4.5 はそれぞれ時速 4.3km と時速 6.5km で WALK で歩行しているものである。



図 4.4: 時速 4.3km(WALK)



図 4.5: 時速 6.5km(WALK)

### 4.3 歩行パターン変化

本研究では歩行パターンを変化する際に、以下の要件を満たせば、なめらかな変化であるとする。

- 接地中の足先位置が移動しない。
- 遊脚時における足先が瞬間的に移動せず、また移動速度の急激な変化がない。
- 脚の動きが馬にとって適切な動きの範囲内でおこなわれる。

図 4.6 は WALK から TROT へ変化している最中の様子である。接地中の足先は固定され、遊脚時においては足先位置の瞬間的な変化はおきず、なめらかな移動がおこなわれている。また、他のパターン変化でも同様にこれらの条件を満たす挙動を確認している。

歩行パターン変化をおこなう際に、タイミングを次のパターンに合わせるため、接地時間を調節している。接地時間の変化量により、変化中の足先の前後移動距離は変化することになる。よって、接地時間を大きく変化させると、足先が脚の可動範囲を越えた位置に移動することが考えられる。そこで、変化中の足先の前後移動量を測定し、適切な範囲であるか検証した。ここでは、足先が脚の付け根から前後 0.8m の範囲にあれば適切な範囲内であると判断する。

図 4.7、図 4.8 のグラフはパターン変化付近の、脚の前後への動きである。縦軸は、0 を脚の付け根とし、正が前方、負が後方である。また横軸は時間を表し、左側が WALK で右側が TROT である。図 4.7 は WALK から TROT への変化におけ

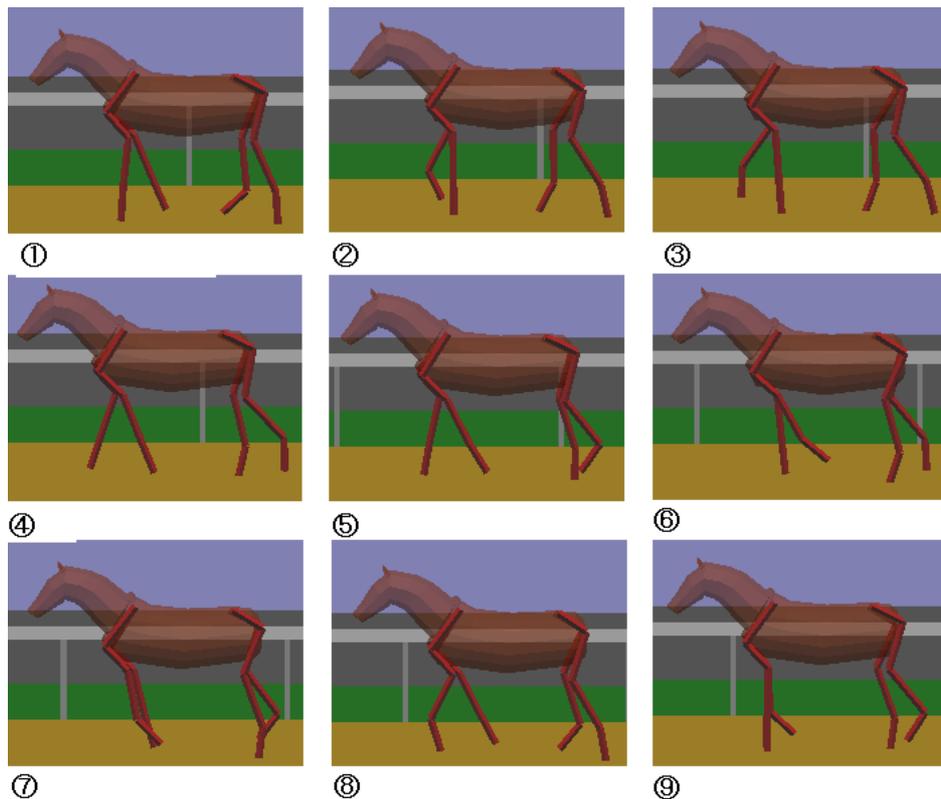


図 4.6: WALK から TROT への変化

る左後脚のものである。図 4.8 は同じ変化における左前脚のものである。図 4.7 の左後脚のグラフでは、足先は常に脚の付け根から前後 0.8m の範囲にあり、TROT の波形へと変化している。しかし、図 4.8 の左前脚のグラフでは、変化の際に接地時間が大きくなるため、変化中に足先の位置は大きく後方へ下がり、脚の付け根から 0.8m の範囲を越えている。

このように足先が適切な位置を越えると、脚は長さの限界、または関節の可動範囲の限界に達し、接地時間中にも脚が宙にうく。このため、必ずしも馬にとって適切な動きであるとはいえない。図 4.6 の 5~6 で脚がうきはじめ、6 以降の遊脚中の動きへとつながっていく。このため、歩行パターンが変化する際に若干の違和感を生むと考えられる。

また、他の脚においては 0.8m の範囲を越えることなく、変化していることを確認した。

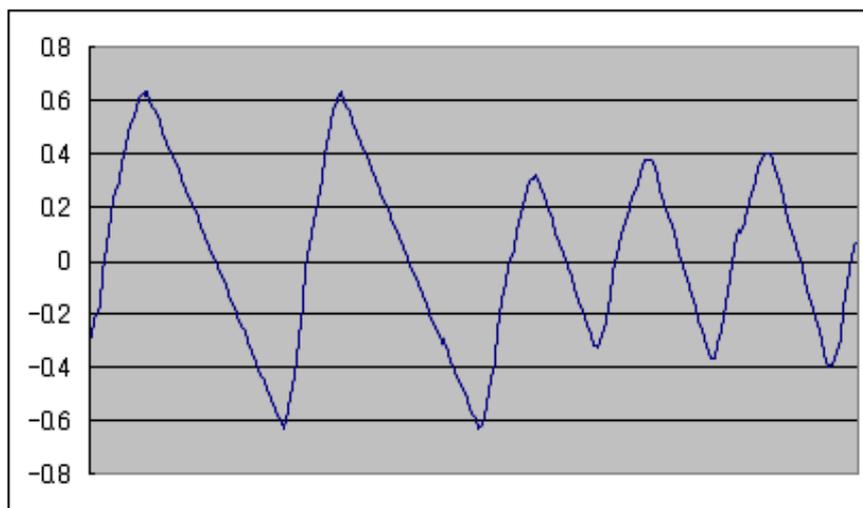


図 4.7: WALK から TROT への変化の左後脚

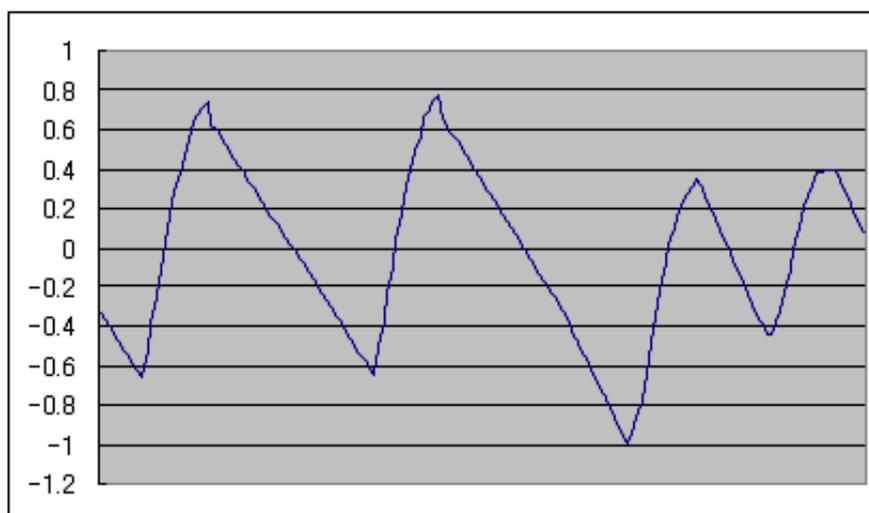


図 4.8: WALK から TROT への変化の左前脚

## 第 5 章

### まとめ

本研究は馬の速度変化をリアルタイムで綺麗に表現することが目的である。馬が速度にあった歩幅をとり、歩行パターンのなめらかな変化をおこなうことで、馬の速度変化をともなうリアルタイムアニメーションは表現できた。

本研究では歩幅を正確にとるために循環座標降下という手法を用いた。さらに、各関節ごとに硬さを設定することで、実際の馬の動きに近づけることができた。

また歩行パターンを変化させるのに、各脚ごと、変化するための時間を作り、その中で複数のパラメータを変化させた。これにより、なめらかな変化が可能となった。一方で、脚が可動範囲の限界に達し、想定した位置へ移動しない場合がある。この点には改善の余地を残す。パターンを変化させるタイミングを調節したり、パターン変化する時間を長くすることで解決できると考えている。

速度変化に対して、自動的に適切な歩幅、歩行パターンへと変化する反面、遊脚時の脚の軌道や関節の硬さの値を設定する作業はあらかじめ自分で設定しなければならなかった。とくに、関節の硬さの設定は数値から実行結果が想像しにくいので、期待する結果を得るために面倒な作業が必要になってしまった。リアルなアニメーションを追求するうえで、扱いやすい手法への改良を今後の課題としたい。

# 謝辞

本論文を締めくくるにあたり、ご指導頂きました本校メディア学部の渡辺大地講師および和田篤氏（電気通信大学）に心より深く感謝いたします。

さらに、本研究を進めるにあたり、相談に乗っていただいた研究室のメンバーおよび友人の方に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 新井清志, ”動力学を応用した多関節構造体のキーフレームアニメーション”, 情報処理学会研究報告 グラフィックスとCAD, 57-3, pp.17-23, 1992.
- [2] 阿部哲也, 水野裕識, 村岡洋一, ”CGによる犬の柔軟なアニメーション生成”, 情報処理学会研究報告 グラフィックスとCAD, 73-5, pp.33-40, 1995.
- [3] 栗原恒弥, 安生健一, ”3DCGアニメーション 基礎から最先端まで”, 技術評論社, 2003.
- [4] SEGA CORPORATION, ”StarHorse2 NEW GENERATION”, 2005.
- [5] KOEI, ”WinningPost6”, 2003.
- [6] KOEI, ”真三國無双3 Empires”, 2004.
- [7] 伊藤聡, 湯浅秀男, 伊藤宏司, ”エネルギー消費量による四足歩行パターン遷移の発振機 - 力学モデル”, 計測自動制御学会論文集 Vol.32 No.11, pp.1535-1543, 1996.
- [8] Eadweard.Muybridge, ”HORSES AND OTHER ANIMALS IN MOTION”, Dover Publications, 1985.
- [9] Eadweard.Muybridge, ”ANIMALS IN MOTION”, Dover Publications, 1957.

- [10] BROKEN's Advanced Vehicle Laboratory, 4 脚  
歩行ロボット入門, 第4項 "動物の歩行パターン".  
<http://homepage1.nifty.com/BROKEN/project/walk/memo.htm>
- [11] D. F. Hoyt, C. R. Taylor, "Gait and the energetics of locomotion in horsees",  
Nature Vol.292 No.16, pp.239-240, 1981.
- [12] NANO ELECTRONICS, 2 章 "自己組織化とは?", 2002.  
<http://www.nanoelectronics.jp/kaitai/selfassemble/>
- [13] 宮下充正, 小林寛道, 山下文治, "走る科学", 大修館書店, 1990.
- [14] 日本中央競馬会競走馬総合研究所編, "サラブレッドの科学:競走馬の心技体",  
講談社, 1998,10.
- [15] 大藪喬介, "職人のなせる仕事", 競馬のすべて, pp.48-55, メディアート, 1997.
- [16] 菅野正人, "健康増進を目的とする四足歩行乗馬ロボットの開発", 高知工科大学大学院修士論文.
- [17] 橋本, "馬の解剖アトラス", 日本中央競馬協会弘済会, 1997.
- [18] D. Gordon E.Robertson, Graham E.Caldwell, Joseph Hamill, Gary Kamen,  
Saunders N.Whittlesey, "Reserch Methods in Biomechanics", Human Kinetics,  
2004.
- [19] Jason Weber, "制約付き逆運動学", Game Programming Gems3 日本語版,  
pp.196-202, 2004.
- [20] 渡辺大地, FK Tool Kit System Ver 2.7.11.4 for VisualC++.NET2003.