

CGによる犬の柔軟なアニメーション生成

阿部 哲也 水野 裕識 村岡 洋一

早稲田大学 理工学部

{abe, hiro, muraoka}@muraoka.info.waseda.ac.jp

あらまし 本稿では、犬の柔軟な動作のアニメーションをリアルタイムに生成する制御パラメータによる動作変化手法を提案する。ここでいう柔軟とは、歩行のような動作で、歩幅などを様々に変えられることである。本手法では、犬の動作を多関節の骨格モデルで扱い、リアルタイム生成のため運動学を用いる。従来、犬のような4足動物の動作を、運動学を用いて生成する場合には、多大な労力をかけないと動作の変化が表現できなかった。そこで本手法では、制御パラメータによって、運動学による関節角の動作生成に変化を加え、同時に関節角の変化にともなう位置の変化を物理法則で定めることで、柔軟な動作をリアルタイムに実現可能にする。本手法を利用したアニメーションシステムを実際に構築した結果、柔軟な歩行・走行・跳躍動作をリアルタイムに生成できた。

A flexible CG animation of dog

Tetsuya ABE , Hironori MIZUNO , Yoichi MURAOKA

School of Science and Engineering , WASEDA University
3-4-1 Ohkubo Shinjuku-ku , Tokyo 169 , JAPAN

Abstract This paper presents a scheme of generating flexible motion of dog in realtime, which handles motion changing by using control parameters. "Flexible" means, in a motion of dog ,such as walking, we can variously change width of step, and so on. In our scheme, we use kinematics to generate motion in realtime by skelton model. In previous work, to generate a motion of dog by kinematics, it needs a lot of cost to change motion. In this scheme, to generate flexible motion in real time, we propose two proceses , by using control parameter, changing joint angle which generate by kinematics ,and calculating moving of position from change of joint angle by physics. In our experiment , we could construct a system that generate a realtime flexible animation of a dog walking, running ,and jumping.

1 はじめに

本稿では、犬の柔軟な歩行・走行・跳躍動作をリアルタイムにアニメーション表現するために、運動学による動作生成に対し、制御パラメータで動作変化を扱う手法を提案する。そして、本手法を利用して構築したアニメーションシステムについて述べる。ここでいう柔軟とは、歩行・走行・跳躍などに分類される犬の各動作において、動作ごとに固定した動きだけでなく、歩幅・速度などを変化させた状態での動作ができることである。例えば歩行や走行では歩幅・速度を変化し得る移動が柔軟な走行であり、跳躍では高さ・跳ぶ幅を変化し得る跳躍が柔軟な跳躍である。

本研究では、犬の動作を多関節構造体で表現する。この場合、2つの処理が必要となる。それは、身体各関節の角度の変化を定める処理と、定められた各関節の角度の変化から、身体位置の変化を定める処理である。本研究では、リアルタイム性の確保のために、これらの処理を運動学によるアプローチで行なう。

従来の運動学によるアプローチで多関節体の動作を表現する手法には、周期動作に関して、関節角度を関数化する方法や、キーとなるフレームの状態を指定して、その間を補間して動作を生成するキーフレーム法などがあった。しかし、これらの方法では、ある固定した動作しか表現できず、変化した動作を生成するには、膨大な労力が必要だった。

この欠点を解消するためにいくつかの研究がなされている。まず、人間の上半身の動きと下半身の動きを合成した動作を生成する研究 [2] があった。しかし、この場合には、合成するタイミングや種類の組合せによって、動作のバリエーションは得られるが、個々の動作そのものは変化できなかった。他に、人間の歩行動作の測定データを2つ用意して、その中間の動作を補間して生成するという研究 [1] があった。しかし、この研究では人間を扱っているのに対し、本研究では4足動物である犬を扱う。2本足である人間に対し、4本足の場合には、歩行や走行などの状態によって、それぞれの足の位相などの状態が複雑に変化する。そのため、従来の動作生成方法では、犬の動作を柔軟に変化させられなかった。

これに対し、本稿で提案する制御パラメータを用いて動作の変化を扱う手法は、制御パラメータを用いて動作の測定データに変化を加え、測定データとは異なる動作を生成する手法である。本手法では、関節状態の変化と位置の変化両方を制御することで、従来の研究で表現できなかった、跳躍のような動作をリアルタ

イムに柔軟に変化させて表現する。

本手法では、あらかじめ歩行・走行などの周期動作の一状態の関節角度を、実際の犬から測定し、関数化しておく。動作生成時には、1) 制御パラメータを用いて、関節角度関数に変化を加えて、関節状態を変化させる。そして、2) 関節状態の変化から、自由落下、重心を中心とする回転運動などの物理法則を用いて、位置の変化を動的に算出する。この2つの処理を同時に行なうことで、足が滑って移動するなどの矛盾した動きをなくし、自然な動作を生成可能にする。

制御パラメータによる動作変化手法を利用したアニメーションシステムを IRIS Indigo² 上に実装した。実際に用いた制御パラメータは、1) 関節角の変化割合、2) 動作周期、3) 進行方向に対する曲がり角度、の3つである。この結果、平面上での歩幅、移動速度の異なる直進および曲がる歩行・走行動作と、幅・高さの異なる跳躍動作を実現できた。また、これらのパラメータが使用者が動作生成時に直接操作できるパネルを用意し、パラメータが、動作にどのような変化を与えるかをインタラクティブに確認できるようにした。描画速度は、30fps となっており、リアルタイムの描画が行なえた。

2 制御パラメータによる動作変化法

ここでは、従来研究の問題点を解決する方法として提案する、制御パラメータを用いた動作変化手法について述べる。従来の運動学による動作生成で問題になる点を示した後、本手法の処理の概要と利点について述べる。

2.1 従来の問題点と解決すべき課題

リアルタイムな動作生成を行なうには、計算コストの削減のため、運動学による手法を用いる。従来の運動学による動作生成方法の問題点は、動作の変化ができないことであった。キーフレーム法では、生成したい動作のキーとなるフレームを用意して、その間を補間する。この場合、キーとなるフレームの間のフレームを指定する手間は省けるが、柔軟な動作を生成するには、その動作すべてについて、キーフレームを用意しなければならず、膨大な手間が必要になる。これは、各動作について動きを関数化する場合でも同様である。このため、柔軟な動作を容易に生成する方法が必要となる。

2.2 本手法の処理の概要

本手法では、犬の動作を表現するための2つの処理、1)各関節の状態を定める処理と、2)位置の変化を定める処理、を扱うことで、柔軟な動作を自然にアニメーションさせることを可能にする。

周期動作の一状態の測定データから関節角度を関数化したものを用意する。そして、制御パラメータで動作をリアルタイムに柔軟に変化させ、その関節状態の変化から位置の変化を算出することで、自然な位置の変化を実現する。

(1) 各関節の状態を定める処理

基本となる関節状態は、周期動作の一状態の測定データから関節角度を関数化することで得る。そして、制御パラメータとで、測定データとは異なる関節状態を作り出す。実装した制御パラメータは、1) 関節角の変化割合、2) 動作周期、3) 進行方向に対する曲がり角度の3つである。これらを用い、歩行・走行動作の歩幅・速度・曲がる動作と、跳躍動作の跳ぶ高さ・幅を扱う。

(2) 位置の変化を定める処理

関節角の状態変化から、各フレームごとに動的にグローバル位置の変化を定めていく。位置の変化を計算する方法は、次の2つの処理に分けられる。

- 身体の中で固定する部分を考えて、そこから逆運動学により各関節の位置を決めていく。この処理を、位置を計算する部位が接地している場合に用いることで、滑って移動することをなくせる。
- 自由落下の法則や重心を中心とした回転運動のような物理法則を考えた計算を行う。位置を計算する部位が接地していない場合にこの処理を行うことで、自然な動作を表現できる。

2.3 本手法の利点

本手法を用いて多関節モデルの動作を表現する場合、以下のような利点がある。

- 運動学によるアプローチで柔軟な動作を表現する場合に、様々な状態ごとに測定データをとって関数化するという膨大な労力をかける必要がない。また、測定データそのままを表現する場

合と違い、位置の変化を動的に計算しているの
で、地面との干渉を考慮した動作を生成できる。

- 関節角の変化を定める処理と、位置の変化を定める処理をともに扱うことで、従来の運動学によるアプローチで柔軟な動作を生成する研究では実現できなかった跳躍のような動作を柔軟に表現できる。
- 本手法では、犬の身体に多数ある関節の角度については、基本的に測定データから関節角度を関数化することで定める。そのため、関節角度を定める処理の計算コストはかなり抑えられるので、リアルタイムに柔軟な動作の生成を行なうことができる。従って、人間との相互作用によって動作をリアルタイムに変化させた行動を表現できる。

3 犬のアニメーション生成システム

3.1 システムの概要

本システムは、制御パラメータによる動作変化手法を利用した、犬のアニメーション生成システムである。犬の動作は、その骨格モデルを、多関節構造体の木構造で扱って表現する [3]。平面上での犬の柔軟な歩行・走行・跳躍動作をリアルタイムに生成する。また、制御パラメータを使用者が直接操作できるパネルを用意し、パラメータによってどのように動作が変化するかをインタラクティブに確認できるようにする。

本システムの処理の流れは、図 1 に示すようになる。システムの処理は、動作選択処理と動作生成処理の2つに大きく分けられる。動作選択処理とは、周囲の状況からどんな動作で行動するかを決定する処理である。一方、動作生成処理とは、動作選択処理で選択した動作を実際にCGで表現する処理である。

制御パラメータによる動作変化手法は、動作生成処理の中で用いる。本システムで実際に用いる制御パラメータは、

- (1) 関節角の変化割合
- (2) 動作周期
- (3) 進行方向に対する曲がり角度

の3つである。

3.2 システムの仕様

入力 現在システムで扱えるオブジェクトは、ハード

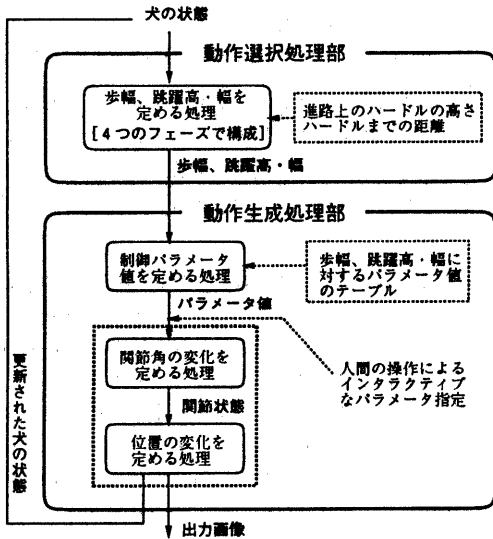


図 1: 処理の流れ

ルと犬である。犬の場合には、位置・速度・歩行や走行などの初期状態を与える。ハードルの場合には、位置・高さを初期状態とする。また、歩行・走行・跳躍の各動作について、ある一状態の関節角度を関数化したものを用意する。

出力 リアルタイムに犬が動くアニメーション画像を、連続したフレーム画像として生成する。犬は、骨格の周囲に表面をポリゴンで覆ったモデルで表示する。

本システムでは、あらかじめ置いておくハードルの位置を変えることができる。ハードルの位置を変えると、それをクリアできるように自動的に歩幅を調整する。また、操作パネルで制御パラメータを直接変化させると、それに応じて曲がる方向や、移動速度・歩幅などが変化した動作を生成する。

4 直進動作での処理

本システムの処理は、直進動作の場合と曲がる動作の場合で異なっている。曲がる動作は直進動作を拡張した処理である。ここでは直進動作での処理の内容を述べる。

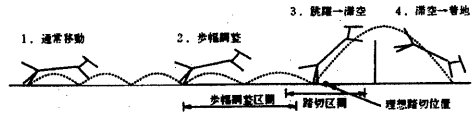


図 2: ハードル跳躍の状態推移

4.1 直進動作での動作選択処理

動作選択処理は、周囲の状況に応じて、どんな動作で行動するかを決定する処理である。直進動作においては、進路上のハードルを、歩幅を調整して飛び越える動作を扱っている。

1つのハードルをクリアする動作は、図2に示すようにハードルまでの距離に応じて、4つのフェーズから構成される。ハードルの高さや犬の移動速度から、歩幅の調整を行なう歩幅調整区間、踏切を行なう踏切区間、理想踏切位置を定め、現在がどのフェーズに属するかを決定する。各フェーズにおける処理は以下のようになる。

- (1) 通常移動フェーズ
歩幅調整区間よりもハードルから離れている場合は、特に動作選択処理を行わず、速度・進行方向を保って移動する。
- (2) 歩幅調整フェーズ
歩幅調整区間内に入った場合には、理想踏切位置に合うように歩幅を調整する。現在の歩幅で走行していった場合を考え、理想踏切位置に合わない余りの、歩幅の半分に対する大小で歩幅の調整を行なう。余りが大きい場合は、図3(a)に示すように歩幅を広げる。逆に小さい場合は図3(b)のように歩幅を縮める。
- (3) 踏切→滞空フェーズ
踏切区間に達したら、その位置でのハードルとの距離から、跳躍高と踏み切る強さを決定する。
- (4) 滞空→着地フェーズ
犬の速度、足の長さ及び地面からの高さより、いつ滞空姿勢から着地体勢に移るかを決定する。

4.2 直進動作での動作生成処理

制御パラメータによる動作変化手法を用いる。本処理部、1) 制御パラメータの値を定める処理、2) 関節角の変化を定める処理、3) 位置の変化を定める処理の3つの処理で構成されている。

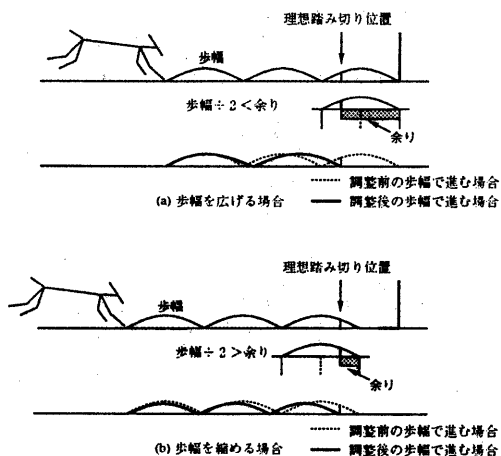


図 3: 歩幅の調整の仕方

動作選択処理で決定した動作を実現する制御パラメータの値を求め、それに基づいて関節角度を変化させ、関節角度変化から、位置の変化を定める。

以下に、各処理の内容について述べる。

4.2.1 制御パラメータの値を定める処理

動作選択処理部で、動作の歩幅などを選択した場合には、選択した動作を実現するための制御パラメータの値を求める処理を2つの処理の前に行なう。

制御パラメータの値は、歩幅、跳躍の幅・高さを入力として、テーブルを参照する形式で求める。このテーブルは、実際のアニメーション生成の前にはあらかじめ前準備として生成しておく。

● 前準備として行なう処理

制御パラメータの値での動作に対する、歩幅及び跳躍の幅・高さのテーブルを作成する。テーブルの作成方法は以下になる。まず、パラメータの値の定義域を、それぞれ一定の間隔で分割し、用意するテーブルの大きさを決定する。

そして、犬の骨格モデルの各骨の長さを定めた後で、パラメータの値の全ての組合せについて、画像を生成せずに、実際に動作の計算処理だけを行なう。こうして、パラメータの値の全ての組合せに対する、歩幅、跳躍の幅・高さを実際の動作から求め、テーブルに設定する。

● アニメーション生成時の処理

前準備であらかじめ作成しておいたテーブルを用い、動作選択処理で決定した歩幅、跳躍の高さ・幅に最も近い動作を実現するパラメータの値をテーブルから逆算して決定する。

4.2.2 関節角の変化を定める処理

関節角の変化を定める処理では、制御パラメータの値に応じて、関節角度関数から求まる関節角を変化させて、関節状態の異なる動作を生成する。ここでは、システムで実際に用いた3つの制御パラメータのうち、直進動作と曲がる動作の両方で用いる関節角の変化割合と動作周期の2つの働きについて述べる。

(1) 関節角の変化割合

あらかじめ持っているある一状態での関節角度を、図4のように制御パラメータで変化させることで、定型動作とは異なる柔軟な動作を生成可能にする。

関節角の変化量の増減の割合は、関節角のフレーム間での変化量を測定データからどの程度増減させるかを定める。このパラメータの値が1の場合に、測定したデータと同じ動きを行なうように定めておく。この値を1より小さくすれば各関節の角度の変化量は測定データよりも小さくなり、歩幅などは元の動作より小さくなる。1より大きくすれば各関節の角度の変化量は測定データよりも大きくなり、歩幅などは元の動作より大きくなる。

関節角度の増減の割合は、それぞれの関節によって異なった値をとる。これを表現するために、各関節ごとに制御パラメータの効果の及ぶ割合を重みとしてあらかじめモデルに定めておく。こうすることで、1つの制御パラメータで、全身の関節を制御することを可能にする。

測定データでの関節角の変化量を θ_n 、制御パラメータ・関節角の変化量の増減の割合を α 、各関節ごとの重みを W_n とした場合、新しい関節角の変化量を θ'_n は、

$$\theta'_n = \alpha \cdot W_n \cdot \theta_n$$

として定められる。

(2) 動作周期

本システムでは、歩行、走行などの動作は、実際の犬のビデオから関節角度のデータをサンブ

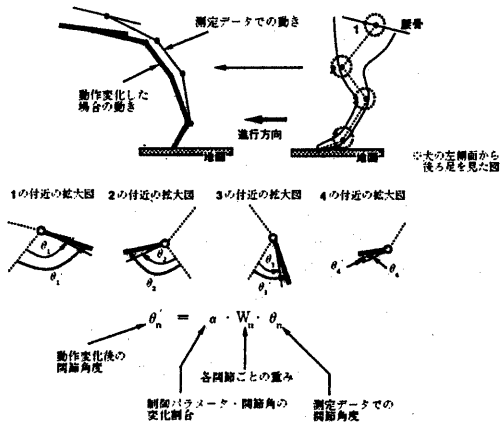


図 4: 関節角の変化割合による動作変化処理

ルし関数化している。このため、関節角度関数は離散的なものとなる。

そこで、この離散データから標本化定理により連続関数へ拡張する。すると、関節角度関数 $Farg(t)$ (t : 時間), 周期: T は、 t についての連続関数として表せる。

こうすると、フレーム間の関節状態も計算できる。そして、動作の周期を T から T_2 に変化した動作についても、関節角度関数が

$$Farg_2(t) = Farg(t * T/T_2)$$

として定まり、周期の異なる動作が表現可能になる。

歩行などの動作周期を変えることで、歩幅が同一でも、移動速度が異なる状態での動作を生成できる。

4.2.3 位置の変化を定める処理

関節角の変化を定める処理で定めた関節角の変化にあった位置の変化を定める。ここでは、地面との接地点を足のみと仮定し、接地している足の有無で異なる処理を行なう。

接地している足がない場合

物理法則に従って位置の移動を定める。この場合は、犬を真横から見た場合の平面上のみについて考える。鉛直方向の自由落下と、水平方向への等速運動によって重心の移動を計算する。

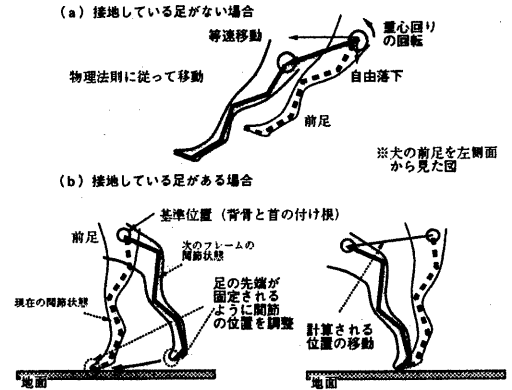


図 5: 犬を横から見た平面上での位置の変化の定め方

位置の変化を計算する初期値として、踏み切った時、すなわち接地している足が離れた瞬間の速度ベクトルを用いる。踏み切った時の速度ベクトルを鉛直成分 v_v と水平成分 v_h とに分ける。鉛直成分 v_v は重力加速度に応じて変化させ、水平成分 v_h については踏み切った時の速度を保持する。また、重力によって起こる重心を中心とした回転運動も考えて、位置の変化を求める。

この結果、物理法則にかなった自然な動きを生成できる。

接地している足がある場合

直進動作では、犬を真横から見た平面上での処理を行なう。そして、足が地面から離れるまで、平面上での接地点を固定して考える。

図 5(b) に示すように、接地点の位置が固定されるように調整を行ない、位置の変化を定める。位置の移動によって接地点が地面から離れるまで、固定は持続する。この結果、足が地面の上をすべるような不自然な現象をなくせる。

この平面上での位置の変化を定める処理によって、犬の前進動作が生成される。接地した足が支点となって、身体を前方向に押し出す形で前進が実現される。

5 曲がる動作での処理

5.1 曲がる動作での動作選択処理

曲がる動作では、現在、動作選択処理は行っていない。従って、歩幅や移動速度は、制御パラメータを操作パネルで変化しない限り、以前の値を保って動作する。

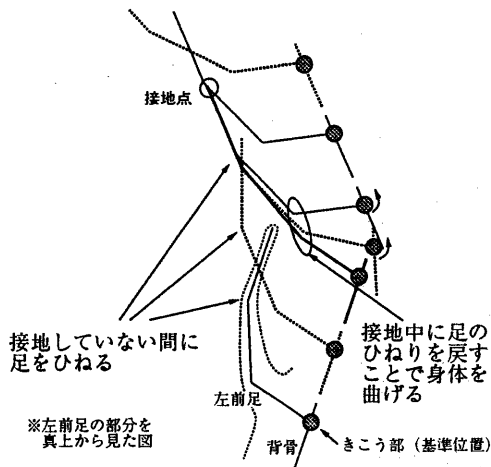


図 6: 足のひねりによる曲がる動作

5.2 曲がる動作での動作生成処理

曲がる動作では、関節角の変化割合・動作周期の2つの制御パラメータに加えて、進行方向に対する曲がり角度を新たに扱う。このパラメータの関節角の変化を定める処理と位置の変化を定める処理での働きを以下に述べる。

5.2.1 関節角の変化を定める処理

実際の犬の曲がる動作の観察などから、曲がるという動作が、直進動作と大きく異なる点は、足の「ひねり」にあると考えられる。この「ひねり」とは、水平面上での方向角についての関節角度の変化で表現される。そこで、進行方向に対する曲がり角度を制御パラメータとして扱うことで、曲がる動作を実現する。

曲がるという動作は、地面に対する自分の相対的な向きを変化させることで実現される動作である。犬が自分の意志で変えられるのは、関節角度のみである。従って、犬と地面との相対的な向きを変えるのは、接地している足の作用によると考えられる。

まず、空中にある足を曲げたい方向にひねって踏み出す。そして、その足が接地したら、接地している間に、身体の向きを曲げたい方向へと変えるために、ひねり、その足が地面から離れている間にひねりを元に戻す。

この一連の動作を4本の足がそれぞれ位相を変えて連続的に行うことで、曲がる動作が実現できる。この様子を図で説明すると、図6のようになる。

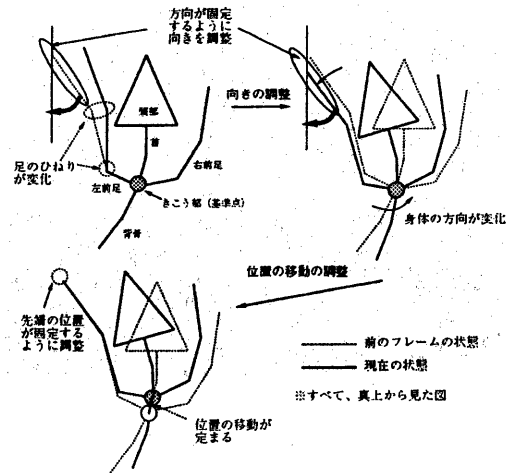


図 7: 犬を上から見た平面上での位置の変化の定め方

5.2.2 位置の変化を定める処理

曲がる動作では、犬を真上から見た平面上で処理を行なう。ここでの位置の調整は、接地点の足の位置を固定するとともに、接地している足の向きも固定して行なう。

位置の調整処理と、関節角度の変化を定める処理で、足のひねりを行なうことによって、身体の向きが変わる動作を生み出し、曲がる動作を実現する。

処理の流れは、図7に示すようになる。まず、接地している足の先端の方向を求め、前のフレームの方向との変化分を求める。そして、その足が前フレームも接地だった場合は、求めた変化分だけ身体の方角を変化させる。向きの調整で方向角が変わった後に、位置を調整する。

6 実験結果

以上のシステムを、グラフィックスワークステーション IRIS Indigo²上に実装した。その結果、用意した3つの制御パラメータを用いることで、平面上での歩幅、速度の異なる直進および曲がる歩行・走行動作と幅・高さの異なる跳躍動作を生成できた。アニメーション生成例を図8に示す。描画速度は、30fpsを確保しており、リアルタイムに動作を生成できた。また、用意した制御パラメータの操作パネルを用いることで、制御パラメータの値によって、動作がどのように変化する

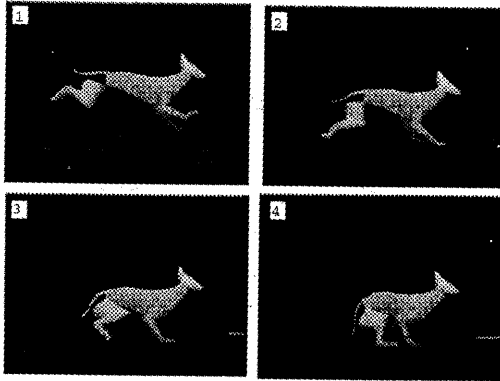


図 8: アニメーション生成例

かをインタラクティブに確認できた。同時に、制御パラメータの値を極端な値に設定すると、明らかに不自然な動作を生じてしまうことが確認できた。

問題点として、複数の足が同時に接地する場合に、位置の調整がうまく行われずに、不自然な動作を示す場合があった。これは、元の関節角度関数では接地していなかった足が、動作変化によって関節角度が変化した結果、接地してしまったことが原因であると考えられる。また、周期動作の途中で動作周期の制御パラメータを操作した場合も不自然な動作となっていた。これは、動作周期を変えた場合に、関節角度関数の読みだし位置を調整することを行っていないことが原因であった。

7 おわりに

本稿では、多関節構造体で犬の柔軟な動作をリアルタイムに表現するために、制御パラメータで動作の変化を扱う手法を提案し、それを用いて構築した犬のアニメーション生成システムについて述べた。

制御パラメータによる動作変化手法は、関節角度関数を利用して関節角度を決定し、物理法則を用いて位置の変化を定める。このため、柔軟な動作を、リアルタイムに表現できる。

実装したシステムでは、歩行・走行・跳躍といった犬の周期動作の一状態の関節角度を関数化したものを用意し、平面上での歩幅、速度の異なる直進および曲がる歩行・走行動作と幅・高さの異なる跳躍動作を生成できた。また、制御パラメータを操作できるパネルを

用意し、パラメータによる動作変化をインタラクティブに確認できるようにした。

今後の課題としては、現在のシステムでは平らな平面上での動作しか行えないので、これに高さを加えて、起伏のある地面上での動作が行なえるようにすることがあげられる。それにともない、犬が進もうとする方向の高さによって、自動的に足を踏み出す高さや幅を決定して移動できるようにするために、動作選択処理を充実させる必要がある。また、現状ではインタラクションが、パネルでパラメータを操作するという形でしか行なえないので、人間が操作できるオブジェクトを用意して、それと犬とのインタラクションを行なうようにする予定である。

参考文献

- [1] 鷗沼 宗利、武内 良三:「CGのための人間の動作生成手法」,第6回NICOGRAPH論文コンテスト論文集,1990
- [2] Douglas Dow, Sudhanshu K.Semwal 'Synthetic Human Movement: to Mimic and Deviate' 情報処理学会第45回全国大会,1992
- [3] 水野 裕識、村岡洋一:「CGによる4脚動物の歩行動作生成する実装モデルの構築」,電子情報通信学会論文誌 D-II Vol. J77 - D-II No.6 , 1994
- [4] 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 Vol.57 - No.3,1992
- [5] 筒口 拳、渡辺 保日児「人間の歩行動作生成手法」グラフィックスとCADシンポジウム, 1993
- [6] Andrew Witkin, Michael Kass: 'Spacetime Constraints', SIGGRAPH'88, Atlanta, August1-5, 1988
- [7] Michael F.Cohen: 'Interactive Spacetime Control for Animation', SIGGRAPH'92, Chicago, July26-31, 1992
- [8] 武内 良三、鷗沼 宗利:「動物の移動経路シミュレーション」,情報処理学会研究報告・グラフィックスとCAD Vol.52 - No.9,1991
- [9] 鷗沼 宗利、武内 良三:「CGアニメーションにおける人間の経路の自動生成手法」,情報処理学会第45回全国大会,1992