

スタイル変換を用いた効率的な四足歩行動物アニメーション生成

前田修治[†] 栗原恒弥^{†‡} 西田友是[†]
東京大学[†] (株)日立製作所[‡]

近年、キャラクタアニメーション制作において、モーションキャプチャシステムが盛んに利用されている。しかし、四足歩行動物のモーションキャプチャに関しては、人間と比較して非常に時間とコストがかかる点や意思疎通が難しい点が課題となっている。そこで本稿では、スタイル変換の手法を人間の動作から四足歩行動物の動作への変換に適用し、人間の新たな動作の入力のみから対応する四足歩行動物の動作を出力する手法を提案する。そして、システム同定手法によるモーションデータ間の変換関数の推定に関する検証実験の結果を示す。実験結果より、人間の脚動作から四足歩行動物の後足動作への変換、四足歩行動物の後足動作から前足動作への変換の実現可能性を確認できた。これにより、既存のモーションデータを再利用した効率的な四足歩行動物アニメーション生成が期待される。

Effective Creation of Quadruped Animation using Style Translation

Shuji Maeda[†] Tsuneya Kurihara^{†‡} Tomoyuki Nishita[†]
The University of Tokyo[†] Hitachi, Ltd[‡]

In recent years, a motion capture system is actively used in creating a character animation. However, the motion capture of quadruped animals has a challenge because they cause high costs and have communication difficulty compared with human case. In this paper, we propose a method which generates a novel output quadruped animal motion corresponding to only other input human motion by applying a style translation method to the transform of human motion to quadruped animal motion. We show results of verification experiments which estimate a transform function between motion data using a system identification method. These results show the feasibility that the system transforms the leg motion of human into the hind foot motion of quadruped animal and translates the hind foot motion into the forefoot motion of quadruped animal. This will help to effectively create the quadruped animations by reusing of existing motion data.

1 はじめに

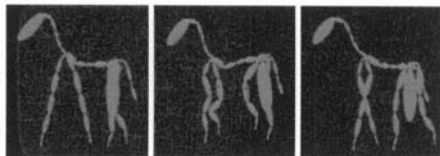


図1 四足歩行動物のモーションデータの例。

アニメーション制作は、キャラクターの動きを表現するために膨大なデータが必要となり、多大な労力と時間のかかる作業である。このため、アニメーション制作の効率化が大きな課題となる。

アニメーション制作の効率化を実現する一つの方法として、現実の人物などの動きを記録するモーションキャプチャシステムが近年盛んに利用されている。このモーションキャプチャによって得られるモーションデータは再利用が可能であり、データを加工することによってより広範囲の動きの表現が可能となる。よって、モーションデータ

の加工・再利用に関する研究が現在コンピュータ・グラフィックス分野で注目されている。

映画やゲームの中には人間のキャラクター以外に動物のキャラクターが登場することもある。動物のアニメーション制作では、指示通りに演技を行う人間の場合とは異なり、モーションキャプチャシステムを用いたデータ取得が難しい。このため、アニメーターが手付けで動物のアニメーションを作成している場合が多い。これは熟練したアニメーターであっても多大な労力と時間を必要とする。

そこで本稿では、取得しやすい人間のモーションデータを利用することにより、四足歩行動物のアニメーション制作を支援するシステムを提案する。具体的には、人間の動作から四足歩行動物の動作への変換関数をあらかじめ求めておくことにより、人間の新たなモーションデータの入力のみから対応する四足歩行動物のモーションデータ(図1)を出力することを目的としている。人間の動作から四足歩行動物の動作への変換関数の推定

には、Hsu らのスタイル変換[1]の手法を用いる。本手法は、人間の動作に合わせて四足歩行動物を演技させることを目標としており、これにより既存のモーションデータを再利用した効率的な四足歩行アニメーション生成が期待される。ただし、任意の人間動作から四足歩行動物動作を生成することは困難であるため、本稿では主に歩行動作を実験の対象とする。

2 関連研究

本節ではまず、提案法において人間の動作から四足歩行動物の動作への変換関数を求める際に用いるスタイル変換の手法について述べる。次に、近年の四足歩行アニメーション生成に関する研究について紹介する。

2.1 スタイル変換

Hsu らのスタイル変換[1]は、軌道や障害物の回避といったモーションデータの全体的な流れを維持しながら、あるスタイルの動作を異なるスタイルの動作へ変換する手法である。

まず、「かがみながら」、「片足をひきずりながら」といった基本動作に対する付加情報を“スタイル”として定義する。そして、異なるスタイルを示すモーションデータペア間の変換関数をシステム同定[2]により求め、既存のモーションデータのスタイルを変換することでアニメーション生成の効率化を実現している。

スタイル変換では、例えばあらかじめ求めておいた「通常歩行」から「忍び足」への変換関数を用いることにより、新しく入力された「通常歩行」のアニメーションをリアルタイムに「忍び足」のアニメーションに変換できる。しかし、このスタイル変換は人間のモーションデータを対象

としており、様々なモーションデータ間における変換に対応できているとは言えない。本稿では、四足歩行動物のモーションデータを対象に含めることにより、スタイル変換の適用範囲を拡張する。

2.2 四足歩行アニメーション生成

四足歩行アニメーション生成に関する研究分野は長い間注目されてきたが、動物のリアリティを追及するための技術的取り組みは近年になって特に増加してきている[3]。

リアルな四足歩行アニメーションを生成するための手法としては、映像からのモーションキャプチャ[4]や物理モデルに基づく手法[5]、インバース・キネマティクスに基づく手法[6]などが報告されている。この中でも、映像からのモーションキャプチャは近年盛んに研究されているテーマの一つである。しかし、映像からのモーションキャプチャは映像に含まれていない動作を再現することができないため、提案手法のような既存データの変換手法が必要となる。

3 提案手法

本節では、まず提案手法の概要を述べ、次に提案手法を実現するために必要な同期処理、システム同定処理について詳細を述べる。

3.1 提案手法の概要

人間の動作と四足歩行動物の動作との相関をあらかじめ求めておくことにより、人間の新たなモーションデータの入力のみから対応する四足歩行動物のモーションデータを出力する手法を提案する。本手法は、(1)人間の脚動作から四足歩行動物の後足動作への変換関数を推定する処理と、(2)四足歩行動物の後足動作から前足動作への変換関数を推定する処理に分けられる。提案手法の概要を

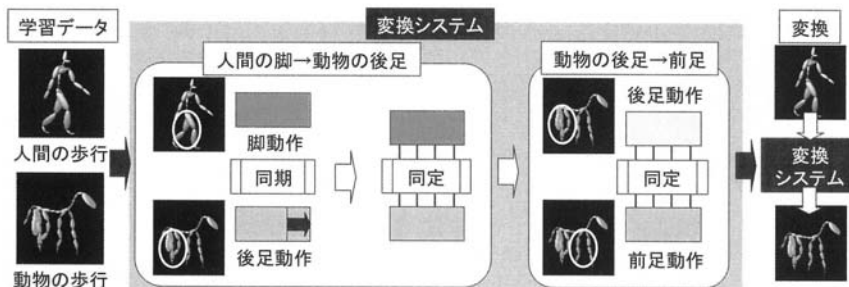


図2 提案手法の概要。

図 2 に示し、それぞれの処理について以下で述べる。また、本手法の実験で用いた人間と四足歩行動物のモーションデータのスケルトン構造を図 3 に示す。

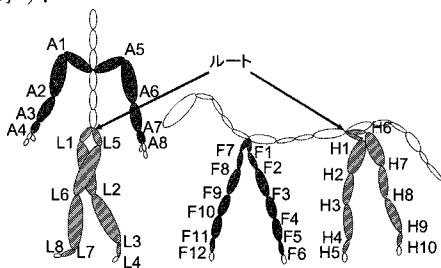


図 3 モーションデータのスケルトン構造。人間のスケルトン（左），馬のスケルトン（右）。

(1) 人間の脚動作から四足歩行動物の後足動作への変換関数

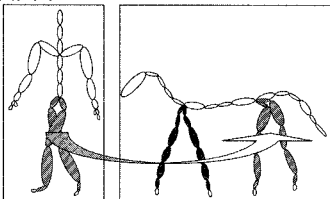


図 4 人間の脚動作から四足歩行動物の後足動作への変換。

まず人間の脚動作と四足歩行動物の後足動作データを入力データと出力データとみなす（図 4）。これは、スタイル変換における異なるスタイルを示すモーションデータペアに対応する。

次に、入力データから出力データへの変換関数を求める。この際、入力動作と出力動作は時間的に同期している必要がある。すなわち、モーションデータの長さや足の接地のタイミングが一致していなければならない。このために、入力データと出力データに対して同期処理を適用し、タイミング差の情報を記憶する。入出力データの同期処理としては、動的時間伸縮法（Dynamic Timewarping : DTW）[7]を用いる。

そして、同期させた入出力データに対して、入力データから出力データへの変換関数をシステム同定により求める。これにより、人間の新たな脚動作データをシステムに入力し、同定した変換関数を用いて対応する四足歩行動物の後足動作デー

タを出力する。変換関数としては、線形時不変（Linear Time-Invariant : LTI）システム[2]を用いる。また、モーションデータは関節ごとに exponential map[8]で表現する。

(2) 四足歩行動物の後足動作から前足動作への変換関数

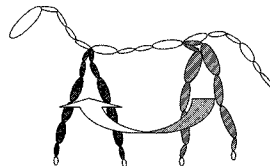


図 5 四足歩行動物の後足動作から前足動作への変換。

上記の処理により、脚動作・後足動作に関して人間モーションデータと四足歩行動物モーションデータとの相関を推定することができる。次に、四足歩行動物の全身アニメーションを生成するため、四足歩行動物の後足動作から前足動作への変換関数を推定する。

この処理では、後足動作データと前足動作データを入力データと出力データとみなす（図 5）。これは、スタイル変換における異なるスタイルを示すモーションデータペアに対応する。

次に、入力データから出力データへの変換関数をシステム同定により求める。これにより、新たな後足動作データをシステムに入力し、同定した変換関数を用いて対応する前足動作データを出力する。よって全体として、新たな人間の動作データを四足歩行動物の動作データに変換することが可能となる。変換関数は、人間の脚動作から四足歩行動物の後足動作への変換関数を推定する際と同様に LTI システムを用いる。ただし、四足歩行動物の歩行動作に関して後足動作データと前足動作データは時間的に同期しているため、DTW による同期処理は不要である。

3.2 同期処理

人間の脚動作から四足歩行動物の後足動作への変換関数を推定する際、両動作データに対して同期処理を行う。本手法では同期処理の手法として DTW 法を採用する。この DTW 法は音声信号に代表される一次元波形に関するアルゴリズムであるが、キャラクターの姿勢間の距離（後述）を算出することにより、本研究で扱うモーションデータのような多次元データに

も適用できる．以下では，まず二次元波形に対する DTW 法について紹介し，続いてモーションデータへの適用について述べる．

DTW 法は，データ長やピーク値をとるタイミングが一致するように 2 つの二次元波形データの同期をとるアルゴリズムである．すなわち，波形 1 ($F(m), m \in \{1, \dots, M\}$) と波形 2 ($G(n), n \in \{1, \dots, N\}$) を入力とした場合，波形 1 に同期した波形 2 ($G'(t), t \in \{1, \dots, M\}$) を出力する処理である．ここで， m, n, t は時刻， M, N は終端時刻を表す．

DTW 法の処理手順は次のようになる．

1. 距離行列 D の計算
2. 距離行列上のコスト最小経路の計算
3. コスト最小経路に沿った時間変換

まず，サイズ $M \times N$ の距離行列 D を生成し，行列の各成分 $D(m, n)$ に $F(m)$ と $G(n)$ の距離を格納する．次に，距離行列の成分 $(1, 1)$ から成分 (M, N) に至る経路のうち，経路上の成分の総和 $\sum D(m, n)$ が最小となるような経路を計算する．最小経路探索アルゴリズムには動的計画法を用いる．そして，コスト最小経路にあたる要素を (i, j) とするとき， $G'(i) = G(j)$ となるように時間変換を行うことにより，波形 1 と波形 2 の同期をとることができる．

次に，DTW に多次元データであるモーションデータを適用するために，2 つのモーションデータの姿勢の差異をスカラ値として定量化する姿勢距離測度 δ を導入する．

δ の計算は，対応する 2 つの身体各部位の位置 p_i と p'_i のユークリッド距離をもとに計算する [9]．

$$\delta = \sum_i \| p_i - Tp'_i \|^2 \quad (1)$$

ここで， T は座標正規化行列と呼ばれる行列であり，姿勢距離を算出する上でキャラクターの位置や方向をできるだけ一致させるために，データに対して平行移動や回転操作などを行う．

モーションデータに関する DTW 法は，一般的にスケルトン構造の近いモーションデータ間に適用されることが多い．本手法で扱う人間と四足歩行動物のモーションデータは，人間のモーションデ

ータ間と比較するとスケルトン構造の差が大きいが，身体各部位の位置データの同期をとる点では人間のモーションデータ間の場合と同様である．このため，スケルトン構造の異なるモーションデータ間に対しても DTW が適用可能であると考えている．適用可能性の検証は今後の課題である．

3.3 システム同定

同期させた人間の脚動作と四足歩行動物の後足動作に対して，両者間の変換関数をシステム同定処理により求める．システム同定における入出力として，人間の脚動作データと四足歩行動物の後足動作データをそれぞれ用いる．

システム同定は，システムの入出力データ $\mathbf{u}(t) \in \mathcal{R}^{d_i} (t=1, 2, \dots)$ ， $\mathbf{y}(t) \in \mathcal{R}^{d_o} (t=1, 2, \dots)$ から，その内部構造 f を推定する．ここで， t はフレーム番号， d_i, d_o は入出力データの次元を表し， f は線形システムであると仮定する．このとき，システムの入出力関係は次のような線形時不変 (LTI) システム [2] で表される．

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}(t+1) \\ \mathbf{y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{u}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{u}(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで， \mathbf{F} および $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ はシステムの入出力特性を表す行列であり， $\mathbf{x}(t) (t=1, 2, \dots)$ はシステムの内部状態を表す状態ベクトルである．線形時不変システムの概要を図 6 に示した．

本研究では，システムの内部構造を推定するために，システム同定問題の解法の一つである N4SID (Numerical algorithms for Subspace State Space System Identification) アルゴリズム [2] を用いる．

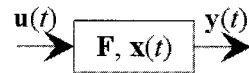


図 6 LTI システム． $\mathbf{u}(t)$ ， $\mathbf{y}(t)$ は入出力データ， $\mathbf{x}(t)$ は状態ベクトル， \mathbf{F} はシステム行列．

4 結果

図 2 に示したように，提案システムは同期処理とシステム同定処理によって構成される．人間の脚動作と四足歩行動物の後足動作の同期処理は DTW 法によって実現可能であると考えているが，

実験は行っていないため、今後の課題として取り組んでいる。よって、本稿ではシステム同定処理を用いた四足歩行動物の後足動作から前足動作への変換関数推定(3.1節(2))の実験結果について報告する。

4.1 人間の脚動作から腕動作への変換

本手法では、人間のモーションデータと四足歩行動物のモーションデータを実験の対象としている。しかし、動物の様々なモーションデータを入力することは難しい。

そこでまず、比較的入手しやすい人間のモーションデータを用いて、システム同定手法を用いた脚動作から腕動作への変換関数推定を行い、脚動作のみの入力から対応する腕動作が出力できるかを検証した。これは、四足歩行動物のモーションデータにおける後足動作から前足動作への変換に対応する。

実験方法は次の通りである。まず、人間キャラクターの「通常歩行」の脚データ(図3のL1~L8の関節データ, $d_f = 24$)と腕データ(図3のA1~A8の関節データ, $d_o = 24$)をシステムの入力として、「通常歩行」(図7)における脚動作と腕動作の相関を変換システムに学習させた。次に、「遅歩き」(図8上段)、「大股歩き」(図9上段)の脚データを変換システムにそれぞれ入力し、入力された脚データに対応する腕データを出力させた。「遅歩き」、「大股歩き」の適用例をそれぞれ図8, 図9に示す。腕データに関して上段はオリジナルデータ, 下段はシステムの出力結果を表し、腕以外の関節データは両段共にオリジナルの関節データを用いた。

図8から、脚動作のテンポ変化に関しては、腕の振り幅やタイミングがオリジナルデータに類似しており、腕動作が十分に再現できているといえる。また図9から、歩幅の変化に関しては、振り幅や動作方向の点でオリジナルデータと異なる腕動作ではあるが、全体として自然なアニメーションが生成できている。

結果より、類似した歩行動作に関して、あらかじめ求めておいた脚-腕動作間の変換関数を用いることにより、脚動作のみの入力から対応する腕動作が出力できると考察される。これは、提案手

法における四足歩行動物の後足動作から前足動作への変換の実現可能性を示唆している。



図7 通常歩行アニメーション。

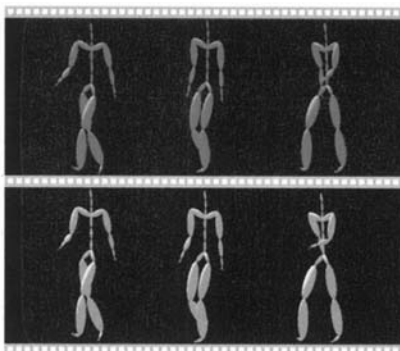


図8 遅歩きの適用例。オリジナルデータ(上段), システムの出力(下段)。

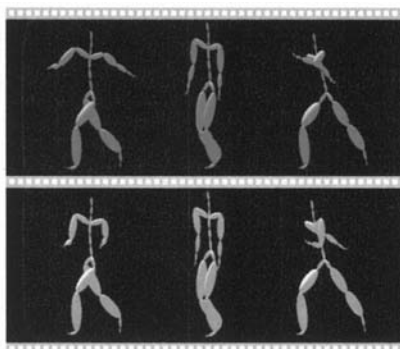


図9 大股歩きの適用例。オリジナルデータ(上段), システムの出力(下段)。

4.2 四足歩行動物の後足動作から前足動作への変換

前節では、人間の脚-腕動作の変換関数を用いることにより、脚動作のみの入力から対応する腕動作を出力できることを確認した。これは、四足歩行動物に対しても同様のことが行える可能性を示している。そこで本節では、対象を四足歩行動

物とし、4.1 節と同様の方法で後足動作から前足動作への変換を行った。これにより、後足動作のみの入力から対応する前足動作を出力できるかを検証した。

実験方法は次の通りである。四足歩行動物キャラクターの「通常歩行」の後足データ(図 3 の H1~H10 の関節データ, $d_l = 30$)と前足データ(図 3 の F1~F12 の関節データ, $d_o = 36$)をシステムの入力として、「通常歩行」(図 10 上段)における後足動作と前足動作の相関を変換システムに学習させた。そして、変換システムに学習で用いた「通常歩行」の後足動作を入力し、後足動作から前足動作への変換が正常に行われるかを実験した。実験結果を図 10 に示す。前足データに関して上段はオリジナルデータ, 下段はシステムの出力結果を表し、前足以外の関節データは両段共にオリジナルの関節データを用いた。

図 10 より、あらかじめ求めておいた後足-前足動作間の変換関数を用いることにより、後足データのみの入力から対応する前足データが出力できると考察される。これは、提案手法における人間の脚動作から四足歩行動物の後足動作への変換、四足歩行動物の後足動作から前足動作への変換の実現可能性を示唆している。計算時間に関しては、システム同定処理には一定時間を要するが、一度変換システムが同定できれば、実行はリアルタイムで行うことが可能である。

現在は、人間の脚動作と四足歩行動物の後足動作との同期処理について検討し、提案手法の実現を目指している。

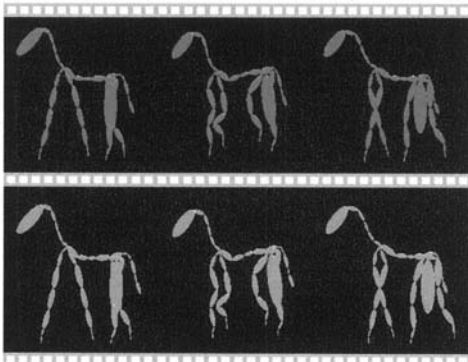


図 10 馬キャラクターの後足動作から前足動作への変換。オリジナルデータ(上段), システムの出力(下段)。

5 おわりに

スタイル変換で用いられる同期処理とシステム同定処理を人間の動作から四足歩行動物の動作への変換関数の推定に利用し、人間の新たなモーションデータの入力のみから対応する四足歩行動物のモーションデータを出力する手法を提案した。提案手法を実現するために必要なシステム同定処理によるモーションデータ間の変換関数の推定に関する検証実験の結果を示した。実験結果より、人間の脚動作から四足歩行動物の後足動作への変換、四足歩行動物の後足動作から前足動作への変換の実現可能性を確認することができた。

今後は、人間と四足歩行動物といった異なるスケルトン構造を持つキャラクター間の同期処理手法について検討し、提案手法の実現を目指したい。また本稿では、歩行動作を実験の対象としたが、歩行動作以外の運動に対してもモーションデータの変換を適用できるように手法を拡張していきたい。

参考文献

- [1] Eugene Hsu *et al.*, "Style Translation for Human Motion", *ACM Transactions on Graphics*, vol.24, no.3, pp. 1082-1089, 2005.
- [2] 片山徹, "システム同定-部分空間法からのアプローチ", 朝倉書店, 2004.
- [3] Ljiljana Skrba *et al.*, "Quadruped Animation", *EUROGRAPHICS2008 STAR*, 2008.
- [4] Jane Wilhelms and Allen Van Gelder, "Combining vision and computer graphics for video motion capture", *The Visual Computer*, vol.19, no.6, pp. 360-376, 2003.
- [5] Joseph Laszlo *et al.*, "Interactive control for physically-based animation", *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '00)*, pp. 201-208.
- [6] Nick Torkos and Michiel van de Panne, "Footprint-based quadruped motion synthesis", *Proceedings of Graphics Interface*, pp.151-160, 1998.
- [7] Lucas Kovar and Michael Gleicher, "Automated Extraction and Parameterization of Motions in Large Data Sets", *ACM Transactions on Graphics*, vol. 23, no. 3, pp. 559-568, 2004.
- [8] F. S. Grassia, "Practical Parameterization of Rotations Using the Exponential Map", *Journal of Graphics Tools*, vol.3, no.3, pp.29-48, 1998.
- [9] Lucas Kovar *et al.*, "Motion Graphs", *ACM Transactions on Graphics*, vol.21, no.3, pp. 473-482, 2002.