

アニメーションキャラクタの体型を考慮した同化動作生成手法

Assimilated Motion Generation for Various Figures

本林正裕

原口誠

Masahiro Motobayashi

Makoto Haraguchi

北海道大学大学院工学研究科電子情報工学専攻

Division of Electronics and Information Engineering, Hokkaido University

This paper presents a new framework for synthesizing the target motions of human characters with various features by assimilating the character's motion to motion data stored in a database. Our assimilation process is divided into three subprocesses: identifying partial motions of the source motions with parts of the target, generating complementary motions for connecting the partial ones smoothly, and adjusting the target to make the character behave naturally. As there exist enormous combinations of the partial and the complementary motions, we have to find a pair of those. For this purpose, we consider a search procedure based on A* search method taking account of the notion of the amount of energy change on muscles. The procedure is guided by a cost function that estimates the amount needed to transform one state into another. Some experimental results to show the effectiveness of our approach are also presented.

1. はじめに

3DCG アニメーションにおける自然な人型キャラクタの動作を作成するための手法としてモーションキャプチャデータやアニメータによるアニメーションを再利用することが有効であり、様々な手法が提案されている。例えば Liu et al. [Liu 02] は、ユーザが作成した簡単なアニメーションを参考にし、様々な制約条件を満足する自然な動作を最適化問題を解くことにより生成する。この手法によって動作を生成するためには比較的多くの知識や手間が必要とされ、技術や知識を持たないユーザにとっては負担の多い作業となり得る。一方、ユーザに手間や知識を要求しない技術の場合には、データやシステムによって生成できる動作が制限されるという問題がある。例えば、Unuma et al. [Unuma 93] は、アニメーションを作成するためにユーザに必要とされる負担は小さいが、動作生成に用いる動作データとそのデータと他の動作との差異を表す成分データを予め用意しておかなければならない。

これらの問題を同時に解決することは容易ではないと思われる。なぜならば、必要なデータを予めすべて用意することは不可能であり、またすべての動作を生成できるシステムを構築することは困難だからである。そこで [本林 02] では、ユーザが望む動作を合成するためにそのお手本となる規範動作を与え、それをできるだけ容易に修正するための枠組みを提案した。具体的には、ユーザは合成したい動作（目標動作）の初期状態、目標状態、再利用の対象となる規範動作データをシステムに入力し、システムは目標動作と部分的に類似している動作データの一部分を取り込むことにより、初期状態から目標状態を達成できる動作を生成する。特に、類似している規範動作を部分的に取り込む過程は、動作の模倣による同化と捉えることが可能なことから、この枠組を同化動作生成手法と命名している。

ここで、動作の類似を表わすためには様々な尺度が考えられる。[本林 02] での動作の類似とは、規範動作と目標動作間で部分動作を共有する現象をさし、同一の特徴を持つキャラクタは、同じ部分動作を共有することを意味する。この場合、動作中の別の部分は異なる動作でも構わない。例えば、同一キャラ

クタにおける、「立ち上がる」と「椅子から立ち上がる」は似ている動作である。本研究では上記に加えて、さらに、体節強度や筋力等が大幅に異なるキャラクタ間で動作が共有できる場合を考える。ただし、ここでの共有とは、動作を行うキャラクタのパラメータの違いを除き同じ動作であることを意味する。例えば、筋力の強いキャラクタの歩行と標準キャラクタの歩行は、同じ「歩行動作」のインスタンスという意味で似ているとみなされなければならない。しかし同時に、その外見上の動作は微妙に異なり、それは、実際の間接の動かし方の違いに起因している。本論文では、この2種類の類似性に基づく同化動作生成を同一のメカニズムで実現する。

動作データを様々な体格のキャラクタに適用する多くの手法が提案されているが、[本林 02] や本論文において主要な処理となる、目標動作を規範動作の一部に適合・同化させるということは考慮されておらず、動作データの幾何学的な制約条件を重視している。例えば、Gleicher [Gleicher 98] は、体格の異なるキャラクタに対して、体節の長さの違いを考慮した動作データの変換手法を提案している。一方、本研究では、特徴の異なるキャラクタの動作の一部で、目標動作に再利用可能な部分動作を決定するための操作を必要とする。このためには、単に長さの違いを考慮するだけでは不十分であり、ある程度の力学的条件のもので「自然さ」を追求する必要がある。そこで本論文は、キャラクタの体節の重さ・太さ、体節の強さ、筋力を考慮し、筋肉や体節に無理な力がかからないという制約を活用する。

2. 同化動作生成手法

本研究では、予め用意されている動作データ群から生成したい動作に最も近い動作データをユーザに選択してもらい、それを全体・部分的に模倣（再利用）することで動作を生成するという戦略を採用している。しかし、動作データを採取した人物と特徴の異なるキャラクタに動作データを適用する場合、一般に、直接データを適用してもキャラクタらしい自然な動作を生成することはできない。これは、例えば筋力の強い人が筋力の弱い人と同じ動作をしようとした場合のように、体節強度や筋力等が異なる場合には体節や筋肉にかかる力等の負担が変化するために同一の動作をすることが容易ではないためである。

連絡先: 本林正裕, 北海道大学大学院工学研究科電子情報工学専攻, 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目, 011-706-7161(Tel,Fax), moto@db-ei.eng.hokudai.ac.jp

したがって、特徴の異なるキャラクタに動作データを適用する場合には、同一の動作を行なうことができないため、元の動作の特性（各筋肉、関節、体節に作用するデータから得られるおおよその力及びその時間変化）を部分的に模倣した動作を生成する。その際に、キャラクタにとって可能な動作を生成するために、身体の各部（筋肉や体節）にかかる負担を考慮し、その負担をできるだけ小さくする、という処理を行なう。すなわち本手法では、身体の各部にかかる負担が小さい動作が自然な動作であるとする。このような負担の大きさはコストによって表現する。コストはキャラクタがその動作を実行する場合に各筋肉、体節にかかる負担をエネルギーの変化量によって表す。以下ではまず、キャラクタの状態について説明し、本手法で考慮するコスト、そしてコストを考慮した動作生成処理について述べる。

2.1 状態

本研究ではある時刻でのキャラクタの状態を、キャラクタが仮想空間内でどこにいるか、キャラクタはどんな姿勢をとっているか、キャラクタの各部にはどれくらいの力が作用しているか、によって表す。まず、キャラクタの位置はキャラクタの代表点の位置とみなす。ここで代表点とはキャラクタの、例えば骨盤や臍のような、身体の中心部を意味する。そしてキャラクタの姿勢はキャラクタを構成する各関節の位置と角度によって知ることができる。また、筋肉に必要とされるトルクと体節に作用する力は動作データから計算することができるものを考慮する。

以上より状態は、ある時刻 t におけるキャラクタの位置、姿勢、筋肉、リンクに働く力の組として定義する。

2.2 コスト関数

コスト関数は、キャラクタが動作を行なう際に各筋肉に必要とされる力を考慮したものであり、またその結果構造にかかる力を考慮したものである。簡単のため、関節は一つの筋肉によって動作するものとする。そして、キャラクタの各部に作用する力は、重力、接触による反力、運動による慣性力、隣接体節から伝播される力のみを考慮する。

コスト関数を実際に設計するにあたって、本研究は力学的に完全な最適性を保証するコスト関数が必ずしも好ましいものとは限らないとの立場にたっている。つまり、人が他人の動きを模倣する多くの場合にそうであるように、必ずしも「完璧」な模倣が必要なわけではなく、模倣した動作が自然な動作であること、すなわち模倣した動作が例え完璧な模倣でなくても、身体にかかる負担の少ない動作であることが重要だと考えている。

この観点から述べれば、動作データのうち具体的にどの部分を再利用するかについては、多少の最適性を犠牲にしても比較的良好な模倣がしやすい部分を高速に求めることに重きをおく。そのために、計算が比較的安価な「見積みコスト」を用いる。また、そうした計算により求められた再利用可能な部分動作から実際の目標動作を求める際には、より厳密な「遷移コスト」を用いて、より力学的に精度の高い動作合成を実現する戦略を本研究では採用している。

遷移コストは、状態 S から S' に遷移する際、本研究で想定している 4 つの力により筋肉 m に必要とされるトルク $\vec{\tau}_m(S, S')$ 、体節 b に作用する力 $\vec{\phi}_b(S, S')$ を考慮したコストである。筋肉の総数 M 、体節総数 B 、状態 S での関節角度 $\vec{\theta}_m(S)$ 、体節位置 $\vec{p}_b(S)$ とした場合の遷移コスト $g(S, S')$ は以下の式によって計算する：

$$g(S, S') = g_r(S, S') + g_\phi(S, S'), \quad (1)$$

$$g_r(S, S') = \sum_{m=1}^M \left(\vec{\tau}_m(S, S') \cdot \frac{\vec{\theta}_m(S') - \vec{\theta}_m(S)}{dt} \right)^2, \quad (2)$$

$$g_\phi(S, S') = \sum_{b=1}^B \left(\vec{\phi}_b(S, S') \cdot \frac{\vec{p}_b(S') - \vec{p}_b(S)}{dt} \right)^2. \quad (3)$$

この式は、動作を行なう際に筋肉、体節に作用するエネルギーの変化量を求めるために用いる。

見積みコストは遷移コストで考慮している 4 つの力のうち、重力、慣性力のみを考慮する。 $\vec{N}_m(S, S')$ 、 $\vec{F}_b(S, S')$ をそれぞれこの 2 力を考慮して計算したトルク、体節に作用する力、とした場合見積みコストは以下の式によって計算する：

$$h(S, S') = h_N(S, S') + h_F(S, S'), \quad (4)$$

$$h_N(S, S') = \sum_{m=1}^M \left(\vec{N}_m(S, S') \cdot \frac{\vec{\theta}_m(S') - \vec{\theta}_m(S)}{dt} \right)^2, \quad (5)$$

$$h_F(S, S') = \sum_{b=1}^B \left(\vec{F}_b(S, S') \cdot \frac{\vec{p}_b(S') - \vec{p}_b(S)}{dt} \right)^2. \quad (6)$$

ここで、見積みコストは、計算時間の短縮と A^* 探索の許容条件 $h(S, S') \leq g(S, S')$ を考慮して設計した。

このようなコスト関数を用いる様々な手法がある。例えば、Rose et al. は関節トルクを考慮した目的関数を用いている [Rose 96]。Cohen はラグランジアンを用いて目的関数を設計している [Cohen 92]。これらに対して、本手法では関節トルクに加えて体節に作用する力を考慮する。関節トルクは動作にとって重要な要素であるが、様々な特徴の違いを表すためには不十分である。そこで、トルク計算では無視されてしまう体節に作用する力を考慮することにより、体節強度のような特徴の違いをより明確に表すことができると考えている。

2.3 動作生成処理

ユーザによって与えられたキャラクタに適した動作を生成するために、まず、動作データを容易に模倣できるキャラクタ（このキャラクタを標準キャラクタと呼ぶ）の動作を生成するため以下の 3 つの処理を行う：

同定処理 与えられた動作データに含まれる再利用することが可能な部分動作を同定する（図 1）。

補足処理 同定処理で得られた部分動作間を滑らかに接続する動作（補足動作）を生成する（図 2）。

構成処理 部分動作と補足動作を接続し、目標動作を生成する。

次に生成した動作をユーザによって与えられたキャラクタに適用する：

適用処理 標準キャラクタの動作を異なる特徴のキャラクタに適用し、動作が自然になるように調整する。

2.4 同定処理

与えられた初期状態 I 、目標状態 G から再利用できる規範動作 $M_S = (S_1, \dots, S_f)$ の部分 M_R を同定する（図 1）。そのために、再利用可能な部分動作の最初の状態 S^* と最後の状態 S^{**} を同定する。これらの状態は以下のように同定する。 M_S に含まれる状態 $S_i, S_j (1 < i < j < f)$ に対し、 $h(I, S_i), h(S_j, G)$ を最小にする状態 S_i, S_j を各々 S^*, S^{**} とする。

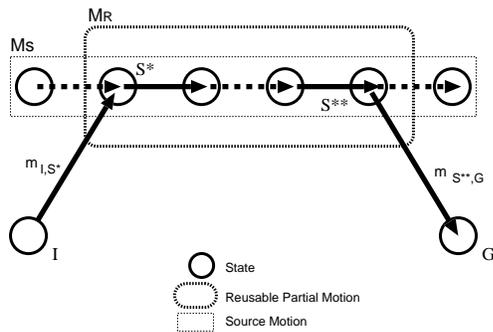


図 1: 再利用可能部分動作の同定

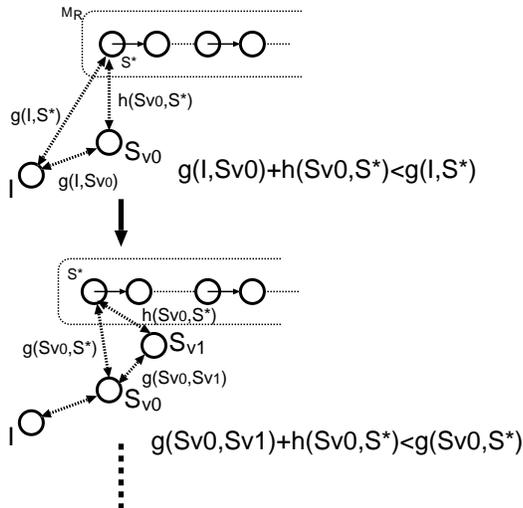


図 2: 中間状態の挿入

同定する部分動作は目標動作に対して必ずしも完全な動作でなくても構わない。この処理での目的は、規範動作をそのまま利用するよりは良い部分を見つけることである。そして、この不完全さは補足処理によって補う。

2.5 補足処理

同定処理で得られた部分動作 $\mathcal{M}_R = (S^*, \dots, S^{**})$ に対して、目標動作 \mathcal{M}_T は、 $\mathcal{M}_T = (I, S^*, \dots, S^{**}, G)$ となる。 \mathcal{M}_R は規範動作の一部であるため自然な動作であるが、動作 $\mathcal{M}_0 = (I, S^*)$ と $\mathcal{M}_1 = (S^{**}, G)$ は、自然な動作である保証はない。そこで、 I と S^* の間、 S^{**} と G の間に適当な中間状態を挿入することによって $\mathcal{M}_0, \mathcal{M}_1$ を自然な動作にすることを試みる。本論文では、自然な動作の一例として遷移コストの小さい動作を考えるため、遷移コスト $g(I, S^*), g(S^{**}, G)$ を小さくする状態が中間状態として選択される。

具体的な処理は次のように行う。中間状態を挿入する動作を $\mathcal{M} = (s_0, s_1)$ とする。まず、 \mathcal{M} において最も遷移コストが大きい関節 j を探す。次に、 s_0 において、 j に隣接する関節の角度を変化させ、その状態を s'_0 とする。もし $g(s_0, s'_0) + h(s'_0, s_1) < g(s_0, s_1)$ ならば、 s'_0 を中間状態の候補に加える。この処理を遷移コストが大きい順にすべての関節に適用する。そして、中間状態の候補の中で最小遷移コストの状態が挿入する中間状態 s_v となる。このような中間状態をいくつか挿入することによってよりコストの小さい動作を生成することができる。

結果的に生成される動作 $\mathcal{M}_{C_0} = (I, S_{v_0}^0, S_{v_1}^0, \dots, S_{v_k}^0, S^*), \mathcal{M}_{C_1} = (S^{**}, S_{v_0}^1, S_{v_1}^1, \dots, S_{v_l}^1, G)$ を補足動作と呼ぶ。図 2 は中間状態を生成する際のイメージを表す。

2.6 構成処理

$\mathcal{M}_R = (S^*, \dots, S^{**})$ を同定された部分動作、 $\mathcal{M}_{C^0} = (I, S_{v_0}^0, \dots, S_{v_i}^0, S^*), \mathcal{M}_{C^1} = (S^{**}, S_{v_1}^1, \dots, S_{v_j}^1, G)$ を補足動作とすると、目標動作 \mathcal{M}_T は $\mathcal{M}_{C^0}, \mathcal{M}_R, \mathcal{M}_{C^1}$ を接続した動作

$$\mathcal{M}_T = (I, S_{v_1}^0, \dots, S_{v_i}^0, S^*, \dots, S^{**}, S_{v_1}^1, \dots, S_{v_j}^1, G).$$

となる。

2.7 適用処理

最後に生成された目標動作をキャラクタに適用する。目標動作は標準キャラクタのための動作であるため、異なるキャラクタの特徴に合うように修正する必要がある。しかし動作は関節角の時間変化で表現されているため、動作からキャラクタの特徴を認識することは難しい。

関節角の時間変化は、筋肉が発する力とキャラクタの特徴によって決定される。このために、本手法では動作によって身体の各部に働く力を得ることによって特徴を抽出することができる。したがって、働く力が各部に及ぼす負担を模倣する、すなわち適用した結果のコストが標準キャラクタのコストと一致するように動作を修正するという方針を取る。具体的には、以下のような処理を行なう：

1. 目標動作 $\mathcal{M}_T = (S_I, \dots, S_G)$ をキャラクタに適用し、遷移コストを計算する
2. \mathcal{M}_T の各状態 S_i ($I < i < G$) に対して、

$$\begin{aligned} & \left| \frac{1}{C_m} g_\tau(S_{i-1}, S_i) - \frac{1}{C'_m} g_\tau(S'_{i-1}, S'_i) \right| \\ & + \left| \frac{1}{C_b} g_\phi(S_{i-1}, S_i) - \frac{1}{C'_b} g_\phi(S'_{i-1}, S'_i) \right| \end{aligned}$$

を最小化する状態 S'_i を探す。ここで、 C_m は標準キャラクタの筋肉 m の筋力パラメータ、 C_b は標準キャラクタの体節 b の体節強度パラメータとし、 C'_m, C'_b はそれぞれ適用するキャラクタの筋力パラメータ、体節強度パラメータとする。

2.8 ユーザによる生成動作の修正

以上のようにユーザの入力に対して自動的に動作を生成することも可能であるが、生成された動作がユーザの意図を満足しない場合には、修正することも可能である。動作を修正する方法は幾つか考えられるが、現段階ではキャラクタのパラメータを調整することによって、生成される動作をコントロールする。

3. 評価実験

本論文では、以下の条件で動作実験を行った：

- ここで、用いるキャラクタは 1 代表点、20 関節、21 体節、21 筋肉、58 自由度を持つ。
- 標準キャラクタは図 4 のように設定する。
- キャラクタの筋力パラメータ、体節強度パラメータ、生成したい動作の初期状態、目標状態、利用する規範動作列はユーザによって与えられるものとする。

- キャラクタの筋力パラメータ、体節強度パラメータは簡単のため、標準キャラクタの値をそれぞれ1とし、それに対する割合で与えることとする。
- 力、トルクの計算はNewton-Euler方程式を利用して行う。
- 補足処理と適用処理では最急降下法を用いて計算時間を短縮する。

動作生成例を以下に示す。

『初期状態：立っている、目標状態：初期状態からz軸方向に3m離れた場所に立っている、規範動作列：歩く/82状態(図3)』

この例では同定処理、補足処理、構成処理に要した計算時間は約10秒であった。同定処理で得られた部分動作は65状態、また補足処理によって得られた補足動作 M_{C_0} 、 M_{C_1} はそれぞれ3状態、8状態であった。 M_{C_1} の状態数が M_{C_0} よりも多いのは、3m歩くという条件のために、 S^{**} は G に最も近い状態を選択できなかったためである。

次にこの動作を2種類のキャラクタ($C_m = 2.0, C_b = 0.5$)に適用する。各動作生成に要した時間はそれぞれ約30秒であった。 $C_m = 2.0$ に設定したキャラクタの動作は、腕、脚の振りが大きい動作となった。また $C_b = 0.5$ に設定したキャラクタの動作は、腕の動作にはあまり大きな変化は見られなかったが、脚と腰の動きに変化が現れた。すなわち、体節にかかる負担が小さくなるように動作が変化したものと考えられる。

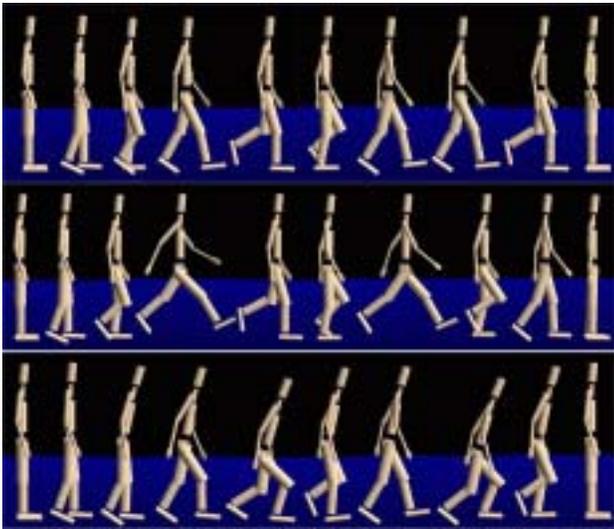


図3: 動作生成例1; 上: 標準キャラクタの動作; 中: $C_m = 2.0$ の特徴をもったキャラクタの動作; 下: $C_b = 0.5$ の特徴をもった動作

4. まとめと今後の課題

本論文では、様々な体格の人の型のキャラクタに動作データを適用するための一手法を提案した。[本林 02]では動作生成に多くの時間(40フレーム程度で約15分)を必要としたため複数の動作データを扱うことができなかった。本論文では評価実験に示したように計算時間を短くすることができた。計算時間を短縮できた理由は、探索に最急降下法を用いたことと、見積もりコストの設計によるものと思われる。実験によると、見積もりコスト値は遷移コスト値の約50%であった。力、トルクの計算量を減らすために見積もりコスト関数を設計したた

part	weight(割合)	length(m)	C_b	C_m
whole body	60kg(100%)	1.85	-	-
head	7.8kg(13.0%)	0.18	1.0	1.0
thoracic	14.40kg(24.0%)	0.27	1.0	1.0
lumbar	7.44kg(12.4%)	0.13	1.0	1.0
pelvis	6.60kg(11.0%)	0.24	1.0	1.0
upperarm	1.80kg(3.0%)	0.29	1.0	1.0
forearm	0.60kg(1.0%)	0.29	1.0	1.0
hand	0.48kg(0.8%)	0.11	1.0	1.0
thigh	6.00kg(10.0%)	0.43	1.0	1.0
calf	2.40kg(4.0%)	0.52	1.0	1.0
foot	0.60kg(1.0%)	0.14	1.0	1.0

図4: 標準キャラクタ

め、探索にとっては最適なヒューリスティックではないが、生成処理全体ではかなり計算量を抑えることができた。

また修正に関しては筋力、体節強度パラメータを調節することで動作を力学的に制御することができる。しかし、この方法は幾何学的な修正には向かないため、生成された動作を直接修正する方法を検討中である。

今後の展望としては、今回規範動作はユーザによって与えられるものとしたが、動作を自動的に生成するために、目標動作に必要な動作データをデータベースから高速に抽出することを考える。また、例えば鳥の動作を模倣するような、異なる骨格系のキャラクタの動作を適用することについても考察する。このような動作を生成することができれば、ユーザの要求により広く応えることができると考える。

参考文献

- [Cohen 92] Cohen, M. F.: Interactive Spacetime Control for Animation, *Computer Graphics, Proceedings of SIGGRAPH 92*, pp. 293-302 (1992)
- [Gleicher 98] Gleicher, M.: Retargetting Motion to New Characters, *In Proceeding of ACM SIGGRAPH '98*, pp. 33-42 (1998)
- [Liu 02] Liu, C. K. and Popović, Z.: Synthesis of Complex Dynamic Character Motion from Simple Animations, *In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002* (2002)
- [Rose 96] Rose, C., Guenter, B., Bodenheimer, B., and Cohen, M. F.: Efficient Generation of Motion Transitions using Spacetime Constraints, *Computer Graphics, Vol. 30, No. Annual Conference Series*, pp. 147-154 (1996)
- [Unuma 93] Unuma, M. and Takeuchi, R.: Generation of Human Walking Motion with Emotion for Computer Animation, *Trans. Inst. Electron. Inf. Commun. Eng. D-II(Japan)* (1993)
- [本林 02] 本林正裕, 原口誠: モーションアナロジーに基づくアニメーションの同化動作生成手法, *Visual Computing グラフィックスとCAD 合同シンポジウム*, pp. 67-72 (2002)