3D バネモデルに基づいた音楽に応じた動作の自動生成*

王 旗†・才脇 直樹†・西田 正吾†

Automatic Motion Generation Corresponding to Music Based on 3D Spring Model*

Qi WANG†, Naoki SAIWAKI† and Shogo NISHIDA†

This paper proposes an approach to automatic motion generation of 3D spring model with music. Music factors are extracted from MIDI (Music Instrument Digital Interface) file. Instead of designing and calculating animation of an object directly, a sequence of motion-controllers, which can finish a set of motions affected by music factors, are automatically generated through a synthesis algorithm. A prototype system is developed to evaluate the motion generator and it is confirmed that the users are satisfied with the generated motion based on music.

1. はじめに

近年, 3次元コンピュータグラフィックス(CG)を用いたアニメーションやコマーシャル,あるいはSFX映画などが一般化してきた。しかし,このようなCG動画を作成するにはモデリングやレンダリング,そしてインバースキネマティクスといった主要な製作段階において,それぞれ膨大な手作業によるパラメータの設定が必要となる。最近のソフトウェア技術の発達と計算機パワーの増大によって,これらを補助する様々な手法が実用化されつつあるが,まだまだ経験者の手作業に頼らざるを得ない状況に変化はない。

まず,外部からの刺激に合った動きに対する研究の現状について説明する。もちろん三次元物体,とりわけ多関節物体の動きの質を問われる作品制作の場合には詳細なパラメータ設定が必要であるが,インタラクティブに入力に応じて動作を変化させるシステムの場合には,動きとしてのリアルさより外部からの刺激に応じた適切な応答を生成できるかが問われる傾向にある。このような場合,人間は細部の動きよりも,動作全体としての応答内容の適切さや意味を重視する傾向があるためである。

それは,最近注目を集めているペット型ロボット,あるいは音や光のような刺激に反応するキャラクタグッズの一般的な評価のされ方をみれば明らかである。このような商品に対する評価は,「動きのあいらしさ」のような漠然とした雰囲気であり,関節角の精度ではない。ところで,このように動きの正確さを厳密に追求しなくてよいデフォルメされた対象のCGによる動作生成を扱った研究はまだ少なく,またインタラクティブ・トイとして実態化,商品化されているものについても現時点では動かすことが目的であり,外部の刺激に対する応答の動きの適切性の評価にまでは至っていないのが現状である。

一方,単純な音や光の刺激への応答ではなく,音楽に応じてCGに振り付けを行う研究は更に少ない。ディズニーのアニメーションやCMに代表されるように,現在では音楽と同期したCGの動作付けが普通のものとなりつつある。しかし,音楽と映像は最初から同時に生成されるのではなく別々に作られ,音楽に合うように映像の動きを手動で補正せねばならない場合も少なくない。この場合,たとえば音楽を差し替えたりフレーズの長さを変化させたりといった大きな音楽構造に変化があった場合はもちろん,テンポを調整しただけでも映像そのものの作り直しを迫られる場合がある。一方,システムに音楽を与えればその音楽にあった振り付けを自動的につけてくれると省力化されるのみならず,音楽に様々な変化を何度でも与えてその都度振り付けの変化をみることができるようになり,作品を作る際の自由度を高めることが期待できる。

* 原稿受付 2000年9月19日

† 大阪大学 大学院 基礎工学研究科 Graduate School of Engineering Science, Osaka University; 1-3 Machikaneyamacho, Toyonaka city, Osaka 560-8531, JAPAN

Key Words: motion generation, music factor, MIDI, 3D spring model.

本論文では、上述したような機能を実現するプロトタイプシステムを制作し、評価を行った結果について報告する。

2. 音楽に同期した動きの自動生成

2.1 従来の研究

本論文に関連する研究例はまだそれほど多くはないが、音楽と同期した動きを生成する研究の性格は、二つの分類軸で区分される四つの象限で分類することができる。その軸の一つは、システムに与えられる音楽が、MIDI信号に代表される楽器演奏情報で与えられているか、音楽信号そのものとして与えられているかである。また、もう一つはリアルタイムに検出される音の高さ、音の長さ、音の強さ、音色などの音楽要素そのものを動きの生成に用いているか、それとも音楽の解釈や構造・特徴の分析結果も併用し、動きに踊りとしての意味を付与しようと指向しているかどうかである (Fig. 1)。この分類軸によって、それぞれの研究が焦点を合わせている技術的な課題の違いも明白になる。

Fig. 1 A taxonomy of former researches and the stance of current research

たとえば、リアルタイム演奏に合わせた動きを追求している後藤らは音響信号としての音楽から拍節構造を認識するリアルタイム・ビートトラッキング技術 [1-4] を開発し、それを応用して音楽のビートに合わせて踊るバーチャルダンサーを構築した。ここではビートトラッキングが研究の中心であり、CGの動作についてはあらかじめ決められた動きをリズムのパターンに合わせて繰り返すというシンプルな生成方法をとっている。基本的にアニメーションする物体の変更や形状変化は効かず、また、音楽に合わせてダンスが新たに生成されるわけでもなく、あくまでビートをダンスとして可視化することを目的とした信号処理の延長線上にある研究である (Fig. 1 の第2象限)。

一方、MIDI信号そのものを、3DCGの人形の動作パ

ラメータとして与える研究もなされている [5] (Fig. 1 の第3象限)。こちらの入力にはMIDI音楽ファイルであるためリアルタイム・ビートトラッキングを行う必要がない。したがって、音楽と動作パラメータとの対応付けが中心課題となり、ユーザの好みで対応付けのルールを手動調整可能なエディタとしての機能に焦点があてられている。ただし、システムが音楽を構造的に解釈し、イメージにあったダンスを生成提示してユーザをサポートすることを目指しているわけではないので、音楽のイメージにあった動きをさせるようにパラメータを設定するには経験が必要である。したがって、生成されたダンス自身が音楽のイメージにあっているかどうかについては、評価が難しいと述べられている [5]。

2.2 本研究の基本方針

一方、本研究の目的は、ユーザの与える MIDI 音楽ファイルにふさわしいダンスアニメーションの自動生成であり (Fig. 1 の第4象限)、参考文献 [5] と同様 MIDI 信号が入力となる。ただし、参考文献 [5] のように MIDI そのものの信号で関節角を制御する直接的な手法をとらず、音楽の特徴変化がバネモデルの動きのパラメータ変化に反映され、その結果新しい踊りが間接的に生成されるような生成アルゴリズムを提案する。

特に本論文で提案する手法では、与えられた音楽を分析する際に、音楽の演奏情報である基本的音楽情報 (3.1.1 に示す) と、その雰囲気や盛り上がりといった感性的情報 (3.1.2 に示す) をそれぞれ抽出し、両者を動作の生成に反映させる¹ことで、より自然な動き²を実現することを試みる。これらを導入することによって、様々な音楽の特徴に柔軟に対応し、それらが反映された動きを生成できる点で参考文献 [1-4] と、また音楽の雰囲気にあった踊りが生成されるという視点からは参考文献 [5] と比較して、より良い振り付けを簡単に実現することができるものと期待される。

また、動作生成に関して、本論文ではCGで表現された物体の動きに関する計算量を減らすため、運動と変形可能な3Dバネモデルで表現された直方体内部に物体を表現し、動作コントローラを用いて音楽にあわせた連続動作を実現する手法を提案する。この方法を用いれば直方体の変形に比率して内部の複雑な物体を変化させることが可能であり [6]、しかも計算そのものは直方体一個分のみでよい。たとえば、イスやテーブル、あるいは車といったデフォルメ可能な物体を擬人的に取り扱ってミュージカル風に踊らせる芸術的效果も期待できる。次章では、ここで提案した手法を実現する仕組みについて詳しく説明する。

¹対象物の動きが音楽のリズムや感性的情報にあっていること。

²音楽の有り無しにかかわらず、対象物に固有の物理的な性質を反映した、ユーザにとって違和感のない動き。

3. システムのアーキテクチャ

本システムは、大きく三つのステージから成る (Fig. 2).
それらは

- 1) 音楽の特徴抽出,
  - 2) アニメーションする物体の 3D バネモデルによる表現,
  - 3) 音楽の特徴に応じたアニメーションの生成
- である. 以下の各節で、それぞれについて説明する.

Fig. 2 System architecture

3.1 音楽の特徴抽出

本研究では、音楽のパラメータを動作パラメータに反映させることにより、自動動作生成を行う。まず、どのような音楽要素を必要とするかを説明する前に、音楽と映像の調和について説明する。参考文献 [15–17] によると、こうした調和には、構造的調和と意味的調和の二つがあると指摘されている。構造的な調和とは音楽のテンポやリズムと映像の動きや変化との同期による調和である。それについて、3.1.1 で具体的に説明する。もう一つの意味的調和とは、たとえば「明るい」印象の音楽と「明るい」印象の映像の間に生じる意味の対応による調和である。それについて、3.1.2 で述べる。

3.1.1 基本的音楽情報の抽出

本研究におけるアニメーションの合成では、入力された音楽ファイルから抽出された音楽特徴量が動作を生成する基本的な要素となる。音楽の入力ファイルは標準規格である SMF (Stand MIDI File) [7] で与えられる。SMF のファイルに対して抽出アルゴリズムを用い、分解能 (division)、時間位置 (measure/beat/tick:MBT)、テンポ (tempo)、拍子 (beat)、音の強さ (velocity)、音の長さ (duration または gate time) といった情報を抽出する。本論文における、SMF の時間の表記法には MBT 方式 [8] が用いられる。MBT とは、小節 (Measure) と拍 (Beat) とティック (Tick)¹ からなる時間表現方法のことである。

本システムでは、音楽のテンポ、拍子と小節における位置によって各動作の開始時刻を決め、音楽に同期する

動作の表現を可能としている。曲の途中で、新たなテンポや拍子を設定する場合でも、それらの MBT による時間位置から、絶対的な曲のスピードとリズムの変奏される位置を計算し、音楽に同期する動作の開始時刻を決定することができる。

3.1.2 感性的音楽情報の抽出

音楽の流れには盛り上がりが存在し、我々はその変化で音楽の緩急を感じ、音楽より受けるイメージも大きく左右される。感性情報理論の角度では、本論文で討論される音楽の盛り上がり度は感性情報の一部である。感性情報処理論によって感性情報が個人差とあいまい性がある [20] ので、本文の音楽の盛り上がりも個人差とあいまい性がある。これまでこの盛り上がりの度合いを計算する方法がいくつか提案されている [9,10]。一方、音楽の盛り上がりと同様に、ダンスの流れにも盛り上がりがある。本論文では、踊りを生成するという目的にあわせて小節または拍における盛り上がり度を計算する方法を提案する。文書の流れとしては、本節では音楽に関する盛り上がり度を説明し、3.3.2 と 3.3.3 で動きに関する盛り上がり度を説明する。

(1) 音楽の盛り上がり度と音の強さの関係

参考文献 [8] による、MIDI において「音の強さ」の要素となる「音の強弱」を表わすのが「ベロシティ (velocity)」である。ベロシティは音量に対応し、0 から 127 の数値が割り当てられ、数値が大きい程、音も大きくなる。ベロシティは音源により音色にも対応し、大きい音は明るく、小さい音は柔らかくなるなど音色変化も伴っている。そういうある範囲内の単調性を反映するため、本論文では、音の高さ、音色、音の長さが同じの場合、単音列において、音楽の盛り上がり度が音の強さと正比例関係を保つと仮定する。

(2) 音楽の盛り上がり度と音長の関係

普段には、人間の耳から聞いている音は「音の高さ」「音色」「音の大きさ」という三つの要素からなる。そして一番重要なことは、音というのは必ず、時間的な変化をするということである [8]。物理的には、音の長さが音のエネルギーの累積効果に影響を与える [17]。つまり、長い音が短い音より多くの音のエネルギーを解放する。以上の単調性を反映するため、以下のように仮定する。本論文では、音の高さ、音色、音の強さが同じとし、音の減衰を考えない場合、単音列において、音楽の盛り上がり度が音の長さと正比例を保つと考える。

(3) 音楽の盛り上がり度と音の数の関係

音楽の和音と単音の間および音符と休符の間など、強い響きを人間に与える [17,19]。また、ユニゾン (unison: いくつかの楽器で同じ高さあるいはオクターブで音を重ねる) によっても和音と類似の「強い」響きを人間に与える [17]。それらの性質を反映させるため、本論文では、

¹ティックは、分解能 (タイムベース) の最小単位を表している [7,8]。

簡略化するため、音色¹など他の要素をまず考えないと、単純に同時に音の数が増えたら音楽の盛り上がり度も上がると仮定する。

(4) 拍エネルギーと小節エネルギー

音楽の認知理論によると、人間は音の長さ、音の強さ、テンポ等の要素に対しては、相対的に感じるが多い[17,19]。本論文で論じる音楽の盛り上がり度にも相対的な量的の度合いと考える。ここで、その曲に当たり、基音（基音の長さが一拍の長さと同じ）の最大強さに達する表現は音の表現の目安としたら、一拍内の他の音は基音で正規化して相対的に表現する。

本論文では、拍の盛り上がり度はその拍内のすべての単音の相対的表現値の総和と定義する。また、拍の盛り上がり度を拍エネルギーと名づける。この定義は(1)式に示す。ここで、 $MaxD_b$ は拍 b の長さとし、 $MaxV$ をVelocityの最大値とし、 D_i ³、 V_i はそれぞれ拍内の単音 i の長さとし、 $(D_i/MaxD_b)(V_i/MaxV)$ を音 i の相対的表現値と考えられ、それを単音エネルギーと定義すると、 $E_b(b)$ は b 小節におけるすべての単音エネルギーの総和となる。なお、 k は b 拍に発音する音の数である。

$$E_b(b) = \sum_{i=1}^k \frac{D_i}{MaxD_b} \frac{V_i}{MaxV} \quad (1)$$

同様に、小節の盛り上がり度は小節エネルギーとなづけ、それを(2)式のように定義する。ここで、 $E_m(m)$ は m 小節目の単音のエネルギーの総和である。なお、 k は m 小節に含まれる音の数である。また、 D_i 、 V_i 、 $MaxV$ 、 $MaxD_i$ は(1)式と同じ設定である。

この小節のすべての音が休止した場合、 $E_m(m)$ 、 $E_b(b)$ は0になる。また、MIDIデータの性質により、 $MaxV$ は常に127となる。また、電子楽器の最大同時発音数制限があるので[7]、 E_b にも上限がある。

$$E_m(m) = \sum_{i=1}^k \frac{D_i}{MaxD_i} \frac{V_i}{MaxV} \quad (2)$$

(5) 音楽の感性情報から動きへ

3.1の冒頭部分に述べたように、動きと音楽の意味的調和関係があり、いわゆる、同じな感性情報を持つ音楽と動き、たとえば「強い」音楽と「強い」動きを組み合わせた場合、「共鳴現象」[18]を生じる。その意味的調和を反映するため、本論文では、盛り上がり度というパラ

メータによって動作と音楽を対応付ける。

(a) ダンスの基本動作について考察すると、本論文では平行移動スピードが「大きい」、ジャンプが「高い」、回転角度が「大きい」などを対応付ける。対応時間については、ダンスのルールによって、一般には、ダンスの基本動作は一拍内で終了する⁴。

(b) 一連の基本動作からなるダンス基本動作の組合せを考察すると、「難度が高い」基本動作（たとえば、ジャンプが平行移動より難しい、3回転が2回転より難しいなど）がある動作組合せのほうがより「共鳴現象」を生じやすいと考える、また組合せの「複雑度が高い」組合せ（たとえば、人間の動きには慣性があるので、三つの動作の中に、二つ目が急にストップすると、より完成度が難しくなるので、音楽の盛り上がりとの「共鳴現象」を生じやすい）がより「共鳴現象」を生じやすいと考える。対応時間については、本論文では、簡略化のため、一小節とする。その具体的な対応アルゴリズムは3.3で更に説明する。

3.2 アニメーションする物体の3Dバネモデルによる表現

3.2.1 3Dバネモデル

J. Marksらの研究によって[12,14]、アニメーションとして表現された対象物(animated figure)を提案された。アニメーションの中では、元々動けないものが擬人化される場合が多い。たとえば、ひねりをする擬人化されたダンスをする木や飛んでいる皿と瓶などの例が少なくない。本研究では、そういったanimated figureを対象とし、それを動かすことを目的としている。

仮想空間内で柔らかい物体や弾性のある物体を表現する手法としてバネモデルが提案されている[11]が、本論文では直方体の各頂点をバネで結んだ格子状のバネモデルを用いる(Fig.3)。複雑な形状を極小直方体の格子で表現し物理的にリアルな動きを表現することも試みられているが、現時点ではできるだけ少ない計算量で自然な動きを再現できればよいという立場に立っている[12,14]。したがって、モデリングのデータとしてバネモデルの各頂点からのベクトルを与えることにより、バネモデルの

Fig. 3 3D spring model

¹本文では、簡略化のため、楽器の増減による音色の影響にかかわらず、ただの音の数を増えると考える。

²曲中で、テンポによる、基音の長さが必ずしも一定ではない。ゆえに、拍の記号をつける。

³ D_i には、音 i がその音のキーオフまでの持続時間ではなく、拍 b 内の持続時間である。 D_i は所在する拍 b の拍線を超えれば、拍線により若干のサブイベントに分ける。その超える音は次の拍 $b+1$ で統計される。

⁴基本動作が一拍以上で終了するケースもあるが、一拍内に終了させるのは計算の簡略化のためである。

変形に伴い中のモデルも変形する．これにより，直接複雑な形状のモデルを扱うより計算量を減らすことができる．

3.2.2 バネモデルの変形ルール

実際のバネの動作は(3)式を考えることによりシミュレートできる．ここで F はバネにかかる力， x はバネの伸び， K はバネ定数， L はバネの自然長， D はバネのダンピング定数， t は時間を表す．

$$F = -K(L - x) - D \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

3.2.3 基本動作

バネモデルに与える動作の最小単位となる基本動作として大きく分けて Shear, Twist, Splay, Scale の 4 種類 [13] を考える (Fig. 4)．つぎに，それらを組み合わせることによってダンスを表現できることを説明する．

Fig. 4 Fundamental motions

ダンスといえば，一般には，人物の体の移動，傾き，ひねりや回転，ジャンプなどの基本動作を組み合わせで表現できるものである．本研究では，平行移動には本節の(4)に示される ScaleX, ScaleY により完成させ，傾きには本節の(1)に示される ShearX と ShearY により完成させ，ひねりや回転には本節の(2)に示される Twist により完成させ，ジャンプには本節の(4)に示される ScaleZ により完成させる¹．また，発進する時に足を長くしたり，興奮するときに頭が大きくなったりするなどのような人間ではなく animated figure が特有である局所の拡大性の表現には，本節の(1)に示される Splay による反映させる．

さらに，本手法では，ある瞬間のバネモデルの頂点の位置により，その瞬間の対象物体の形状をレンダリングする．また，3.2.4 に述べる基本動作の開始時間と持続時間によって，バネモデルの減衰状態が決まる．したがって，前の動作の持続時間が終わるまで，完全に減衰するわけではないので，次のスタートする基本動作との複合運動をさせる．

(1) Shear

バネモデルの上部が傾き同時にモデル自身の傾きを促すという動作であり，この動作には傾く方向が X 軸方向

¹ここでは，簡略化のために，人物の重量と弾性係数が一定であると設定したため，そのジャンプによる自由落下運動も同時に完成させる．ただし，3.2.4 に述べる基本動作の引数によってジャンプの高さが違う．

と Y 軸方向の 2 種がある．

(2) Twist

バネモデルの上部を Z 軸（仮想空間内の鉛直方向）中心にひねり，その反動による回転を促す動作である．

(3) Splay

バネモデルの上部が拡大・縮小する動作である．

(4) Scale

バネモデルが押しつぶされたようになり，その反動によるモデルの移動を促す動作であり，この動作には X, Y 軸の平行移動，Z 軸の跳躍の 3 種がある．

したがって，Shear は 2 軸を，Scale は 3 軸を考える必要があるため，実質的には動作の選択肢は 7 種となる．この基本動作の組合せにより，物体の複雑な動きを表現する．さらに，アニメーションに重力要素も加えれば，自然な動きの表現ができる．

3.2.4 動作コントローラによる物体の連続的な動きの構成

本研究では，音楽にあったダンスアニメーションは動作コントローラ (Motion Controller: MC) の時系列からなる (Fig. 5)．MC は一つの動作パターンと考えられ，一連の最小動作単位 (Cell) からなる．一つの Cell を与える際には，四つのパラメータを付与する．その四つのパラメータの各時刻の値によって，バネモデルの頂点位置の計算を行い，モデルにあてはまる対象の瞬間のフレームをレンダリングさせる．ここでは，各基本動作において，モデルの各頂点に与える力の相対的方向²を定数とし，また，初期設定があるバネモデルの初期位置また，モデルの各頂点のを結びつけるバネの弾性係数などのパラメータについては，実験とした現時点では，すべて定数としている．ただし，実用段階では，CAD のようなエディタ環境を与えることによる，初期パラメータの設定も可能である．

Fig. 5 Structure of motion controller sequence

1) 基本動作の種類：先に述べた 7 種の基本動作のどれを選択するかを示す．0 から 6 までの数値が動作種類番号を表示する．

2) 基本動作の引数：-1.0 から 1.0 までの数字を与え

²頂点の瞬間座標が時刻によって違うので，力の方向はその瞬間の頂点の法線による確定する．

Table 1 Data example in pattern database

Beat (Numerator)	Climax of Motion Patten	Motion Controller (FM:Fundamental Motion; DIR:Direction)								
		<i>Cell</i> ₁		<i>Cell</i> ₂		<i>Cell</i> ₃		<i>Cell</i> ₄	...	<i>Cell</i> ₁₀
		FM	DIR	FM	DIR	FM	DIR			
3	S:0.00 <= <i>MCR</i> < 0.33	ScaleX	+	ScaleX	+	ScaleX	+	NULL	...	NULL
3	S:0.00 <= <i>MCR</i> < 0.33	ScaleX	+	ScaleX	+	ScaleX	-	NULL	...	NULL
3	S:0.00 <= <i>MCR</i> < 0.33	ScaleX	+	ScaleX	+	ScaleY	+	NULL	...	NULL
3	S:0.00 <= <i>MCR</i> < 0.33	ScaleY	+	ScaleY	+	ScaleY	+	NULL	...	NULL
3	S:0.00 <= <i>MCR</i> < 0.33	ScaleY	+	ScaleY	+	ScaleY	-	NULL	...	NULL
3	S:0.00 <= <i>MCR</i> < 0.33	ScaleY	+	ScaleY	+	ScaleX	+	NULL	...	NULL
3	M:0.33 <= <i>MCR</i> < 0.67	ScaleX	+	ScaleX	+	ShearX	+	NULL	...	NULL
3	M:0.33 <= <i>MCR</i> < 0.67	ScaleY	+	ScaleY	+	ShearY	+	NULL	...	NULL
3	M:0.33 <= <i>MCR</i> < 0.67	ScaleX	+	ScaleX	+	Twist	Rt(-)	NULL	...	NULL
3	M:0.33 <= <i>MCR</i> < 0.67	ScaleY	+	ScaleY	+	Twist	Rt(-)	NULL	...	NULL
3	L:0.67 <= <i>MCR</i> <= 1.00	ScaleX	+	ScaleX	+	ScaleZ	Up(+)	NULL	...	NULL
3	L:0.67 <= <i>MCR</i> <= 1.00	ScaleY	+	ScaleY	+	ScaleZ	Up(+)	NULL	...	NULL

を満足する動作コントローラが選ばれる．Table 1 に 3 拍子の音楽に対応するパターンデータベースの一部を示す．一つのパターンの中に含まれる動作 Cell の数は小節内の拍の数で決められるので，動作コントローラは有限個の基本動作 Cell からなる¹．Table 1 では， MCR を三段階にわけている． MCR と Table 1 によって，具体的に対応する動作コントローラは以下のように決定される．

a.) $0.00 \leq MCR < 0.33$: 音楽が比較のおちついた静かな状態であることを示す．したがって，動作の速さは弱く，動きは平行移動を中心とする．表の 1 行目から 6 行目までの動作コントローラ中から一つランダムに選ばれる．

b.) $0.33 \leq MCR < 0.67$: 音楽はやや盛り上がりつつある．これに対応して，動作の速さは普通となり，動きにも傾きとひねりが付与される．表の 7 行目から 10 行目までに相当する．

c.) $0.67 \leq MCR \leq 1.00$: 音楽はクライマックスにさしかかり，非常に盛り上がっている．これに応じて，動作の速さは速く，動きにはジャンプが付与される．表の 11 行目と 12 行目の動作コントローラからどちらか一つが選ばれる．

以上のように選択された動作コントローラで，一連の基本動作 Cell の動作種類が決められる．

3.3.3 動作の強さの決定方法

前節で述べたように，小節の盛り上がりによって動作パターンが決まる．小節エネルギーは拍エネルギーの累積値であるので，小節の盛り上がり度が大ければその中の各拍における盛り上がり度も平均的に大きい．しか

し，同一小節内にも平均すれば見分けがつかなくなるような微妙な変化がある場合が少なくない．拍による差を動作に反映させることによって微妙な動きの差を拍ごとに出すことができるようになる．3.1.2 で述べたように，拍エネルギーは基本動作 Cell の盛り上がり度に対応するので，それを基本動作 Cell のパラメータ決定に反映することで，基本動作の動きを微調整する．

基本動作の盛り上がり度を *MontionFactor* (MF と略記する) とし，(5) 式で定義する．ここで， $E_b(b)$ は b 拍のエネルギー， $\min(E_b)$ は拍エネルギーの最小値， $\max(E_b)$ は拍エネルギーの最大値である．

$$MF(b) = \frac{E_b(b) - \min(E_b)}{\max(E_b) - \min(E_b)} \quad (5)$$

(5) 式で計算される MF の値は常に正である．一方，3.3.2 で選ばれた動作パターン of the MC では，その MC 中の各動作 Cell の運動方向が正であるか負であるかだけが決められており，その量は MF に比例して与えられる．すなわち， MF が大きければ長く，あるいは強くその動きを行うことになる．

なお，X 軸（または Y 軸）に沿って同じ方向に動きすぎ視野から消えてしまわないように，視野外に出た場合は自動的に 180 度方向転換する．

3.3.4 音楽と動作の同期

本方法では，各動作がリズムに合うよう一拍が一つの Cell に対応付けられ，各 Cell の開始時刻は各拍の開始時刻位置から算定される．

一方，拍に対応する動作 Cell の持続時間は，(6) 式で示すように，動作タイプ *MotionType* (MT と略記する) と動作引数 MF からバネのダンピング時間

¹一般には，拍子は 10 を超える可能性が少ないので，一つの動作コントローラに含む基本動作数は最高 10 個とする．

$Damp(MT, MF)$ ¹で計算される. ここで, CBL は当該拍の長さ, $Endurance$ は持続時間である.

$$Endurance = \min(Damp(MT, MF), CBL) \quad (6)$$

特別な例として, たとえば拍エネルギー E_b が 0 の場合は (5) 式で MF が 0 になるので (6) 式から持続時間も 0 となり, 急ストップの効果が得られる.

以上より, 各基本動作 Cell のパラメータがすべて与えられ, 3D バネモデルの (3) 式で示されるバネの減衰原理に基づいて時間ごとのオブジェクトの頂点位置を計算し, 全体のアニメーションの動作が出力される.

4. 評価実験

4.1 プロトタイプシステムの製作

今回のプロトタイプシステムの構築は WindowsNT 上で Visual C++ を用いて行われた. プロトタイプシステムは生成部と再生部に分けられる.

生成部では, MIDI 音楽ファイルが入力された後, 前節で述べたアルゴリズムにしたがって, 音楽の分析と特徴抽出が行われ, 最終的に, 音楽に合った動作コンローラ時系列の自動生成が行われる.

再生部では, 音楽と生成されたアニメーションを組合せて同期して再生することが行われる. MIDI 音楽は MCI(Media Control Interface) を用いて再生され, 動画は OpenGL を用いて描かれる. 動作は 3D バネモデルの中に Fig. 7 に示すようなチェスのキングをあてはめて表示した. 具体的な動作の例を Fig. 8 と Fig. 9 に示す. Fig. 8 はひねりが入ったワルツのステップの例であり, Fig. 9 はジャンプが入ったワルツのステップの例である.

Fig. 7 Simulation sample(A dancing king)

4.2 評価結果

自動生成された動作と音楽とが適切に対応しているかどうか評価実験を行った. 具体的には, ワルツ 2 曲, タンゴ 2 曲, ジャズ 1 曲, ディスコ 1 曲, クラシック 1 曲計 7 曲について, 各曲の 30 小節ぐらいを入力音楽とし

¹ここで, バネの 2 次減衰時間とする.

Fig. 8 An example of twist pattern for waltz

Fig. 9 Another example of jump pattern for waltz

て, 動作生成アルゴリズムにより動作を生成した. 生成した動作は入力音楽を同時にアニメーションとして呈示し, 生成した動作と入力音楽の適合性を被験者 5 名に評価してもらった.

評価の手法としては, 以下の三つの採点基準に対してそれぞれ 5 段階の評価をしてもらった.

- 1) 生成された動作が音楽のリズムに合う度合い. ここで, 点数は 5 (合っている), 4 (ほぼ合っている), 3 (合わない場合が多い), 2 (合っていない), 1 (まったく合っていない) から選ばせる. ここで, 3.1 の冒頭部分に述べたように, 音楽と踊りの構造的な調和について感性評価を行う.
- 2) 生成された動作パターンが音楽の盛り上がり合う度合い. ここで, 点数は 5 (合っている), 4 (ほぼ合っている), 3 (合わない場合が多い), 2 (合っていない), 1 (まったく合っていない) から選ばせる. ここで, 3.1 の冒頭部分に述べたように, 音楽と踊りの意味的な調和について評価する. なお, 特に「強い」のように軽重感にたいして感性評価を行う.
- 3) 全体としてみたアートの感覚. ここで, 点数は, 5 (たいへん良い), 4 (良い), 3 (普通), 2 (悪い), 1 (たいへん悪い) から選ばせる. ここで, 音楽と踊りの意味的な調和について評価するが, 特に全体のムードについて感性評価を行う.

さらに, 個別に長所と短所について自由形式でコメントをもらった. Table 2, Table 3, Table 4 に評価結果を示す.

4.3 評価結果の分析

生成した動作と音楽リズムの適合性の評価については, Table 2 に示すように, 全体としては, 比較的高い評価が得られているが (平均で 3.5), ジャンル別にみると, タンゴ, ワルツが比較的高い評価のに対し, ジャズは低くなっている. この理由としては, 「タンゴ, ワルツは踊りのイメージがすぐわく」のに対し, 「ジャズに合わせて踊る」ことは実際に少ないため, ジャズのリズム

Table 2 An evaluation of five degrees of the fitness between synthesized motions and music rhythm

Input SMF	Testee A	Testee B	Testee C	Testee D	Testee E	Average
<i>Waltz₁</i>	5	3	4	3	4	3.8
<i>Waltz₂</i>	4	3	4	3	4	3.6
<i>Tango₁</i>	4	4	4	4	3	3.8
<i>Tango₂</i>	5	4	4	4	3	4.0
<i>Jazz</i>	3	2	3	2	2	2.4
<i>Disco</i>	4	3	4	3	3	3.4
<i>Classic</i>	5	4	5	2	3	3.8
Total Average						3.5

Table 3 An evaluation of five degrees of the fitness between synthesized motion pattern and music climax

Input SMF	Testee A	Testee B	Testee C	Testee D	Testee E	Average
<i>Waltz₁</i>	4	2	3	4	3	3.2
<i>Waltz₂</i>	4	2	4	3	4	3.4
<i>Tango₁</i>	3	3	3	2	3	2.8
<i>Tango₂</i>	4	3	4	2	2	3.0
<i>Jazz</i>	3	3	3	4	2	3.0
<i>Disco</i>	4	2	4	4	3	3.4
<i>Classic</i>	4	3	4	3	4	3.6
Total Average						3.2

Table 4 An evaluation of five degrees of the artistry impression on whole animation

Input SMF	Testee A	Testee B	Testee C	Testee D	Testee E	Average
<i>Waltz₁</i>	2	2	3	4	4	3.0
<i>Waltz₂</i>	2	2	4	3	4	3.0
<i>Tango₁</i>	2	3	3	4	3	3.0
<i>Tango₂</i>	2	3	4	3	2	2.8
<i>Jazz</i>	3	2	3	2	2	2.4
<i>Disco</i>	3	3	4	3	3	3.2
<i>Classic</i>	2	3	4	4	3	3.2
Total Average						2.9

と動きとのマッチングそのもののイメージが得にくい点があったようである（被験者 B,D の意見）。

一方、生成した動作パターンと音楽盛り上がりの適合性の評価については、Table 3 に示すように、全体としてはリズムとの適合性より少し低い値となっている（平均で 3.2）。ジャンルでは、ワルツ、ディスコとクラシックが比較的评价が高いのに対し、タンゴは低くなっている。これは、タンゴにおいては、音楽的盛り上がり頻繁に起こっているが、それに対応した「切れの良い」動作が必ずしも完全に再現されていない点が原因となっているようである（被験者 D,E の指摘）。

全体としてのアートの感覚の評価については、Table 4 に示すように、平均で 2.9 と、三つの評価基準の中では一番低い評価点となっている。特に芸術性という観点か

らは、「リズム」と「盛り上がり」のようなプリミティブな要素だけでなく、音楽の感情的な解釈やそれに応じた細かい動きが必要であると考えられるが、この点については、まだまだ不十分であることも確認できた。

また、自由形式のコメントとしては、以下のようなものが得られた。

- 「ワルツとクラシックに合わせる動きがイメージに合っていて良かったと思う」（被験者 A,B,C,D）
- 「ディスコの印象が一番よかった。動きにバリエーションが多い。音が止まっている時動きが止まったり、音が大きいところで大きな動きに与えたりして、盛り上がりにあっていると思う」（被験者 A,E）
- 「すべるような動きがワルツっぽいと思う」（被験者 D）

- 「クラシックの音楽に合わせる動きは流れるような音楽のイメージにあっていると思った」(被験者E)
- 「タンゴ1では、動きが全体として小さい」(被験者E)
- 「全体的には、ダンスなので、オブジェクトが人間のほうがわかりやすい(評価しやすい)と思う」(被験者C)
- 「クラシックでは、曲全体を画面全体に割り振っている、頭部分はおとなしすぎる、退屈してしまう」(被験者D)

以上の評価結果とコメントに基づいて総合評価および今後の課題をまとめると、以下のようになる。

- 1) 全体としては、「リズム感」「盛り上がり度」に関しては、ほぼ対応した動きが生成できている。
- 2) 一方、芸術性に関しては、音楽の感情的解釈やそれに応じた細かい動作が欠けており、不十分である。
- 3) 今後の課題としては、
  - ①リズム感、盛り上がり度以外のファクターの考慮、
  - ②オブジェクトの細かい動きの表現等が上げられる。

5. おわりに

本稿では、音楽に応じたアニメーションを生成するアルゴリズムを提案し、プロトタイプシステムを用いて動作を検証すると共に、生成された動作の質に関する評価実験を行った。評価実験については、ワルツ、タンゴをはじめとする7曲について被験者5名の実験を行い、「リズム感と盛り上がり度に関しては音楽に応じた動作が生成できている」ことが確認できたが、芸術性に関しては、まだ不十分であることも分かった。

今後はこの芸術性を高める点に焦点をあてて、さらに研究を進めていく予定である。また、複数のオブジェクトの協調的な動作の生成についても今後試みてみたいと考えている。

謝 辞

本研究は一部、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「インタラクションによる相乗効果を用いた感性創発世界の構築」(プロジェクト番号: JSPS-RFTF99P01404)による支援を受けている。

参考文献

- [1] M. Goto and Y. Muraoka: Real-time rhythm tracking for drumless audio signals — Chord change detection for musical decisions —; *Working Notes of the IJCAI-97 Workshop on Computational Auditory Scene Analysis*, pp. 135–144 (1997)
- [2] M. Goto and Y. Muraoka: An audio-based real-time beat tracking system and its applications; *Proceedings of the 1998 International Computer Music Conference*, pp. 17–20 (1998)
- [3] 後藤: 拍節認識 (ビートトラッキング); bit 別冊 コンピュータと音楽の世界 — 基礎からフロンティアまで —, pp. 100–116, 共立出版 (1998)
- [4] M. Goto and Y. Muraoka: Real-time beat tracking for drumless audio signals: Chord change detection for musical decisions; *Speech Communication*, Vol. 27, Nos. 3–4, pp. 311–335 (1999)
- [5] 村田, 山内, 土井: 音楽を用いた対話的3次元CGアニメーション—ミュージックドリブンCGの試作—; 情報処理学会ヒューマンインタフェース研究会, No. 74, pp. 1–6 (1997)
- [6] J. T. Ngo and J. Marks: Physically realistic motion synthesis in animation; *Evolutionary Computation*, Vol. 1, No. 3, pp. 235–268 (1993)
- [7] 中島: MIDIバイブルI, リットーミュージック出版 (1997)
- [8] 大浜: MIDI検定3級公式ガイドブック, 音楽電子事業協会 (AMEI) 発行 (1998)
- [9] J. Kawabata, N. Saiwaki and S. Nishida: Cooperative performance system based on agents; *Proceedings of 6th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (ROMAN'97)*, pp. 454–459 (1997)
- [10] 才脇, 川端, 西田: 心理的ポテンシャルを用いた感性協調型合奏システム; ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 2, No. 1, pp. 47–57 (2000)
- [11] M. Carignan, Y. Yang, N. Thalmann and D. Thalmann: Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes; *Proceedings of SIGGRAPH'92 on Computer Graphics*, Vol. 26, No. 2, pp. 99–104 (1992)
- [12] A. Fukunaga, J. Marks and J. T. Ngo: Automatic control of physically realistic animated figures using evolutionary programming; *Proceedings of the Third Annual Conference on Evolutionary Programming (EP94)*, pp. 76–83 (1994)
- [13] 王, 才脇, 西田: 3Dバネモデルに基づく音楽に応じた動作生成の一手法; 第43回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 463–464 (1999)
- [14] J. Christensen, J. Marks and J. T. Ngo: Automatic motion synthesis for 3D mass-spring models; *The Visual Computer*, Vol. 13, Issue 1, pp. 20–28 (1997)
- [15] V. J. Bolivar, A. J. Cohen and J. C. Fentress: Semantic and formal congruency in music and motion pictures — Effects on the interpretation of visual action; *Psychomusicology*, Vol. 13, pp. 28–59 (1994)
- [16] S. D. Lipscomb and R. A. Kendall: Perceptual judgement of the relationship between musical and visual components in film; *Psychomusicology*, Vol. 13, pp. 60–98 (1994)
- [17] 谷口: 音は心の中で音楽になる—音楽心理学への招待, 北大路書房, ISBN4-7628-2173-X (2000)
- [18] 岩宮: オーディオ・ビジュアル・メディアを通しての情報伝達における資格と聴覚の相互作用に及ぼす音と映像

の調和の影響；日本音響学会誌，Vol. 48，pp. 649-657
(1992)

[19] 大串：音楽の認識心理学，誠信書房，ISBN4-414-30283-
8 (1998)

[20] 井口：感性情報処理，オーム社 (1994)