

「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」

平成22年度採択研究代表者

H23 年度
実績報告

安生 健一

株式会社オー・エル・エム・デジタル ビジュアルエフェクト/R&D スーパーバイザー

デジタル映像数学の構築と表現技術の革新

§1. 研究実施体制

(1)「映像数学」グループ

① 研究代表者： 安生 健一（株式会社オー・エル・エム・デジタル 取締役 研究開発部門
ビジュアルエフェクト/R&D スーパーバイザー）

② 研究項目

人間の表情アニメーションに関する数理モデルの構築. 具体的には、次の課題を解決するための方式を検討する:

- ・ 実際の人間の表情をキャプチャーする際に、重要となる点を定める方法の検討.
- ・ 表情のデータベースが与えられたときに、それを有効活用して新しい表情アニメーションを効率よく作る方法の構築.
- ・ 人間の動きをアニメーションとして作成するための基本 CG ツールの開発.

(2)「数学モデル」グループ

① 主たる共同研究者： 落合 啓之（九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 教授）

② 研究項目

デジタル映像技術 (CG) の制作現場での演出に基づく映像作りや経験の蓄積を、モデル化・理論化する. 併せて、モデル化された数学的構造の構造解析による体系化を行う. 具体的には、映像数学グループと CG グループが今年度提起する課題をもとに、

- ・ デジタル映像表現に適した記述様式の研究
 - ・ CG アニメーションのための離散モデルの研究
- を行う.

(3)「CG」グループ

① 主たる共同研究者：土橋 宜典（北海道大学大学院情報科学研究科 准教授）

② 研究項目

- ・ 大規模データベース構築への対応
- ・ 流体シミュレーションを利用した演出表現手法の検討・開発

§ 2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

研究項目は各グループについて前記の通りであるが、以下では CG の具体的な課題に応じて次のように研究内容を分類し、それぞれ報告する:

- I. 人間やキャラクタの表情アニメーションについて
- II. 流体表現について
- III. レンダリング(表示手法)について
- IV. CG アニメーションの基礎: 変形・補間手法やデータベースの数学的構造について

I. 人間やキャラクタの表情アニメーションについて

平成 23 年度は、表情アニメーション作成の標準的な手法の 1 つであるブレンドシェープ (blendshape) についての基礎的な検討と、「使える」技術の開発と評価を目指した。

3次元 CG で作られる顔のモデルには色々な表現形式があるが、多くは微小多角形の集合体として顔のモデルとする。本稿では、その多角形の頂点座標をすべて並べて 1 つの(長い)列ベクトルとしたものを、顔ベクトルと呼ぶことにする。キャラクタの顔ベクトルが、無表情な顔を表すとき、これをニュートラルな顔という。同様に、喜怒哀楽等の表情をあらわす「瞬間」の顔はアニメータにより作られるが、これらはターゲット顔と呼ばれる。ブレンドシェープとは、これら顔ベクトルの線形和で一般の顔を表し、その係数を補間してアニメーションを作る方式のことである。ブレンドシェープ方式では係数をスライダーバーで制御して所望の表情を作るのであるが、その際に必要となる係数の数は、ターゲット顔であれば少なくとも 50 から 100、ハリウッドでは 2000 以上になる場合もあり、従来は非常に骨の折れる仕事であった。安生等は、2010 年の夏期にこれを解決する手法を発表した(IEEE CG&A Vol.30 No.4)。この手法は、顔モデルへの直接操作(具体的にはピン&ドラッグ操作)から係数パラメータ値を推定する、というある種の逆問題を解き、パラメータのスライダーでのチューニングの負荷を大幅に減らすことに貢献した。以下この手法を DMB (Direct Manipulation Blendshapes) と引用する。

今年度の主な成果として、次の 2 点がある。第 1 は、DMB と連動するアルゴリズムを考案し、従来からブレンドシェープ法の欠点の 1 つとして指摘されていた顔の破綻の問題を、対話的に解決する手法を提案したことである (図 1)。

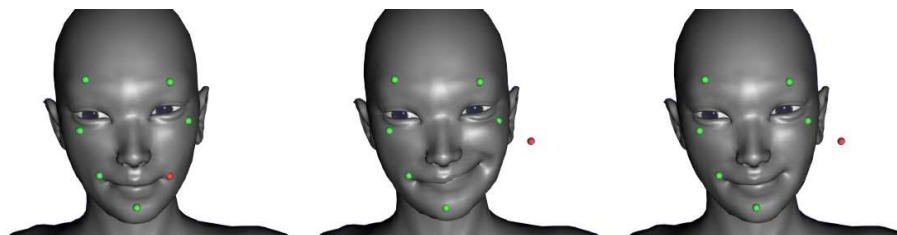


図 1. ラプラシアンを用いた顔編集:

3D 顔モデル(左図)をピン(図中の赤)で引っ張りすぎると顔が破綻する(図中央)が、ラプラシアン平滑化により穏やかな変形(右図)へと調整できる

第2に、DMB の拡張として、表情のキャプチャーデータあるいは既存データをトレーニングデータとして学習し、より効率よく表示用アニメーションを作成できる方式を開発した(図 2)⁵⁾。この拡張版の DMB に関する数学的背景¹⁾として、再生核ヒルベルト空間にもとづく定式化とその応用⁴⁾も、数学モデルグループのサポートのもとで進めてきた。今後も論文の執筆を進めていく。

以上に加え、人間の CG アニメーションを作成するための基本ツールの開発も進めた。これは上記の DMB の方法以外に、リップシンク技術や、表面の筋肉変形方式(映像数学グループの JP Lewis による Pose Space Deformation (SIGGRAPH2000 にて発表の業界標準技術)などをシームレスにつなぐ多機能システムである。今年度は顔の表現に関する部分を中心に開発したが、さらに全身表現も可能となるよう、次年度には機能の拡充と実証実験を進める。

図 2. 学習データを活用した効率的アニメーション生成:
既存のアニメーションデータから顔の動きの特徴(例えば左右の目の同期する動きなど)を抽出し、笑顔(図中央)や驚いた顔(右)などのデザインとそれらの連続的なアニメーションが効率よく作成できる。



II. 流体表現について

平成 23 年度は、主に以下の2つの項目について研究を行った。

- [1] 大規模データベース構築への対応
- [2] 流体シミュレーションを利用した演出表現手法の検討・開発

項目[1] は計画時に予定していた課題であり、並列計算による流体シミュレーションの高速化とデータ圧縮について研究・開発を行った。一方、研究計画時に予定していたデータベースのインタラクティブなブラウジングに関しては、開発を一時中断しているため、本稿で報告事項としては挙げていない。その理由は以下のとおりである。本プロジェクトの大目標の 1 つは流体映像生成における演出的アニメーション作成のための数学モデルの導入である。データベースのブラウジングはデータベースを可視化することで上述の大目標を達成するための一助となることを想定していた。しかし、これまでの研究過程から、本格的なブラウジングツールの開発を待たずして、流体の演出表現の実現可能性がわかってきた。そこで、ブラウザの開発は中断し、流体映像の演出表現に関する研究に注力している。上記の項目[2] はこのことに対応している。ブラウザの開発は、その重要性が低下しているものではないが、現在、数学チームと共同で行っている流体的挙動の特徴解析の結果を待って開発の再開の要/不要を判断する。

[1]大規模データベース構築への対応

大規模なデータベースを構築するためには、計算の高速化とデータの圧縮が必要不可欠である。計算の高速化に関しては、GPUによる並列計算を採用した。近年のGPUは数百個もの演算コアを内蔵しているため、相当な高速化が達成できた。我々の開発したシミュレータは、CPUによって計算した場合と比較して、100倍～200倍の高速化を実現している。

次に、データ圧縮に関しては、差分符号化、予測符号化、変換符号化、主成分分析(PCA)による符号化について検討を行った。これらのうち、前者の3つ(差分符号化、予測符号化、変換符号化)は、音声や動画画像などにも広く採用されている。流体シミュレーション結果についても高い圧縮率が得られたが、これらの手法は、解凍処理に時間を要する点と粒子ベースのシミュレーション結果には適用が難しい点が問題となる。そこで、これらの問題点を解決できるPCAによる符号化を採用した。具体的には、シミュレーションにより生成した m 個の速度場に対して、主成分分析を行い、 n 個の固有速度場を生成する(n はユーザにより指定する)。この n 個の固有速度場の線形和として、 m 個の速度場を近似することでデータを圧縮する。 n を変更して実験を行ったところ、映像表現に十分な精度を保った上で、データサイズを1/5程度まで削減できることがわかった。また、圧縮後データからの復元は n 個の固有速度場の線形和を計算するのみであり、かつ、GPUを利用した並列計算が利用できるため、高速に処理することが可能である。

流体シミュレーションの高速化と計算結果のデータ圧縮は、以下に述べる流体の演出表現手法の開発に大きく寄与している。なぜなら、以下の手法は、各種流体现象のシミュレーションを行ってその挙動を解析することで手法の設計を行っているからである。流体シミュレーションの高速化とその結果のデータ圧縮により、データの採取と挙動の解析が迅速かつ効率的に行えるようになった。

[2] 流体シミュレーションを利用した演出表現手法の開発

流体の方程式は、雲、水、炎など、さまざまな自然現象を記述するが、爆発もその1つである。爆発の演出的制御に関する研究は、昨年度から進めてきたが、今年度はそれを論文の形で公表した。図3にその適用例を示す。所望の爆発形状を作り出すための、最適な初期強度分布と、Navier-Stokes 方程式を解く際に、形状変化の予測制御を組み合わせる手法²⁾である。

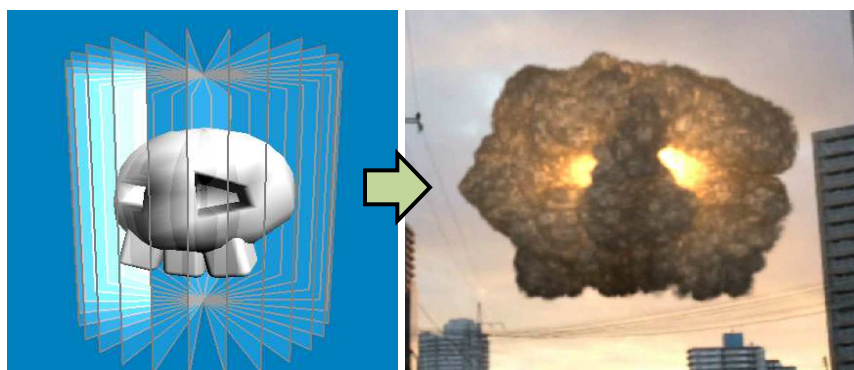


図3. 爆発シミュレーションの制御：
与えられた爆発形状データ(左)をもとに、この形になるべく近い形の爆発形状(右)を生成する。



図 4. データベースを用いた波のアニメーション編集:
波頭を赤い曲線で指示したとき、これに沿うような波の動きを、シミュレーションデータベースにもとづいて生成することができる。

次に、データベースを利用して流体の演出表現を行う手法として、①所望の動きの流体アニメーションの生成(図4) および ②流体シミュレーションの高解像度化に関する研究を行った。以下、それぞれについて説明する。

① 所望の動きの流体アニメーションの生成

基本的な考え方は、以下のとおりである。まず前処理として、パラメータをさまざまに設定して流体解析を行い、その結果をデータベースとして保存しておく。データベースには、シミュレーションによって得られる温度や速度分布と併せて、使用したシミュレーションパラメータや流体の形状や動きの複雑さなどを表す特徴量も計算して記憶する。速度分布や温度分布については、主成分分析を行ってデータを圧縮して記憶する。次に、データベースを利用して所望の映像を生成する。ユーザは所望の流体の形状や複雑さなどの特徴量を指定する。そして、指定された特徴量からデータベースを検索して映像を生成する。この考え方を炎の映像生成や波の映像生成に応用した手法を開発した。

② 流体シミュレーションの高解像度化

提案手法の考え方は以下のとおりである。まず、上述の手法と同様に、パラメータをさまざまに設定し、高解像度の流体シミュレーションを行うことで、複数の速度場を作成し、主成分分析を用いて基本速度場(固有速度場)を算出し、これをデータベースとして保存しておく。次に、データベース作成時よりも低解像度なシミュレーションを行う。低解像度のシミュレーションは非常に高速に行うことができるため、ユーザによる意図を反映するようパラメータを調整することが容易に行える。しかし、低解像度のシミュレーションでは、リアルな映像を作成することはできない。そこで、前もって計算したデータベースを利用して高解像度化を行う。具体的には、前もって計算した高解像度の速度場の線形和によって低解像度の速度場を近似して、置き換える。これは、最小二

乗問題として定式化できる. これによって、高解像度のシミュレーションを行うことなく、低解像度のシミュレーションから高解像度の映像を生成することが可能となる.

ここでは上述の方法を炎、煙、雲の映像生成に応用し、妥当性を確認した.

III. レンダリングについて

流体表現やキャラクタ表現においては、最終的にそれを CG 映像として表示すること、すなわちレンダリングする過程にも配慮しながら制作全体の流れを把握した上で効率化や演出技術の開発を行うことが必要である. 例えば、映像数学グループでは H25 年度以降には、レンダリング処理に関わる演出的制御手法の導入も予定している.

今年度は、これらの前段階として、流体とキャラクタのレンダリング技術についても考察した. 以下にその成果を報告する.

[1] Radial Basis Function (RBF) を用いた雲の陰影編集手法:

数学モデルグループの動径基底関数 (RBF) に関する知見をもとに、流体シミュレーションにより生成した雲の陰影を編集する手法³⁾の開発を行った. 雲は、雲の粒子(水滴)の3次元的な密度分布として表現される. そして、視点位置や太陽位置に応じて、物理則に従って雲の輝度計算を行い、画像を生成する. しかし、その結果は雲粒子の光学特性など、多くのパラメータに依存して変化するため、所望の結果を得るためには調整作業が必要となる. 特に、雲の表現に相応しい柔らかい陰影の表現をするためには、多重散乱成分が重要と言われているが、その計算はコストが高いこともあり、調整作業は困難を極める. そこで、多重散乱成分を擬似的に表現する環境光成分をユーザが編集できる手法を開発した. 一般には、環境光成分は雲全体で一定値であるが、本手法では、空間的に変化する分布として拡張し、ユーザにより部分的に指定された環境光成分を RBF により補間する. 具体的には、環境光成分を雲内部の位置とその点に届く直射光成分の強度の関数と仮定し、ユーザにより指定された輝度から RBF を用い

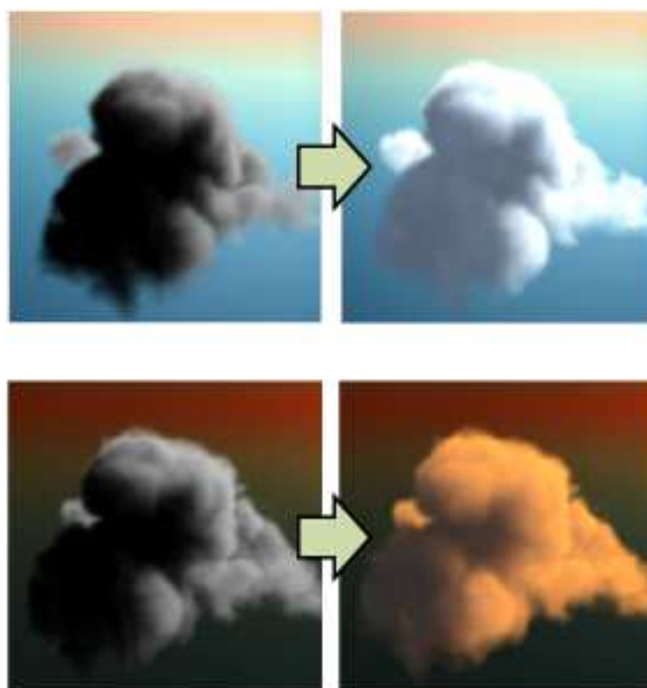


図5. 雲のボリュームレンダリングの演出的制御:
図の上段では、ユーザが入力画像(左)の明るい部分を白く塗ると、それをもとに全体の色がリアリティを保ちつつ変化する(右).背景色は変わっていない. 下段では、明るい部分の色を同様に指定して、夕方の色調を再現した.

て全体の環境光成分を補間する。RBF の基底関数としては、ガウス型の関数を用いた。これにより、多重散乱を計算することなく、ユーザの意図を反映したリアルな雲の柔らかい陰影を実現した。

[2] 非写実的レンダリングのためのライトベースマッピング:

実写映像に登場する CG キャラクタは、シームレスに画面に馴染ませて登場させる必要があり、これを実現するにはレンダリング技術が重要である。非写実的レンダリング (Non-Photorealistic Rendering, NPR) とは、これとは逆に、手描きアニメに CG キャラクタを馴染ませる手法である。例えばトゥーンシェーダーと呼ばれる手法は、3DCG モデルの陰影をアニメ風に抽象化して表現するのに用いられる。トゥーンシェーディングでは、表示曲面の各点での法線情報をもとに、拡散光やハイライトの計算をする。CG に登場する曲面は、多様体としての局所座標系が定義されてはいるが、一般にパッチ同士のオーバーラップはなく、陰影計算で不連続を生じる場合がある。これを解決する試みとして、曲面上の各点において、光源方向ベクトルの方向を一つの軸とし、これに直交する2軸とで3次元ベクトル空間の局所座標系を定義したベクトル束を用いて陰影計算する方式を考案した。これにより、光源方向から見える任意の点における陰影計算は破綻なく進められる。現在はさらにその応用を検討している。

IV. CG アニメーションの基礎: 変形・補間手法やデータベースの数学的構造について

アニメーション作りで最もスタンダードなキーフレーム法においては、キーとなるフレームでの画像や 3D データ(例えばキャラクタのポーズ)が作成された後、コンピュータでそのフレーム間を補間するという作業を行う。

数学モデルグループを中心として、剛体変形のように時間変化に沿った新しいキーフレーム法をいくつか提案し、これらの提案手法を比較するために数値的な評価基準の検証を行った。その一部は、Study Group Workshop 2011(2011年8月)とIMI 短期共同研究「新しいアニメーション補間手法とその評価指標の提案」(2012年3月)において議論を進めた。これらを通じて得られた数学的な知見を、来年度は論文として公表したいと考えている。

同じく数学モデルグループでは、CG グループから提起されたデータベースに関するいくつかの問題に対し、主成分分析(PCA)やグラフ・ラプラシアンを用いた手法により、従来よりも有効なクラスタリングや圧縮の可能性を探求し、その上でデータ空間の構造の特性を調べた。さらに現在、これらデータ間の計量やトポロジーに着目することにより、そこに統計多様体の構造に類似の普遍的な枠組みを与えるための考察を行っている。このようなアプローチに必要な対称性の観点を重視し、関連して正規分布のなす統計多様体等の群論構造の研究を推進した。またグラフ書き換え系の CG 構造物生成への応用可能性も検討している。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. Ken Anjyo and J. P. Lewis, "RBF interpolation and Gaussian process regression through an RKHS formulation", *Journal of Math-for-Industry JMI2011A-6* pp.63-71, 2011.4
2. 佐藤周平, 土橋宜典, 山本強, “最適な初期強度分布の推定および予測制御による爆発シミュレーションの制御”, *映像情報メディア学会論文誌*, pp.1446-1451, 2011.10, (DOI:10.3169/itej.65.1446).
3. 岩崎航, 土橋宜典, 山本強, “Radial Basis Function を用いた雲のボリュームレンダリングの編集システム”, *電子情報通信学会 D, Vol.J95-D No.2* pp.297-304, 2012.2
4. Y. Seol, J.P. Lewis, J. Seo, B. Choi, K. Anjyo, J. Noh, “Space Time Expression Cloning for Blendshape”, to appear in *ACM Transactions on Graphics* 2012.
5. K. Anjyo, H. Todo and J.P. Lewis, “A Practical Approach to Direct Manipulation Blendshapes”, to appear in *Journal of Graphics Tools* 2012.