

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24300032

研究課題名(和文) 流れ現象の高速CG映像生成技術に向けた多角的アプローチ

研究課題名(英文) Multilateral Approaches toward High Speed CG Animation Technologies for Flow Phenomena

研究代表者

千葉 則茂 (Chiba, Norishige)

岩手大学・工学部・教授

研究者番号：40171946

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,100,000円

研究成果の概要(和文)：水流、炎、煙、および布の揺らぎなどの流体現象の高速なアニメーション技術の開発を目的として、以下のような手法開発を行った。(1)短時間での水流シミュレーションをもとにエンドレスなアニメーションを生成するためのマルコフ型ベクトル場法；(2)フラクタルブラウン運動により構成された風速場による炎・煙などの流体現象のアニメーション法；(3)2次元の水流シミュレーションから3次元アニメーションを生成する方法および3次元水流シミュレーション計算を小規模化する方法；(4)揺らぎ運動する曲線群を用いた布や炎などの揺らぎ現象のアニメーション法

研究成果の概要(英文)：Aiming the development of efficient methods for animating various fluid phenomena as water flow, fire, smoke, and cloth flapping, we have developed the following techniques: (1)Markov-type Vector Field methods for generating endless animations based on short time simulation result; (2)Methods for animating fluid phenomena as fire and smoke using wind fields composed with fractional Brownian motion; (3)Methods for extending 2D water simulation results to 3D water flow animations and one for decreasing the computational time of 3D water flow simulation; (4)Methods for animating fluctuation phenomena as cloth flapping and fire using fluctuating curved lines.

研究分野：総合領域

キーワード：バーチャルリアリティ コンピュータグラフィックス コンピュータアニメーション 流体 fBm シミュレーション マルコフチェーン

## 1. 研究開始当初の背景

近年、建設計画のための景観シミュレーションシステム、フライトシミュレータ、および防災シミュレータなどのバーチャルリアリティシステムなどにおいて、自然景観を構成する地形、植物、季節、天候、流体などの表現のために、特に流体現象のリアルタイムアニメーション技術の開発が期待されている。これまで、申請者らの成果も含めて、自然現象、特に流体のアニメーション技術には、物理シミュレーション (Physically-based Simulation) をベースとした研究例が多くある。しかしながら、リアルタイム手法に関する研究は未だ不十分である。近年、申請者は、特に CG の観点から、ノイズ (fBm: fractional Brownian motion) による揺らぎ運動の生成法や、物理シミュレーションデータをノイズにより拡張する方法など高速なアニメーション法について研究を行い、樹木や草原の揺らぎ、および打ち寄せる砕波の表現などを可能にしてきた。

本研究では、これらの経験をもとに、以下の目的に掲げるような複数のアプローチについて、その有効性を示すために具体的な対象についてアニメーション法の開発を行った。

## 2. 研究の目的

本研究の長期構想は、水流、炎、煙、風などの流体現象について、計算流体力学による数値シミュレーションのみでは実行不可能な規模 (使用するコンピュータの性能に対して相対的に大きな現象) の CG アニメーションの生成に使える高速なアニメーション技術群を開発・整備することにある。その一環として、本研究期間においては、申請者らのこれまでの研究により発案された以下の複数のアプローチにより多角的な手法開発を行うことを目的とした。

(1)MTVF (Markov-Type Velocity/Vector Field): 短時間/小規模シミュレーションデータをもとに長時間/大規模アニメーションデータを生成するマルコフ型速度場によるハイブリッド型アプローチ

(2)fBm (fractional Brownian motion,  $1/f^\beta$  ノイズともいう): 現象の統計的性質/視覚的性質からアニメーションを生成するフラクタルブラウン運動によるスペクトル合成型アプローチ (本研究では、特に fBm により風速場を合成し、これにより揺らぎ運動を生成する間接的なアプローチ)

(3)HDEX (Hybrid-type Dimensional Extension): 揺らぎの導入により、低次元シミュレーションデータから高次元アニメーションデータを生成するハイブリッド型次元上げアプローチ

(4)SSDEX (Spectrum Synthesis-type Dimensional Extension): 揺らぎ運動する曲線群により面積/体積のある物体のアニメーションを生成するスペクトル合成型次元

上げアプローチ (本研究では、特に fBm により曲線群を生成し、これにより揺らぎ物体を直接的に表現するアプローチ)

## 3. 研究の方法

### (1)研究のベースとした技術概念

目的で示した4つのアプローチの基礎となる技術概念として、以下があげられる。

①粒子ベース計算流体力学 (MPS 法)

②マルコフチェーン

③ランダムノイズ (fBm)

### (2)研究体制

プログラム開発とコンピュータ実験のために、ポスドクや博士後期課程生を研究協力者として雇用して実施した。また、藤本忠博 (岩手大学准教授) を連携研究者として、ランダムノイズ等の基本的な技術概念に関する知見から議論を頂いた。

### (3)研究設備

本研究における効率性は、現在の標準的な PC 環境を想定して行うため、プログラム開発およびコンピュータ実験用の研究設備としては、PC を用いた。

## 4. 研究成果

それぞれのアプローチについて、また研究過程において新たに発案されたアイデアについて、以下のような成果が得られている。

(1)MTVF (Markov-Type Velocity/Vector Field) について

### ①水流表面に対応する MTVF 法

これまでの研究においては、初期計算として、流体シミュレーションによる速度場を、3D グリッド状に配置したマルコフタイプの遷移行列群 (具体的にはこれが MTVF) で記憶し、アニメーション生成段階では、MTVF に従って生成される速度場に対して、トレーサ粒子群により追跡し、計算量の少ないアニメーションを可能としていた。本研究では、さらに効率化を図るために、水流表面に対応する MTVF のみを生成している。本手法では、鉛直方向に連続したグリッドセル毎に表面粒子を定め、その流れの進行方向での近傍表面粒子間を接続するベクトルの変動についての MTVF を作成している。この点において、速度ベクトルの MTVF を作成するこれまでの手法とは異なる。図1 上段が MPS 法による水流シミュレーション、中段・下段が MTVF によるアニメーションからの抜粋である。

本手法については、CG に関する著名な国際会議である CGI2013 に採択され、また拡張版が学術誌 The Visual Computer に掲載された。

### ②複数 MTVF の合成手法

局所的な MTVF の組み合わせにより大域的な MTVF を作成したり、MTVF の部分的な変更により MTVF の構成を変更したりするための技術開発を目指し、次のような2つの操作について試行を行った。

・接続： ほぼ同じ MTVF をもつグリッド部分で流れを接続する (図2).

・重畳： 局所的な MTVF を他の MTVF へ重畳する (図3).

これらの操作による合成 MTVF を作成し、アニメーションにより自然な流れが実現できていることを確認した. なお, 接続部の互いの局所的 MTVF について, 流れベクトルの平均方向の類似性や MTVF の遷移確率の分布の類似性が合成可能性の指標となるが, 後者については, 例えばコルモゴロフ-スミルノフ検定が適用できるかについての検討が今後に期待される.

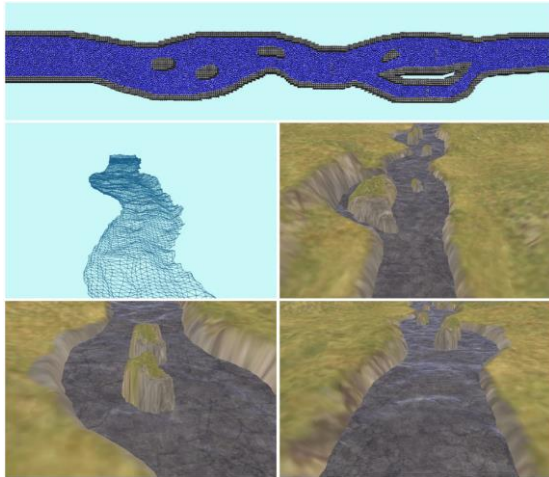


図1. 水流表面の MTVF による水流の表現例

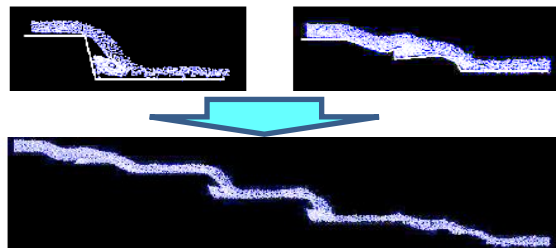


図2. MTVF の接続による流れ

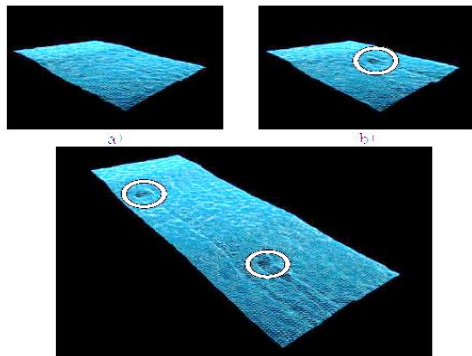


図3. MTVF の重畳による流れ

### ③MTVF での飛沫の表現

計算流体力学に基づく飛沫の表現法は開発されているが, ここでは MTVF によるアニメーション法で飛沫の表現を実現することを試みた. 飛沫が発生する流れの変化を, MTVF による遷移の変化の大きさとみなし, セ

クターの変化分 (セクターのなす角度) と遷移確率の小ささ (まれな変化) をパラメータとして, 生成アルゴリズムを組み込み, アニメーションの生成により, その有効性を確認した (図4).

なお, 厳密なシミュレーションによらずに, MTVF を人工的に構成できるかについての検討が今後に期待される.

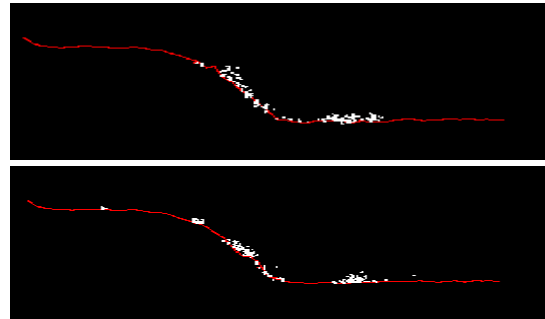


図4. 飛沫の表現 (白の点が飛沫を表す)

### (2)fBm (fractional Brownian motion) について

これまで, fBm のスペクトル密度の係数に Kolmogorov のスペクトルモデルのパラメータをアニメーションに利用しやすいように簡略化し, (n-1)個の n次元 fBm を生成することにより (n-1)次元空間の非凍結型の風速場を生成する方法を開発している. 本研究では, この風速場をベースに, 間接的に炎, 噴出炎, および竜巻を表現する手法を開発している.

#### ①fBm による風速場を利用した炎の表現技術

fBm による非凍結型風速場 (地面から上空に向かう流れ場) を生成し, その場に寿命が定められた粒子群をトレーサとして, 流れをトレースすることで炎の運動を表現する. 粒子群に対して, 視点側に向けたガウス分布型の  $\alpha$  値を持ったビルボードをそれぞれの粒子に割り当ててレンダリング ( $\alpha$ ブレンディング) することにより炎の画像生成を行う (図5). ビルボードは, 残り寿命に応じて, 大きさを小さく, 透明度を大きくする. 図5の左端は粒子を点で表示したもの, 左から2番目は風速場のベクトルに応じた線分で表示したもの, 3番目はビルボードを可視化したもの. 右端がガウス分布型の  $\alpha$  値を持ったテクスチャ付きビルボードでの画像生成を行ったものである.

#### ②①の炎に障害物とのインタラクション機能を導入する手法

障害物の周りに障害物を避けた流れのベクトル場を作るための流れ関数を障害物周辺に定義し, このベクトル場でノイズベースの気流の流れ場を修飾して, インタラクション機能を実現する (図6).

ノイズベース炎のアニメーション法としてのシステム化が今後に期待される.

#### ③噴出炎の表現法

風の中のトレーサとして、トーラス状のプリミティブを定義し、風の中での流れ方、拡散の仕方、トーラス表面のサンプリングとビルボードによるレンダリング法を開発し、蒸気機関車の煙のような噴出炎のアニメーションを生成し、有効性を確認した(図7)。

なお、トーラス状の煙プリミティブの拡散表現の改良によるリアリティの向上と噴煙への拡張可能性に関する検討が今後に期待される。

#### ④構成的風の中生成と fBm による竜巻の表現法

次のような表現法を開発した。まず、竜巻の風速場を、吸い込みながら回転して上昇する渦巻として、その中心線が変動しながら移動・成長する気流として表現するために、ランキン渦を模した吸い込みのベクトル場、コリオリ力の作用、ロート雲形状、4次元ノイズによる変動、カテナリ曲線などの関数による中心線の表現などをベースとして、Voxel空間として生成する。次に、この風速場を可視化するために、雲や砂塵などの表現として多数の粒子(トレーサ)を用い、風速場による運動を生成する。さらに、粒子群に雲や砂塵のテクスチャをマッピングし、CG画像を生成する(図8)。

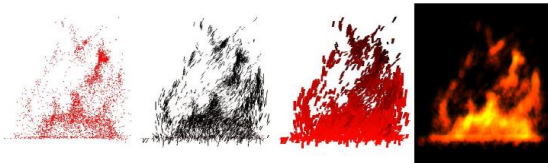


図5. fBmによる炎の表現法

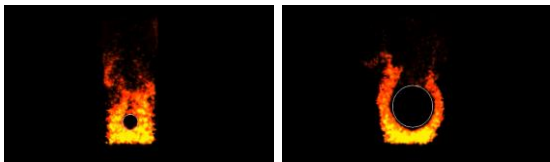


図6. 障害物とのインタラクション機能

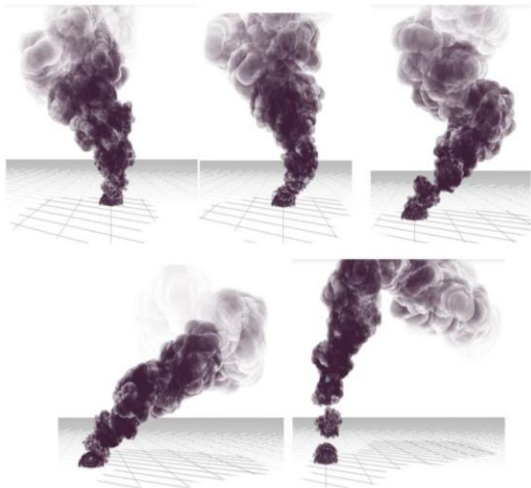


図7. トーラス型プリミティブによる噴出炎の表現



図8. 構成的風の中による竜巻の表現

なお、渦巻きのレンダリング法を改良し、デザイナー向けのインタフェースを整備したシステム化を検討することが今後に期待される。

#### (3)HDEX (Hybrid-type Dimensional Extension) について

次のような次元上げ手法について検討を行った。

##### ①並列型拡張技術

運動方向の垂直平面(スライス)上での2Dシミュレーションデータを幅方向に並列して3D化するというアイデアである。これを実現するために、隣接するスライスのアニメーションフレームが自然な揺らぎ(時間差運動)を持つようにするために、シミュレーションフレーム(アニメーションフレームより $\Delta t$ が非常に小さく多くのフレームが生成される)から、隣接するスライスに対応する揺らぎ(2DfBmの列が対応する)で、それぞれのスライスのアニメーションフレームを選択することで実現した。また、流体表面を生成するためのスライス間データの平滑化・補間法を適用し、押し寄せる砕波、さざ波、および渦巻く波の表現に拡張した(図9上段から)。本手法については、芸術科学会論文誌に発表している。

さらに、飛沫、泡沫、気泡の表現を組み込み、より映像のリアリティを向上させるための検討が今後に期待される。

##### ②積層型拡張技術

流れの可視化に重要なデータは表面形状であることから、流れの内部のシミュレーション計算が省略可能であれば、少量粒子による効率的なアニメーションが可能となる。このアイデアに基づいて、少量の粒子群により流れのシミュレーションを行い、流れが安定した時点で粒子群を固定化し、それを新しい川底とすることにより、所定の水量となるまでこのことを繰り返すというアイデアについて検討した。その結果、段差部分の流れのように変化の激しい部分は川底にすることが困難であることから、流れの安定した層流部分(速度ベクトルの変動が小さい部分)をトンネル状領域として検出し、その中の粒子の位置を固定化するという方法について検討を行った(図10黄色い部分がトンネルの

例). 固定粒子にはシミュレーションに必要なとされる情報を持たせ, トンネル内粒子に関する更新計算は行わない. また, トンネルの入り口側では, 粒子の吸収を行い, 出口側では放出を行う.

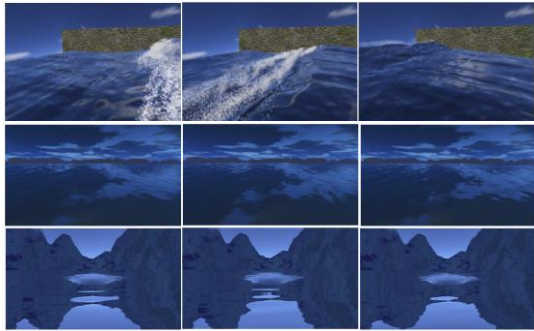


図 9. 並列型拡張による碎波の表現

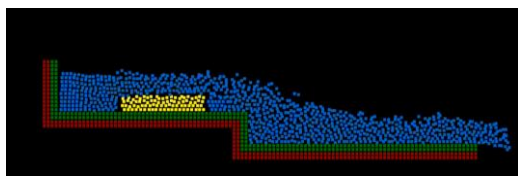


図 10. トンネル状削減法

なお, ②については, 有効な手法としての実現可能性が高いことが分かったので, 一層の詳細化の検討が今後期待される.

#### (4)SSDEX (Spectrum Synthesis-type Dimensional Extension) について

本研究では, 揺らぎ物体の表現に fBm による揺らぎ曲線群を直接適用する手法として, 布の揺らめき表現法, またそれを利用した炎の表現法, さらに滝の表現法を試みた.

##### ①布の揺らめき現象のアニメーション技術

3次元 fBm を生成(1次元を時間軸として, 刻々と変化する 2次元スライスを生成)し, 布の格子モデルへその 2次元スライスを割り当てることにより, 布の揺らめきを表現する方法を開発した. また, 風の方角へ 2次元 fBm をシフトして布上の風の流れを表現する方法や, カーテン, 簾, および幟の揺らぎ表現への適用法を開発した(図 11). 本手法については, 芸術科学会論文誌に発表している. 予想以上の自然なアニメーションが生成可能であり, ツールとしてのシステム化が今後期待される.

##### ②炎のアニメーション技術

①の布の揺らめき現象のアニメーション技術の応用として, 以下のような炎の表現法を開発している.

まず, 2次元 fBm を利用した炎のテクスチャを生成する(図 12左). 次に, ①の布のアニメーションを地面から上空に向かうカーテンとして行い(図 12右上段), これに風の流れに合わせて流れるような fBm により生成した炎のテクスチャをマッピングすることにより上昇する炎を表現する(図 12右

下段). さらに, 炎を地面で延焼できるものへと拡張し, fBm により地面に燃料の量を定義したアニメーションにより, その可能性を確認した.

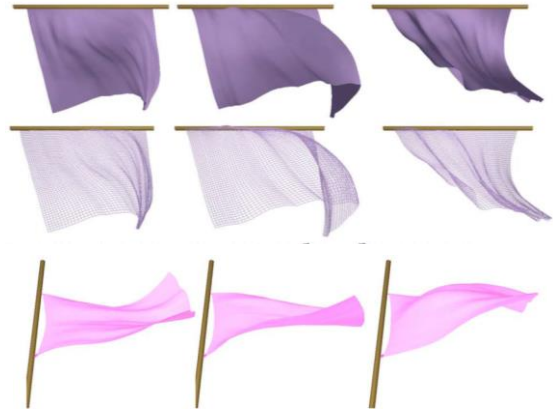


図 11. 布の揺らぎの表現

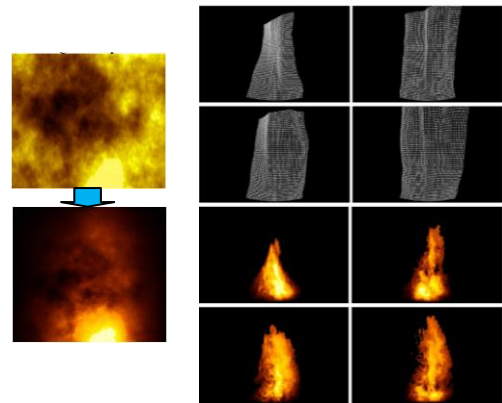


図 12. 布の揺らぎを利用した炎の表現

##### ③滝のアニメーション技術

本研究では, 以下のようなアルゴリズムを開発している. 2次元 fBm (FFT による生成のためトーラス状に連続している) から長周期の 1次元 fBm を切り出す方法を拡張して, 幅を持った帯状の 2次元 fBm を切り出し(図 13左), これを水量マップとして, 滝の自由落下曲面に従い, 動的にボリュームマッピングを行い, 滝の水塊の表現を行う(図 13右). 図中, 緑の矢印が切り出しの方角で, 黄色い矢印が滝の水流方向となる.

本手法について, 特にレンダリング法について検討を深めることが今後期待される.

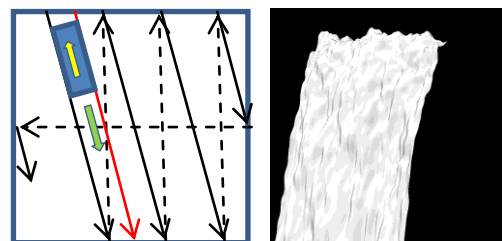


図 13. 滝の表現に使う fBm の切り出し方(左), マッピング後の表面形状例(右)

#### (5) fBm を生成するマルコフチェーン

FFT で生成する標準的な手法では、fBm の長さやランダムさを表すパラメータは事前に設定しなければならず、応用によっては使いづらい面がある。これに対して、以下のようなマルコフチェーンによる方法によれば、柔軟な生成が可能となる。なお、本手法は、(1) の MTFV を精査する際に発案されたものである。

まず、理想的な fBm として、FFT によるスペクトル合成法により、可能な限り長い fBm を生成する。この fBm を参照データとして、遷移行列 (1 入力 1 出力) を生成する。得られた遷移行列とランダムサンプリング法によりノイズが生成できる。なお、このノイズのスペクトルを求め、参照データとした fBm のスペクトルと比較するとほぼ同じものが得られている (図 1 4)。

想定以上の有効性が確認できているので、ツールとしての整備と、2次元への拡張により、一層実用的な手法とすることが今後に期待される。

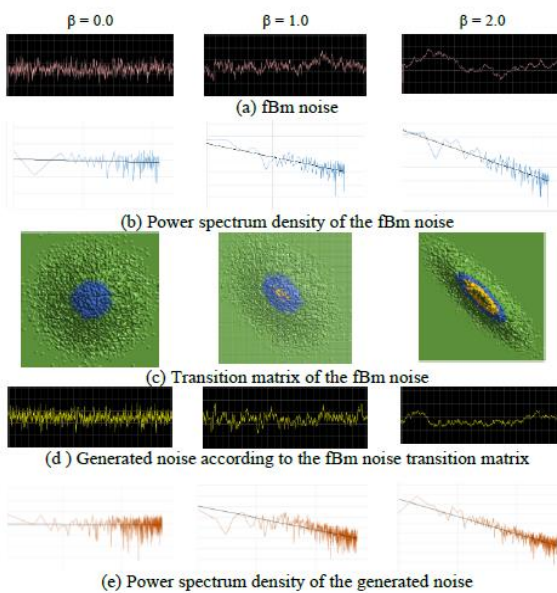


図 1 4. マルコフチェーンによる fBm の生成

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Purevtsovt Nugjgar and Norishige Chiba, Markov-Type Vector Field for Endless Surface Animation of Water Stream, The Visual Computer, Vol. 29, No. 9, pp. 959-968, 2013
- ② J. Tynystanova, N. Chiba, Fourier Descriptor Animation of Cloth Flapping in Wind, The Journal of the Society for Art and Science, Vol. 11, No. 3, pp. 79-91, 2012
- ③ G. Tsedendorj, N. Chiba, Stochastic Extension Method for Animating Water Flows,

The Journal of the Society for Art and Science, Vol. 11, No. 3, pp. 92-101, 2012

[学会発表] (計 3 3 件)

- ① 神航平, 千葉則茂, 風の場のノイズベースアニメーション法へのインタラクション機能の導入, 平成 26 年度芸術科学会東北支部研究会, 2015. 3. 28, 日本大学工学部 (福島県郡山市)
- ② Batjargal Sosorbaram, Zorig Gunjee and Norishige Chiba, Empirical Generation of fBm Using Markov-Type Transition Matrix, IWAIT2015, 2015. 1. 12, Tainan (Taiwan)
- ③ 佐々木亮太, 千葉則茂, 構成的速度場生成に基づく竜巻のアニメーション法, 平成 26 年度芸術科学会東北支部大会, 2015. 1. 10, アイーナ (岩手県盛岡市)
- ④ Purevtsovt Nugjgar and Norishige Chiba, Markov-Type Vector Field for Endless Surface Animation of Water Stream, CGI2013, 2013. 6. 12, Hannover (Germany)
- ⑤ J. Tynystanova, N. Chiba, Simple Fire-like Animation Using Noise-based Dynamic Texture, NICOGRAPH International 2012, 2012. 7. 2, Bali (Indonesia)
- ⑥ O. Khorloo, N. Chiba, An Application of Noise-based Wind Field Generation for Animating Fire, NICOGRAPH International 2012, 2012. 7. 2, Bali (Indonesia)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

千葉 則茂 (CHIBA NORISHIGE)  
岩手大学・工学部・教授  
研究者番号: 40171946

##### (2) 連携研究者

藤本 忠博 (FUJIMOTO TADAHIRO)  
岩手大学・工学部・准教授  
研究者番号: 00312512