

平成 26 年 4 月 18 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700182

研究課題名(和文) 測地画像処理の高速計算法開発

研究課題名(英文) Fast Algorithms for Geodesic Image Processing

研究代表者

吉澤 信(Yoshizawa, Shin)

独立行政法人理化学研究所・光量子工学研究領域・上級研究員

研究者番号：10455371

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではデジタル画像を処理するための新しい計算方法(アルゴリズム)を研究した。画像の明るさや色を幾何的に捉えて定式化する、画像多様体・測地画像に注目し、従来の方法では困難であった問題を解決した。具体的には、測地画像の高精度かつ効率的な処理が可能となる新しい畳み込みアルゴリズムを開発した。また、ノイズ除去・領域抽出・非写実的エフェクトの三つの応用に対してのアルゴリズムも提案し、国際賞(EG'13 Best Poster)を受賞するなど国際的に高い評価を得た。

研究成果の概要(英文)：In this research, we had been devoted to develop new algorithms and computational methods for digital image processing. Our idea to tackle the problems, which are difficult to be solved by using conventional methods, is to consider the so-called image manifold and geodesic image which are geometrical concept of image intensity and color information with coordinates. In particularly, we proposed a fast, accurate, and new convolution algorithm for geodesic images. We had also developed three applications such as image noise reduction, segmentation, and synthesis which have been received favorable reputation, internationally (e.g., EG'13 Best Poster).

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学、知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：測地画像処理 畳み込み 非写実的エフェクト 領域抽出 陰関数 高速ガウス変換 幾何不変量 曲率導関数

## 1. 研究開始当初の背景

一般へのデジタルカメラの爆発的普及、及び共焦点レーザー顕微鏡、CT、MRI等の画像取得技術の発展により、従来のコンピュータ・ビジョンやパターン認識の分野に加えて、計算 Photography と呼ばれるデジタル・エンターテイメントや自然科学・工業工学の分野でも画像データが必要不可欠となっている。

画像データに対してのノイズ除去、超解像度解析、非写実的エフェクトや領域抽出等の幅広い応用では、入力画像の顕著なエッジや特徴的テクスチャーパターンを保存する事が重要である。通常、特徴を保存する処理は、非線形の畳み込み等で計算するが、その計算量は非常に多いため、効率的なアルゴリズムの研究が盛んで、国際的競争が行われており、現在までその状況は続いている。

最近では、入力画像の勾配、テクスチャーや拡散テンソル MRI 等の特徴を、画素の「幾何計量」として扱い、特徴空間での測地線を距離計算に利用する測地画像と呼ばれる方法論が注目を浴びている。これは、色情報以外の観察・計測で得られる温度分布や蛍光色素等の様々な付属データ、及び High Dynamic Range(HDR)画像等の複数露光設定による多チャンネル画像を統一的に扱える為である。この測地画像の概念自体は、ベクトル中間値フィルタや拡散テンソル MRI 処理など古くからあるが、最近の研究では、特徴空間での距離に基づき、入力画像の画素を実際に移動し測地画像へ変換する。これにより、元の空間では非線形だった処理が、変換後の空間では線形になり、GPU 等を用いての効率的計算が可能となる。

残念ながら、最新の方法群は、「測地画像化」と「ラスタ画像化」の二つの原因に基づく誤差の為に処理結果にアーティファクトが発生する。ラスタ画像化は、測地画像への変換後にバラバラになった画素の間を線形補間等で補間しラスタ画像として近似する為、畳み込み計算の精度が非常に悪くなる。また、特徴空間の距離を二次元画像の距離に反映させる事は、準等長写像を構成する事と同義であり、測地画像化も誤差を含む非常に難しい問題である。この「測地画像化」と「ラスタ画像化」による二つの誤差を最適化する研究は模索されていなかった。

しかしながら、HDR 画像や自然科学・工業工学のデータで、多チャンネル画像の需要が爆発的に増大している事から、上記の問題を克服し、高精度かつ高速に測地画像処理を行える方法を開発するが急務であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、測地画像を高速かつ高精度に畳み込み処理するアルゴリズムの開発を目的とした。また、測地画像処理を曲面の幾何学から考察・調査するために、曲率に基づく特徴解析・計算アルゴリズムについても研究を実施した。測地画像処理としてノイズ除

去・領域抽出・非写実的エフェクトの三つの応用課題の新しい計算法開発も目的である。

## 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、既に有用性の実証されている高速ガウス変換法と定義域変換法を発展させて、新しい測地画像に対する畳み込み処理アルゴリズムを開発する。既存の方法との比較検証を精度と速度に対して実施した。海外研究機関等の支援を受けながら、高性能 PC を用いて開発を効率的に進めた。高性能ノート PC による研究成果発表を積極的に実施し、外部から本研究課題への公正な評価を受ける事により、本研究を成功させる。実際の観察・計測データに対しての検証を行い自然科学や工業工学分野への展開を目指した。

研究活動では、実験プログラム・アルゴリズムの開発とその検証が中心であった。数学的な詳細は割愛するが以下の手順に従って研究を実施した。

### 3.1 測地画像の高速畳み込み法の開発

定義域変換法で「測地画像化」を行い、ラスタ画像化前の画素データに対して高速ガウス変換を適応した。既存法と畳み込みの精度及び速度の比較検証を行った。

### 3.2 測地画像化法の開発

特徴空間の距離を用いて画像を測地画像へ変換する方法を開発した。計画当初は、陰的フィルタ法を拡張する予定であったが、定義域変換法より良い結果が得られなかったため、定義域変換法を改良する事で問題の克服を試みた。測地画像化後は、前述の高速ガウス変換に基づく畳み込みを組み合わせた。

### 3.3 測地画像処理の応用問題への適応

開発したアルゴリズムを用いて、ノイズ除去、領域抽出、及び非写実的エフェクト処理を行える計算法を提案した。

### 3.4 幾何特徴の調査

測地画像を構成する幾何曲面の調査・研究も実施し、特に曲率とその導関数を用いて、公式・不変量・特徴量とそのアルゴリズムの開発を実施した。

## 4. 研究成果

本研究を実施する事によって、測地画像の高精度かつ効率的な処理が可能となる畳み込みアルゴリズムを開発した。また、研究を通して得られた成果は査読付き論文や招待講演などで発表した。また、要素技術をまとめて参考書チャプター(吉澤 信 他, CG Gems JP, 2012)として発表した。本研究成果は、画像処理、コンピュータ・グラフィクス、コンピュータ・ビジョンやパターン認識等の応用研究への礎となる事が今後期待される。本研究による代表的な研究成果を以下に挙げる。

#### 4.1 高速畳み込み・ノイズ除去

ガウス関数を測地画像と高速に畳み込む新しい近似計算法を考案した (Yoshizawa and Yokota, EG'13). このアルゴリズムにより、画像のエッジ特徴を保持した平滑化・ノイズ除去を実現した (図1 参照).



図1：特徴保存平滑化の例. 左上の入力画像を保存したいエッジの大きさを変えて処理した3つの結果.

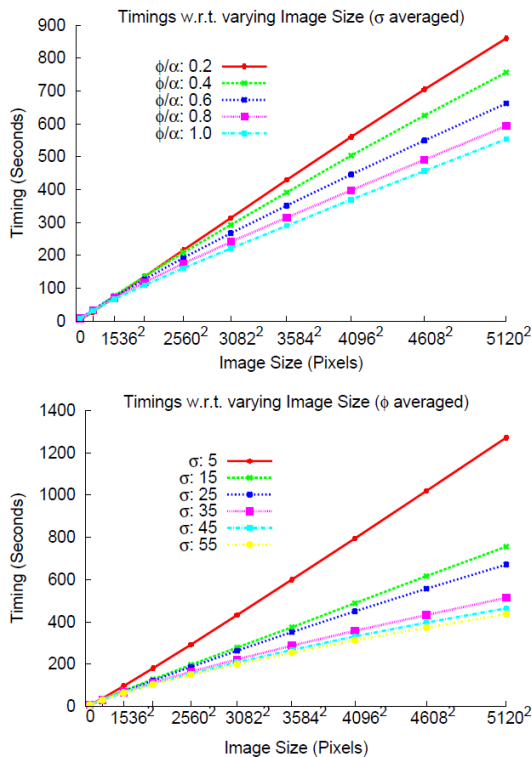


図2：計算時間のプロット. 横軸は画素数, 縦軸は計算時間(秒),  $\alpha$ は輝度値の標準偏差,  $\phi$ はエッジ保存・ $\sigma$ は平滑化量のパラメータである. 複数のパラメータを変化させた場合, 2次元パラメータでの速度計算であるため, 上下のプロットはそれぞれ $\sigma$ と $\phi$ の速度を平均した結果である.

図2は提案法による計算速度を示してる. Exact な計算には画素数の二乗に比例する計算複雑度が必要であるが, 考案した計算方法により, 計算複雑度が線形で計算できる事がわかる.

#### 4.2 領域抽出法

画像多様体を陰関数で近似し, ユーザーの指定した制約を満たす事で, 3次元・多チャンネルの画像をインタラクティブに領域抽出する計算法の開発へ貢献した (図3 参照). 本研究成果は権威ある査読付き国際会議 EUROGRAPHICS1 2013 (EG' 13)にて日本から唯一 full paper として採択された (Ijiri et al. EG'13).

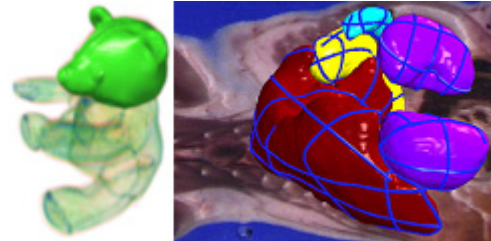


図3：画像多様体の Bilateral Hermit 型放射基底関数による領域抽出. ユーザーがスケッチした空間曲線と高次元画像多様体のエッジを通る曲面として領域をインタラクティブに抽出する.

#### 4.3 非写実的エフェクト法

高速畳み込みを画像類推法及びポアソン画像合成法へ適応して, テクスチャーを考慮した新しい画像合成法を考案した. 従来では困難であった色合とテクスチャー細部の両方を考慮した合成に成功した (図4 参照). 本研究成果は EG' 13にて発表し (Yoshizawa and Yokota, EG'13), 国際賞 (Springer Prize for the Best Eurographics Poster 2013)を受賞した.



図4：入力画像, 従来法と提案法(右)の結果. 従来法は色合が補間されてもテクスチャー細部の違いにより, 合成境界が目視でき, 不自然な結果となる. 提案法では, 色合・細部共に自然な合成に成功している.

#### 4.4 幾何特徴解析

測地画像化で重要な曲面の幾何的不変量の研究を実施し, 曲率の導関数に基づく新しい不変量を発見した (数学的に証明). また, その不変量を用いた曲線と曲面のエネルギー及び幾何特徴を考案した. この研究成果は英国応用数理学会 (IMA) の査読付き国際会議や学術論文誌など (Yoshizawa and Belyaev, ACDDE'12, IMA MoS'13: SCIS 2013) で発表し好評を得た (図5). また, 幾何特徴を画像多様体で抽出するアルゴリズムも考案した (Yoshizawa et al., JoGG, 2012, 図6 参照).

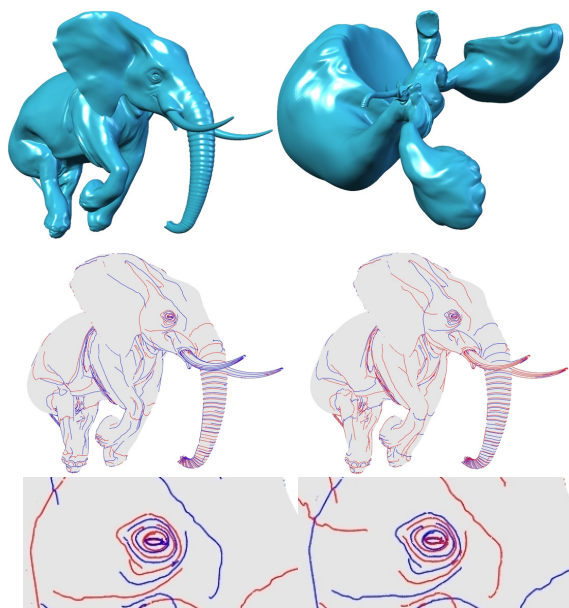


図5：入力曲面とその球反転変換(上段)．メビウス変換に不変な新しい幾何特徴線(中下段)．

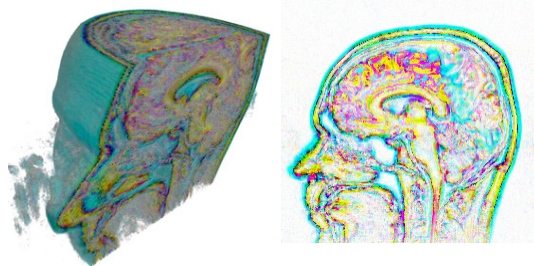


図6：3次元画像の曲率極値特徴の Volume Rendering(左)と断面(右)．

#### 4.5 画像処理システム

開発したアルゴリズムの実用化へ向けて、画像処理システムのプロトタイプ開発に貢献した．領域抽出の評価システム(Takemoto et al., ISCN'13)及びクラウド生物・医用画像処理システム(Morita et al, ISCN'13, 図7参照)を開発し、現在テスト運用に向けて、準備中である．

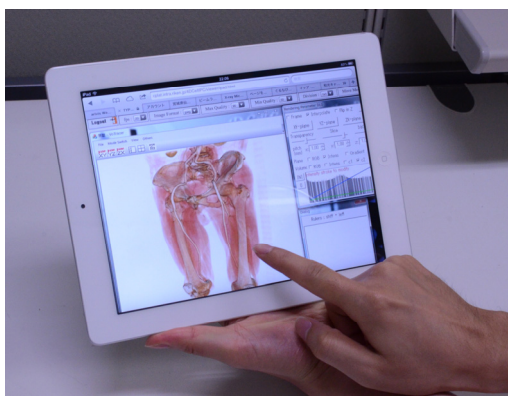


図7：開発中のクラウド生物・医用画像処理システム．安価なクライアントでクラウドを通した高負荷な処理結果をインタラクティブに編集する

ことが可能である．

上記 4.1-4.5 とは異なる、全く新しい高速・高精度の畳み込み計算法及び測地画像応用も発見しており、現在権威ある査読付き国際会議へ論文を投稿中である．採択後には開発したアルゴリズムのプログラムをライブラリ化しソースコードと共に公開し、実際の使用例等の解説ページも作成予定である．

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 12 件)

- ① **S. Yoshizawa** and A. Belyaev, “Möbius-invariant surface energies and ridges”, *The Mathematics of Surfaces*, 14, pp. 109-125, 2013, 査読あり.  
<http://www.riken.jp/brict/Yoshizawa>
- ② T. Ijiri, **S. Yoshizawa**, Y. Sato, M. Ito, and H. Yokota, “Bilateral Hermite Radial Basis Functions for Contour-based Volume Segmentation”, *Computer Graphics Forum (Proc. of EUROGRAPHICS'13)*, 32(2), pp. 123-132, 2013, 査読あり.  
DOI: 10.1111/cgf.12032
- ③ **S. Yoshizawa** and H. Yokota, “Poisson Image Analogy: Texture-Aware Seamless Cloning”, *EUROGRAPHICS Poster Proc.*, pp. 5-6, 2013, 査読あり.  
DOI:10.2312/conf/EG2013/posters/005-006
- ④ **S. Yoshizawa** and A. Belyaev, “Möbius-invariant curve and surface energies and their applications”, *Science China Information Sciences*, 56(9), pp. 1-10, 2013, 査読あり.  
DOI:10.1007/s11432-013-4997-0
- ⑤ S. Takemoto, **S. Yoshizawa**, Y. Tsujimura, and H. Yokota, “A novel performance evaluation system for fluorescent cell image segmentation”, *Proc. of International Symposium on Computing and Networking*, pp. 294-299, 2013, 査読あり.  
DOI:10.1109/CANDAR.2013.51
- ⑥ M. Morita et al. (10人中4番目), “Biomedical Image Communication Platform”, *Proc. of International Symposium on Computing and Networking*, pp. 281-287, 2013, 査読あり.  
DOI: 10.1109/CANDAR.2013.49
- ⑦ **S. Yoshizawa**, A. Belyaev, and H. Yokota, “Shape and Image Interrogation with Curvature Extremalities”, *Journal for Geometry and Graphics*, 16(1), pp. 81-95, 2012, 査読あり.  
<http://www.heldermann.de/JGG/JGG16/JGG161/jgg16009.htm>
- ⑧ **S. Yoshizawa** and A. Belyaev, “Conformally Invariant Energies and Minimum Variation Surfaces”, *Proc. of Asian Conference on*



Design and Digital Engineering, pp. 20:1-20:9, 2012, 査読あり.

[学会発表] (計 21 件)

- ① **S. Yoshizawa**, “*Shape Aesthetics and Features via Möbius Invariants*”, Seminar, Invited Talk, Institute of Perception, Action and Behaviour, Edinburgh University, September 3, 2013, Edinburgh, UK.
- ② **S. Yoshizawa** and H. Yokota, “*Filtering and Registration of Cell and Intracellular Images*”, EPS Seminar, Invited Talk, School of Engineering & Physical Sciences, Heriot-Watt University, August 28, 2013, Edinburgh, UK.
- ③ **吉澤 信**, “計測データの曲率に基づく特徴抽出”, 精密工学会, 現物融合型エンジニアリング専門委員会, 招待講演, 2013年2月22日, 東大.
- ④ **吉澤 信**, ベリヤエフアレキサンダー, 横田 秀夫, “特徴保存フィルタの測地画像に基づいた高速アルゴリズム”, バイオイメージインフォマティクスワークショップ, 2012年11月1-2日, 神戸理研.

[図書] (計 1 件)

- ① **吉澤 信**, 高速エッジ保存平滑化フィルタ, Computer Graphics Gems JP 2012 - コンピュータグラフィックス技術の最前線-, Chapter 5, pp. 89-120, (株)ボーンデジタル, 32ページ, 2012.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 境界特定装置、境界特定方法、プログラム、及び記録媒体

発明者: 井尻 敬, **吉澤 信**, 横田 秀夫

権利者: 井尻 敬, **吉澤 信**, 横田 秀夫

種類: 特許

番号: 2013-081628

出願年月日: 2013年4月9日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.riken.jp/briect/Yoshizawa>

本研究成果の一部により, 国際賞 Springer Prize for the Best Eurographics Poster 2013 を受賞.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉澤 信 (YOSHIZAWA, Shin)

独立行政法人 理化学研究所

光量子工学研究領域 上級研究員

研究者番号: 10455371