

平成 22 年 5 月 21 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20700175
 研究課題名（和文）
 高速特徴保存フィルタによる高次元画像処理基盤ソフトウェアの構築
 研究課題名（英文）
 Multidimensional Image Processing via Fast Feature-Preserving Filters
 研究代表者
 吉澤 信 (Yoshizawa Shin)
 独立行政法人理化学研究所・生物基盤構築チーム・研究員
 研究者番号：10455371

研究成果の概要：

自然科学での観察・観測データや工学応用での計測・測定データは高次元画像として得られる。本研究では、高次元画像処理の分野において線形フィルタしか適用出来なかった問題に対して、特徴保存フィルタを高速に適用する計算法を開発した。ノイズ除去、周波数分解、領域・特徴抽出等の応用問題で、3GHzのコンピュータで通常30年以上計算時間が必要な 513^3 の3乗ボックスからなる高次元画像を、本研究で開発した計算法を用いて3分程度で計算する事を達成した。

研究成果の概要（英文）：

Multidimensional images had become popular in natural science and industrial engineering for observed or measured data. In this research, we have developed a fast approximation algorithm of feature-preserving filters for multidimensional images. Application of the developed algorithm includes noise reduction, frequency decomposition, region segmentation, and feature extraction of the images. Filtering the image consisting of 513^3 voxels took only 3 minutes by our algorithm with 3.2 GHz PC where the exact filtering requires approximately 30 years for such huge data.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

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：画像処理, グラフィクス, 高速アルゴリズム, Bilateral フィルタ, 特徴抽出

1. 研究開始当初の背景

近年、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コンピュータ内に生体情報・工業製品内部情報等の時空間領域を観測・計測し、高次元画像(Volume)と

して取得する事が可能となった。また、数値流体解析等の物理シミュレーションの計算結果や一般のデジタルビデオ情報も同様に高次元画像としてコンピュータ内で表現されている。この様な高次元画像は通常の2次元画像と比べデータ量が大幅

模(数百万～数億画素)になり、その効率的な処理方法の研究が注目を浴びている。特に、入力画像のエッジやパターンを保存するフィルタ処理は非常に重要であり、ノイズ除去、解像度解析、特徴量算出、領域抽出、パターン認識等の幅広い応用が存在する。しかしながら高次元画像処理分野における現状としては、多くの場合における問題解決のために、その計算量の少なから特徴を保存しない線形フィルタが多く用いられており、特徴を保存する非線形フィルタを幅広く適用する方向は模索されていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高次元画像処理の分野において線形フィルタしか適用出来なかった問題に対して、特徴保存フィルタを高速に適用する方法を研究する事である。特徴保存フィルタには様々なものがあるが、本研究においては **Bilateral** フィルタを用いる。ノイズ除去、周波数分解、領域・特徴抽出と3つの応用問題に対して、高速特徴保存フィルタを用いた処理プログラムを開発する。また、研究にあたり開発されたプログラム群は、高速特徴保存フィルタを用いた高次元画像処理基盤ソフトウェアとして **WEB** を通じて公開する予定である。本研究を実施する事によって、初めて高次元画像の効率的解析が可能になり、開発される基盤ソフトウェアはコンピュータグラフィクス、コンピュータビジョン、物理シミュレーション等の応用研究の礎となる事が期待出来る。

本研究で用いる特徴保存フィルタ (**Bilateral** フィルタ)は数学的には、非線形の離散畳み込み形式で表せる。それ故、通常の高速フーリエ変換による離散畳み込みを適用する事が出来ない。したがって、計算量は入力画素数の2乗に比例する。例えば、画像サイズが128の3乗の3次元画像を通常の2GHzコンピュータで計算すると4.6日計算時間が必要である。さらに、画像サイズの一辺の長さをたった2倍にした256の3乗サイズの3次元画像では、計算量にして64倍、約294日の計算時間が必要である。このような莫大な計算時間を短縮し処理の効率化をはかる事は現在の画像処理・コンピュータグラフィクス分野において急務である。しかしながら現状では **Bilateral** フィルタの高速計算法は2次元画像に対するものしか知られていない。過去によく研究されている手法としては、主にマサチューセッツ工科大学の **Durand** らのグループによる、高速フーリエ変換を改良した方法と **B. Weiss** 等によるヒストグラムを用いた方法がある。これら既存の方法の最大の問題点は、高速化の仕組みが2次元画像の構造を基にしており、それ故、

高次元画像に対して適用出来ない事である。また、既存の高速計算法は高速化に伴い制御不能な誤差が処理結果に生じる事が知られている。

既存の方法に対して、本研究課題で利用した高速ガウス変換は計算物理学の分野において既に有効性が実証されており、入力画素数に線形に比例する計算量で高速に非線形の畳み込みが実行可能である。さらに誤差の制御が可能のため高速で堅固な特徴保存フィルタ計算法を構築可能である。高次元画像処理において特徴保存フィルタを効果的に適用可能な問題は数多く存在するが、本研究課題における具体的なターゲットは以下の3つの問題である。

1. 高速ノイズ除去：観測・計測画像の特徴を保持したままノイズを除去する事が可能である。これにより、線形フィルタに比べて、確度の高い工業製品解析、共焦点レーザー顕微鏡画像等の超高感度撮影画像の高品質な画像を、少ない計算量で得られる事が期待出来る。
2. 高速周波数分解：元画像の特徴を保存するため、線形フィルタによる周波数分解に比べて、少ない分解数で画像の情報を再構成出来る事が期待される。また、多重解像度表現を構成し、様々な画像解析処理の基盤データ構造を構築する事が可能である。
3. 高速領域・特徴抽出：特徴保存フィルタにより高次元の畳み込み曲面を生成し、その微分幾何特徴量を生成する事が期待出来る。また、特徴保存フィルタを繰り返し適用する事により自動的に画像領域が断片化され、領域抽出が可能となる。

これらの問題はいずれも高次元画像処理で根本的かつ非常に重要であり、高速特徴保存フィルタを用いる事により高精度かつ高速に解く事が期待出来る。

3. 研究の方法

本研究課題の研究活動では、実験プログラム・アルゴリズムの開発とその検証を中心に実施した。最新の高性能デスクトップ型PCを購入する事により、その効率を高めた。また、研究発表時には成果の有用性をアピールするために、リアルタイムで計算結果を可視化するデモを実施した。そのために、高性能グラフィクスカードを搭載したノートブック型PCを利用した。

平成20～21年度に実施した具体的な研究内容を以下に示す。

- (1) 高速特徴保存フィルタの開発
アルゴリズムの開発にあたっては高性能数値計算手法の一つである高速ガウス変換を基にした。具体的には、元画像を座標値と輝度値を同時に扱っ

た一次元上の空間に拡張する。例えば、2次元画像なら3次元空間、3次元画像なら4次元空間へ拡張する。次に、画像の特徴を保存する **Bilateral** フィルタの数式をその拡張空間にて記述する。これにより、本来非線形の **Bilateral** フィルタを一次元上の次元での線形畳み込みとして表す事に成功した。フィルタの畳み込み核にガウス関数を用いる事により **Bilateral** フィルタをガウス変換と呼ばれる形式で記述する。この **Bilateral** フィルタとガウス変換の同義性は本研究代表者らによって世界で初めて示された。最後に物理数値計算の研究分野でよく用いられている高速ガウス変換法を用いて **Bilateral** フィルタを高速かつ高精度に近似する。高速ガウス変換は高速多重極展開法(Fast Multipole Method)の一種で空間を代表点にて近似を行う。代表点の近傍と遠方でエルミート展開とテイラー展開にてガウス変換の式を近似し、その近似計算が与えられた誤差の範囲内になる様に上記展開を打ち切る。実際的高速ガウス変換法の細部は非常に複雑なため本報告書では割愛する。

(2) ノイズ除去アルゴリズムの開発

(1)で開発した高速特徴保存フィルタを用いて、観測・計測高次元画像のノイズを高速に除去するアルゴリズムを開発した。**Bilateral** フィルタを繰り返し適用する事は、発展型偏微分方程式として記述される。非線形拡散方程式の一種として離散化する事で画像のエッジ特徴を保存しながら加算白色ガウスノイズを除去する方法を開発した。

(3) 周波数分高手法の開発

(1)で開発した高速特徴保存フィルタを用いて、高次元画像を周波数ごとに高速分解する手法を開発した。フィルタ前後の画像の差分を生成する操作を再帰的に行い、画像を高周波成分と低周波成分に分解し、多重解像度表現を生成した。既存の線形フィルタ処理では難しい High Dynamic Range 画像を主に取り扱った。

(4) 領域・特徴抽出技法の開発

(2)及び(3)で用いた高速特徴保存フィルタの繰り返し・再帰的処理法を用いて、高次元画像の注目領域・幾何特徴を自動抽出する技法を開発した。(3)で開発した方法により画像を多重解像度表現にし、(2)で開発した繰り返し処理法により領域の断片化を行った。幾何特徴は高次元画像を高次の多様体とみなして曲率に基いた微分幾何量を計算する方法を提案した。

(5) 基盤ソフトウェアの構築

上記の研究により試作されたプログラムをまとめて基盤ソフトウェアを開発した。この

ソフトウェアは画像処理の基本的な機能であるノイズ除去・多重解像度解析・領域抽出を、高速特徴保存フィルタを用いて行うものである。

4. 研究成果

本研究経過に対する批評・外部からの公正な評価を得るため、積極的に学会に参加し、本研究の部分成果を国際会議・学術論文誌等に発表した。また、マックスプランク研究所、エディンバラ大学等の海外有名研究機関にて成果発表を実施した。

本研究代表者は情報科学の研究者のみならず自然科学・ものづくり技術の研究者との連携を行える研究体制である。理化学研究所内に多数存在する生物学系研究グループから細胞・生体情報の大規模な3次元・4次元観測画像データを提供支援、研究代表者の所属するVCAD研究プログラムの研究グループからは工業製品の大規模な断面・CT画像データ、力学シミュレーションの数値計算結果(4次元画像)を提供支援してもらい、本研究で構築した高次元画像処理基盤ソフトウェアの検証データとした。この事により本研究で構築した基盤ソフトウェアが情報科学の研究者の利用のみにとどまらず、観測・計測画像を扱う自然科学・ものづくり技術の研究に寄与する事が期待出来る。

以下本研究課題で開発した基盤ソフトウェアによる処理結果の実例を示す。図1～図3はそれぞれ、上の画像は入力で下の画像は開発した高速特徴保存フィルタでの処理結果であり、エッジ特徴を保存しながら加算白色ガウスノイズを除去している事がわかる。

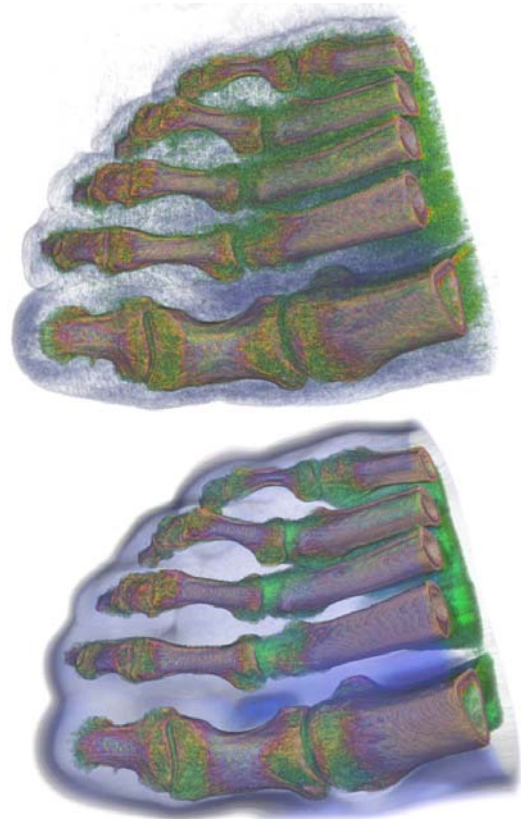


図 1 : 人体 3 次元 CT 画像の処理結果.

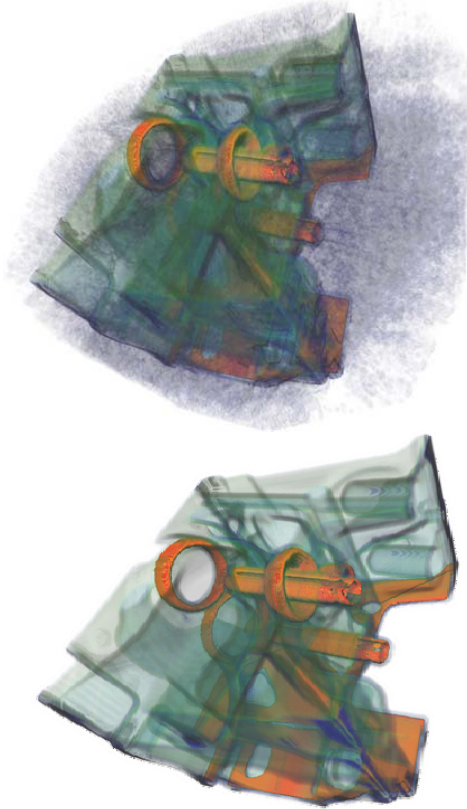


図 2 : 工業製品 3 次元 CT 画像の処理結果.

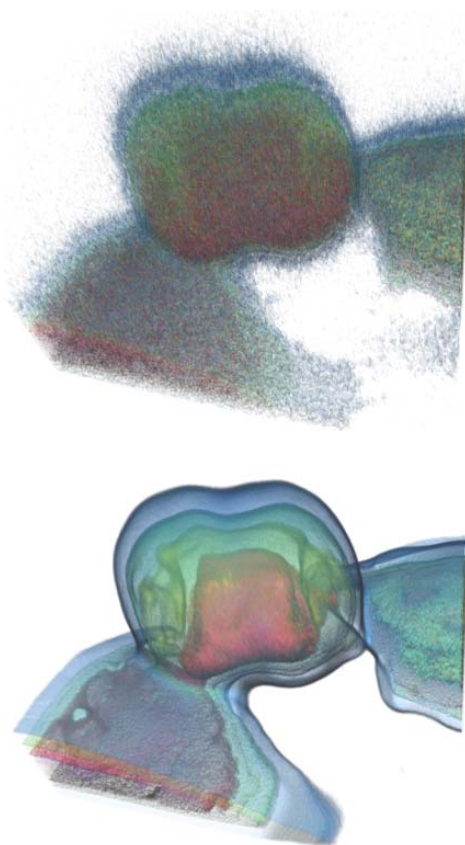


図 3 : 細胞 3 次元顕微鏡画像の処理結果.

図 4 は左の画像が入力、右の画像が開発した高速特徴保存フィルタでの処理結果であり、領域が断片化している事がわかる.

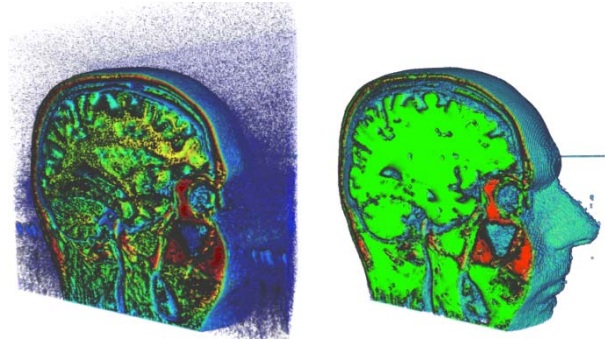


図 4 : 脳 3 次元 MRI 画像の処理結果.

図 5 及は開発した周波数分解法を用いた高諧調画像の合成結果である. 下の画像は露光設定を複数変えて取得した結果の入力画像で上の画像はその合成結果である. 開発した方法を用いる事により, 部屋の内外の明るさが異なる部分を綺麗に合成する結果が得られている事がわかる.

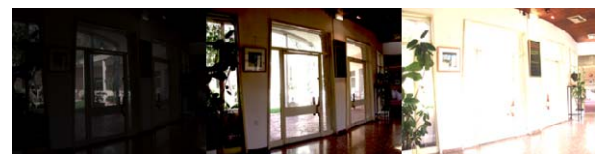


図 5 : 2 次元デジタルカメラ画像の合成結果.

図 6 は本研究課題で開発した高速特徴保存フィルタと, 既存の高速計算法との比較結果グラフである. 縦軸は Bilateral フィルタ近似の平均二乗誤差, 横軸は計算速度を表す. ここで, 既存の高速計算法は畳み込み核の分離法(PvV05,赤), 現在主流である Durand らのグループによる, 高速フーリエ変換を改良した方法(PD06,青, ピンク)と F. Po-

rikli によるヒストグラムを用いた方法 (Por08, 緑) を用いた。グラフ中の点群はそれぞれ、Bilateral フィルタの異なるパラメータを指定したときの近似誤差と計算速度のプロットである。

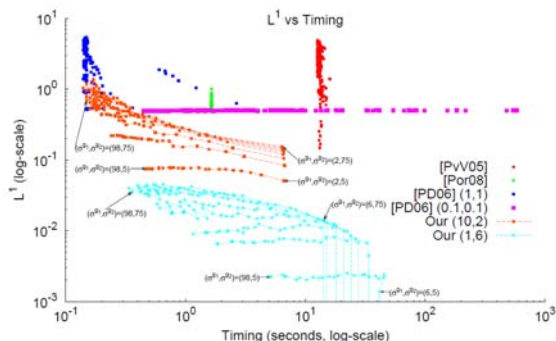


図 6 : 計算速度と近似精度の比較

本研究課題で開発した高速特徴保存フィルタ (Our, オレンジ, 水色) が与えられた近似精度を満たす様に計算速度を自動的に調節し、既存の計算方法より高速かつ高精度に近似計算を行っている事がわかる。

線形フィルタによる高次元画像処理が主流である現状において、特徴保存フィルタの有効性を示す事は、今後の画像処理分野の発展において非常に重要である。本研究で提案した新しい高速化アルゴリズムは、特徴保存フィルタの高次元画像への適用を可能にする事によって多くの新しい研究を生み出し、既存の方法では莫大な計算時間故に解決困難であった問題を、簡単に解く事が出来る可能性を与える。今後予測される高次元画像データ需要の爆発的増加に対応する為には、高品質な高次元画像処理を高速に行えるソフトウェア基盤の構築が急務であり、本研究課題は特徴保存フィルタによる高次元画像処理の普及における先駆けである。本研究を実施した事により、特徴保存フィルタの適用を現在の方法より数百～数万倍の速度で計算可能となった。具体的には 3.2GHz コンピュータで現状では 3 年以上の計算時間が必要な 512 の 3 乗画素のデータでは、本研究で開発した高速特徴保存フィルタにより 3 分間程度で計算する事に成功した。研究当初想定したスタンダードな 2GHz のコンピュータより 3.2GHz のコンピュータを用いてはいるが、通常 2.7 日の計算時間が必要な 128 の 3 乗画素のデータで 42 秒という高速計算を達成した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① S. Yoshizawa, A. Belyaev, and H. Yokota, *Fast Gauss Bilateral Filtering*, Computer Graphics Forum, Vol. 29, No. 1, pp. 60-74, 2010, 査読有。
- ② S. Yoshizawa, S. Takemoto, M. Takahashi, M. Muroi, S. Kazami, H. Miyoshi, and H. Yokota, *Intracellular Volume Registration*, Proceedings of International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, pp. 1407-1412, 2009, 査読有。
- ③ S. Yoshizawa, T. Langer, and A. Belyaev, *Digital Geometry Processing: Methods of Classical Differential Geometry for Shape Interrogation and Deformation*, Max Planck Institut für Informatik Ninth Biennial Report: Computer Graphics Group (H.-P. Seidel), pp. 367-368, 2009, 査読無。
- ④ 吉澤 信, *測定データのノイズ除去について*, 精密工学会誌, Vol. 72, No. 12, pp. 1256-1259, 2008, 査読無。
- ⑤ S. Yoshizawa, A. Belyaev, H. Yokota, and H.-P. Seidel, *Fast, Robust, and Faithful Methods for Detecting Crest Lines on Meshes*, Computer Aided Geometric Design, Vol. 25, Issue 8, pp. 545-560, 2008, 査読有。

[学会発表] (計 24 件)

- ① S. Yoshizawa, A. Belyaev, and H. Yokota, *A Novel Approach for Fast and Accurate Bilateral Filtering*, Invited Seminar Talk, Max Planck Institut fuer Informatik, October 29, 2009, Saarbruecken, Germany.
- ② S. Yoshizawa, A. Belyaev, H. Yokota, and H.-P. Seidel, *On surface ridges and their use for shape analysis*, Invited Seminar Talk, Institute of Perception, Action and Behaviour, Edinburgh University, October 22, 2009, Edinburgh, Scotland, UK.
- ③ S. Yoshizawa, A. Belyaev, and H. Yokota, *Fast Bilateral Image and Volume Processing*, Invited Seminar Talk, Signal and Image Processing Joint Seminar, Edinburgh Research Partnership in Engineering and Mathematics, October 21, 2009, Edinburgh, Scotland, UK.
- ④ S. Yoshizawa and H. Yokota, *Volume Processing for Cell Biology*, Invited Seminar Talk, Durham University, October 30, 2008, Durham, England, UK.
- ⑤ S. Yoshizawa and H. Yokota, *Image & Geometry Processing for Cell Biology*, Invited Seminar Talk,

Signal and Image Processing Joint Seminar,
Edinburgh Research Partnership in Engineering and Mathematics, Invited Talk, October 29, 2008, Edinburgh, Scotland, UK.

- ⑥ **S. Yoshizawa**, A. Belyaev, and H.-P. Seidel,
Natural-Looking Variational Mesh Deformations, Invited Seminar Talk, Heriot-Watt University, October 23, 2008, Edinburgh, Scotland, UK.

[その他]

ホームページ等

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

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・生物基盤構築チーム・研究員

研究者番号：10455371