

平成 29 年 5 月 16 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K16023

研究課題名(和文)乱択化による高速エッジ保存平滑化フィルタの実現

研究課題名(英文)Development of Randomized Algorithm for Fast Edge-Preserving Filtering

研究代表者

福島 慶繁(Fukushima, Norishige)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80550508

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：乱択アルゴリズムを用いたエッジ保存平滑化フィルタの高速化を行う研究を行った。高速化のために情報を間引いて計算する方針を取った。その際、周期的に間引くのではなく、ある程度のランダムさを持った間引きを行うように間引きを最適化し、同じサンプル数でも、より高精度なフィルタを実現可能とした。また、この間引き方法を乱択アルゴリズムのモンテカルロ法、ラスベガス法で拡張し、より広い範囲で本手法が適用可能になった。実装面においては、乱択アルゴリズムによる間引きを行ったフィルタリングを、SIMDやSIMTといったベクトル演算環境で高効率に動作可能な実装方法を提案し、GPUやCPUのAVX環境で実装した。

研究成果の概要(英文)：We research acceleration of edge-preserving filtering using randomized algorithms. For acceleration, information is sub-sampled. Instead of using periodical sub-sampling, we optimize sub-sampling patterns with sufficient randomness to realize a more accurate filter even with the same number of samples. Also, the sub-sampling method is extended to the Monte Carlo algorithm the Las Vegas algorithm in the randomized algorithm for broad usages of applications. On the implementation side of the algorithm, we investigate implementation methods that can perform filtering with randomized sub-sampling in a vector operation environment, such as SIMD or SIMT. We implemented it in the AVX environment of CPU and a modern GPU, and verified the implementation had high efficiency.

研究分野：画像処理

キーワード：乱択エッジ保存平滑化フィルタ バイラテラルフィルタ 乱択バイラテラルフィルタ 乱択DCTデノイジング 乱択アルゴリズム 並列化 ベクトル化 SIMD

1. 研究開始当初の背景

エッジ保存平滑化フィルタは、エッジを保持しつつ、残りを平滑化するフィルタであり、代表的なものにバイラテラルフィルタがある。このエッジ保存平滑化フィルタは、フィルタ対象を、画像ではなくコスト情報や推定結果といった計算経過であるに拡張すると、ノイズ除去、ハイダイナミックレンジ画像、超解像、霞除去やステレオマッチング、オプティカルフローなど、コンピュータビジョンの様々なアプリケーションに応用できる。そのため、エッジ保存平滑化フィルタは、この分野における基盤的なツールとなりつつある。

しかし、エッジ保存平滑化フィルタは、フィルタ重みを画素毎に変更するため、計算コストが高く、その高速化は重要な課題とされてきた。主要な国際会議・論文において、数々の近似高速化手法が提案されてきたが、それらの特性は一長一短である。高速だが精度の低いセパラブル実装、定数時間で実行可能だが、メモリ消費量が膨大となる手法、単一コアでは効率的だが、並列化効率が悪いもの、カラー画像やノンローカルミンフィルタ等の高次元フィルタ拡張で制約を受けるものなどがある。つまり、速度、精度、メモリ消費量、並列性、次元拡張のトレードオフを解消するフィルタは、未だに国内外のどこにも存在しない。

2. 研究の目的

本研究では、上記制約のすべてを満たすエッジ保存平滑化フィルタを実現するために、従来研究で用いられてきた決定的アルゴリズムではなく、乱択アルゴリズムを採用する。本研究の基本概念を図1に示す。本フィルタは、畳みこみカーネルから少数サンプルだけを乱択し、間引き処理を行うことで近似高速化する。そして、そのサンプリングのパターンを事前用意し、切替えることで効率化する。このフィルタの乱択化は、構造が単純なため高い並列性、拡張性を持つ。しかし、間引きのサンプリングパターンをランダムに選ぶため、結果が確率的に変動するデメリットがある。そこで、この確率的に動作する新たなエッジ保存平滑化フィルタの学術的な検討は必須である。加えてそれらの有効性を示す具体的なアプリケーションの実現も同様に重要である。

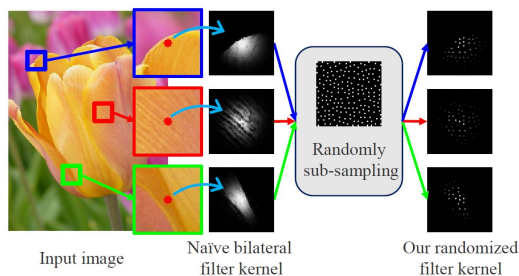


図1：乱択フィルタのパターンとフィルタ重み

3. 研究の方法

本研究では、エッジ保存平滑化フィルタの基本であるバイラテラルフィルタと高速なデノイジング方法である DCT デノイジングの乱択化アルゴリズムを主に検討する。また、それらの効率的な並列化・ベクトル化を行う実装方法の検討をし、それらを活用するアプリケーションを実装する。また、関連するエッジ保存平滑化フィルタの高速化アルゴリズムの研究も加えて行う。

乱択バイラテラルフィルタでは、最適なサンプリング方法の検討と乱択アルゴリズムであるモンテカルロ法とラスベガス法への拡張、効率的なベクトル演算実装を検討した。また、乱択フィルタ一般のための効率的なデータ再配置方法の検討を行った。

乱択 DCT デノイジングでは、効率的なランダム間引き方法や、周波数領域でのフィルタリング手法の検討、高効率な並列化実装方法を検討した。

アプリケーションでは、エッジ保存平滑化フィルタを利用した効率的な奥行き推定や、高速な文字認識アプリケーションの開発を行った。そのほか、ハイパースペクトル画像へのデノイジング手法の検討を行った。

その他エッジ保存平滑化フィルタでは、ガイドフィルタの高速化やボックスフィルタの高速化、決定的アルゴリズムの場合のバイラテラルフィルタの高速化を行った。

4. 研究成果

乱択バイラテラルフィルタ：

バイラテラルフィルタとは、画素ごとに重みの異なる2次元フィルタである。コンピュータビジョンに使う場合、このフィルタは大きな範囲で畳みこみを行う。その場合、畳みこみカーネルのサイズに依存して計算量が大きくなる。乱択アルゴリズムを用いた乱択バイラテラルフィルタでは、この畳みこみカーネル中で少数のサンプルをランダムに選択することで、計算量の大幅な削減をねらう。

サンプリングは、フィルタカーネルの重要度に応じて行った。図2にフィルタリングに重要なサンプルを表す確率密度関数を示す（上段：サンプル数が少ない場合、下段：多い場合。横軸は、フィルタ半径の大きさ）。フィルタリングパラメータには依存するが、中央のサンプルが重要であり、そのほかのサンプルは多少の大小はあるものの中央との重要度に比べるとその差は小さい。そこで、中央の点を必ずサンプルし、それ以外は均等かつできるだけサンプル間が等距離かつランダムになるように選択した。このサンプリング方法はポアソンディスクサンプリングを応用して行った。

また、ランダムにサンプルした値をどのような順序で畳みこむかで2種類の乱択アルゴリズムによるフィルタが構築可能であることが明らかになった。前者がモンテカルロ法

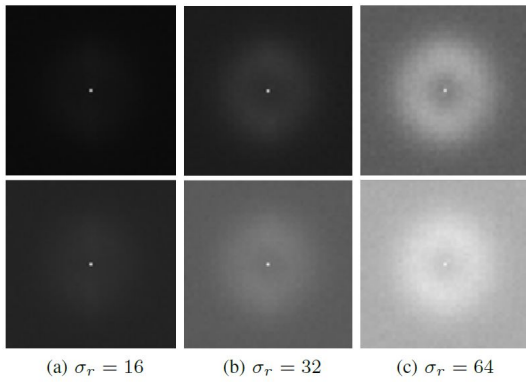


図 2：カーネルの重要度の確率密度関数

であり、後者がラスベガス法である。ラスベガス法は、フィルタカーネルを単純にランダムに間引いてフィルタリングするのみの高速で精度がある程度維持された手法である。ラスベガス法は、乱択されたサンプルを重要度に応じて重みづけして畳みこみ、何度も繰り返し畳みこむことで近似精度を高める。特にレイテンシの低い作業が要求される写真編集などにおいて、インタラクティブかつプログレッシブに計算結果を出力することが可能となる。

これらを近年の計算機アーキテクチャに必須であるベクトル演算環境で効率的に動作するように実装方法を複数検討した。このベクトル演算環境は、CPU では AVX や NEON、GPU では SIMT 環境での演算に相当する。図 3 に計算方法を示す。ベクトル計算環境では、通常、連続する複数の画素を同時に計算する理想的には、図 3 (a) 上段のように各画素別々の位置の画素が乱択されてフィルタされる。しかしその場合は、ベクトル演算用のデータロード命令が使えず計算効率が大幅に劣化する。そこで、まず、そのデータのロードをベクトルロードに切り替える実装を行った(図 3 (a) 下段)。しかしその実装はランダムシードが共有化され、ベクトル演算単位の計算結果に周期的な模様が発生する。そこで、この問題を緩和するべくベクトルロードをベクトル単位でシャッフルする実装を図(b)に示す。そのほかにも複数回、異なるベクトルロードを用いた計算結果をラスベガス法で結合することでさらに条件を緩和する方法(図 3 (c))も提案した。加えて、画像をブロック分割して多チャンネル画像へと再配置することでベクトルロードの周期性を隠蔽する手法を実装した(図 3 (d))。ただしこの方法は、分割数が増えると計算にオフセットが生じる。

フィルタした結果と正解画像と差分とのフーリエ変換後の振幅画像を図 4 に示す。薄い色ほど該当する周波数成分が多いことを示している。画像より、SSA で周波数応答が若干滑らかになり、OSA でさらに平準化し、RSA ではほぼ均等になっていることがわかる。つまりこれは、周期的な模様が削除されたことを示している。

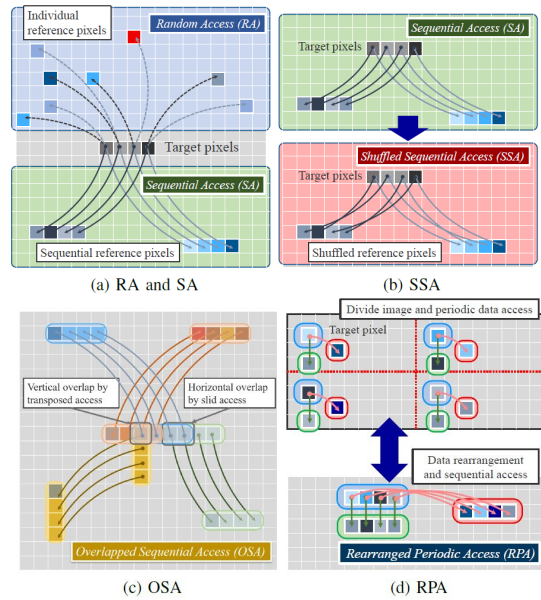


図 3：乱択フィルタのベクトル化実装

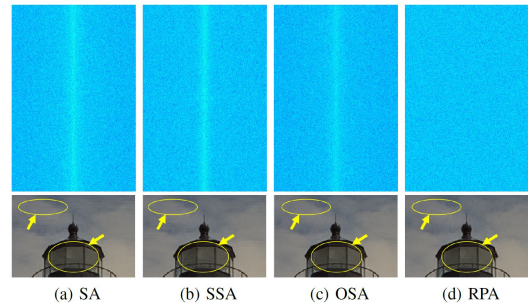


図 4：乱択バイラテラルフィルタの周波数

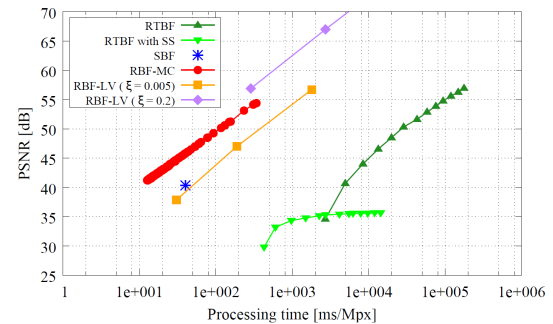


図 5：計算速度と近似精度のトレードオフ

乱択バイラテラルフィルタの近似精度と速度の関係の結果を図 5 に示す。図中 RTBF は従来まで高速に動作した定数時間アルゴリズム、SBF は本研究発表の一部であるセパラルアルゴリズム(発表論文等[10])、赤がモンテカルロ法でサンプル点の数を変えた場合、オレンジと紫がそれぞれ最小、最大のサンプル点で繰り返し回数を変えた場合である。なお、横軸は対数オーダーであることに注意されたい。図より、モンテカルロ法による手法が速度、精度のバランスが最良であることがわかる。また、近似精度を上げるためには、ラスベガス法が有効であることもわかる。これらの手法、従来の手法に比べて指数オーダーで計算速度の向上を達成することが出来たことになる。

その他、このデータ再配置の考え方を一般化し、バイラテラルフィルタを含む任意の FIR フィルタについてカーネルのデータを冗長に再配置するカーネルベクトル化を提案した。ランダムサンプリングした場合だけでなく、通常のフィルタリングの場合にも高速化に成功した。

これらの研究成果は、発表文献[2,4,11,17,19,23,25,29]で発表した

乱択 DCT デノイジング:

DCT デノイジングは、画像を冗長なパッチに区切り、パッチ単位で周波数領域のデノイズを行ってそのパッチを統合することでデノイジングする手法である。本研究では、冗長なパッチをランダムに間引くことと、パッチ単位の処理を精度維持したまま演算量を削減することで高速化した。

従来は画素単位あたりパッチの個数分だけさまざまな位置にシフトしたパッチを演算する必要がある。それをランダムに間引くことで性能の劣化を抑制しつつ高速化した。間引きには、乱択バイラテラルフィルタと同様にポアソンディスクサンプリングを用いることでノイズ量の偏りが生じないようにした(図6)。

パッチ処理の高速化では、DCT、閾値処理、逆 DCT 変換の処理を一括化したときに高効率な処理が実現できるように、JPEG 圧縮で用いられるポストスケール形 DCT である AAN 法を拡張し、一括処理することで乗算処理を削減した。また、演算には 1 次元 DCT を縦横 2 回適用するが、そのうちの 1 回は非冗長な場合も含めてすべて同一の計算となるためそれらの変換は事前に行い、計算結果を再利用することで全体の演算回数の削減を行った。

この DCT デノイジングはパッチ単位で並列が可能である。しかし、パッチの平均においては画素ごとに同期を取らなければコンフリクトが生じる。そこで、画像をブロックサイズ以上の大きさを持つ帯に分割し、偶数、奇数の帯の順に処理することでコンフリクトを抑制し、完全に並列化可能なアルゴリズムを構築した。また、DCT 処理はパッチごとにベクトル演算が可能である。そのとき、横方向への DCT 演算は、ベクトル演算の効率が低下する。それをパッチの転置処理を行うことでベクトル化効率を最大化した。また、DCT と逆 DCT が対に実行されることを利用して転置処理の総数を半減することに成功した。

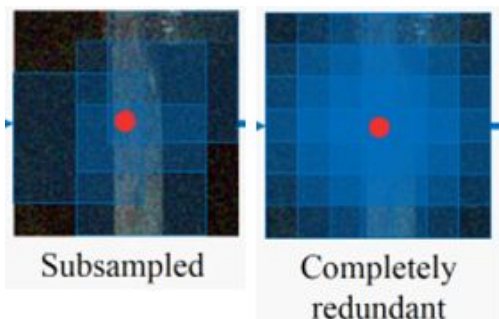


図 6: 冗長パッチのランダムサンプリング

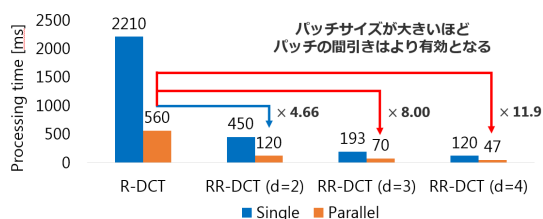


図 7: DCT デノイジングの計算時間

実験の結果を図 7 に示す。なお、16x16 のパッチサイズで 1024x1024 の画像を DCT デノイジングした結果である。R-DCT が従来の DCT デノイジング、RR-DCT が乱択化した DCT デノイジングである乱択 DCT デノイジングである。d はポアソンディスクサンプリング時の点間の最小距離であり大きいほど間引きが大きい。実験より、d を大きくするほど計算量が大きくなるのがわかる。また、並列化することで有効に並列化していることがわかる。なお計算機環境は Intel Core i73370K である。またこの時のデノイジング性能を表す PSNR の指標は、従来で 34.41 dB、d=2,3,4 の場合で 34.32,34.15,33.92 dB とわずかな劣化で大幅な高速化に成功した。

これらの研究成果は、発表文献[9,13,16,22,27,30]で発表した。

アプリケーション:

実現したアプリケーションとしては、デブスマップの高精度化にエッジ保存平滑化フィルタを用いることで高速に実現可能なもの(発表論文, [6,28,32])や、SfM による三次元復元[34]、文字認識の前処理にデノイジングを行ったもの(発表文献[1,21])、ハイパースペクトル画像のデノイジング((発表論文, [8,33]))がある。デモ展示(その他(4))やアプリケーションの講演[35]も行った。その他エッジ保存平滑化フィルタ: その他エッジ保存平滑化フィルタの高速化として、ガイドフィルタの高速化(発表文献[3,7,12,18,24])や決定的アルゴリズムのバイラテラルフィルタの高速化(発表文献[5,10,14,15,20,26,31])を行った。

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 2 件)

藤田秀, 草次良樹, 福嶋慶繁, "スペクトラルドメイントランスフォームフィルタによるハイパースペクトル画像の高効率ノイズ除去," 電子情報通信学会論文誌, vol. J99-D, no. 9, pp. 871-873, Sep. 2016. DOI: 10.14923/transinfj.20161EL0001

藤田秀, 中村将大, 松尾琢也, 福嶋慶繁, "デブスマップ精度改善フィルタのフィードバックによるコストボリュームステレオマッチング," 電子情報通信学会論文誌, vol. J99-D, no. 9, pp. 892-894, Sep. 2016. 査読有

[学会発表](計 35 件)

<国際会議>(すべて査読有)

- [1] Y. Maeda, N. Fukushima, and H. Matsuo, "Basic Study on Recognition of Seven-Segment LED Digits by Using Binary Template Matching," in Proc. International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT), Jan. 2017, Penang (Malaysia).
- [2] Y. Kusatsugu, M. Kimura, and N. Fukushima, "GPU Implementation of Randomized Bilateral Filter," in Proc. International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT), Jan. 2017, Penang (Malaysia).
- [3] M. Nakamura, and N. Fukushima, "Fast Implementation of Box Filtering," in Proc. International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT), Jan. 2017, Penang (Malaysia).
URL:http://fukushima.web.nitech.ac.jp/paper/2017_iwait_nakamura.pdf
- [4] S. Yamashita, and N. Fukushima, "Rearrangement of Filtering Kernel for Interactive Spatially Invariant FIR Filtering," in Proc. International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT), Jan. 2017, Penang (Malaysia).
- [5] K. Sugimoto, N. Fukushima, and S. Kamata, "Fast Bilateral Filter for Multichannel Images via Soft-assignment Coding," Proc. Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA), Dec. 2016, Cheju Island(Korea).
DOI: 10.1109/APSIPA.2016.7820813
- [6] N. Fukushima, K. Takeuchi, and A. Kojima, "Self-Similarity Matching with Predictive Linear Upsampling for Depth Map," in Proc. 3DTV Conference, July 2016, Hamburg (Germany).
DOI: 10.1109/3DTV.2016.7548889
- [7] S. Fujita and N. Fukushima, "High-Dimensional Guided Image Filtering," in Proc. International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP), Feb. 2016, Rome (Italy).
DOI: 10.5220/0005715100250032
- [8] S. Fujita and N. Fukushima, "Hyperspectral Gaussian filtering: Edge-Preserving Smoothing for Hyperspectral Image and Its Separable Acceleration," in Proc. International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM), Dec. 2015, Tokyo (Japan).
URL:http://fukushima.web.nitech.ac.jp/paper/2015_icam_fujita.pdf

- [9] S. Fujita, N. Fukushima, M. Kimura, and Y. Ishibashi, "Randomized Redundant DCT: Efficient Denoising by Using Random Subsampling of DCT Patches," in Proc. ACM SIGGRAPH Asia Technical Briefs, Nov. 2015, Hyogo (Japan).
DOI: 10.1145/2820903.2820923
- [10] N. Fukushima, S. Fujita, and Y. Ishibashi, "Switching dual kernels for separable edge-preserving filtering," in Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp. 1588-1592, Apr. 2015, Brisbane (Australia).
DOI: 10.1109/ICASSP.2015.7178238

<国内会議>(すべて査読無)

- [11] 草次良樹, 土井寛旦, 福嶋慶繁, "SIMD実装による乱択バイラテラルフィルタのための画像再配置法," 電子情報通信学会総合大会, Mar. 2017, 名城大学(愛知).
- [12] 中村将大, 前田慶博, 福嶋慶繁, "キャッシュ効率を考慮したガイドフィルタの高速化," 情報処理学会第 79 回全国大会, Mar. 2017, 名古屋大学(愛知).
- [13] 川崎雄基, 福嶋慶繁, "DCT デノイジングの高速化," 電子情報通信学会東海支部 卒論発表会, Mar. 2017, 名古屋大学(愛知).
- [14] 室岡芳樹, 福嶋慶繁, "クロマサブサンプリングによるジョイントフィルタの高速化," 電子情報通信学会東海支部 卒論発表会, Mar. 2017, 名古屋大学(愛知).
- [15] 渡邊光一郎, 福嶋慶繁, "多倍長実装による IIR 型 0(1)バイラテラルフィルタの解析" 電子情報通信学会東海支部 卒論発表会, Mar. 2017, 名古屋大学(愛知).
- [16] 中村健太, 福嶋慶繁, "DCT デノイジングの AAN 実装による乗算回数の最小化," 電子情報通信学会通信方式研究会(CS), Dec. 2016, 石川県地場産業復興センター(石川).
- [17] 草次良樹, 木村誠, 福嶋慶繁, "ダイバジェンスを抑制する GPU 実装による乱択バイラテラルフィルタの高速化," 第 14 回情報学ワークショップ(WiNF), Nov. 2016, 愛知県立大学(愛知).
- [18] 中村将大, 福嶋慶繁, "ガイドフィルタの高速化のための高効率なボックスフィルタ実装," 第 14 回情報学ワークショップ(WiNF), Nov. 2016, 愛知県立大学(愛知).
- [19] 山下頌太, 福嶋慶繁, "画像データのベクトル化によるインタラクティブ処理の高効率な SIMD 実装," 第 14 回情報学ワークショップ(WiNF), Nov. 2016, 愛知県立大学(愛知).
- [20] 福嶋慶繁, 杉本憲治郎, 鎌田清一郎, "

- 複素係数表現による再起型バイラテラルフィルタ," 画像符号化シンポジウム(PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム(IMPS), Nov. 2016, ラフォーレ修善寺(静岡).
- [21] 前田慶博, 福嶋慶繁, 松尾啓志, "バイナリテンプレートマッチングを用いた7セグメントLED文字認識の基礎検討," 画像符号化シンポジウム(PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム(IMPS), Nov. 2016, ラフォーレ修善寺(静岡).
- [22] 中村健太, 福嶋慶繁, "AAN実装によるDCTデノイズングの高速化," 画像符号化シンポジウム(PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム(IMPS), Nov. 2016, ラフォーレ修善寺(静岡).
- [23] 草次良樹, 木村誠, 福嶋慶繁, "乱択バイラテラルフィルタの効率的なGPU実装," 画像符号化シンポジウム(PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム(IMPS), Nov. 2016, ラフォーレ修善寺(静岡).
- [24] 中村将大, 福嶋慶繁, "キャッシュ効率を考慮したボックスフィルタ実装によるガイドフィルタの高速化," 画像符号化シンポジウム(PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム(IMPS), Nov. 2016, ラフォーレ修善寺(静岡).
- [25] 山下頌太, 福嶋慶繁, "インタラクティブなフィルタリング処理のための画像配置法," 画像符号化シンポジウム(PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム(IMPS), Nov. 2016, ラフォーレ修善寺(静岡).
- [26] 杉本憲治郎, 福嶋慶繁, 鎌田清一郎, "色クラスタに着目したカラー画像向けの効率的なバイラテラルフィルタ," 電子情報通信学会画像工学研究会(IE), Sep. 2016, 愛知県立大学(愛知). (IE賞)
- [27] 藤田秀, 福嶋慶繁, 木村誠, 高橋桂太, 藤井俊彰, "乱択アルゴリズムによる冗長DCTノイズ除去の高速化," 第19回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU), Aug. 2016, アクティシティ浜松(静岡).
- [28] 中村将大, 藤田秀, 松尾琢也, 福嶋慶繁, "フィードバックステレオマッチングによるデプス推定の高速化," 3次元画像コンファレンス, Jul. 2016, 関西大学(大阪).
- [29] 藤田秀, 木村誠, 福嶋慶繁, "乱択バイラテラルフィルタによる高速エッジ保持平滑化," 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), Jan. 2016, 大阪大学(大阪).
- [30] 藤田秀, 木村誠, 福嶋慶繁, "高効率デノイズングのための乱択冗長DCT," 電子情報通信学会通信方式研究会(CS), Dec. 2015, 神戸大学(兵庫).
- [31] 藤田秀, 福嶋慶繁, "複数参照画像を用いた高次元ガウシアンフィルタの定数時間アルゴリズム," 画像符号化シンポジウム(PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム(IMPS), Nov. 2015, ラフォーレ修善寺(静岡).
- [32] 中村将大, 藤田秀, 松尾琢也, 福嶋慶繁, "リファインメント画像のフィードバックによる高効率なステレオマッチング," 画像符号化シンポジウム(PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム(IMPS), Nov. 2015, ラフォーレ修善寺(静岡).
- [33] 草次良樹, 藤田秀, 福嶋慶繁, "スペクトラルドメイントランスフォームフィルタによるハイパースペクトル画像の高速平滑化," 画像符号化シンポジウム(PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム(IMPS), Nov. 2015, ラフォーレ修善寺(静岡).
- [34] 山下頌太, 福嶋慶繁, "SfMのための高効率映像符号化の基礎的検討," 画像符号化シンポジウム(PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム(IMPS), Nov. 2015, ラフォーレ修善寺(静岡).
- [35] 福嶋慶繁, "コンピュータショナルフォトグラフィ: 計算を前提とした新たなイメージング法," 第54回日本生体医工学大会 企画シンポジウム5: 神経科学と信号処理の邂逅, May 2015, 名古屋国際会議場(愛知).
- [図書](計0件)
[産業財産権]
出願状況(計0件)
取得状況(計0件)
[その他]
ホームページ等:
(1) 乱択DCTノイズのプロジェクトページ
<http://fukushima.web.nitech.ac.jp/lab/research/rrdct/>
(2) 乱択BFを含む高速エッジ保存平滑化フィルタに関するソースコードのページ
<https://github.com/norishigefukushima/0penCP>
発表:
(3) 福嶋慶繁, "画像処理ライブラリOpenCVで出来ること・できないこと", Design Solution Forum 2016.
<https://www.slideshare.net/FukushimaNorishige/opencv-67214568>
デモ展示:
(4) 福嶋慶繁, "乱数を使ったフィルタによる高速な画質改善" イノベーションジャパン2016.
6. 研究組織
(1) 研究代表者
福嶋 慶繁 (FUKUSHIMA, Norishige)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 80550508
(2) 研究協力者
松尾 琢也 (MATSUO, Takuya)
木村 誠 (KIMURA, Makoto)
竹内 広太 (Takeuchi, Kouta)