

令和 6 年 5 月 13 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03465

研究課題名(和文) 近似計算を伴う画像処理コンパイラの理論体系化

研究課題名(英文) Systematization of Theory in Approximated Compiler for Image Processing

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) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：当初計画では、間引きによる近似、色変換による近似といった単純ループ構造の近似をターゲットにして研究計画を立てていた。実施研究成果としては、より広範囲の画像処理をサポートしており、1) 近似画像処理アルゴリズム、2) ハードウェアオリエンテッドな高効率実装とそのプログラミング環境、3) 近似画像処理のための画質評価の研究の3つに分けて研究を行った。

1では、当初計画であるループ構造の間引きに加えて、周波数変換や多項式近似による処理削減、LUTによる近似の研究を行った。2では、ハードウェアを活用した関数近似やLUTによる置き換え、ループ構造と演算の最適化、3では、画質評価関数の高精度化の研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

画像処理は、自動運転、監視、ウェブ会議、写真撮影、マルチメディア放送など様々な産業で使われる応用範囲の広い研究分野である。この画像処理研究において、その精度は重要な要因の一つであるが、その精度を維持したまま高速化することも実用化にとって重要である。本研究は、高速化を実現するための近似を含めたプログラミング方法の研究である。本研究により、広い範囲の画像処理の近似方法が明らかになり計算量を削減する高速化手法が導入されるだけでなく、それをハードウェアアクセラレータを活用して実装するための研究や演算量を増やしてでも親和性を高める方法、その実装をサポートするプログラミング環境の研究が促進されている。

研究成果の概要(英文)：In the initial plan, the research plan targeted the approximation of simple loop structures such as approximation by thinning and approximation by color transformation. The results of the implementation research supported a wider range of image processing and were divided into three parts: 1) approximation image processing algorithms, 2) hardware-oriented high-efficiency implementation and its programming environment, and 3) image quality evaluation research for approximation image processing.

In addition to the original plan of loop structure thinning, frequency conversion, polynomial approximation for processing reduction, and LUT-based approximation were studied in 1); in 2) hardware-oriented function approximation, LUT-based replacement, and optimization of loop structures and operations; and in 3) improvement of image quality evaluation functions.

研究分野：画像処理

キーワード：近似画像処理プログラミング 並列画像処理 画像処理コンパイラ 近似画像処理 近似畳み込み ハードウェアアクセラレータ CPU画像処理プログラミング GPU画像処理プログラミング

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スマートフォン、監視カメラの普及や機械学習、IoT などの用途拡大により、画像情報の流通は加速的に増大している。一方で、その情報処理を支える計算機を支配するムーアの法則は終焉を迎えつつあり、計算機の高性能化へのフリーランチは、もはや期待できない。加えて、画像処理に対する要求も、省電力、高スループット、高精度と多様化する一方で、実装対象となるハードウェアも CPU、GPU、FPGA と多様化している。しかし、ソフトウェアを目的やハードウェア毎にチューニングすることには膨大なコストがかかる。

また、画像処理の研究で使われている多くの画像データの解像度は、市販のカメラの解像度と比べて小さい。例えば、スマートフォンは、 4000×3000 (12M) ピクセルの画像が撮れるのに対して、典型的な画像処理データセットは 512×512 (0.25M) ピクセルと 50 分の 1 程度しかない。つまり、処理対象となる画像情報の急速な巨大化も問題である。

これらの問題解決には、様々なハードウェアに対して適切なプログラムの最適化を行うだけでなく、大胆な近似や間引き計算を用い、速度と精度のトレードオフを取ることが重要である。そのために、専用プログラミング言語を設計することは有望な解決策である。この設計すべき新たな言語では、プログラムをアルゴリズム記述部とハードウェア記述部、速度精度トレードオフ記述部に分離する。このモジュール化により、プログラマはアルゴリズム設計に専念しながらも、最適化、速度調整を分けて考慮できる。加えて、コンパイラが推論することで、速度調整の自動化・最適化も視野に入る。このような、高解像度画像が適切に扱える手段が得られれば、様々な画像処理の性能が劇的に改善する可能性を持つ。しかし、この実現には、以下の核心をなす学術的「問い」を明らかにする必要がある。

- 近似なし計算と近似あり計算の画像処理が、コンパイラと言う機械的なシステムから見たときにアルゴリズム的に同一の画像処理と見なすことができる拘束条件とは何か？
- その拘束条件に従うときに許されるループ構造変換やデータ構造、近似方法とは何か？

2. 研究の目的

近年、Halide という画像処理プログラムをアルゴリズム記述部と、最適化のためのループ構造変換や並列・ベクトル計算方法を書いた計算順序部に分離して記述するプログラミング言語が提案されている。この分離というコンセプトにより、一度アルゴリズムを書けば、出力デバイスが CPU や GPU、FPGA と異なっても、プログラムの変更を一部に抑えられる。加えて、その計算順序部だけにコード最適化が絞られ、高速化も容易になる。そのため、一般的な画像処理の高速化から、深層学習ライブラリ (TVM や Tensor Comprehensions) の計算基盤まで広く使われている。この Halide は、計算順序を変えても数値計算結果が同一になるという制約下でコンパイラが計算順序を最適化する。一方、画像処理は、視覚的にほぼ同一な画像劣化を許容するといった面があり、画像符号化に代表される画像処理ではこの特性を積極的に活用する。しかし、Halide の数値計算の同一性で制約すると、この視覚特性を有効に活用することが出来ず、近年の大容量の画像情報を処理するには、その処理性能が足りない。

そこで本研究では、通常のコンパイラでは許されない劣化を許す「近似計算を考慮したプログラミング言語」を構築する。そのために、Halide における「数値計算結果が同一である」という最適化制約に代わる、「1. 近似計算を含む場合の計算の同一性を担保する制約」とは何かを明らかにし、その制約下で、「2. どこまで近似計算が扱えるのか」も明らかにし、それを、「3. 近似計算可能な画像処理専用プログラミング言語として実現」する。

3. 研究の方法

画像処理計算は、画像全体ループや、畳み込みなどの周辺操作ループ、色情報のループなどの多重ループから構成される。前回の基盤 B では、そのループ構造に応じて画像処理はいくつかの計算パターンに分けられることを明らかにしている。また、本課題の中核アイデアである汎用的な高速化は、周期的な間引き、ランダムな間引き、境界領域の間引きは、画像処理のループ構造の間引きとして定義できることも示している。図 1 に、その間引きパターン集を示す。画像処理は、各ループを全走査するフルサンプルが基本である。画像全体ループを周期間引きすれば、よく使われる画像縮小となる。ランダム間引きは、画像の平均値やヒストグラムを求める計算パターンの中で画像全体ループに適用すると効果的となり、周波数情報が重要な畳み込みの場合は、周辺操作ループに適用すると効果的である。境界領域間引きは、画像をブロック単位計算することでキャッシュ効率を向上させるときの境界処理の中で効果を発揮する。加えて Region of Interest (ROI) を使った処理にも対応する。これらの間引きパターンはカラー画像の場合には、色変換を交え、必要に応じて切り替えられる。

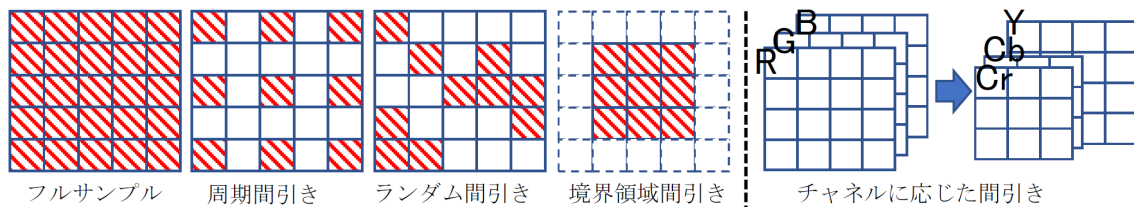


図1：各間引きパターンと、多チャンネルの場合のチャンネルごとの間引きの様子

何を：～仮説，根拠，目的～

「ループ構造の間引きだけなら，コンパイラから見た計算結果の同一性を担保できるのではないか？」という仮説の元，どの計算パターン，どの間引きパターン，どのタイミング，どれだけの量の間引きなら同一と見なせるのかを検証する。

本研究では，画像処理プログラムに現れるループ構造を間引くだけでなく，その間引きが効果的に働くように，ループ順序やデータ構造も自動的に変更する必要がある。本研究にアナロジーのある研究分野として，MPEGなどの符号化がある。PSNRやSSIMといった画質評価指標が高くなるように，様々な処理を自動で切り替えて最適化することで，少ない符号量で高い映像品質を得られる。他にも深層学習による画像生成（GAN）では，SSIMを基準に，異なる画像を出力するネットワークを自動生成する。つまり，画質評価指標を基準にして，自動で間引き処理やループ構造を決定することは有望な手段であることを示唆している。

そのため，近似画像処理コンパイラの実現を目的として，第1段階で，各処理のループの間引き前後で処理の精度評価機能を持つように言語拡張を行い，一つ一つ近似なし計算と比較しながらコンパイルする。しかし，毎回の比較は非常にコンパイル時間が長くなる。そこで第2段階で，第1段階で得られた様々の処理の統計情報と計算パターンから，有効な間引きループを演繹的に導出する。そして第3段階でプログラミング言語として完成を目指す。

どのように，どこまで：～具体的な研究項目～

「アセンブリではなく，Halideコードを出力するプログラミング言語として実装し，段階的に構築することで，研究の学術的問いを明らかにするとともに，実用的な成果を目指す。」

これは，Halideの制約では記述不能な計算順序も，アルゴリズム部に含めることで目的のプログラムが書けると言う我々の成果によって可能となった手段である。これによりHalideが持つ機能も活用できる。ただし，アルゴリズム部に書いた処理は純粋なHalideでは最適化対象にならず，拡張が必要となる。

- 【第1段階】1つのクラスに，1つの任意の多重ループ構造を抽象的に記述可能であり，ループ構造も任意に入れ替え可能である
- 【第1段階】各クラス中のループ走査は，周期的，ランダム，境界領域の間引きパターンに対応するループ構造間引き構造を持つ
- 【第1段階】画像処理のメインフローの前の入力，出力アウトプットのデータ構造変換や色変換を可能にする
- 【第1段階】各クラスは，間引きのない処理との画質評価機能を持つ（前田 2021/9～2022/3）。そして，可能な間引きパターンの検討を行う
- 【第2段階】可能な間引きパターンの推論機能を作る。この推論可能性から，画像処理コンパイラにとっての制約とは何かを探索する。
- 【第2段階】高速な画質評価機能を作成。上記がうまくいかない場合のバックアップ。
- 【第3段階】複数クラスの処理順序の木構造生成機能を作成し，汎用的な画像処理を書けるようにする。また，計算順序の最適化も可能にする。この構築と共に要素技術の体系化と近似コンパイラとしての学術的な基盤確立を目指す。

4. 研究成果

当初計画では，間引きによる近似，色変換による近似といった単純ループ構造の近似をターゲットにして研究計画を立てていた。実施研究成果としては，より広範囲の画像処理をサポートしており，1) 近似画像処理アルゴリズム，2) ハードウェアオリエンテッドな高効率実装とそのプログラミング環境，3) 近似画像処理のための画質評価の研究の3つに分けて研究を行った。

1) 近似画像処理アルゴリズムの研究

当初計画であるループ構造の削減として，色空間の色変換による次元圧縮[1]やPCAによる次元圧縮[2]，ループ構造を含むタイリングとPCA[3]の研究を行った。また，位置空間の削減として乱択化による処理範囲の削減[4]，畳み込みの次元圧縮を含むIM2COLのような事前ループ構造[5]，変換畳み込み半径の削減[6][7]（PCSJIMPS ベストポスター賞，IE賞を受賞）の研究を行った。また，近似手法として，フーリエ級数展開による局所ラプラシアンピラミッド（2022年度の年間論文アクセス数2位），ウェーブレット変換[9]，バイラテラルフィルタ[10]の研究を行った。その他にも，区分線形近似によるエッジ保存型DoG処理[11]や，その一般化手法[12]の研究を行った。また，LUTによる人気曲線の近似も行った[13]。これらの研究の応用事例として，応用としてのRetinexに基づく低照度画像の加工も行っている[14]。

2) ハードウェアオリエンテッドな高効率実装およびそのプログラミング環境の研究

近似計算は、ハードウェアアクセラレータとの親和性が必要不可欠である。数値計算を近似・置換する研究としてステレオマッチングによる距離変換の高速化[15][16] (IE 賞) や、ガウス関数の近似 SIMD 実装の研究を行った[17] (IE 賞)。また畳み込みループ構造のアクセラレータ向け最適化も行っており、GPU テンソルコア向け[18]、CPU 整数演算向け[19]、ウェブアセンブリ向け[20]の研究を行った。また、畳み込みと近似手法を合わせた研究として、GPU 向けの最良多項式の研究も行った。これは、GPU の演算局所性を考慮したときに冗長計算したほうが速くなる特性を利用したものである[21]。また、計算再利用も重要であり、計算結果の LUT 格納方法の研究も行っている。時間変動する畳み込み重みのための近似 LUT ベクトル演算[22]や短時間 DCT のための推定パラメータの LUT 近似[23]、エッジを考慮したウェーブレット変換のベクトル演算向け LUT 格納方法[24]の研究である。また、プログラミング言語として記述可能にした研究として、アップサンプリングを Halide のオートスケジューラを用いて動的に調整できるようにした研究[25]、短時間 DCT 変換を用いた畳み込み専用のプログラミング言語の作成[26]、画像処理時の型変換を任意に記述できるようにした Halide 拡張[27]の研究がある。またループ構造のスキップに関しては、専用言語として構築している[4]。これらの研究は、一般的な CPU、GPU といったハードウェアの研究から、量子計算機を含めた研究[28]に発展させている段階である。

3) 近似画像処理のための画質評価の研究

近似処理を含む高速化のためには、その出力結果の確認のための画質評価の研究が必要不可欠である。しかしながら、高品質な画像の劣化を測ること、また高速かつ高精度な画質評価を行うことは未だ未解決問題の一つである。そこでまず、従来から多く使われてきている評価指標である SSIM の高速化アルゴリズムの研究とその高精度かのためのパラメータ最適化の研究を行った[29]。また、近似高速化専用の評価を行うためにバイラテラルフィルタの近似に特化した画質評価の研究を行った[30]。特に JND と呼ばれる高品質の感知に特化した指標を用いて画質評価を行っている。またその有効性を検証するため符号化劣化のための JND を用いた画質評価[31]へ拡張している。

上記の近似高速化の研究成果は、招待講演[32][33]としても発表している。また以下の参考文献中のいくつかの研究成果である Project と書かれたリンクでは、該当論文のソースコードやデータセットを公開している。

参考文献

- [1] Y. Maeda, N. Fukushima, and T. Hamamoto, "Color Transformation for Compressive Computing in Image Filtering," in Proc. Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), Dec. 2021.
- [2] K. Ishikawa, S. Oishi and N. Fukushima, "Principal Component Analysis for Accelerating Color Bilateral Filtering," in Proc. International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT), Jan. 2023.
- [3] S. Oishi and N. Fukushima, "Tiling and PCA Strategy for Clustering-Based High-Dimensional Gaussian Filtering," SN Computer Science, 5, 40, Nov. 2023. [\[Project\]](#)
- [4] H. Takagi and N. Fukushima, "Domain Specific Description in Halide for Randomized Image Convolution," in Proc. Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), Dec. 2021.
- [5] 福嶋慶繁, 前田慶博, "ローカルパッチ特徴の高速次元圧縮," PCSJ/IMPS, Nov. 2021.
- [6] 福嶋慶繁, "ロングテールを持つカーネルの正確な畳み込み," PCSJ/IMPS, Nov. 2021.
- [7] 福嶋慶繁, 亀井宏和, 野上遥貴, 長縄侑樹, 金高俊士, 角谷勇仁, 石川加寿也, 大石創, "ロングテールなカーネル重みを持つ畳み込みの高効率化," 電子情報通信学会画像工学研究会 (IE), Mar. 2022.
- [8] Y. Sumiya, T. Otsuka, Y. Maeda, and N. Fukushima, "Gaussian Fourier Pyramid for Local Laplacian Filter," IEEE Signal Processing Letters (SPL), vol. 29, pp. 11-15, 2022. [\[Project\]](#)
- [9] 林晃平, 前田慶博, 福嶋慶繁, "局所コントラスト変換によるエッジ保存型ウェーブレット変換," 信号処理シンポジウム, Dec. 2022.
- [10] 石川加寿也, 角谷勇仁, 福嶋慶繁, 杉本憲治郎, 鎌田清一郎, "離散フーリエ変換によるバイラテラルフィルタの近似高速化," 電子情報通信学会画像工学研究会 (IE), May 2022.
- [11] K. Hayahi, Y. Maeda, and N. Fukushima, "Local Contrast Enhancement with Multiscale Filtering," in Proc. Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), Oct. 2023.
- [12] H. Nogami, Y. Kanetaka, Y. Naganawa, Y. Maeda, and N. Fukushima, "Decomposed Multilateral Filtering for Accelerating Filtering with Multiple Guidance Images," Sensors, vol. 24, no. 2, 633, 2024. [\[Project\]](#)

- [13] T. Tsubokawa, H. Tajima, Y. Maeda, and N. Fukushima, "Local Look-Up Table Upsampling for Accelerating Image Processing," *Multimedia Tools and Applications*, Aug. 2023. [\[Project\]](#)
- [14] S. Oishi and N. Fukushima, "Retinex-Based Relighting for Night Photography," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 3, 1719, Jan. 2023. [\[Project\]](#)
- [15] J. Takeda and N. Fukushima, "Poisson Disk Sampling with Randomized Satellite Points for Projected Texture Stereo," *Optics Continuum*, vol. 1, issue 5, pp. 974-988, 2022. [\[Project\]](#)
- [16] 武田淳, 福嶋慶繁, "ポアソンディスクサンプリングと乱択サテライトポイントによるテクスチャ投影型ステレオカメラ," 電子情報通信学会画像工学研究会 (IE), Feb. 2022.
- [17] 小島史也, 前田慶博, 福嶋慶繁, "ガウス分布重み計算の近似によるバイラテラルフィルタの高速化," 電子情報通信学会画像工学研究会 (IE), Jan. 2022.
- [18] T. Kondo, Y. Maeda, and N. Fukushima, "Accelerating Finite Impulse Response Filtering Using Tensor Cores," in *Proc. Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*, Dec. 2021.
- [19] 近藤拓海, 前田慶博, 福嶋慶繁, "CPU マイクロアーキテクチャに応じた整数 2 次元畳み込みの効率化," *PCSJ/IMPS*, Nov. 2022.
- [20] S. Oishi, K. Ishikawa, H. Nogami and N. Fukushima, "Performance evaluation of image convolution with WebAssembly," in *Proc. International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT)*, Jan. 2023.
- [21] 間瀬和哉, 福嶋慶繁, "混合次元削減および最良多項式近似によるバイラテラルフィルタの近似," *PCSJ/IMPS*, Nov. 2021.
- [22] Y. Naganawa, H. Kamei, Y. Kanetaka, N. Haruki, Y. Maeda, and N. Fukushima, "SIMD-Constrained Lookup Table for Accelerating Variable-Weighted Convolution on x86/64 CPUs," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 15800-15819, 2024. [\[Project\]](#)
- [23] K. Ishikawa, Y. Sumiya, and N. Fukushima, "Polynomial Fitting for Period Prediction in Sliding-DCT-Based Filtering," in *Proc. International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT)*, Jan. 2022.
- [24] Y. Sumiya, H. Kamei, K. Ishikawa, and N. Fukushima, "Vectorized Computing for Edge-Avoiding Wavelet," in *Proc. International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT)*, Jan. 2022.
- [25] H. Nogami, S. Oishi, T. Sasaki, Y. Maeda and N. Fukushima, "Performance Evaluation of Halide Auto-Scheduler with Directional Cubic Convolution Interpolation," in *Proc. International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT)*, Jan. 2023.
- [26] Y. Kanetaka, H. Nogami, Y. Naganawa, and N. Fukushima, "Domain Specific Language for Type Casting in Image Processing," in *Proc. International Conference on Computer Graphics Theory and Applications (GRAPP)*, Feb. 2024.
- [27] Y. Kanetaka, H. Takagi, Y. Maeda, and N. Fukushima, "SlidingConv: Domain-Specific Description of Sliding Discrete Cosine Transform Convolution for Halide," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 7563-7583, 2024. [\[Project\]](#)
- [28] A. Hasegawa, Y. Maeda, and N. Fukushima, "Evaluation of Quantum Image Processing in CUDA-Based Simulation," in *Proc. SPIE, Future Sensing Technologies*, Apr. 2024.
- [29] 大石創, 福嶋慶繁, "Structural Similarity Index のパラメータ最適化による再定式化," 電子情報通信学会信号処理研究会 (SIP), Aug. 2022.
- [30] S. Oishi, Y. Maeda, and N. Fukushima, "Just-Noticeable Difference in PSNR of Approximated Bilateral Filtering," *International Workshop on Image Media Quality and its Applications (IMQA)*, 2022
- [31] S. Honda, Y. Maeda, and N. Fukushima, "Dataset of Subjective Assessment for Visually Near-Lossless Image Coding based on Just Noticeable Difference," in *Proc. International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)*, June 2023. [\[Project\]](#)
- [32] 福嶋慶繁, "特別招待講演 ハードウェアを活用した高速な高能率画像処理," 電子情報通信学会コミュニケーションシステム研究会 (CS), 2023.
- [33] 福嶋慶繁, "招待講演 機械学習の中間言語表現とそのハードウェアアクセラレータ," 電子情報通信学会総合大会, 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Oishi Sou, Fukushima Norishige	4. 巻 13
2. 論文標題 Retinex-Based Relighting for Night Photography	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1719 ~ 1719
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app13031719	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yuto Sumiya, Tomoki Otsuka, Yoshihiro Maeda, and Norishige Fukushima	4. 巻 29
2. 論文標題 Gaussian Fourier Pyramid for Local Laplacian Filter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Signal Processing Letters	6. 最初と最後の頁 11-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LSP.2021.3121198	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Jun Takeda and Norishige Fukushima	4. 巻 1
2. 論文標題 Poisson disk sampling with randomized satellite points for projected texture stereo	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Continuum	6. 最初と最後の頁 974-988
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OPTCON.451197	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tsubokawa Teppei, Tajima Hiroshi, Maeda Yoshihiro, Fukushima Norishige	4. 巻 83
2. 論文標題 Local look-up table upsampling for accelerating image processing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Multimedia Tools and Applications	6. 最初と最後の頁 26131 ~ 26158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11042-023-16405-7	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Oishi Sou, Fukushima Norishige	4. 巻 5
2. 論文標題 Tiling and PCA Strategy for Clustering-Based High-Dimensional Gaussian Filtering	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 SN Computer Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42979-023-02319-6	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanetaka Yamato, Takagi Hiroyasu, Maeda Yoshihiro, Fukushima Norishige	4. 巻 12
2. 論文標題 SlidingConv: Domain-Specific Description of Sliding Discrete Cosine Transform Convolution for Halide	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 7563 ~ 7583
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2023.3345660	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Naganawa Yuki, Kamei Hirokazu, Kanetaka Yamato, Nogami Haruki, Maeda Yoshihiro, Fukushima Norishige	4. 巻 12
2. 論文標題 SIMD-Constrained Lookup Table for Accelerating Variable-Weighted Convolution on x86/64 CPUs	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 15800 ~ 15819
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2024.3354720	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nogami Haruki, Kanetaka Yamato, Naganawa Yuki, Maeda Yoshihiro, Fukushima Norishige	4. 巻 24
2. 論文標題 Decomposed Multilateral Filtering for Accelerating Filtering with Multiple Guidance Images	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 633 ~ 633
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s24020633	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計70件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 16件）

1. 発表者名 浅村颯士, 長縄侑樹, 福島慶繁
2. 発表標題 カメラキャリブレーションのためのガウスサークルを用いた円形パターン描画方法
3. 学会等名 画像センシングシンポジウム (SS11)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 長谷川滉, 前田慶博, 福島慶繁
2. 発表標題 CUDA ベースのシミュレーションにおける量子画像処理の評価
3. 学会等名 画像センシングシンポジウム (SS11)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 浅村颯士, 福島慶繁
2. 発表標題 カメラキャリブレーションのためのガウスサークルを用いた円形パターン描画方法
3. 学会等名 電子情報通信学会東海支部卒業研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 長谷川滉, 福島慶繁
2. 発表標題 量子計算機シミュレーションにおける量子画像表現に関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会東海支部卒業研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 長縄侑樹, 亀井宏和, 福島慶繁
2. 発表標題 SIMDレジスタを用いたLUTによる可変重み畳み込みの高速化
3. 学会等名 電子情報通信学会画像工学研究会 (IE)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 福島慶繁
2. 発表標題 ハードウェアを活用した高速な高能率画像処理
3. 学会等名 電子情報通信学会コミュニケーションシステム研究会 (CS) (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 亀井宏和, 福島慶繁
2. 発表標題 一般化ガウス関数の近似計算による性能評価
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 林晃平, 前田慶博, 福島慶繁
2. 発表標題 値域フーリエ級数展開画像群のウェーブレット変換による局所コントラスト操作
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 本田宗一朗, 福嶋慶繁
2. 発表標題 グレイスケール画像のニアロスレス圧縮に着目したJust noticeable differenceに基づく主観評価データセット
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長縄侑樹, 亀井宏和, 福嶋慶繁
2. 発表標題 可変畳み込み演算の高速化のためのSIMD高速LUT
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野上遥貴, 前田慶博, 福嶋慶繁
2. 発表標題 Tensor Coreを用いたガウシアンフィルタの高効率実装
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金高俊士, 福嶋慶繁
2. 発表標題 短時間DFTを用いた畳み込みにおける演算数削減による高速化
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 本田宗一朗, 福島慶繁
2. 発表標題 低圧縮画像に着目した二値評価でのデータセットの作成
3. 学会等名 第22回情報科学技術フォーラム (FIT)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Asamura, Y. Naganawa, and N. Fukushima
2. 発表標題 Fast drawing method of circular patterns based on Gaussian circles for camera calibration
3. 学会等名 SPIE, Future Sensing Technologies (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 A. Hasegawa, Y. Maeda, and N. Fukushima
2. 発表標題 Evaluation of quantum image processing in CUDA-based simulation
3. 学会等名 SPIE, Future Sensing Technologies (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Y. Kanetaka, H. Nogami, Y. Naganawa, and N. Fukushima
2. 発表標題 Domain Specific Language for Type Casting in Image Processing
3. 学会等名 International Conference on Computer Graphics Theory and Applications (GRAPP) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Y. Naganawa, H. Nogami, Y. Kanetaka, and N. Fukushima
2. 発表標題 Automation of Camera Calibration Using Display with Virtual Patterns
3. 学会等名 International Conference on Robotics, Computer Vision and Intelligent Systems (ROBOVIS) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 K. Hayashi, Y. Maeda, and N. Fukushima
2. 発表標題 Local Contrast Enhancement with Multiscale Filtering
3. 学会等名 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Honda, Y. Maeda, and N. Fukushima
2. 発表標題 Dataset of Subjective Assessment for Visually Near-Lossless Image Coding based on Just Noticeable Difference
3. 学会等名 International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金高俊士, 福嶋慶繁
2. 発表標題 Halideを用いたDCTに基づく定数時間フィルタの効率的な記述
3. 学会等名 電子情報通信学会東海支部卒業研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野上遥貴, 福島慶繁
2. 発表標題 マルチスケール画像処理における複雑なデータアクセスパターンの効率的な自動生成
3. 学会等名 電子情報通信学会東海支部卒業研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長縄侑樹, 福島慶繁
2. 発表標題 ディスプレイを用いた仮想パターンによるカメラキャリブレーションの自動化
3. 学会等名 電子情報通信学会東海支部卒業研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大石創, 福島慶繁
2. 発表標題 Structural Similarity Indexのパラメータ最適化による再定式化
3. 学会等名 電子情報通信学会信号処理研究会 (SIP)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長縄侑樹, 福島慶繁
2. 発表標題 仮想パターンを使用したディスプレイ投影によるカメラキャリブレーション
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福嶋慶繁
2. 発表標題 サンプリング密度による畳み込みの空間重みの代替表現
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川加寿也 , 大石創, 福嶋慶繁
2. 発表標題 カラーバイラテラルフィルタリングを高速化するための主成分分析
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤拓海, 前田慶博, 福嶋慶繁
2. 発表標題 CPUマイクロアーキテクチャに応じた整数2次元畳み込みの高効率ベクトル化
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小島史也, 前田慶博, 福嶋慶繁
2. 発表標題 サブ/スーパーガウシアン分布関数の近似高速化計算
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大石創, 前田慶博, 福嶋慶繁
2. 発表標題 近似バイラテラルフィルタのJust-Noticeable Differenceに基づく画質評価指標
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金高俊士, 前田 慶博, 福嶋 慶繁
2. 発表標題 スライディング周波数変換を用いた畳み込みフィルタのドメイン固有言語
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野上遥貴, 福嶋慶繁
2. 発表標題 方向性Cubic補間を利用したHalideオートスケジューラの性能評価
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林晃平, 福嶋慶繁, 前田慶博
2. 発表標題 局所コントラスト変換によるウェーブレット変換
3. 学会等名 信号処理シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野上遥貴, 福嶋慶繁
2. 発表標題 方向性Cubic 補間における高速化手法の性能評価
3. 学会等名 電子情報通信学会画像工学研究会 (IE)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金高倭士, 前田慶博, 福嶋慶繁
2. 発表標題 Sliding DFTを用いた畳み込みフィルタの効率的な記述
3. 学会等名 電子情報通信学会画像工学研究会 (IE)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Haruki Nogami, Sou Oishi, Tomohiro Sasaki, Yoshihiro Maeda, and Norishige Fukushima
2. 発表標題 Performance Evaluation of Halide Auto-Scheduler with Directional Cubic Convolution Interpolation
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuya Ishikawa, Sou Oishi, and Norishige Fukushima
2. 発表標題 Principal Component Analysis for Accelerating Color Bilateral Filtering
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sou Oishi, Haruki Nogami, Kazuya Ishikawa, and Norishige Fukushima
2. 発表標題 Performance Evaluation of Image Convolution with WebAssembly
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yamato Kanetaka, Yoshihiro Maeda, and Norishige Fukushima
2. 発表標題 Basic Study on Domain Specific Description of Convolution with Sliding DFT
3. 学会等名 International Workshop on Image Sensors and Imaging Systems (IWISS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福島慶繁
2. 発表標題 機械学習の中間言語表現とそのハードウェアアクセラレータ
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金高俊士, 前田慶博, 福島慶繁
2. 発表標題 短時間フーリエ変換による高速な広範囲畳み込みのドメイン固有言語表現
3. 学会等名 画像センシングシンポジウム (SSI1)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長縄侑樹, 福島慶繁
2. 発表標題 仮想パターンを使用したディスプレイ投影によるカメラキャリブレーション
3. 学会等名 画像センシングシンポジウム (SSI)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野上遥貴, 福島慶繁
2. 発表標題 方向性Cubic補間による画像アップスケーリングの高効率実装
3. 学会等名 画像センシングシンポジウム (SSI)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 本田宗一朗, 前田慶博, 福島慶繁
2. 発表標題 丁度可知差異によるニアロスレス圧縮画像の画質評価
3. 学会等名 電子情報通信学会画像工学研究会 (IE)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 林晃平, 前田慶博, 福島慶繁
2. 発表標題 局所コントラスト変換画像のウェーブレット変換によるエッジを考慮したマルチスケール処理
3. 学会等名 電子情報通信学会画像工学研究会 (IE)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 本田宗一朗, 福島慶繁
2. 発表標題 符号化劣化のJust-Noticeable Differenceに基づいた画質評価
3. 学会等名 電子情報通信学会東海支部 卒論発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 ノグチジオゴ, 福島慶繁
2. 発表標題 重み再割り当てによるロングテール重みをもつ円形カーネルの正確な畳み込み
3. 学会等名 電子情報通信学会東海支部 卒論発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 林晃平, 福島慶繁
2. 発表標題 フーリエ級数展開を用いた局所コントラスト変換によるエッジ保存型ウェーブレット変換
3. 学会等名 電子情報通信学会東海支部卒論発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sou Oishi, Norishige Fukushima
2. 発表標題 Clustering-Based Acceleration for High-Dimensional Gaussian Filtering
3. 学会等名 International Conference on Signal Processing and Multimedia Applications(SIGMAP) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大石創, 前田慶博, 福島慶繁
2. 発表標題 バイラテラルフィルタの近似誤差のJust-Noticeable Difference
3. 学会等名 電子情報通信学会画像工学研究会 (IE)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川加寿也, 角谷勇仁, 福島慶繁, 杉本憲治郎, 鎌田清一郎
2. 発表標題 離散フーリエ変換によるバイラテラルフィルタの近似高速化
3. 学会等名 電子情報通信学会画像工学研究会 (IE)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福島慶繁, 亀井宏和, 野上遥貴, 長縄侑樹, 金高優士, 角谷勇仁, 石川加寿也, 大石 創
2. 発表標題 ロングテールなカーネル重みを持つ畳み込みの効率化
3. 学会等名 電子情報通信学会画像工学研究会 (IE)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武田淳, 福島慶繁
2. 発表標題 ポアソンディスクサンプリングと乱択サテライトポイントによるテクスチャ投影型ステレオカメラ
3. 学会等名 電子情報通信学会画像工学研究会 (IE)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小島史也, 前田慶博, 福嶋慶繁
2. 発表標題 ガウス分布重み計算の近似によるバイラテラルフィルタの高速化
3. 学会等名 電子情報通信学会画像工学研究会 (IE)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuto Sumiya, Hirokazu Kamei, Kazuya Ishikawa, Norishige Fukushima
2. 発表標題 Vectorized Computing for Edge-Avoiding Wavelet
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuya Ishikawa, Yuto Sumiya, Norishige Fukushima
2. 発表標題 Polynomial Fitting for Period Prediction in Sliding-DCT-Based Filtering
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshihiro Maeda, Norishige Fukushima, and Takayuki Hamamoto
2. 発表標題 Color Transformation for Compressive Computing in Image Filtering
3. 学会等名 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Kondo, Yoshihiro Maeda, and Norishige Fukushima
2. 発表標題 Accelerating Finite Impulse Response Filtering Using Tensor Cores
3. 学会等名 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroyasu Takagi and Norishige Fukushima
2. 発表標題 Domain Specific Description in Halide for Randomized Image Convolution
3. 学会等名 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 角谷勇仁, 大塚友貴, 前田慶博, 福嶋慶繁
2. 発表標題 ガウシアンフーリエピラミッド～ローカルラプラシアンフィルタの高速化～
3. 学会等名 電子情報通信学会画像工学研究会 (IE)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 間瀬和哉, 福嶋慶繁
2. 発表標題 混合次元削減および最良多項式近似によるバイラテラルフィルタの近似
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福島慶繁
2. 発表標題 ロングテールを持つカーネルの正確な畳み込み
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大石創, 福島慶繁
2. 発表標題 固有値分解とクラスタリングによる高次元ガウシアンフィルタの高速化
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川加寿也, 角谷勇仁, 福島慶繁
2. 発表標題 離散フーリエ変換によるバイラテラルフィルタの高精度化と高速化
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高木博康, 福島慶繁
2. 発表標題 畳み込み乱択化のためのHalideによるドメイン固有な記述
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近藤拓海, 前田慶博, 福嶋慶繁
2. 発表標題 Tensor CoreによるFIRフィルタの高速化
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小島史也, 福嶋慶繁, 前田慶博
2. 発表標題 バイラテラルフィルタのガウス分布重み計算の近似高速化
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李思語, 福嶋慶繁
2. 発表標題 SSIMの高速化計算と関連するパラメータの最適化
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 角谷勇仁, 大塚友貴, 前田慶博, 福嶋慶繁
2. 発表標題 フーリエ級数展開を用いたLocal Laplacian Filterの高速化及びParameter-adaptive拡張
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福嶋慶繁, 前田慶博
2. 発表標題 ローカルバッチ特徴の高速次元圧縮
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大石創, 福嶋慶繁
2. 発表標題 クラスタリングに基づく高次元ガウシアンフィルタの高速化
3. 学会等名 電気電子情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

SlidingConv https://fukushimalab.github.io/SlidingConv/ SIMD-Constrained Lookup Table for Accelerating Variable-Weighted Convolution on x86/64 CPUs https://fukushimalab.github.io/registerLUT4conv/ Decomposed Multilateral Filtering for Accelerating Filtering with Multiple Guidance Images https://fukushimalab.github.io/dmf/ Local Look-Up Table Upsampling for Accelerating Image Processing https://fukushimalab.github.io/LLF/ MIDD: Meikoudai Image Distortion Dataset https://norishigefukushima.github.io/iqanearlossless/ Relighting Night Photography https://norishigefukushima.github.io/RelightingUpNightPhotography/ TilingPCA4CHDGF https://norishigefukushima.github.io/TilingPCA4CHDGF/ GaussianFourierPyramid https://norishigefukushima.github.io/GaussianFourierPyramid/ プロジェクトページ PDSRSP https://norishigefukushima.github.io/PDSRSP_ProjectedTextureStereo/ OpenCP: MultiScaleFilter https://github.com/norishigefukushima/OpenCP/tree/master/SpatialFilter

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	前田 慶博 (Maeda Yoshihiro) (80843375)	東京理科大学・工学部電気工学科・講師 (32660)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	杉本 憲治郎 (Sugimoto Kenjiro)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 APSIPA ASC 2021 Special Session High-Performance Image Processing	開催年 2021年～2021年
---	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------