

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K11351

研究課題名(和文) 画像復元処理における局所領域ごとの逆問題解法および特異値分解の高効率計算法の開発

研究課題名(英文) Development of high-efficiency calculation method for solving inverse problem and singular value decomposition for each local area in image restoration processing

研究代表者

白井 啓一郎 (Shirai, Keiichiro)

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：00447723

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：画像信号処理において現れる「小規模ではあるが、膨大な量の特異値分解」を短時間で効率良く計算する方法について開発し、その成果を国内研究会および国際ジャーナルにおいて発表した。ある画素で得られた特異値分解結果を、周辺の画素において利用する方法である。本手法をノイズ除去法(ASTV: Arranged Structure Tensor Total Variation)に適用した場合、元々の実行時間を100%として、本手法を用いて計算効率化および並列計算を行う場合の実行時間は5%まで短縮された。多目的に用いられるGuided Image Filterへの適用においても、20%までの短縮を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

画像信号処理において、特異値分解は、画像中で繰り返されるパターンや、カラー画像の各色間の相関を考慮する際に用いられ、これらの保護や強調を目的とする際に、その計算過程に現れる。2010年から2015年頃に提案された画像処理法において用いられ、処理精度の向上に貢献したが、膨大な計算量、及び、分単位の処理時間を必要とする致命的な欠点があった。本手法を用いることで、その処理時間を大幅に短縮できるようになり、処理時間の面で有用には向かないと判断された手法を再利用できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：We developed a method for efficiently calculating "small-scale but enormous amount of singular value decomposition" that appears in image signal processing, and presented the results at some domestic workshops and an international journal. This method propagates the result of singular value decomposition at a pixel to the surrounding pixels and uses it in the calculation. When this method is applied to a noise removal method, "ASTV" (Arranged Structure Tensor Total Variation), the execution time is shortened by 95% compared to the naive method without losing numerical accuracy. Additionally, when applied to the "Guided Image Filter" that is used for multipurpose processing, the execution time is shortened by 80%.

研究分野：画像処理

キーワード：特異値分解 縮退処理 カラー画像処理 スパースモデリング

1. 研究開始当初の背景

数理最適化に基づく画像復元処理は現在では随所で用いられ、カメラや医用 MRI で撮影したデータの画像化、手ブレにより生じたぼけの除去、複数枚画像の合成など、応用は多岐に渡る。復元処理の際には画像信号の持つ特徴を用い、2005 年頃から局所領域 (小さなパッチ画像) の持つ特徴を利用した方法が扱われ始めた。これは、不鮮明となった画素の修復に、近傍領域に含まれる画素の情報を利用する試みであり、復元精度の飛躍的な向上を与えた。

しかし、これらのパッチ特徴を数理最適化問題として扱うと、その解法時にパッチごとに逆問題を解く必要や、固有値分解や特異値分解を行う必要が生じ (図 1 参照)、計算量および処理速度の面での大きなボトルネックとなる。

これは、模様のパターンや画素値の相関関係というものが、領域内の画素値から生成されるデータ行列の特異ベクトルに関係し、パターンや相関の強弱が特異値の大小に関係するためである。

上記の計算の一つ一つの計算量は微々たるものであるが、互いにオーバーラップするパッチの数は一般的なサイズの画像では数百万個となり、合計して数十秒の処理時間を要する。また、これは画像復元で用いられる反復アルゴリズムにおける 1 回の反復に必要な計算量の話であるので、100 回の反復が必要になると数十分を要する。

このようなことから、画像復元性能としては十分であるが、処理時間の面から実用できない欠点があり、効率の良い計算方法の開発が必要であった。

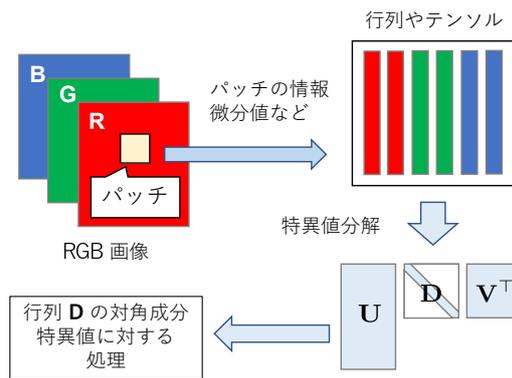


図 1: パッチ内の画素値からのデータ行列の作成と特異値分解

2. 研究の目的

数理最適化に基づく画像信号処理において、パッチ特徴を考慮した際に計算過程に現れる “小規模ではあるが、膨大な回数の特異値分解” を効率的に計算する方法の開発を目的とする。特異値分解の計算自体は、多くの分野で用いられるため、LAPACK などの高精度・高機能なライブラリが存在するが、これらは単一のデータ行列の分解を目的としており、複数の類似したデータ行列の分解は考慮していない。

本研究においては、複数の類似したデータ行列に対する特異値分解を考え、それらの特異値分解の結果も類似することに着目し、計算量の低減を図る。具体的には、特異値分解の方法として反復アルゴリズムを意図的に使い、初期値として、類似データ行列での分解結果を与える (図 2 参照)。このようにすることで、反復が収束するまでの反復回数を低減できる。

精度と計算複雑さ (処理速度) のトレードオフにおいては、計算の簡易さを重視し、マルチコア CPU や GPU を用いての並列演算への利用のしやすさを重視している。

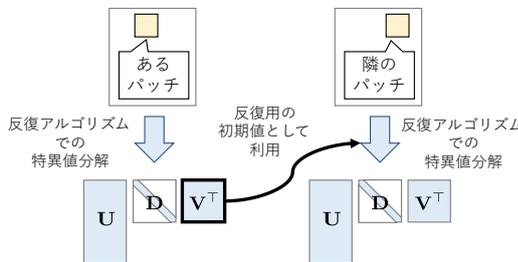


図 2: 隣のパッチへの特異値分解結果の伝播

3. 研究の方法

本研究の課題では、平成 30 年、平成 31 年 (令和)、令和 2 年、令和 3 年の 4 年間の研究を以下のように進めた。なお、当初は令和 2 年までの計画であったが、令和 2 年にコロナ禍となったため、令和 3 年まで延長した。

【平成 30 年度】

パッチごとの部分問題を効率良く解くため、申請者はこれまでに“あるパッチで既に得られた解を近傍パッチの初期解として伝播して用いる走査方式の計算方法”をその都度、個別に開発してきた(参考文献 [1] (逆行列生成法), [2] (固有値分解法), 特異値分解については未実装)。これら基盤となる手法のフレームワークを整理して汎用性をもたせ、また、特異値分解については効率的な計算は未実装であるため、固有値分解法を基に新たに実装した。

特異値分解には、前述の既存法 [1, 2] でも用いた反復アルゴリズムである Arnoldi 法 (ベキ乗法とグラムシュミット直交化の組み合わせ) を採用し、また、事前計算できる部分を反復の外側に出し、反復時の計算量を抑える式変形を導出して用いた。

【平成 31 年度】

前年度で基礎的な部分は完成したため、並列処理に関する改良を行った。実際には平成 30 年度後半から行ったが、平成 31 年度分とまとめて記述する。

1. 【並列化】

前年度の計算を並列に行えるよう、マルチスレッド用にプログラムの書き直しを行った。

2. 【精度の検証】

本手法のような画素から画素への値の伝播を行うタイプのアルゴリズムでは、精度が高くない場合、並列に計算する場合に画像の行ごとに行うか、ブロックごとに行うかなどにより、結果画像に線状やブロック状のノイズが生じる場合があり、これらのノイズが生じるかどうかの検証を行い、ノイズは生じないことを確認した。つまり、精度は少なくとも人間の目を誤魔化せるほどには十分であった。

3. 【時間方向への特異値分解結果の伝播を行う方法の開発】

ここまでに述べた各画素における特異値分解は、画像復元で用いられる反復アルゴリズムにおける 1 回の反復に必要な計算の話であるので、時間的に何度も繰り返し行われる。このとき、各画素において時間的に繰り返し計算される特異値分解についても、各画素において分解結果は類似するため、時間方向に対しても前回の特異値分解の結果を伝播し、特異値分解を行いやすくする方法を考案し、検証を行った。なお、この方法が最も計算効率が良い。

【令和 2 年度】

前年度の後半に国内研究会において研究報告を行い、他の研究者らと意見交換から関連手法の情報を得た。具体的には、データ行列の内容がわずかに書き換わったときの特異値分解結果の変化、すなわち摂動に関係するため、摂動定理に関係する手法を実装し、検証した。なお、パッチ画像に基づくデータ行列に関しては、摂動定理を用いて予測するよりは、より単純な Arnoldi 法で反復回数を増やしたほうが処理時間は短縮された。

これまでの研究成果をまとめ、国際ジャーナルへと投稿し、査読者からの指摘事項に対するより細かな性能検証を行った。

【令和 3 年度】

前年度に引き続き、国際ジャーナルでの査読において、査読者からの指摘事項に対する性能検証を行った。

4. 研究成果

本手法をノイズ除去法である Arranged Structure-Tensor Total Variation (ASTV) 法 [3] に対して適用した結果、処理結果の精度を損なわずに、その処理時間を 5%まで短縮することを達成した。その実験結果を簡単に示す。

図 3 に画質の定性評価のための実験結果を示す。左から、(a) 原画像、(b) ノイズを付加した画像 (輝度値の値域 $[0, 1]$ に対して、標準偏差 0.1 のガウシアンノイズ)、(c) 従来法の結果、(d) 本手法の結果、(e) は (c) と (d) の差分画像である。なお、(e) の差分は知覚できないほど小さいため、差

分を目視できるように 50 倍に強調した。本手法は従来法の近似計算になるため、若干の差異は生じるが、知覚することは難しく、(c) と (d) の画像間の変化量を数値的に表す PSNR（ピーク信号対雑音比）も 60dB を超えており、知覚的な差異は無いと言える。

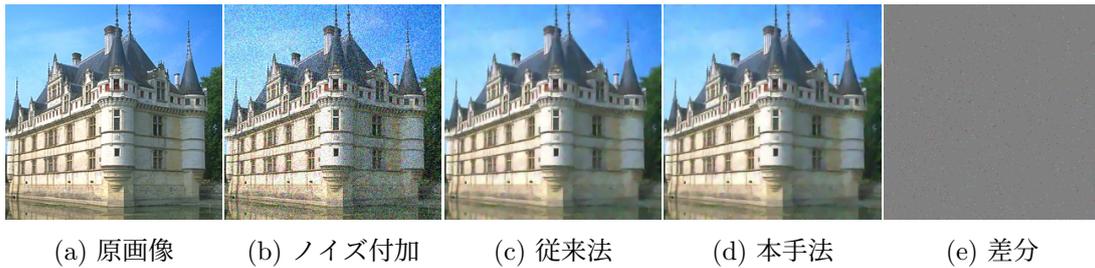


図 3: 従来法と本手法での画質評価

図 4 に、マルチスレッド化において、スレッド数を増やしていった際に、処理時間がどの程度短縮されるかの遷移を示す。横軸がスレッド数であり、縦軸が処理時間（単位は秒。対数表示）である。4つの異なるサイズの画像グループに対して行った結果を示す。16 スレッドまでは、スレッド数の増加に伴い、処理時間も短縮された。24 スレッドでは、スレッドを分けて計算するための諸準備の影響が現れ、時間短縮は頭打ちとなった。つまり、各スレッドごとの計算量に対して、スレッド分配・統合のための計算量が増え始めている。最終的にはどのサイズの画像においても、概ね処理時間は 10% ~ 20% まで短縮された。

図 5 に、本手法にて提案した各種計算方法による処理速度の短縮結果を示す。まず、大きく 4 つに分かれており、Original method が従来法、Spatial propagation が画像の縦横方向の空間的に隣接する画素に対して特異値分解の結果を伝播する方法、Temporal propagation が画像復元アルゴリズムの反復における時間的に隣接する画素（同一位置の画素値が時間的的反復により書き換わっていく場合の、ある時刻 t と、ある時刻 $t+1$ の同一画素の時間的な連なり）に対して特異値分解の結果を伝播する方法、Perturbation が摂動定理に基づいて特異値分解の初期値を予測する方法である。

Spatial propagation において順に述べる。Random は特異値分解の初期値（特異ベクトル）にランダム値を設定したもの、Propagate および Prop は隣接画素の分解結果を伝播し流用したもの、Cut は特異値が小さくなった時点で特異値分解を打ち切ったもの（truncated SVD と呼ばれる。特異値が小さい成分は結果に影響しにくく、若干の精度低下と引き換えに時間短縮できる）、Parallel は Propagate と Cut の 2 つを用いた上で並列計算を行ったものである。Propagate および Cut を用いることで、Original method の処理速度を 50% まで短縮でき、2 つを合わせることで、更に短縮される。この状態から並列計算によって 5% まで短縮される。

Temporal propagation において順に述べる。Temp-Prop は時間的に分解結果を伝播したもの、

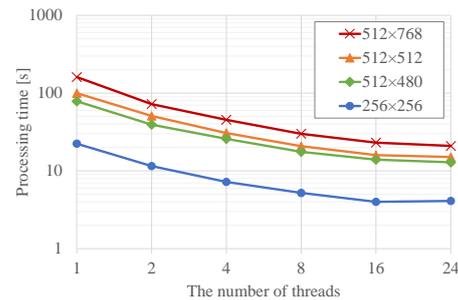


図 4: スレッド数の変化（横軸）に伴う、処理時間の変化（縦軸。対数表示）

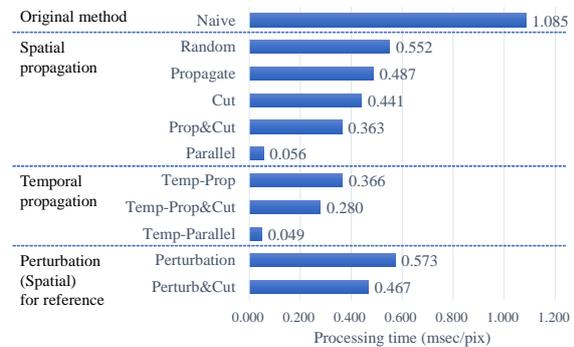


図 5: 本手法にて提案した各種計算方法による処理速度の短縮結果

Temp-Prop&Cut は、前述の Cut（微小な特異値が現れた時点度計算を打ち切る）を加えたもの。Temp-Parallel は Temp-Prop&Cut を並列化したものである。この結果も Spatial propagation と同様となるが、Spatial propagation よりも Temporal propagation のほうが、特異値分解されるまでの処理時間は短縮される。これは、Spatial では近傍の画素への伝播に対して、Temporal では同一の画素への伝播であるため、Spatial に比べて Temporal のほうが、扱うデータ行列の類似度がより高まるためである。

Perturbation において順に述べる。Perturbation は Spatial propagation において、初期値を摂動定理に基づいて予測したものである。摂動を計算する箇所に時間がかかり、Spatial propagation での単なる Propagate よりも処理時間が伸びている。より詳細には、最大特異値の計算では、摂動を用いたほうが時間短縮につながるが、以降の特異値の計算では、摂動に費やした計算量に対して、時間短縮の効果が得られていない。Perturb&Cut においても、Cut によって時間短縮はされるが、Spatial propagation での Prop&Cut に劣る結果となった。

本手法で開発したアルゴリズムの詳細については [4] にまとめ、オープンアクセスで公開している (doi: 10.1109/ACCESS.2021.3083895)。また、開発したプログラムコードを公開する準備をすすめており、申請者のホームページで公開する。 http://wwell.cs.shinshu-u.ac.jp/~keiichi/projects/pixwisesvd/index_j.html

引用文献

- [1] K. Shirai and M. Okuda, “FFT based solution for multivariable l2 equations using KKT system via FFT and efficient pixel-wise inverse calculation,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics Speech Signal Proc. (ICASSP)*, pp. 2648–2652, 2014.
- [2] K. Shirai, M. Okuda, T. Jinno, M. Okamoto, and M. Ikehara, “Local covariance filtering for color images,” in *Proc. Asian Conf. Comput. Vis. (ACCV)*, pp. 406–417, 2013.
- [3] S. Ono, K. Shirai, and M. Okuda, “Vectorial total variation based on arranged structure tensor for multichannel image restoration,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. (ICASSP)*, pp. 4528–4532, 2016.
- [4] K. Shirai, Y. Ito, H. Miyao, and M. Maruyama, “Efficient pixel-wise SVD required for image processing using the color line feature,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 79449–79460, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shirai Keiichiro, Ito Yuya, Miyao Hidetoshi, Maruyama Minoru	4. 巻 9
2. 論文標題 Efficient Pixel-Wise SVD Required for Image Processing Using the Color Line Feature	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 79449 ~ 79460
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3083895	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 Matsubara Yoichi, Shirai Keiichiro, Ito Yuya, Tanaka Kiyoshi	4. 巻 33
2. 論文標題 Pixel-wise parallel calculation for depth from focus with adaptive focus measure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Multidimensional Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 121 ~ 142
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11045-021-00794-9	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊藤 勇弥, 白井 啓一郎, 宮尾 秀俊, 丸山 稔
2. 発表標題 画像の局所領域ごとの特異値分解における初期値の伝播法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 信号処理研究専門委員会 信号処理シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 勇弥, 白井 啓一郎, 宮尾 秀俊, 丸山 稔
2. 発表標題 画像の画素ごとの特異値分解における初期値伝播法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 信越支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 勇弥, 白井 啓一郎, 宮尾 秀俊, 丸山 稔
2. 発表標題 複数の色や成分を扱う画像処理における画素ごとの特異値分解の計算効率化
3. 学会等名 電子情報通信学会 信号処理シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤 勇弥, 白井 啓一郎, 宮尾 秀俊, 丸山 稔
2. 発表標題 カラーライン特徴を用いた画像処理における画素ごとの特異値分解の計算効率化の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 信越支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤 勇弥, 白井 啓一郎, 宮尾 秀俊, 丸山 稔
2. 発表標題 複数の色や成分を扱う画像処理における画素ごとの特異値分解の計算効率化の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 回路とシステムワークショップ
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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0件

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
---------	---------