

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K16092

研究課題名(和文) 多次元画像のスパースフーリエ変換と深層学習の高速化

研究課題名(英文) Sparse Fourier Transform for High-dimensional Images and Accelerating Deep Learning

研究代表者

杉本 憲治郎 (Sugimoto, Kenjiro)

早稲田大学・理工学術院(情報生産システム研究科・センター)・次席研究員

研究者番号：00773483

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)：工学において重要な高速フーリエ変換の発展形であるスパースフーリエ変換の高度化に取り組んだ。またそれに関連してスペクトルスパース性に基づく定数時間フィルタを提案し、計算量と近似精度の両面からの性能向上を実現した。当該研究期間である2016-2017年度での研究業績としての成果は、ジャーナル論文1件、学会発表16件(内訳は国際会議7件、国内会議9件)、受賞3件であった。国際会議発表の多くは当該分野で最も権威あるフラグシップ会議(ICIPとICASSP)に採択され、また国内発表でも3件が受賞につながるなど、国内外で高い評価を得たと考えている。

研究成果の概要(英文)：The Fast Fourier Transform (FFT) is an essential tool in many applications of engineering. This research has tried to establish a more efficient FFT algorithm for sparse signals, called Sparse Fourier Transform (SFT), and also has developed more elaborated techniques related to the SFT, called constant-time image filters. During the research period (two years, 2016/4-2017/3), we published 1 journal paper, 16 conference papers (7 international and 9 domestic), and 3 awards. Many of our conference papers were accepted to worldwide flagship conferences in signal/image processing fields and also some of our domestic papers won research awards. From these highly-evaluated outcomes, our research showed high impacts and potentials in signal/image processing communities.

研究分野：信号処理、画像処理、機械学習

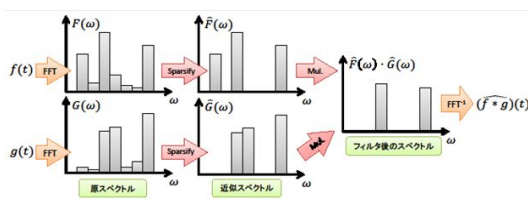
キーワード：スパースフーリエ変換 定数時間ガウシアンフィルタ 定数時間バイラテラルフィルタ 深層学習

1. 研究開始当初の背景

ビッグデータ時代の到来と並列計算環境の普及により、深層学習は学术界・産業界の双方で大きな注目を集めている。画像処理・コンピュータビジョン分野では、深層学習に基づく手法である Convolutional Neural Network (CNN) が圧倒的な精度を誇る。他方、CNN の数時間～数日といった多大な学習時間が重要な問題となっている。これは 10 万枚以上の画像それぞれに多数回適用される畳み込み演算 = 線形フィルタに起因する。対策としては、マルチ GPU による超並列計算等のハードウェア強化が一般的であるが、当然ながらアルゴリズム面での改善も強く望まれている。一つの切り口として、畳み込み演算を高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform; FFT) を通したスペクトル乗算で実装するアプローチがある。しかしながら、畳み込み比で 2~5 倍程度の高速化にすぎず、CNN の導入障壁を打破するほどではない。

2. 研究の目的

画像処理を対象にしたスパースフーリエ変換 (Sparse Fourier Transform; SFT) の高速アルゴリズムを構築し、深層学習の一手法である CNN を高速化する。一般に画像データのスペクトルは近似的にスパースである事実に着目して、SFT を通じた振幅の大きなスペクトル成分のみを取り扱う効率的なフィルタ手法を確立すれば、CNN において支配的な畳み込み演算の計算量を大幅に削減できる。明らかにしたい点は、定数時間フィルタの知見に基づく SFT のさらなる効率化の可能性、画像処理を念頭においた実数型 SFT 等への理論の発展、それら高速 SFT を用いた CNN の画像認識における実性能の検証である。



FFT は工学における重要な基礎技術の一つである。特に信号処理では、信号の周波数成分を活用したアルゴリズム設計が一般的であり、FFT はその方法論の根幹をなす。FFT の一つの課題が $O(N \log N)$ の計算量 (N は信号長) であるが、これを信号のスペクトルスパース性に着目して削減した手法が SFT であり、その計算量は $O(K \log N)$ あるいは $O(K \log K)$ である (K はスペクトルの非ゼロ成分の数)。スパース性の現実の多くの信号が満たすと考えられている。例えば画像圧縮では、JPEG / MPEG / H.264 など、視覚的に影響の少ない画像中の高周波周波数成分を積極的に削減することでデータ量の圧縮

を実現している。

本テーマの主な目的はスパースフーリエ変換の性能改善と、それに関する基礎技術・応用技術の確立である。またそれに関連した技術である定数時間フィルタの高度化である。

3. 研究の方法

サブテーマとして A. 定数時間フィルタを応用した SFT の理論面での効率改善, B. 画像処理を念頭においた SFT の実性能面での効率改善, C. 高速 SFT を用いた CNN の実性能検証, を設けた。2016 年度は、比較的通しの立つ B を優先し、この成果を基にした C の CNN の性能検証環境を早期に確立することを目指した。それと並行して検討に時間を要する A を着実に進めた。2017 年度は、前年度の A の成果を C へと随時反映させ CNN 上での性能検証を目指した。適宜、A の最新の成果は B へと落とし込み、研究成果の更なる進展を目指した。これらのテーマは他の研究者や大学院生のサポートを仰ぎつつ各自並行して遂行した。

4. 研究成果

当該研究期間である 2016-2017 年度の 2 年間での研究業績としての成果 (5 節を参照) は、ジャーナル論文 1 件、学会発表 16 件 (うち国際会議 7 件、国内会議 9 件)、受賞 3 件であった。当該分野で最も権威ある国際会議は、米国電気電子学会 (IEEE) の信号処理ソサイエティ (SPS) が主催するフラグシップ会議である International Conference on Image Processing (ICIP) と International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) である。本研究成果の国際会議発表の多くが、これらの会議に採択されたものであり、世界的に高い評価を得たと考えている。また国内発表でも 3 件が受賞につながり、国内でも高く評価された。

以下に、本研究で扱ったテーマを 4 つにわけ、各テーマの成果について概説する。

〔スパースフーリエ変換〕

2016 年度は、基礎的な面での性能向上を主な目的として取り組んだ。主に以下の二つの成果を挙げた。

一つ目は、実信号に対する高速 SFT のアルゴリズムである。従来一般的な FFT は複素信号を対象として議論されるが、通常我々が中心的に扱う信号 (画像、音声、センサーデータなど) の多くは実信号である。従来 FFT であれば、実信号に特化した方法論 (実数 FFT) は既に広く実用化されているが、SFT についてはこのような実信号向けのアルゴリズムがなかった。我々はこの現状に着目し、実数データを対象にした SFT を提案した。具体的には、実信号のスペクトルが対称性を有する事実に基づき、推定した一つのスペクトル成分の片方の情報と、それと対称

な位置にあるスペクトル成分の推定に活用する。このようなアプローチにより、従来の複素数の手法と比べて 10~20%程度少ない計算量でフーリエスペクトルを抽出できた。

二つ目は、スペクトル推定に失敗するケースへの対処法についての研究である。SFT は信号中からランダムに部分信号を抽出し、そこから原信号のスペクトルの概形を推測する。この操作をランダムに何度も繰り返すことで、高確率で存在すると思われるスペクトル成分の位置を特定し振幅・位相を推定する。信号のスペクトルスパース性を前提としているため、有限回の試行で上位の有効な成分を順次特定できる。しかしながら、原信号によっては特定に失敗することもある。これが SFT の欠点の一つである。我々はこの問題に対し、疑似乱数スペクトル順列の性質を活用してこのエラーを抑制した手法を提案した。いずれも従来の SFT と同様の実験条件において、それらに対する計算時間と近似精度の優位性を実験的に確認できた。

2017 年度は、前年度の成果を基に応用面の性能向上を目指した。前述のように、本テーマの主要な対象は深層学習の高速化であったが、現状ではいくつかの点で性能向上につながり辛いことがわかった。第一に、深層学習における畳み込み演算の方向性の変化である。深層学習では、ここ数年、より小さい窓サイズ (3x3 や 5x5) の畳み込み層をより多層に重ねる方向へと進化している。FFT 経由の畳み込み演算では、より大きな窓サイズに対してより大きな有効性を示すが、近年の方向性はこれと逆行した形である。この点から SFT による深層学習に対しての実用化にはまだ多くの課題が残る。これについては将来的な問題の解消を目指して引き続き取り組む。

〔定数時間ガウシアンフィルタ〕

SFT と合わせて、別の角度から畳み込みの高速化に切り込んだテーマが定数時間フィルタである。畳み込み演算では計算量が窓サイズに依存し、大きな窓サイズのフィルタは計算時間が多大である。一方定数時間フィルタは、計算量が窓サイズに非依存で、大きな窓サイズのフィルタでも常に一定の計算時間で済む。なかでも定数時間ガウシアンフィルタは、ガウシアンカーネルのスペクトルスパース性に着目して、信号の短時間スペクトルを活用した高速アルゴリズムの一種である。スパースフーリエ変換の内部で用いられる Dolph-Chebyshev フィルタや Gaussian-Sinc フィルタとも関連深い。

研究期間内に得られた定数時間ガウシアンフィルタの成果についてまとめる。一つ目が最適化に基づくモーメント保存のフィルタ設計手法の確立である。従来の方法論では任意のモーメント (ガウシアンカーネルの平均や分散など) を維持する近似が得られない問題があり、その結果として近似に用いるコサ

インの分解手法 (DCT) の種類が限られていた。本研究により、任意の DCT で良好に近似できるより一般化された形での方法論を確立できた。この結果、従来良好とされていた DCT-5 や DCT-3 に比べて DCT-7 が最良の近似精度に達成することが新たに分かった。本テーマ開始以前の最新手法と比べても、近似誤差を 1/2 にしつつ計算時間も 15%程度削減できた。この成果は国内シンポジウムにおいて優秀論文賞を獲得し高い評価を得た。他の研究者からの要請で既に他研究の基礎ツールとして採用されるなど、応用面でも今後の更なる普及が期待できる。

〔定数時間バイラテラルフィルタ〕

上述のガウシアンフィルタを一般化した非線形フィルタであるバイラテラルフィルタでもその定数時間化について進展があった。具体的には、バイラテラルフィルタを高い近似精度で畳み込みへと分解する方法論を確立し、上述の定数時間ガウシアンフィルタと組み合わせることで、近似精度と計算速度を現時点で最も高いレベルで両立した手法を実現できた。具体的には、ガウシアンレンジカーネルのスペクトルスパース性に基づきコサインの和で近似することで、畳み込みへの効率的な分解を実現する。この近似は従来法の数倍は効率がよく、前述の定数時間ガウシアンフィルタと組み合わせることで、5 倍以上の性能向上を達成できた。そのほか、カラー画像への発展や GPU での 3D ポリウムデータへの応用などにも取り組んだ。この成果も研究会での受賞やシンポジウムでのベストポスタ賞へとつながった。また本研究機関内に、深層学習の分野においても CNN をバイラテラルフィルタの観点から一般化した形の新たなニューラルネットワークが注目を浴びており、こういった方法論に対しても、本手法の応用が期待できる。

〔定数時間フィルタの更なる発展〕

上記の成果発表が縁で、米 Dayton 大学との新たな国際共同研究もはじまった。具体的には本研究をバイラテラルフィルタの一般化・発展型であるノンローカルミーンズフィルタへとさらに進展したものであり、実際に国際会議 1 件の成果を挙げている。

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 1 件)

X.T. Lim, K. Sugimoto and S. Kamata: "Nuclei detection based on secant normal voting with skipping ranges in stained histopathological images", *IEICE Trans. Info. & Sys.* (査読有), vol. E101-D, no. 2, pp. 523-530, (Feb. 2018). DOI: 10.1587/transinf.2017EDP7326

〔学会発表〕(計 16 件)

C. Karam, K. Sugimoto, and K. Hirakawa: "Near-constant time bilateral filter for high dimensional images", *IEEE ICIP*, 5 pages (Oct. 2018).

矢野 光一, 杉本 憲治郎, 鎌田 清一郎: "GPU処理に適した三次元画像の高速近似バイラテラルフィルタ", *画像センシングシンポジウム*, 4 pages, (2018/6).

K. Sugimoto, S. Kyochi and S. Kamata: "Universal approach for DCT-based constant-time Gaussian filter with moment preservation", *IEEE ICASSP*, pp. 1498-1502 (Apr. 2018).

N. Fukushima, K. Sugimoto and S. Kamata: "Guided image filtering with arbitrary window function", *IEEE ICASSP*, pp. 1523-1527 (Apr. 2018).

杉本 憲治郎, 鎌田 清一郎: "特異値分解を用いた効率的な定数時間バイラテラルフィルタ", *画像符号化・映像メディア処理シンポジウム*, P-3-1, pp. ?-? (2017/11). <ベストポスタ賞>

杉本 憲治郎, 白井 啓一郎, 福嶋 慶繁, 鎌田 清一郎: "レンジカーネルの対称性に基づく効率的な定数時間バイラテラルフィルタ", *信号処理シンポジウム*, P-24, pp. 119-120 (2017/11).

N. Fukushima, K. Sugimoto and S. Kamata: "Complex coefficient representation for IIR bilateral filter", *IEEE ICIP*, pp. 2458-2462 (Sep. 2017).

杉本 憲治郎, 京地 清介, 鎌田 清一郎: "離散コサイン変換に基づく定数時間ガウシアンフィルタの包括的性能解析", *信学会 IE*, vol. 117, no. 48, IE2017-4, pp. 19-24 (2017/5).

K. Sugimoto, N. Fukushima and S. Kamata: "Fast bilateral filter for multi-channel images via soft-assignment coding", *APSIPA ASC*, 259, 4 pages (Dec. 2016)

杉本 憲治郎, 京地 清介, 鎌田 清一郎: "最適化によるモーメント保存型定数時間ガウシアンフィルタの設計", *画像符号化・映像メディア処理シンポジウム*, P-5-18, pp. 216-217 (2016/11). <IMPS 優秀論文賞>

福嶋 慶繁, 杉本 憲治郎, 鎌田 清一郎: "複素係数表現による再帰型バイラテラルフィルタ", *画像符号化・映像メディア処理シンポジウム*, P-2-05, pp. 70-71 (2016/11).

矢野 貴大, 杉本 憲治郎, 黒木 祥光, 鎌田 清一郎: "実信号向けのダウンサンプリングに基づくスプースFFT", *信号処理シンポジウム*, P-5, pp. 75-76 (2016/11).

秋吉 優作, 杉本 憲治郎, 黒木 祥光, 鎌田 清一郎: "疑似乱数スペクトル順列

を用いたダウンサンプリング型スプースFFT", *信号処理シンポジウム*, P-4, pp. 72-74 (2016/11).

K. Sugimoto, T. P. Breckon and S. Kamata: "Constant-time bilateral filter using spectral decomposition", *IEEE ICIP*, pp. 3319-3323 (Sep. 2016).

R. Okutani, K. Sugimoto and S. Kamata: "Efficient keypoint detection and description using filter kernel decomposition in scale space", *IEEE ICIP*, pp. 31-35 (Sep. 2016).

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", *信学会 IE*, vol. 116, no. 221, IE2016-59, pp. 41-45 (2016/9). <IE賞>

〔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

<http://wosugi.sakura.ne.jp/>

オープンソース (コードリポジトリ)

<https://github.com/wosugi>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉本 憲治郎 (SUGIMOTO, Kenjiro)
早稲田大学・理工学術院・次席研究員
研究者番号: 00773483

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

鎌田 清一郎 (KAMATA, Sei-ichiro)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 00204602

福嶋 慶繁 (FUKUSHIMA, Norishige)
名古屋工業大学・工学系研究院・准教授
研究者番号: 80550508

京地 清介 (KYOCHI, Seisuke)
北九州市立大学・国際環境工学部・准教授
研究者番号: 70634616

黒木 祥光 (KUROKI, Yoshimitsu)
久留米工業高等専門学校・教授
研究者番号: 60290847

平川 恵悟 (HIRAKAWA Keigo)
米国・Dayton 大学・准教授

Toby P. Breckon
英国・Durham 大学・教授