

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01801

研究課題名(和文)調和解析の方法によるデジタル・フィルタと非線形画像処理の研究及びその応用

研究課題名(英文) Study of digital filters and nonlinear image processing by harmonic analysis methods and their applications

研究代表者

新井 仁之 (Arai, Hitoshi)

早稲田大学・教育・総合科学学術院・教授

研究者番号：10175953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,000,000円

研究成果の概要(和文)：研究期間(含繰越延長)に得た成果を記す。2013年に研究代表者らは調和解析的方法を用いて画像処理の元になるフィルタ群(便宜上原子フィルタと呼ぶ)を作成した。本研究ではそれを深層学習を用いて用途に応じて変形することを行い、それほど形状を崩さない変形を得ることに成功した。これは非線形画像処理や深層学習による分類の機構の研究等に役立つと考えている。その他、原子フィルタを調整してスーパーハイブリッド画像の新作を作成した。また、調和解析のボッホナー・リース総和法の窓の離散化も行い、時間-周波数の状態を調べ、音声信号等のスペクトログラムに応用した。以上の成果に基づいて今後研究すべき新たなテーマも得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、本研究において調和解析の方法(具体的には(単純)かざぐるまフレームレット(新井・新井, 2009, 2011))と深層学習を融合して、新しい原子フィルタの変形の方法と実例を与えたこと、及び画像処理への応用の可能性と深層学習への応用の可能性も得られたことである。このほか調和解析から窓関数の応用を得たことも挙げられる。なお原子フィルタを調整してスーパーハイブリッド画像の新作を作成し、NHK総合のテレビ番組で社会に広く紹介され、またハイブリッド画像の新作も絵画の教本で紹介されるなど、エンターテインメントやアートとしての社会的意義もあった。

研究成果の概要(英文)：The research results obtained during the research period (including carry-over extensions) are as follows: By using a harmonic analysis method, we constructed filters (for convenience, we call them atomic filters) which are the basis for image processing (H. Arai and S. Arai, 2013). In this study, I used deep learning to deform them according to purposes, making it possible to deform it without significantly changing their shape. I believe that this will be useful in studying image processing and the mechanisms of classification of images by deep learning. I also created a new super-hybrid image by manipulating atomic filters. In addition, I obtained a discretization of the window of Bochner-Riesz summation, which is being studied in harmonic analysis, investigated the spatial-frequency state, and applied it to the spectrogram of signals, for example a speech signal. I also obtained future new themes based on these results.

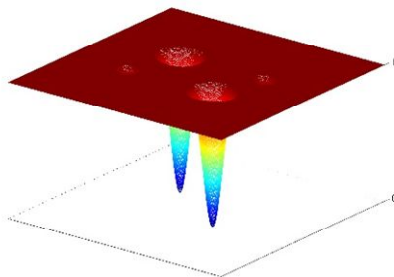
研究分野：数学, 解析学

キーワード：フレームレット 単純かざぐるまフレームレット かざぐるまフレームレット 窓関数 調和解析 デジタル・フィルタ スーパーハイブリッド画像

1. 研究開始当初の背景

(1) まず本研究の基盤となる背景について記す。本研究の大きな基盤の一つは、以前に研究代表者らが視覚・錯視を調和解析的な方法で研究するために考案した単純かざぐるまフレームレットとかざぐるまフレームレットである(新井仁之・新井しのぶ, 2009, 2011)。ここでフレームレットとは Daubechies, Han, Ron and Shen が 2003 年に発表した一般的な枠組みであり、一言で言えば直交あるいは双直交ウェーブレットをフレームに一般化したものといえる。本研究で用いる単純かざぐるまフレームレットとかざぐるまフレームレットは研究代表者らが構成した視覚・錯視の研究に特化したフレームレットの一つである。単純かざぐるまフレームレットとかざぐるまフレームレットの違いは、前者が後者に比べ数学的に比較的シンプルに定式化できることにある。ただし方位選択性に関しては、フィルタをかざぐるま状に並べると、後者の方がやや実際の視覚のものに近い。

(2) 本研究のもう一つの背景も記しておく。それはデジタル・フィルタに関するものである。デジタル・フィルタの設計は、画像処理、信号処理における最も重要なテーマの一つであるといえよう。これまで知られている設計法としては、例えば窓による方法(これはある意味でフーリエ・マルチプライヤーによる方法ともいえる)、差分方程式を用いた方法などが知られているが、特定の周波数特性をもつ有限長フィルタを設計することは易しくない。そこで問題となることは「用途に応じて、特定の周波数特性をもつ有限長フィルタを容易に作る方法はないか?」ということである。研究代表者らは、自らが考案した先述のかざぐるまフレームレットを用いたフィルタ群を作成し、それらを組み合わせることで様々な周波数特性をもつ有限長フィルタを設計するという新しい方法を考案した(発明者: 新井仁之・新井しのぶ, 特許第 5456929 号, 2013 年特許査定, 特許権者: 科学技術振興機構, 参照)。あえて比喩的な表現をすれば、原子・分子からさまざまな物質を構成するようなもので、これに因んで、ここではかざぐるまフレームレットあるいは単純かざぐるまフレームレットのフィルタから作られる元となるフィルタを便宜上、原子フィルタと呼ぶ。この原子フィルタをもとにしてさまざまな有限長フィルタを作成することができる。原子フィルタの方法の有効性を示すために、実例を一つ挙げておく(参考図 1 参照)。



参考図 1. 原子フィルタの方法で得られるある有限長フィルタの周波数特性,
新井仁之・新井しのぶ, 特許 5456929 (2013 年特許査定) 明細書掲載

これは方位選択性を持つ帯域阻止フィルタの一つであるが、特に有限長であり、画像から方位性をもつ周期ノイズを除去するのに有効である。この種のフィルタを有限長で作ることは困難である。それに対して原子フィルタの方法では有限長のものが用途に応じて作成できる。このほかの技巧的なデジタル・フィルタも設計可能である。

研究代表者らは、この新たな方法を用いて、これまでにとえ浮遊錯視などの錯視画像の作成などを行ってきた。そのほか各種の画像処理も行ってきた。

2. 研究の目的

本研究の主な目的は、端的に言えば、単純かざぐるまフレームレットやかざぐるまフレームレット(以下これらを総称して(単純)かざぐるまフレームレットと略記)のフィルタから作られる上記の意味での原子フィルタを使って新たなフィルタを作っていくこと、そしてその各種画像処理への応用を研究することである。なお、研究の途上で本研究に関連して新たな可能性が見いだせた場合は、それについても研究を進めていく。

3. 研究の方法

研究の基本的な方法の一つは、原子フィルタの周波数特性や空間的特性(たとえば方位選択性)を調べ、目的となる画像処理に合わせてフィルタを構成していくことである。また、原子フィルタの変形には、近年急速に進歩している深層学習(ディープラーニング)の方法も導入して使っ

た。このほか、多変数調和解析、特に多変数フーリエ級数の収束問題で主要な研究テーマになっている総和法では窓関数に相当するものが現れる。窓関数はフィルタの一種であると考えられる。これをヒントにデジタル信号処理への応用を考える。特にボッホナー・リース総和法に着目する。

なお研究の方法については「4. 研究成果」の中でも必要に応じて記す。

4. 研究成果

研究成果を三つのタイプに分けて記す。

(1) まず原子フィルタの変形に関する研究成果から始める。既に記したように原子フィルタによるフィルタの研究は、画像処理の用途に応じた有限長のデジタル・フィルタを原子フィルタの組み合わせを調べて組み立てていくというものである。本研究ではこれについても研究した(この方向の研究成果は(3)に記す)が、本研究ではさらに、用途に応じて原子フィルタそのものを変形する研究も行った。ここではそれについて記す。フィルタの変形については、摂動的な方法も考えられないわけではないが、本研究では、近年、急速に進展している深層学習の方法を用いることを考えつき、その研究を行った。

準備的検討としては、画像処理等への応用研究も視野に入れるため、研究代表者らが得てきたこれまでの視覚・錯視の数理と画像処理への応用に関する成果をまとめなおして検討を加えることを適宜行った。

これを踏まえて本研究では、まず原子フィルタの変形にとって、どのようなディープニューラルネットワークを構成するのが適しているのか、計算機実験を行いながら試行錯誤的に検討した。このほか、既述の(単純)かざぐるまフレームレットのどの部分を使うかも検討した。(単純)かざぐるまフレームレットは一般化多重解像度解析の構造を有しているが、これには分解フェーズと再構成フェーズがある。ここで再構成フェーズとは、原子フィルタの構成に使ってきた(単純)かざぐるまフレームレットの(最大重複)一般化多重解像度分解を行った際に現れる再構成フェーズのことである。(なお再構成フェーズは合成フェーズということもある。)従来は原子フィルタを作る際には、いくつかの理由から再構成フェーズを用いてきた。しかし今回は(単純)かざぐるまフレームレットの再構成フェーズのほかに、分解フェーズのフィルタを用いた。分解フェーズを用いた理由は、再構成フェーズのものはフィルタ長が分解フェーズのものより長くなり、しかも分解フェーズには偶型と奇型のフィルタが内在するのに対して、再構成フェーズのフィルタは奇型が現れないからである。分解フェーズのフィルタを変形した原子フィルタを作ることにより、奇型のものも変形原子フィルタのフィルタ群に含めることができ、フィルタ長も再構成フェーズから作った原子フィルタよりも短くなった。そしてディープニューラルネットワークの訓練データを用途に応じて工夫することにより、原子フィルタを変形したものを得ることができた。これはたとえば摂動のように単に数学的に変形を与えるのではなく、用途に応じた(画像の種類に応じた)変形となっている。さらに計算機実験の結果、今回の方法では(単純)かざぐるまフレームレットの分解フェーズから作った原子フィルタの形状は著しく崩れることはないことがわかった。原子フィルタの形状がそれほど崩れないことは、深層学習の方法を使ってフィルタを変形しても、原子フィルタの持つ特性はある程度保たれることを示唆している。したがって、今回の原子フィルタの変形に関する研究成果を用いれば、深層学習の各層でのフィルタの役割が従来よりも分析しやすくなることが考えられる。なぜならば、原子フィルタの特性はすでにわかっていて、それがディープニューラルネットワークの中にあまり崩れない形で表れているからである。さらに今回作ったディープニューラルネットワークは、少なからぬケースで訓練データ数や学習の回数がそれほど多くなくても視覚細胞に近いフィルタが形成されるという特性を有することが確認できた。

(1)の研究について特筆すべき点は、これまでは用途に応じた原子フィルタの変形の一般的な方法は不明であったが、本研究の原子フィルタの変形の研究により、有限長デジタル・フィルタ作成の元となる原子フィルタを用途に応じて変形したり、原子フィルタに新たなフィルタ群を加えたりする一般的な方法の一つを与えることができたことである。この研究成果は、今後の有限長のデジタル・フィルタ設計の研究に貢献するものがあると考えられる。

(1)の最後に(1)の研究の新たな研究への発展性・可能性についても記しておきたい。例えば非線形画像処理への応用、特に研究代表者らが考案した非線形画像処理の一つである鮮鋭化など(発明者:新井仁之・新井しのぶ、特許第5599520号、2014年特許査定、特許権者:科学技術振興機構)への応用が考えられる。また変形原子フィルタの原子フィルタからの変移と特性を数学的に研究することは本研究成果に基づく更なる研究の発展性をもつ。ところで(単純)かざぐるまフレームレットは完全再構成性とタイト性を持っている。しかし、深層学習による変形によって、完全再構成性もタイト性も失われていることが考えられるが、具体的にどの程度失われているのかを定量的に調べることは今後の調和解析における数学上の課題である。

本研究(1)について発表を準備中である。

(2)調和解析の主要なテーマの一つに、多変数フーリエ級数と多変数フーリエ変換の収束問題がある。一変数の場合は20世紀に各種収束に関して多くの結果が多くの数学者により得られた。しかし多変数の場合には、とりわけ球形和に関連したことは未解決な問題も数多くある。その

ような中で、調和解析では収束ではなく総和法、特にフーリエ級数のポッホナー・リース総和法の L^p ノルム収束の研究が、一つの大きなテーマとなっている。本研究ではこのポッホナー・リース総和法に出てくる窓関数をデジタル信号処理の観点から考察した。そのため、まずポッホナー・リース総和法に現れる窓関数を離散化した。ここではこれを便宜上BR窓と呼ぶ、BR窓にはパラメータが備わっており、そのパラメータにより空間的、同時に周波数的に特性が変化する。本研究では、BR窓の空間-周波数の特性を調べ、たとえば音声信号のスペクトログラムに応用した。そしてBR窓のパラメータを調整することにより、スペクトログラムの分解能の変化を調べた。視認した限り、良い分解能を持っていることが確認できた。今後の研究としては先行研究で得られている窓との関係、さらにBR窓の改良などが考えられる。古典的なフーリエ級数の総和法の研究から信号処理への応用が派生したという意味でも興味深い結果であると考えている。本研究成果の一部は、研究代表者の〔図書〕(2022年刊)の中で公開した。

(3)原子フィルタの応用は、そこからさまざまな新しい特性をもつデジタル・フィルタを作成できることである。本研究ではいくつかの用途について考察したが、スーパーハイブリッド画像について得られた結果を記す。スーパーハイブリッド画像の元になるものは2006年にOliva, Trrabla, Schynsの発表したハイブリッド画像である。ハイブリッド画像はよく知られているように、二層からなっている。すなわち、一つの画像でありながら、遠くから見たときと近くから見たときで異なる画像に見える錯視画像の一種である。これを三層にすることは、この方面の研究課題の一つである。研究代表者らは原子フィルタの方法を用いることにより、これを三層にすること、すなわち、一つの画像でありながら、遠くから見たとき、やや近くから見たとき、そして近くから見たときで三つの異なる画像に見える画像の作成を行い、それをスーパーハイブリッド画像と命名し、いくつかの例を作成した(発明者:新井仁之・新井しのぶ,特許第5385487号,2013年特許査定,特許権者:科学技術振興機構)。ただし、元となる三つの画像の周波数特性によっては、三層の分解性能が優れた錯視効果の高いスーパーハイブリッド画像を作るには、原子フィルタの重みなどの調整が易しくない。今回は、そのような画像に対して原子フィルタの調整を検討し、錯視効果の高いスーパーハイブリッド画像の新作を作成した。そのうちの一つはNHK総合のテレビ番組で初公開された(〔その他〕の[3]参照)。なお原子フィルタの方法を使うと、ハイブリッド画像も優れたものを作成できる。今回はカラーの風景画像と花の画像を用いてその一つを作成し、それは〔その他〕に挙げた文献[2]の中で紹介された。このほか原子フィルタを使って水彩錯視の新作も作成した(〔その他〕の[1,図6])。この方向の今後の研究課題としては、研究成果の(1)とも関連するが、深層学習を使って得られる原子フィルタの変形を使ったスーパーハイブリッド画像、あるいは浮遊錯視などの錯視画像生成の画像処理を研究することが挙げられる。これにはオブアートや商用アートへの応用可能性がある。

以上、本研究成果と本研究によりわかった今後の研究の方向とテーマについて三つに大別して記述した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 新井仁之	4. 巻 53
2. 論文標題 錯視の数理とさまざまな応用 解説	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 8-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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1件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 新井仁之
2. 発表標題 錯視の数理およびその応用と実用性について
3. 学会等名 電子情報技術産業協会 感性のセンシング・インタラクション技術分科会（招待講演）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 新井 仁之	4. 発行年 2022年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 250
3. 書名 フーリエ解析とウェーブレット	

〔産業財産権〕

〔その他〕

[1]新井仁之, コンピュータで"錯視"の謎に迫る 第15回『みかん、オクラ、ニンニク スーパーで見られる「色の錯視」を知ってる?』, ITmedia NEWS 2020年, https://www.itmedia.co.jp/news/articles/2002/07/news008_2.html

[2]新井仁之, 新井しのぶ, 富士山と桜のハイブリッド画像, in 山中俊明著, 佐藤和栄(執筆協力)『基本が身につく油絵レッスン』(ナツメ社, 2021), p. 69.

[3]NHK総合「世界!オモシロ学者 スゴ動画際5」(2023年3月16日放映)で原子フィルタによるデジタル・フィルタで作成した研究代表者らの新しいスーパーハイブリッド画像が紹介された。

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