

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K18716

研究課題名（和文）調和解析の方法による視覚・錯視の研究の機械学習への応用

研究課題名（英文）Applications of the study of vision and visual illusions by harmonic analysis methods to machine learning

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） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では視覚・錯視の研究のために開発した（単純）かざぐるまフレームレット（新井仁之・新井しのぶ 2009, 2011）という調和解析の道具を用いて、ディープニューラルネットワーク(NN)を幾つか構築した。また5文字の文字列傾斜錯視3万個と傾いてない5文字の文字列3万個を作ることにより、文字列傾斜錯視データセットを作成した。このうち70%を訓練用、10%を検証用、20%をテスト用データとして、上述のNNで文字列傾斜錯視の分類を行い、テスト用データに関して98%以上の正解率が得られた。本萌芽研究を発展させた調和解析の方法による錯視と深層学習に関する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

本研究成果は調和解析、錯視科学、人工知能を結ぶ学際的研究としてその学術的意義は高い。特に文字列傾斜錯視について、研究代表者らによる数理モデル（新井仁之・新井しのぶ、特許第5456931号、2013年特許査定）とディープニューラルネットワークとの比較検討をすることにより、AIによる分類のメカニズムの研究につながる可能性がある。本研究で作成した文字列傾斜錯視データセットも初めてのものであり、錯視科学上有用なものである。また、浮遊錯視への可能性も得られたが、それはオプアートの商用化への可能性という社会的意義を含む。本研究成果は萌芽的なものであるが、AIによる錯視の研究に新たなテーマを切り開いたといえよう。

研究成果の概要（英文）：In the exploratory research project by this Grant-in-Aid for Scientific Research, the principal investigator, Hitoshi Arai, constructed some deep neural networks using harmonic analysis methods such as simple pinwheel framelets and pinwheel framelets established by H. Arai and S. Arai in 2009, 2011. In this exploratory research project, H. Arai also created newly a dataset of 30000 string tilt illusions of 5 characters and 30000 non-illusory character strings consisting of 5 characters. Using 70% of the dataset as training data, 10% as validation data, and 20% as test data, H. Arai classified the test data to tilt illusions and non-tilt illusions using the deep neural networks described above, and obtained a high accuracy rate of over 98%. H. Arai obtained also some new themes related to the study of visual illusions and deep learning by harmonic analysis methods that will develop this exploratory research.

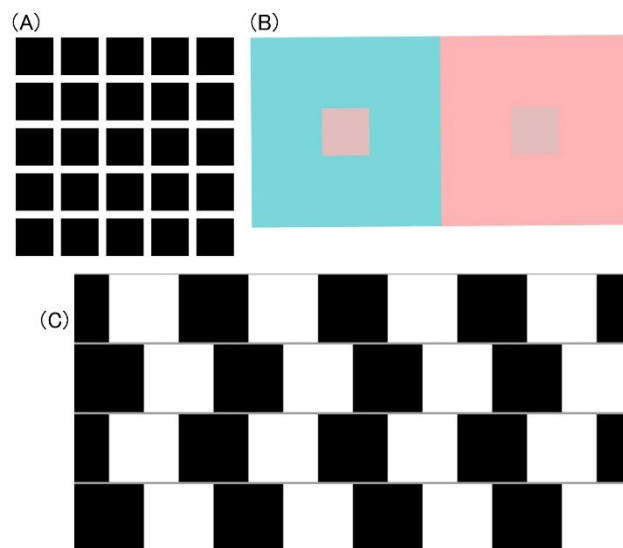
研究分野：数学，解析学

キーワード：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 錯視 深層学習 調和解析の方法

1. 研究開始当初の背景

人の視覚の研究は、古くから行われてきた。しかし、未だに解明されていないことが多々ある。というのは、視覚は外界からの光の信号を脳が処理することにより得られる感覚であり、その脳がまだ完全に解明されてはいないからである。視覚に関連する脳の情報処理のメカニズムの解明は、今世紀最大の問題の一つであるといえるだろう。

その視覚の解明の鍵となるのが錯視である。ところで、一口に錯視と言っても、色々なタイプのものがある。たとえば、存在しないものが見える錯視（例：ヘルマン格子錯視、参考図 1(A)）、実際とは違った色に見える錯視（例：色の同時対比錯視、参考図 1(B)）、実際の幾何的な配置とは異なって見える幾何的錯視（例：傾きの錯視、参考図 1(C)）、静止しているのに動いて見える錯視（例：浮遊錯視）等々である。



参考図 1. 錯視の古典的な例。(A) ヘルマン格子錯視。周辺視の部分の白い十字の交差点のところに存在しない薄黒い斑点が見える。(B) 色の同時対比錯視。二つの小さな四角形の色が同じなのに異なって見える。(C) カフェウォール錯視。水平に並んだグレーの細い線が平行なのに傾いて見える。(A), (B), (C) は何れも古典的によく知られた錯視。

なぜこのような錯視が視覚の研究で重要な役割を果たすのか。その理由は錯視が人の視覚情報処理の過程で生まれるものであり、しかもさまざまな特徴的な性質を持っているからである。つまり、この特徴的な知覚現象を解明することが、視覚のメカニズムの解明に連動しているのである。これまで視覚は、脳科学的方法、神経科学的方法、実験心理学的方法、あるいは旧来の既存の数学を用いた工学的的方法（計算論的方法）による研究が行われてきた。研究代表者は、これらの方法に加えて数理科学的方法を提唱してきた。特に視覚と錯視の研究のために、調和解析的な独自の研究により、研究代表者らは「単純かざぐるまフレームレット」(H. Arai and S. Arai, 2009)、「かざぐるまフレームレット」(H. Arai and S. Arai, 2011) 及び「幾何学的フレーム」(H. Arai and S. Arai, 2010) を考案し、それを駆使して、視覚と錯視の研究を行い、従来の方法で得られなかったような様々な成果を得てきた。それは単に視覚、錯視の研究に留まらず、画像処理への応用、アートに応用でき、その成果のいくつかは実用化されている。(注：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本研究で重要な役割を果たすので、少し補足説明をする。「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」は新井仁之と新井しのぶが構成した視覚・錯視の研究に特化した新しいフレームレットの一つである。これらは大脳皮質 V1 野の単純細胞を模倣して作成したが、ただし視覚に関する神経科学の比較的最近の結果(大脳皮質の V1 野の単純細胞は高階までのガウス関数の導関数でよく fit できるという Young の結果(1985))も反映するように作ってある。ただし、ガウス関数の導関数、あるいは視覚の旧来の数理モデルでよく使われているガボール関数等は、台が非コンパクトであるのに対して、(単純)かざぐるまフレームレットはコンパクト台を有している。調和解析の用語を援用するならば、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、有限長のフィルタからなるタイト・フレームレットになっていて、スプライン関数により 2 次元ユークリッド空間上のルベグ測度に関する L^2 空間におけるコンパクト台をもつタイト・フレームレットとして実現可能である。)

一方、よく知られているように近年、機械学習、特にディープラーニングが、画像認識などさま

ざまな分野に革新をもたらしている。

2. 研究の目的

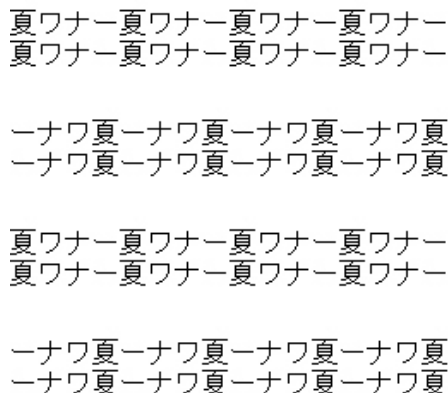
本研究の目的は、研究代表者らが考案した前述の単純かざぐるまフレームレットとかざぐるまフレームレットといった視覚・錯視研究のための調和解析的方法を応用してディープニューラルネットワークを構築し、またそのニューラルネットワークを使って、錯視の研究や機械学習の研究をすることである。

3. 研究の方法

単純かざぐるまフレームレットあるいはかざぐるまフレームレットを用いて新しいディープニューラルネットワークを構築する。また錯視に関するデータセットを作成し、それを使って錯視をこのニューラルネットワークに学習させ、錯視の研究に使う。錯視には多様な種類があるが、本研究では特に幾何的錯視のうち、傾きの錯視の一つである「文字列傾斜錯視」(詳しくは後述)を対象とする。錯視の中で特に文字列傾斜錯視を取り上げる意義については後述する。

4. 研究成果

本研究では、準備としてこれまでに研究代表者らが得た錯視の数値とその応用に関する成果をまとめなおして、再検討しつつ、本研究の主題である調和解析的方法による視覚・錯視の数値を使ったディープニューラルネットワークの研究、及びその応用に関する研究を行った。とりわけ最近出現した文字列傾斜錯視について研究を行った。研究成果を述べる前に「文字列傾斜錯視」とはどのようなものかを本研究に關係する範囲で説明する。この発端は、2005年頃にインターネットの日本の掲示板で流行った、平行なのに傾いて見える文字列を作ってアップするという遊びである。(研究代表者の知る限り、最初にそれを始めた人は不詳である。)もちろん日常、本や文書によって経験しているように、平行に並んだ活字(文字列)が傾いて見えることはあまりない。しかし文字列によっては、傾いて見えることがある。たとえばその一例として研究代表者らが2005年に見出した平行なのに傾いて見える文字列の一つを挙げておく(参考図2)。



参考図2. 新井仁之・新井しのぶが見つけた文字列が傾いて見える錯視の例(2005)

研究代表者らは2005年にこのような平行なのに傾いて見える文字列を文字列傾斜錯視と命名し、数学的方法によりその研究を行った。

この科研費の研究では、文字列傾斜錯視であるかどうかを判別できるようなディープニューラルネットワークを作ることを行った。そのために5文字から成る文字列傾斜錯視を30000個と5文字から成る傾いて見えない文字列30000個を本研究において新たに独自に作ることにし、文字列傾斜錯視のデータセットを作成した。このデータセットに含まれる文字列の例を参考図3にあげておく。参考図3左が文字列傾斜錯視、右が傾いて見えない文字列である。

このような膨大な数の文字列傾斜錯視から成るデータセットは本研究で得られたものが最初であり、このデータセットは本研究に留まらず、錯視研究にとって有益な価値あるものであると考えている。

本研究では、ディープニューラルネットワークを構築し、このデータセットを使って学習させ、文字列傾斜錯視の判別の研究を行った。以下、この報告書では紙数の都合上、特に単純かざぐる

十々卒T r 十々卒T r 十々卒T r 十々卒T r
 十々卒T r 十々卒T r 十々卒T r 十々卒T r

踵蓐亂金嶽踵蓐亂金嶽踵蓐亂金嶽踵蓐亂金嶽
 踵蓐亂金嶽踵蓐亂金嶽踵蓐亂金嶽踵蓐亂金嶽

r T 卒 々 十 r T 卒 々 十 r T 卒 々 十 r T 卒 々 十
 r T 卒 々 十 r T 卒 々 十 r T 卒 々 十 r T 卒 々 十

嶽金亂蓐踵嶽金亂蓐踵嶽金亂蓐踵嶽金亂蓐踵
 嶽金亂蓐踵嶽金亂蓐踵嶽金亂蓐踵嶽金亂蓐踵

十々卒T r 十々卒T r 十々卒T r 十々卒T r
 十々卒T r 十々卒T r 十々卒T r 十々卒T r

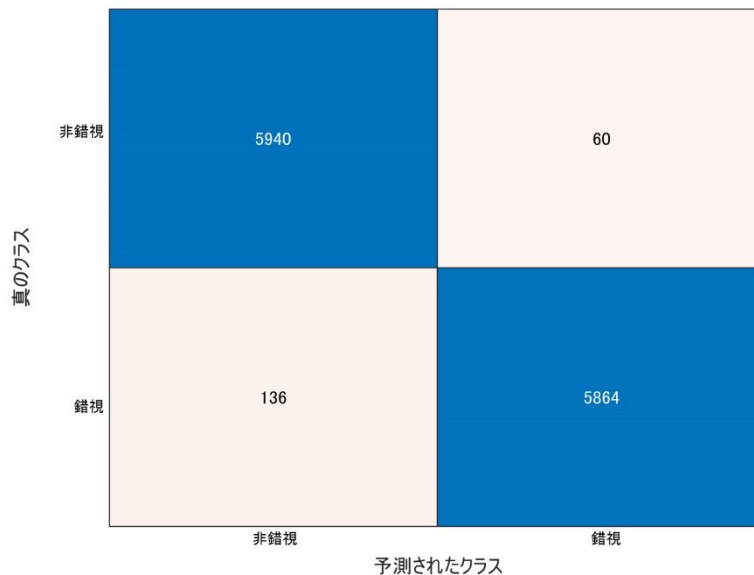
踵蓐亂金嶽踵蓐亂金嶽踵蓐亂金嶽踵蓐亂金嶽
 踵蓐亂金嶽踵蓐亂金嶽踵蓐亂金嶽踵蓐亂金嶽

r T 卒 々 十 r T 卒 々 十 r T 卒 々 十 r T 卒 々 十
 r T 卒 々 十 r T 卒 々 十 r T 卒 々 十 r T 卒 々 十

嶽金亂蓐踵嶽金亂蓐踵嶽金亂蓐踵嶽金亂蓐踵
 嶽金亂蓐踵嶽金亂蓐踵嶽金亂蓐踵嶽金亂蓐踵

参考図 3. 文字列傾斜錯視データセットから作られる文字列の例 . 左が文字列傾斜錯視 , 右が傾いて見えない文字列 .

まフレームレットを用いて作ったディープニューラルネットワークの一つについて記す . 本研究で得られた文字列傾斜錯視のデータセットのうち , 70% を訓練用データ , 10% を訓練中の検証用データ , そして 20% をテスト用データとして , 訓練用データを学習させ , 文字列傾斜錯視を判別するディープニューラルネットワークを作成した . 結果としては , テスト用データを使って試したところ , このニューラルネットワークではテスト用データに関して参考図 4 のような混合行列チャートが得られた (MATLAB を使って作成) . これは非常に高い正解率であることを示している .



参考図 4. 今回のテスト用データ分類の混合行列チャート (MATLAB を利用して作成)

ここでテスト用データの分類の具体例を見るために , テスト用データに対する分類の実行の例を挙げておく . テスト用データの文字列傾斜錯視 6000 個の中に含まれるデータの一つから作られる文字列傾斜錯視の例として , 例えば参考図 5 の文字列傾斜錯視がある . これに対する本研究で得たニューラルネットワークでは , これを文字列傾斜錯視に分類した . 一方 , テスト用データに入っている文字列傾斜錯視ではない 6000 個のデータの一つから作った文字配列の例として参考図 6 がある . 本研究で得たニューラルネットワークでは , これは文字列傾斜錯視ではない方に分類した .

詳細は発表を準備検討中である .

本研究報告の最後に , 本研究の成果を踏まえた今後の発展性と本研究の意義について記しておきたい . この方向の今後の研究課題としては , AI による文字列傾斜錯視の生成が考えられる . また , 本研究は , 例えば浮遊錯視の生成についても研究の端緒を与えるものである . 浮遊錯視については , これまで研究代表者らがオブアートやいくつかの商用アートとして実用化を行ってきた . もしも AI で浮遊錯視が生成できれば , オブアートや商用アートへの影響が少なからずあ

萃蹠士々ヤ萃蹠士々ヤ萃蹠士々ヤ萃蹠士々ヤ
 萃蹠士々ヤ萃蹠士々ヤ萃蹠士々ヤ萃蹠士々ヤ

ヤ々士蹠萃ヤ々士蹠萃ヤ々士蹠萃ヤ々士蹠萃
 ヤ々士蹠萃ヤ々士蹠萃ヤ々士蹠萃ヤ々士蹠萃

萃蹠士々ヤ萃蹠士々ヤ萃蹠士々ヤ萃蹠士々ヤ
 萃蹠士々ヤ萃蹠士々ヤ萃蹠士々ヤ萃蹠士々ヤ

ヤ々士蹠萃ヤ々士蹠萃ヤ々士蹠萃ヤ々士蹠萃
 ヤ々士蹠萃ヤ々士蹠萃ヤ々士蹠萃ヤ々士蹠萃

参考図5. テスト用データに含まれているデータのの一つから作られる文字列傾斜錯視 . 本研究で得られたニューラルネットはこれを文字列傾斜錯視に分類した .

登悦卸同注登悦卸同注登悦卸同注登悦卸同注
 登悦卸同注登悦卸同注登悦卸同注登悦卸同注

注同卸悦登注同卸悦登注同卸悦登注同卸悦登
 注同卸悦登注同卸悦登注同卸悦登注同卸悦登

登悦卸同注登悦卸同注登悦卸同注登悦卸同注
 登悦卸同注登悦卸同注登悦卸同注登悦卸同注

注同卸悦登注同卸悦登注同卸悦登注同卸悦登
 注同卸悦登注同卸悦登注同卸悦登注同卸悦登

参考図6 . テスト用データに含まれているデータのの一つから作られる傾いて見えない文字列 . 本研究で得られたニューラルネットはこれを傾いてない文字列に分類した .

るといえる .

さて , 文字列傾斜錯視には実は深いものがある . それは文字列傾斜錯視が , 幾何的錯視の中でもとりわけバリエーションに富んでいることである . 錯視の中で , これだけ多様なバリエーションが作れる例を研究代表者は知らない . また , 文字列傾斜錯視はヒトの視覚のもつ方位選択性だけでなく , 空間周波数域の選択性にも関係していることが研究代表者らの研究でわかっている . しかも , 文字列傾斜錯視に関しては研究代表者らによる数理モデルがあるので (発明者 : 新井仁之・新井しのぶ , 特許第 5456931 号 , 2013 年特許査定 , 特許権者 : 科学技術振興機構) , この数理モデルとニューラルネットとの比較検討をすることが可能であり , これは AI による分類のメカニズムの研究につながる可能性があると考えている . 本研究成果は萌芽的なものであるが , AI による錯視の研究に新たなテーマを切り開いてくれたといえよう .

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 0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2件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 新井仁之
2. 発表標題 視覚と錯視の数理とその応用
3. 学会等名 第13回生物教育研究連携講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

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