

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540123

研究課題名(和文) フレームレットの調和解析とその画像処理への応用

研究課題名(英文) Harmonic analysis of framelets and applications to image processing

研究代表者

新井 仁之 (Arai, Hitoshi)

東京大学・数理(科)学研究科(研究院)・教授

研究者番号：10175953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：2009年に新井仁之と新井しのぶはかざぐるまフレームレットを考案し、これまでその画像処理への応用、また錯視への応用研究を行ってきた。本プロジェクトの主要な成果を挙げれば、このかざぐるまフレームレットの性質の更なる数学的研究、かざぐるまフレームレットのバリエーションである広義かざぐるまフレームレットの開発、かざぐるまフレームレットを用いたある種の画像処理として立体感のあるエッジ検出法を考案したことである。また画像処理のケーススタディも行った。今後、この基礎研究が画像処理関連の数学によるイノベーションに繋がることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：I established with S. Arai new framelets, simple pinwheel framelets and pinwheel framelets, in 2009. So far I studied applications of pinwheel framelets to image processing and image processing related to visual illusions. The purpose of this project is to study mathematical properties of pinwheel framelets, and image processing by using these framelets. Some of main results are the following: variants of pinwheel framelets, and stereoscopic edge detection. The latter was obtained by using pinwheel framelets. I was concerned with case studies of stereoscopic edge detection as well as other image processing by using pinwheel framelets. I expect that results by this project will contribute to innovation by mathematics.

研究分野：数学

キーワード：フレームレット かざぐるまフレームレット 画像処理 錯視

1. 研究開始当初の背景

人はさまざまなものを見ている。しかし、本当に世の中のありのままの姿をみているのだろうか。答えは No である。たとえば次の図を見て欲しい。

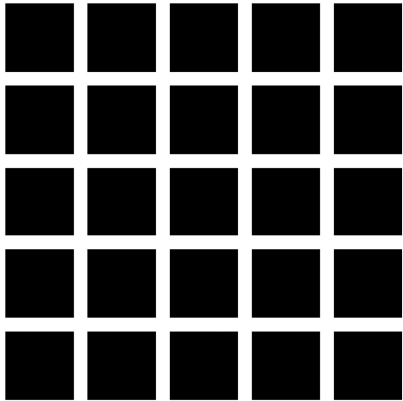


図1 ヘルマン格子錯視

白い道の十字路のところに薄黒い斑点状のものが見える。しかし実際にはそのような斑点状のものは印刷されていない。これはヘルマン格子錯視と呼ばれる視覚の錯覚の一つである。(なお錯視は感覚に関する現象であるため、錯視量には個人差がある。) これは錯視の一例であって、他にもいろいろなタイプの錯視がある。たとえば、次の図2は明暗の対比錯視とシュヴルール錯視を用いたものである。

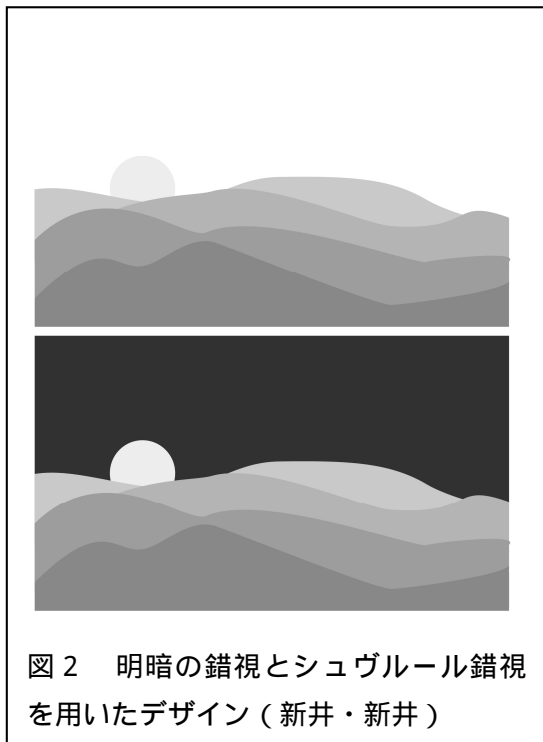


図2 明暗の錯視とシュヴルール錯視を用いたデザイン(新井・新井)

図2の上と下の画像の月が同じ輝度なのに違って見える。これは明暗の対比錯視と呼ばれる現象である。また4つの重なった山があるが、その上から二番目と三番目のものを見ると、それぞれが上方が暗く、下方が明るく見える。しかし各山の輝度は一定である。これはシュヴルール錯視と呼ばれるものである。以上は輝度に関する錯視であるが、このほかにも幾何学的な錯視などがある。その一つが次の図3である。

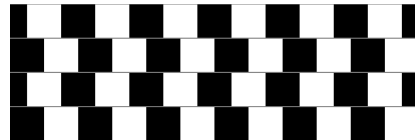


図3 カフェウォール錯視

黒と白のタイルが並び、その間を横方向にグレーの細かい線が数本一定間隔で引かれている。この細かいグレーの線をモルタルという。このモルタルが平行であるにもかかわらず傾いて見えるであろう。これはカフェウォール錯視と呼ばれる錯視である。

このような錯視はなぜおこるのだろうか？

錯視、あるいはより根源的に人の視覚のメカニズムがどのようにしているかという問題は古くから哲学、心理学、また近年では脳科学、視覚科学の分野で研究がされてきた。これまでに多くのことがわかってきたが、まだ未解明な部分も多々ある。研究代表者(新井仁之)はこの問題について、脳内で行われている視覚情報処理の数理モデルを作り、また必要に応じて新しい数学も作り、取り組んできた。新井の研究のアイデアの一つの概略を次の図4に記す。これにより錯視がいかん視覚情報処理の数理モデルの研究にとって重要なものであるかがわかるであろう。

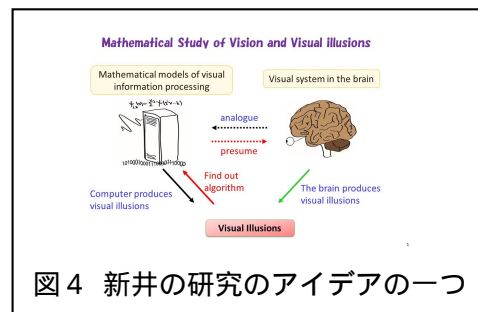


図4 新井の研究のアイデアの一つ

この研究の過程で、新井は新しい数学的道具の一つとして「かざぐるまフレームレット」(pinwheel framelet)を構成した。これが本研究の重要な背景となっているので、これに

ついて少し詳しく述べておきたい。

外界からの光は眼球に入り、網膜で処理され、脳内に伝送される。その多くは外側膝状体を経て、後頭葉にあるV1野に入ってくる。V1野では単純細胞などのニューロンによりさまざまな分解処理が行われている。ここで向き、高空間(擬)周波数から低空間(擬)周波数などの分解処理、色の処理、大域的な非線形処理などが行われる。その処理情報はさらにV2野から脳内のさらに高次の領野に伝送・処理されていく。(図5参照)またフィードバックもある。

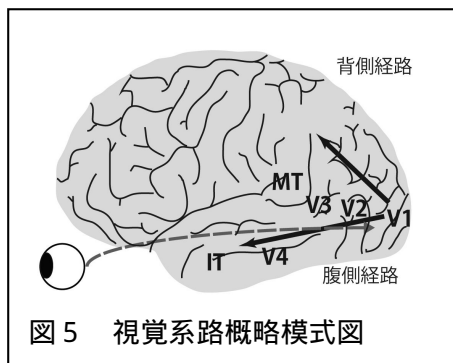


図5 視覚系路概略模式図

まず新井は新井しのぶと共同で、V1野の単純細胞の受容野の形状、機能を参考にしてかざぐるまウェーブレットフレーム(2007)、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(2009)を構成した(図6参照)。なお、フレームレットとは2003年に Daubechies らが考案したウェーブレットを一般化した数学的枠組みである。フレームレット自身は汎用的なもので、特に視覚・錯覚の研究を目的として定義されたものではない。かざぐるまフレームレットは新井・新井が考案した、視覚情報処理の研究に適した新しいフレームレットの一つである。この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もとに新井・新井は視覚情報処理の数理解モデルとその錯視の数理解科学的な研究について多くの成果を得た。

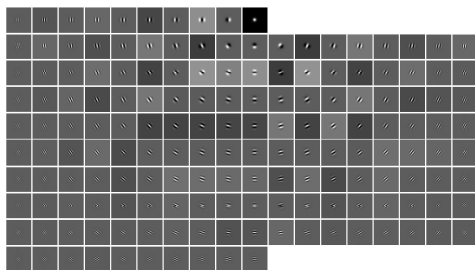


図6 9次(最大重複)かざぐるまフレームレットのレベル2を構成するフィルタの族(新井・新井, 2009)

2. 研究の目的

本研究の目的は、1に記した新井・新井による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の数学的な研究をさらに進め、それを画像処理に応用することである。

3. 研究の方法

まず新井の研究方法がなぜ画像処理に応用できる可能性があるかということについて述べておく。

人の視覚は眼球から入ってきた光の情報、たとえば外の風景などと、実際に私たちの脳により生まれる表象とは異なっている場合がある。その典型例が1でいくつか例をあげた錯視である。このことは、人の視覚情報処理のシステムが不完全再構成であることを示している。これに対して、1で述べたかざぐるまウェーブレットフレーム、単純かざぐるまフレームレット、そしてかざぐるまフレームレットは、入力データと出力データが完全に一致するマルチチャネル・フィルタバンクとなっている。これを我々は視覚情報処理の基盤モデルと呼んでいる。ちなみに新井が行ってきた視覚の研究では、この完全再構成性を有する基盤モデルに、視覚の基本法則を見出し、それを数理化したものを付加して人の視覚と同様の不完全なシステムの数理解モデルを作っていくというものであった。

しかしながら、完全再構成性をもつ基盤モデルからは、人の視覚情報処理の数理解モデルのみが作れるわけではない。他のタイプの処理ができるような機能を付加させることもできる。これにより人の視覚のある機能を特化させるようなシステムを設計することも可能になる。このアイデアに基づいて新井はさまざまな画像処理を考案してきた。本研究でもこのアイデアに基づいた画像処理の研究を行った。

次にかざぐるまフレームレットであるが、この構成を変形して、さまざまなバリエーションを作ることが可能であることが期待できる。どのようなことが可能かを調べていくことは視覚の研究のみならず、新しいフレームの構成という調和解析学としての意義もある。

4. 研究成果

本研究の成果のうち主なものを記す。またその更なる発展の可能性についても述べる。

まずかざぐるまフレームレットに関連する研究の成果について記す。すでに新井・新井により、かざぐるまウェーブレットフレームと単純かざぐるまフレームレットについてはその周波数特性の研究が行われた。本研究ではかざぐるまフレームレットの周波数特性を研究した。その結果、周波数特性は、か

ざぐるまウェーブレットフレーム、あるいは単純かざぐるまフレームレットのそれと類似していることが確認できた。かざぐるまフレームレットは、単純かざぐるまフレームレットよりも構成が複雑であるが、しかしかざぐるま構造自身はかざぐるまフレームレットが最も実際の脳のものに近いことが新井・新井により確認されている。さらに単純かざぐるまフレームレットでもかざぐるまフレームレットでも、さまざまな錯視や視覚の研究ができることが経験的にわかっている。今回の研究により、空間周波数の解析に関しても単純かざぐるまフレームレットと同じような機能が備わっていることを明らかにすることができた。

この方面のもう一つの研究成果は、かざぐるまフレームレットの構成の際の係数の取り方に、さらに別の取り方の可能性を見出したことである。これにより、かざぐるまフレームレットのいろいろなバリエーションが得られることを確認した。このようなバリエーションを含めて広義かざぐるまフレームレットと呼ぶことにした。本研究におけるこの成果から、どの程度まで変形可能かという新たな問題、あるいはさらに別のタイプの変形があるかという新たな研究の萌芽が生まれた。これについては本研究成果に基づき、今後も研究を続けていきたい。

なお以上の研究成果は、さらに整理・補充して論文あるいは著書などで発表していきたい。

かざぐるまフレームレットの画像処理への応用として、立体エッジ検出 (stereoscopic edge detection) と呼ぶことにした処理方法を得たので、これについて述べる。

従来のエッジ検出法は、二次元画像のエッジを検出してその画像の特性を調べるというものであった。ただ従来のエッジ検出の方法の問題点は、3次元的な重なりがあっても、それは平面内の線の交わりとなってしまうことである。

もともと人の視覚は網膜において、3次元的な情報が2次元情報となって脳に伝送されている。それを脳内の情報処理により、私たちは立体感を知覚できている。このことは、網膜で3次元情報が2次元情報に落とされた際に、完全に3次元的な情報が失われているわけではないことを意味している。

2次元から3次元的な知覚を構成するのに使われる情報とは何か？

これにはいろいろなものが考えられるが、その一つが「影」である。実際に、絵を描画する際にも立体感を出すために、物体に影を付けることが多々ある。この点に着目したのが本研究成果である立体エッジ検出法である。ところで、影が産み出す錯視としてクレーター錯視がすでに知られている。本研究にも関連するので、ここでクレーター錯視について簡単に振り返っておこう。なお本研究成果に

よる画像処理はクレーター錯視自動生成という機能も含んでいるので、それを用いて作成したクレーター錯視の一例を示すことにする。

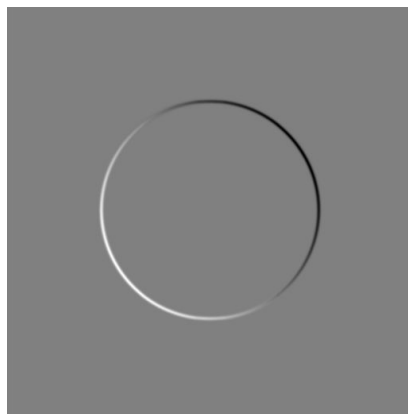


図7a クレーター錯視の例

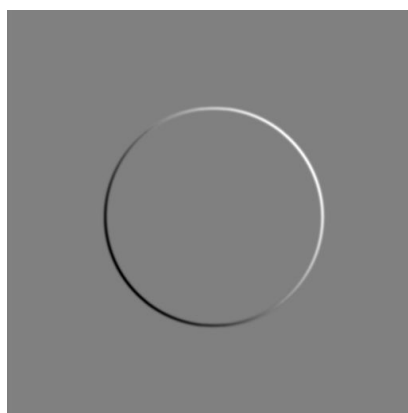


図7b クレーター錯視の例

図7aではボタンのようなものが出張って見える。その一方で図7bではボタン状のものが凹んで見える。なおクレーター錯視の見え方は個人差があり、図7bも出張って見える人もいる。また図7bは何度か見ていると凹んで見える場合や出張って見える場合がある人もいる。なお図7aと図7bでは円の縁の白いところと暗いところの位置関係が違う。

さて本研究の本題に戻るが、かざぐるまフレームレットによるエッジ検出方法に、このようなクレーター錯視の効果を考慮に入れて考案した方法が立体エッジ検出の技術である。クレーター錯視を起こす影の効果を精密に扱う必要があるが、かざぐるまフレームレットは次数を上げると方位選択性の機能が向上するという特性を有しているため、立体エッジ検出が可能になったといえるだろう。その実施例として、たとえば天体写真の場合、

肉眼では識別しにくい星を立体感をもって検出することが可能になっている。また、鳥の骨格のX線写真では、細かいそして識別しにくい骨の部分が、重なり具合も込めて視認できるようになっている。(原画像の著作権の問題から処理結果の提示はしない。)なお、本研究成果による画像処理技術で得られる立体感は、錯視効果によるものであり、現実の物理的な立体構造とは異なるものであることを付言しておく。
なお以上の成果は新井しのぶとの共同研究による。

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 4 件)

① 新井仁之，新井しのぶ，錯視の数理モデルと錯視図形の構造解析，心理学評論，55 (2012)，309-333.

② 新井仁之，数学を使った視覚・錯視の研究の応用 - 数理視覚科学への誘い4，数学文化，21 (2014)，80-86.

③ Hitoshi Arai，Mathematical models of visual information processing in the human brain and applications to visual illusions and image processing. Mathematical Progress in Expressive Image Synthesis I, Springer, 1 (2014)，7-12.

④ Hitoshi Arai，From mathematical study of visual information processing in the brain to image processing, Mathematical Progress in Excessive Image Synthesis I, Springer, to appear.

[学会発表](計 6 件)

① 新井仁之，視覚と錯視の数理解析 - 数理科学と知覚心理学の融合を目指して - ，日本心理学会第75回大会，於日本大学，2011年9月15日(招待有り)

② Hitoshi Arai，Mathematical models of visual information processing and applications to visual illusions, The Eighth Conference of East Asia section of SIAM, 於 National Taiwan Univ., Taiwan, 2012年6月25日(招待有り)

③ Hitoshi Arai，Mathematical models of visual information processing in the human brain and applications to image processing, MEIS2013, 於 Centennial Hall Kyusyu Univ. School of Medicin, Japan, 2013年10月22日(招待有り)

④ 新井仁之，視覚と錯視のフレームレットモデル，数学協働プログラム「人間行動への数理の応用による課題解決」ワークショップ(招待有り)

⑤ 新井仁之，数学を用いた錯視の研究とその応用，第22回 Future of Radiology，於丸ビルホール&コンファレンススクエア，2013年6月6日(招待有り)

⑥ 新井仁之，視覚の錯覚から画像処理へ，第74回日本医学放射線学会総会 招待講演，発表確定(発表日：2015年4月17日，於パシフィコ横浜)

[図書](計 1 件)

① 新井仁之，錯視と科学，ミネルヴァ書房，2013年

[その他]

ホームページ等

錯視の科学館

<http://araiweb.matrix.jp/Exhibition/illusiongallery4.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

新井 仁之 (ARAI HITOSHI)

東京大学・大学院数理科学研究科・教授

研究者番号：10175953