「数学と他分野の協働によるブレークスルーの探索」
平成22年度採択研究代表者

H22 年度
実績報告

杉原　厚吉

明治大学研究・知財戦略機構・教授

計算錯覚学の構築 --- 錯視の数理モデリングとその応用

§1. 研究実施の概要

研究のねらい

人の錯視現象の数理モデリングに関する各メンバーのこれまでの研究ついて互いに理解しあい、共通の研究活動のための拠点スペースを整備して、計算錯覚学の研究をスタートさせる。

これまでの研究の概要

本研究のメンバーは、それぞれの計算手法で錯視のモデリングとその応用に関して検討しており、横断的錯覚科学を探る「計算錯覚学」という新しい研究領域を創成できる見通しを持つことができ、今回の申請・採択に至った。

研究進捗状況

研究成果を展示し、一般に公開する「錯覚美術館」の開設準備を完了した。2011 年 3 月にオープンの予定であったが、今回の大震災で開館は来年度に延期した。一方、それぞれのグループでは、順調に研究を推進できた。

研究成果

立体錯視等に関しては、画像を見る視点と知覚歪ひずみの関係のモデル化、道路の構造と縦断勾配錯視の関係の基礎的データの収集、電気刺激による新しい味覚の生成、などを行うことができた。

数学と知覚心理学の協働による視覚・錯視のメカニズムの解明に関しては、色に関する錯視と静止画が動いて見えるある種の錯視の脳内モデルの考察、フレーザー錯視系統の傾き錯視の分類、それぞれに対応する静止画が動いて見える錯視の説明、「トゲトゲドリフト錯視」という錯視量が際立って多い錯視の発見などを行った。また、顔の錯視については、アイシャドーの効果とアイラインの効果などを明らかにした。

錯視現象の生体反応計測と画像品質評価・画像合成への応用に関しては、回転による混色に

より知覚できない色から、実際には存在しない錯覚色が知覚される現象を発見し、その現象の性質を心理実験により明らかにした。また、脳波計により、この現象に伴う脳活動を計測するための計測システムを立ち上げた。ハイブリッドイメージや視覚復号型暗号では、部分的な空間周波数の制御が求められるが、全体的な制約を満たしつつ、より細かな制御を実現する手法を開発した。

今後の見通し

地震の影響の収束状況を見ながら、なるべく早く錯覚美術館を開館する。

基礎的研究に関しては、特に、高次の視知覚の数理モデルを作るために必要と考えられる新しい数学的方法の開発、実際には存在しない色が知覚される際の脳内機序の検討などを行う。

応用に関しては、画像からの奥行き知覚のひずみ軽減法、縦断勾配錯視を軽減による自然渋滞の緩和、電気味覚の利用、などを開発していく。

§2. 研究実施体制

(1)「杉原」グループ

① 研究分担グループ長:杉原　厚吉 （明治大学研究・知財戦略機構、教授）

② 研究項目

・立体錯視の数理モデリングとその応用

(2)「新井」グループ

① 研究分担グループ長:新井　仁之 （東京大学大学院数理科学研究科、教授）

② 研究項目

・数学と知覚心理学の協働による視覚・錯視のメカニズムの解明

(3)「山口」グループ

① 研究分担グループ長:山口　泰 （東京大学大学院総合文化研究科、教授）

② 研究項目

・錯視現象の生体反応計測と画像品質評価・画像合成への応用

§3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4－1)に対応する)

本研究全体の研究目的は、錯視の数理モデリングを通して、視覚の仕組みを理解し、それを生活に応用すると同時に、人の知覚・視覚現象を扱うことにできるロバストな数学理論を作ることである。チーム全体で、これを実施するための共通基盤として、明治大学駿河台キャンパスの近くに研究活動拠点兼錯覚美術館のスペースを整備した。ここは、普段は研究活動に使うが、本研究メンバーが研究の過程で創作する錯覚作品の新作を順次入れ替えて展示し、一般にも公開して研究内容を紹介すると同時に、来館者からのアンケートを通して錯覚効果を計測する。錯覚美術館は2011 年 3 月オープンを目指して準備を完了したが、今回の地震に伴う節電への協力、安全の確保などを考慮し、オープンは来年度へ延期した。

杉原グループは、立体知覚に関する錯視に注目し、数理モデリングによるその仕組みの解明と応用を目的としている。この目的に沿って、次のように研究を実施した。

画像から奥行きを読み取る人の視覚機能の解明では、絵を理解するコンピュータを開発する研究結果をもとに数理モデルの第一版を構築し、画像知覚のひずみを生じる要因を数理的に解明しつつある[3, 6]。この数理モデルから、柱に支えられていないのに斜面の傾きを逆向きに知覚する「反重力すべり台」の新しい錯視作品群を設計・製作することができた。また、同じ数理モデルから、複数の画像を合成したときの知覚ひずみの要因を抽出することができた。さらに、これらの設計・製作計算の基礎をなすロバスト幾何計算アルゴリズムについてもいくつかの整備をした[2, 8]。

錯覚を日常生活や支援に応用する試みでは、味覚器に電気刺激を与えると、電気味覚と呼ばれる味覚を呼び起こすことができる。この特性を利用し、通常味覚器では感知できない情報を味覚で感知可能にする手法を開発した[4]。 また、種々の応用例のうち、そこに立つだけで口笛の音域が拡張される「口笛拡張場」を開発した。システムは演奏者が出そうとしている音をリアルタイムで推測し、口笛の音として出力する。ガンマイクと超指向性スピーカの使用により、何ら道具を装着しない演奏を可能にし、更に「演奏者から音が出ているかのような錯覚」を聴取者と演奏者自身に与えることに成功した。

道路の構造と縦断勾配錯視の関係については、GPS・ジャイロセンサーを搭載した車で走行することで、香川県屋島ドライブウェイにおいて、運転挙動と道路傾斜の関係、及び錯視が生じる道路上での運転挙動について、データ計測・収集を行い、データ解析の準備を進めているところである。さらに、道路上の傾斜の錯視を解消する方法として、壁面のストライプパターンに注目し、アンケート調査によってその解消策の有効性について検証した。その結果、ストライプパターンによって、道路傾斜の認識が変化していることがわかった。特に、ストライプパターンを水平面と認識する傾向が強く、道路傾斜の認識はストライプパターンからの差分で判断を行っていると考えられ、この方法を用いることで、道路傾斜の誤認を減らすことが可能であることがわかった。

新井グループでは、数学と知覚心理学の協働を目指す研究を行った。新井は色に関する錯視の数理モデルによる研究を、これまでさきがけ研究として行ってきたが、CREST ではそれに心理

学的・神経科学的な解釈を加えて、成果発表をする準備に着手した。また新井はさきがけ研究で、任意の画像を浮遊錯視にする浮遊錯視生成アルゴリズムを発明し、特許を出願したが、CREST ではこれを利用して、さまざまな浮遊錯視を作成するとともに、それに関する脳内での視覚情報処理を明らかにするための準備的研究を行った。また、新井と北岡は、静止画が動いて見えるある種の錯視について、数学と心理学の立場から情報交換を行い、議論・検討を行った。北岡はフレーザー錯視系統の傾き錯視を 3 種類に分類し、それぞれに対応する静止画が動いて見える錯視をファイ、リバースト・ファイ、竹内運動効果の組み合わせで説明できることを示した。3 種類の傾き錯視とは、明・暗と位相の異なる 4 つのラインの組み合わせでできる「ラインタイプ」、明・暗と位相の異なる 4 つのエッジの組み合わせでできる「エッジタイプ」、明・暗のラインとエッジの 4 つの要素の組み合わせできる「混合タイプ」である。「ラインタイプ」と「エッジタイプ」は特定の網膜像のスリップが起こるとファイとリバースト・ファイの組み合わせ（4 ストローク運動）によって特定の方向に動いて見えると説明でき、「混合タイプ」は竹内運動効果で説明できることを示した。新井の浮遊錯視との関係は検討中である。類似しているが、必ずしも同一とは言えないところがある。

山口グループは、回転盤により生じる錯覚色を発見した。この回転盤は色のついた扇型とそこに属する黒い弧からなり、回転によりこれらの弧が作るリングに錯覚色が知覚される。この現象に関していくつかの心理実験を行い、リングに見える色はそのリングを作っている弧が属している扇型の色の反対色であること、ならびに、それぞれの扇型の色が回転のため混色し知覚できない場合でも、この錯覚色はそれぞれの扇型の反対色であることを明らかにした。このことは扇型の色は知覚されないが、脳では処理されており、その結果、錯覚色が生じると考えられる（これらの成果は[1]で発表の上、現在 Perception 誌に投稿中である）。このように、この現象は脳の色情報処理を反映していると考えられるため、脳計測を行うことで色の知覚と脳内処理の関係が調べられる可能性がある。錯覚色の知覚に伴う視覚性誘発電位計測により、その脳内機序を明らかにするため、多電極でかつ容易に計測が可能である脳波計システムと、計測された脳波から脳活動の発生源を突き止めるためのソフトウェアを準備した。これにより、実験参加者に過大な負担を強いることなく多電極による精確な脳波計測が可能な上、その発生源となる脳部位を特定できると考えられる。

視覚の空間周波数特性の応用として、ハイブリッドイメージと視覚復号型暗号を扱った。ハイブリッドイメージは高周波数成分を残した画像 A と低周波数成分を残した画像 B とを合成することで、相対的に大きく見えるように（近くから）観察すると画像 A が、相対的に小さく見えるように（遠くから）観察すると画像 B が認知される。まったく異なる2画像を合成すると、近くから観察したときに2画像がともに認知されてしまう。そこで、与えられた2画像の部分的な空間周波数を解析して、画像Aが画像Bを適切に覆い隠すように制御する手法を開発した。また、視覚復号型暗号は画像をドットパターンに分解し、2画像を重ね合わせた際に、ドットパターンの干渉によって別の画像を作り出す。原理上写真のような自然画像を暗号化する際には、画質が大幅に悪化することが避けられないが、その問題点と各種のアプローチを整理した[7]。

§4. 成果発表等

（4－1） 原著論文発表

●論文詳細情報

1. Haruaki Fukuda and Kazuhiro Ueda, “Illusory colour induced by rapid flicker”, AsiaGraph2010 Proceedings, vol. 4, no. 1, pp. 70-73, 2010 (DOI コード不明)

2. Kokichi Sugihara, Atuyuki Okabe and Toshiaki Sato: Computational method for the point cluster analysis on networks. GeoInformatica: Volume 15, Issue 1 (2011), Page 167-189. (DOI: 10.1007/ s10707-009-0092-5)

3. Kokichi. Sugihara: “Spatial realization of Escher's impossible world”, Asian Pacific Mathematics Newsletter, vol. 1, no. 1, pp. 1-5, 2011 (Printed ISBN 2010-3484, Electric ISBN 2010-3492; DOI コードは不明)

4. Hiromi Nakamura, Homei Miyashita. Augmented Gustation using Electricity, Proceedings of ACM Augmented Human International Conference2011 (AH2011), 34:1-2, 2011. (ISBN 978-1-4503-0426-9)

5. Mieko Nakamura, Homei Miyashita. CatchyAccount: A System for Acquiring a Realistic Sense of Expenditures , Proceedings of ACM Augmented Human International Conference 2011 (AH2011), 29:1-2, 2011. (ISBN 978-1-4503-0426-9)

6. Kokichi Sugihara, “Design of antigravity slopes for visual illusion”, 27th European Workshop on Computational Geometry, Morschach, Switzerland, March 28-30, 2011, pp. 55-58 (DOI コード不明).

7. Yasushi Yamaguchi, “Extended Visual Cryptography for Photograph Images”, Visual Cryptography and Secret Image Sharing, S. Cimato and C.-N. Yang eds., CRC Press (in press) (ISBN 9781439837214)

8. Kokichi Sugihara, “Robust geometric computation based on the principle of independence”, NOLTA, IEICE (in press)