

令和元年6月13日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H01728

研究課題名(和文) 視覚の心理・数理モデリングと第5世代不可能立体

研究課題名(英文) Psychological and Mathematical Modeling of Vision and the 5th Generation Impossible Objects

研究代表者

杉原 厚吉 (Sugihara, Kokichi)

明治大学・研究・知財戦略機構・特任教授

研究者番号：40144117

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,800,000円

研究成果の概要(和文)：心理学的知見を追加した視覚の数理モデルから新しい立体錯視を予測し、それを検証した。具体的には、ゆらゆら動いて見える「浮遊立体」、湾曲して見える「歪み立体」、変形するように見える「軟体立体」、鏡に映すと繋がり方が変わる「トポロジー攪乱立体」、三つの解釈を持つ「3方向多義立体」、鏡に映った姿と元の立体を合成すると意味のある形が見えてくる「鏡映合成変身立体」、二つの方向から別の形が見える「多視点ワイヤーアート」の設計法を構成し、その視覚効果を確認した。網膜の階層構造を反映した反応拡散型の視覚情報処理モデルを構成し、明るさの錯視などが説明できることを示した。読み取りやすい図形の自動生成法も構成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、立体を網膜像から知覚する作業においてあらたな誤認の危険性が明らかになった。この成果は、状況誤認による事故の原因を取り除き、事故の危険性を減らすための環境整備指針を与えるという社会的意義を持つ。また、立体錯視は、不思議で面白いという側面もあるため、本研究で構成した視覚の数理モデルを利用して錯視を強める手段を提供することによって、エンタテインメントのための新しい素材を提供するという意義も持つ。さらに、網膜の階層的な情報処理モデルは網膜での情報処理に新しい理解をもたらすものであり、また、読み取りやすい図形の自動生成法は変化の激しい大量データの効率的な利用法に寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：A mathematical model of vision was used to predict new 3D optical illusions and the existence of the illusions was verified by designing examples of 3D impossible objects. New illusions found in this research include 'floating objects' that appear to drift, 'distorted objects' that appear to be distorted, 'flexible objects' that appear to deform, 'topology-disturbing objects' whose topology appear to change in a mirror, 'triply ambiguous objects' that have three interpretations, and 'multiple-view wire art' that have two different appearances. The design algorithms for those objects were established, and visual effects were verified by example objects created by those algorithms.

A mathematical model of visual information processing in retina that reflects the hierarchical structure of the retina was constructed, and it was used to explain visual effects of brightness contrast and assimilation simultaneously. A method was constructed to create easy-readable diagrams automatically.

研究分野：数理工学

キーワード：視覚の数理モデル 立体錯視 不可能立体 軟体立体 3方向多義立体 多視点ワイヤーアート 鏡映合成変身立体 網膜情報処理モデル

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

見たものが実際とは違うように見えてしまう錯視の研究は、長い間、視覚心理学や認知科学の分野で行われてきたが、近年、錯視の数理モデルを手がかりにその仕組みを探る方法論も開発されてきた。ここでは、目でとらえた網膜像から認識へ至る情報処理の過程を計算手続きとしてモデル化し、それを人の視覚の振る舞いと比較しながらモデルを改良・精密化することによって視覚システムの仕組みを理解しようとする。この方法論で多くの研究がなされてきたが、そのほとんどは2次元図形に関する錯視を対象としていた。それに対して、本研究代表者は、3次元立体を見たときの奥行きに関する錯視の仕組みを探り、新しい錯視立体の設計法を開発してきた。これらの実績の上に、さらに多様な種類の立体錯視を発見・創作すると同時に、その仕組みを数理モデリングによって理解しようとする本研究課題の構想が固まってきた。

### 2. 研究の目的

本研究では、今までに開発・創作してきただまし絵立体・変身立体などの第1世代から第4世代までの不可能立体錯視の基盤の上に、さらに新しい立体錯視群を開拓・創作する。そのため、今までに構築してきた立体知覚の数理モデルに、画像から立体を読み取るとき脳がどのような形を優先的に思い浮かべるかについてのゲシュタルト心理学・知覚心理学的知見を追加してモデルを改良し、それを利用する。特に、この数理モデルから存在が予測される新しい錯視立体を創作し、その視覚効果を数値化し、制御する方法を開発する。また、これから波及する話題として、視覚の入力システムである網膜での情報処理の数理モデリング、わかりやすい視覚情報の生成法についても取り上げる。

### 3. 研究の方法

今までに開発してきた視覚の数理モデルでは、与えられた網膜像に一致する立体の全ての可能性を列挙するところまでは完成していたが、その中から人と同じ知覚をもたらす一つの立体を決定する仕組みについては、未解決のままであった。これに対して、視覚心理学の知見を参考にしながら、立体の候補を絞るための基準を作る。そのための一つの手がかりは、2次元図形でよく知られている錯視が立体と相互作用を起こしたとき何が起るかを調べることである。そこで、第1に、静止図形なのにゆらゆら動いて見えるという2次元錯視図形を立体の表面に貼ったとき、立体が揺れて見える可能性があることから「浮遊立体」の存在を予測し、それを検証する。第2には、線の向きが傾斜して見える2次元幾何学錯視を立体の表面に貼ったとき、線だけではなく面も傾斜する可能性があることから「歪み立体」の存在を予測し、それを検証する。第3には、本研究代表者が発見した変身立体の錯視の強さが立体によって大きく異なることに着目し、視点を動かしても錯視が消えにくい立体（これを「軟体立体」と名付ける）があるはずだという予測に基づいて新しい錯視立体を創作する。これらの作業を通して、視覚システムが可能な立体の中から何を優先しているかを見極める。

また、この研究から波及するテーマとして、網膜での視覚情報処理の数理モデルによる理解、人にとってわかりやすい図形を自動生成する手法なども考察する。

### 4. 研究成果

新しい錯視立体として、当初から目指した「浮遊立体」、「歪み立体」、「軟体立体」に加えて、当初の計画にはなかった新しい錯視立体として「トポロジー攪乱立体」、「3方向多義立体」、「鏡映合成変身立体」、「多視点ワイヤーアート」等も発見・創作することができた。まず、それらについて述べる。

#### (1) 浮遊立体錯視

静止図形なのに動いて見える2次元錯視図形を立体の表面に描くと、立体自体がゆらゆら動いて見える視覚効果が生まれることを確認した。この知見は、タイルを歩道に貼るときなどに浮遊して歩きにくくなる危険性があることを示すもので、生活空間の安全性を確保するための指針となる。(杉原が担当)

#### (2) 歪み立体錯視

線が傾いて見える2次元錯視図形を立体の表面に描くと、線だけでなく面も傾いて見える視覚効果が生まれることを確認した。たとえば、階段にカフェウォール錯視図形を敷き詰めると、階段のステップが湾曲しているように見えて、歩きにくくなる。また、建物の窓の高さをずらすと、建物の壁が傾斜してみえて、住みにくい建物になってしまう。これらの知見は、歩道や階段にタイルを貼る場合や建物の形状設計を行うときに、期待に反した視覚効果をもたらす危険性を回避するための指針となる。(杉原が担当)

#### (3) 軟体立体錯視

実際とは違う形に見える立体錯視は、通常は特定の視点位置から見たときだけ起るが、まれ

に視点を動かしても錯視が起き続ける立体があることを、今までに創作した錯視立体の中で見つけていた。これについて検討し、錯視の原因となっている幾何学的性質が、視点を動かしても消えない場合がこれに当たることを発見した。このような立体では、視点を動かしたとき立体が変形するように見えるという視覚効果が生じる。そのため、これには「軟体立体」という名前をつけた。その一例は、右を向いた矢印を、垂直な軸のまわりで180度回転させたとき、左を向くだろうという期待に反して、再び右を向いてしまう錯視である。(杉原が担当)

#### (4) トポロジー攪乱立体錯視

鏡に映したとき、個々の立体の形は変わらないのに、繋がり方(トポロジー)が変わって見える錯視を発見した。鏡に映しても図形のトポロジーは不変に保たれるから、この視覚効果は不可能なことが起っているという印象を生む。その意味で、新種の不可能立体錯視である。トポロジー攪乱立体が作れるために図形対が満たすべき条件も明らかにし、この錯視立体を設計するためのアルゴリズムを構成した。この成果をまとめた論文[7]は“ The Best Writing on Mathematics 2019 ” (Princeton University Press)に掲載が決まった。(杉原が担当)

#### (5) 3方向多義立体

三つの方向から見たとき、全く異なる形に見える立体の設計法を構成した。異なる解釈を持つ多義図形はたくさん知られているが、そのほとんどは二つの解釈をもつものである。三つの解釈をもつものも偶発的に創作されてはいたが、それを系統的に設計するアルゴリズムを与えたのは初めてである。この立体の一例は、2018年ベスト錯覚コンテスト(Best Illusion of the Year Contest)で優勝を獲得した。(杉原が担当)

#### (6) 鏡映合成変身立体

立体自体は意味不明の形であるが、水平な鏡の上に置くと、立体とその鏡映像が合成されて意味のある形が見えてくる錯視立体の構成法を開発した。この一例は、日本図学会 2018年度デジタルモデリングコンテストで最優秀賞を受賞した。(杉原、森口が担当)

#### (7) 多視点ワイヤーアート

2枚の線画(連結な区分線形グラフ)を入力し、2つの方向から見ると与えられた異なる線画が得られるようなワイヤーアートの作成において、線分数が最小となるワイヤーアートを求める最適化問題を解く方法を求め、実際に3Dプリンタで作成した。(森口、今井が担当)

これらの立体錯視群の開拓とその作品例の創作・観察を通して、目標である「可能な立体の中から人の視覚は何を優先して復元するか」について探求した。その結果、「できるだけ直角の多い構造を優先する」、「対称性の高い構造を優先する」などの一般的傾向を見つけることができた。これらは、視覚心理学で「形の恒常性」と総称されている性質に属すとみなすこともできるが、特に直角と対称性を強く選択する理由についての究明は、今後の課題である。

また、従来から常識的に考えられている「いちどは立体を間違えて知覚しても、本当の形を知った後は間違わない」、「片方の目で見るときは間違えるかもしれないが、近い距離にあるものを両目で見れば奥行きは正しく知覚できる」などの性質も、必ずしも成り立たないことを見つけた。すなわち、奥行き知覚は理性とは別のところで行われており、時には両眼立体視をもあざむくほど強いことがわかった。これらも新しい知見である。

不可能立体錯視以外には、次のような成果が得られた。

#### (8) 網膜の階層構造を反映した視覚情報処理モデルの構築

網膜における視覚情報処理の新しい数理モデルを提案した。視覚は網膜を通して入った情報が脳内に受容されることであり、脳における情報処理の解明の理論的研究が展開されている。「自己組織化」現象はこの半世紀の間、自然科学のみならず、人文科学、社会科学分野においても現れることが示されており、徐々にではあるが、自己組織化機能が明らかになって来ている。視覚の入力は網膜であるが、網膜は光センサーとして、入ってきたデータを視神経を通じて脳に伝えるだけであるという理解が主流であるが、分担者は複雑な階層構造を持つ網膜は単に情報を伝えるだけでなく、入った情報がどのような情報処理を行い、網膜の階層構造モデルを提案することから、明暗錯視が網膜だけで出現する可能性を考察した。(三村、須志田、近藤、杉原が担当)

#### (9) ラベル配置問題

地図上の点集合と各点に対応する注記と呼ばれるラベルの集合が与えられたとき、人が読み取り易いようにラベルを配置する問題を、数理的に定式化して解いている。航空管制官が操作する画面では、航空機の情報はラベルとして表示されるが、情報量が多いため重なって表示される。情報を管制官が読み取るためには重なっていないラベルが多いものより、一か所に重ならないように配置する方が望ましい。点集合と各点に対応する情報を記述するラベルが与えら

れたとき、地図上の点に重なるラベルの枚数の最大値が最小となるような最適化問題を考え、その近似アルゴリズムを提案した。また、モバイル端末で地図を表示したとき、地図の回転によってラベルが重なることがある。回転によってラベルが重ならないような最大の大きさを見つける問題の最適解や近似解を求めるアルゴリズムを開発した。(今井、森口が担当)

#### (10) 路線図の自動生成

東京の地下鉄路線図のような複雑な路線図を対象として、路線図である平面グラフと駅名のラベルを、人が読み取り易いように、かつ実際の位置関係をなるべく保持するように描画する手法を考えた。人が読み取り易い条件を必ず満たすべき制約条件となるべく満たして欲しい制約条件に分け、なるべく満たしてほしい条件を目的関数として表現することによって、最適化問題として定式化して解いた。これまで、東京の地下鉄路線図に対して有効な手法は得られていなかったが、今回、制約を満たす東京の地下鉄路線図の出力に成功した。(今井、森口が担当)

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計21件)

1. K. Sugihara: Anomalous mirror symmetry generated by optical illusion. *Symmetry*, Vol. 8 (2016), DOI: 10.3390/sym8040021
2. K. Sugihara: Visual media culture supported by illusion of depth. *Mathematical Progress in Expressive Image Synthesis III, Selected and Extended Results from the Symposium MEIS2015*, 2016, pp. 61-70.
3. K. Sugihara: A new type of impossible objects that become partly invisible in a mirror. *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 33 (2016), pp. 525-535. DOI: 10.1007/s13160-016-0233-9
4. J. Ono, A. Tomoeda and K. Sugihara: Footsteps illusion art. *Journal of Mathematics and the Arts*, Vol. 10 (2016), pp. 65-73. dx.doi.org/10.1080/17513472.2016.1236645
5. S. Chaidee and K. Sugihara: Fitting spherical Laguerre Voronoi diagrams to real-world tessellations using planar photographic images. *Discrete and Computational Geometry and Graphics (LNCS 9943)*, 2016, pp. 73-84. DOI: 10.1007/978-3-319-48532-4\_7
6. K. Sugihara: Thickness design for ambiguous cylinder illusion. *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 35 (2018), pp. 391-409. DOI: 10.1007/s13160-017-0263-y
7. K. Sugihara: Topology-disturbing objects: A new class of 3D optical illusion. *Journal of Mathematics and the Arts*, Vol. 12 (2018), pp. 2-18. DOI: 10.1080/17513472.2017.1368133
8. Y. Tanaka, M. Mimura and H. Ninomiya: A reaction diffusion model for understanding phyllotactic formation, *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 33, 183-205 (2016)
9. S. Kondo and M. Mimura: A reaction-diffusion system and its shadow system describing harmful algal blooms, *Tamkang Journal of Mathematics*, 47, 71-92 (2016)
10. C. T. Urabe, G. Tanaka, K. Aihara, M. Mimura: Parameter scaling for epidemic size in a spatial epidemic model with mobile individuals, *Plos One*, 11(12): e0168127. doi:10.1371/journal.pone.0168127 (2016)
11. T. Sushida, S. Kondo, K. Sugihara and M. Mimura: A differential equation model of retinal processing for understanding lightness optical illusions. *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 35 (2018), pp. 117-156. DOI: 10.1007/s13160-017-0272-x
12. H. Ikeda, M. Mimura and T. Scotti: Shadow system approach to a plankton model generating harmful algal bloom. *Discrete & Continuous Dynamical Systems, series A*, Vol. 37 (2017), pp. 829-858. DOI: 10.3934/dcds.2017034
13. E. R. Ijioma, H. Izuhara and M. Mimura: Traveling waves in a reaction-diffusion system describing smoldering combustion. *SIAM J. Appl. Math.*, vol. 77 (2017), pp. 614-637. DOI: 37/16M1089915
14. J. Elias, M. H. Kabir and M. Mimura: On the well-posedness of a dispersal model for farmers and hunter-gatherers in the Neolithic transition. *Math. Models, Methods in Appl. Sci.*, Vol. 28 (2017), pp. 195-222. DOI: org/10.1142/S0218202518500069
15. M. Alfaro, H. Izuhara and M. Mimura: On a nonlocal system for vegetation in drylands. *J. Math. Biol.*, Vol. 77 (2018), pp. 1-33. DOI: 10.1007/s00285-018-1215-0
16. L. Contenzo, D. Hilhorst and M. Mimura: Ecological invasion in competition-diffusion systems when the exotic species is either very strong or very weak, to appear in *J. Math. Biol.* (2018) DOI: https://doi.org/10.1007/s00285-018-1256-4
17. M.H. Kabir, M. Mimura, and J.-C. Tsai, Spreading waves in a farmers and hunter-gatherers model of the Neolithic transition in Europe, *Bull. Math. Biol.*, 80, 2452-2480 (2018)

18. J. Elias, D. Hilhorst and M. Mimura, Large time behaviour of the solution of a nonlinear diffusion problem in anthropology, *J. Math. Study*, 51, 307-334 (2018)
19. M. Bertsch, D. Hilhorst., H. Izuhara, M. Mimura and T. Wakasa. A nonlinear parabolic-hyperbolic system for contact inhibition and a degenerate parabolic Fisher KPP equation, to appear in *Discret. Contin. Dyn. Syst. Ser. A*.
20. Y. Higashiawa, K. Imai, Y. Matsumoto, N. Sukegawa and Y. Yokosuka: Minimum Point-Overlap Labeling. 10th International Conference on Algorithms and Complexity, 2017.
21. Y. Yokosuka and K. Imai: Polynomial Time Algorithms for Label Size Maximization on Rotating Maps. Special issue of *Discrete and Computational Geometry, Graphs, and Games*, 2017.

[学会発表](計 49 件)

1. K. Sugihara: What Defeats Binocular Stereo? European Conference on Visual Perception 2016, Barcelona, Spain, 2016年08月28日 ~ 2016年09月01日
2. K. Sugihara: Ambiguous Cylinders: A New Direction of Tricky Art. Visual Science and Art Conference 2016, Barcelona, Spain, 2016年08月26日 ~ 2016年08月27日
3. K. Sugihara: Height Reversal Generated by the Rotation around the Vertical Axis. *Psicologia e Neuroscienze* (Invited), Sassari, Italy, 2016年09月29日
4. K. Sugihara: Topology-disturbing objects: A new class of impossible objects. European Conference on Visual Perception, 2017年.
5. K. Sugihara: Impossible Objects: The Mathematics of 3D Illusions. IMA (Institute for mathematics and Its Applications) Public Lectures, University of Minnesota (招待講演), 2017年.
6. K. Sugihara: Evolution of Impossible Objects. Invited talk, FUN 2018, Maddarena, Italy (招待講演), June 13-15, 2018.
7. M. Mimura: Reaction-diffusion modeling of smoldering combustion under micro-gravity, Conference on reaction-diffusion systems in Mathematics and Biomedicine, Frejus (France), September 18, 2016
8. M. Mimura: Mathematical modeling of Spreading of Farmers into a region occupied by hunters-gatherers, NCTS Workshop on Nonlinear Differential Equations, National Taiwan University (Taiwan), November 18, 2016
9. M. Mimura: Diffusion-driven instability versus cross-diffusion instability, Mathematical Biology Workshop for Ecology and Evolutional Problems, Institute for Mathematical Sciences (South Korea) December 15, 2016
10. M. Mimura: Traveling Waves in a Stay-or-Migrate Model of the Neolithic Transition in Europe. National Center for Theoretical Sciences/PDE & Analysis Seminar (Taiwan) (招待講演), 2017年.
11. M. Mimura: Modeling of farmers and hunter-gatherers interaction in the Neolithic revolution in Europe. International Workshop on Reaction-Diffusion Systems and Mathematical Modelling in Biology (France) (招待講演), 2017年.
12. M. Mimura: Transition waves in a farmers and hunter-gatherers model of the Neolithic revolution in Europe, PDE seminar, Institute of Mathematics and Scientific Computing, University of Graz, Graz, Austria September 22, 2017
13. M. Mimura: On mathematical models for vegetation in arid ecosystems. Workshop on Patterns and Dynamics with nonlocal effects (Japan) (招待講演), 2017年.
14. M. Mimura: Propagating waves in farmers and hunter-gatherers systems in Neolithic Transition, ReDiNet 2017: International Conference on Mathematical Biology, NCTS/NTU, Taiwan October 12, 2017
15. M. Mimura: Propagating waves in a farmers and hunter-gatherers model of the Neolithic Transition in Europe. International Conference on Reaction-diffusion, Propagation, Modeling (France) (招待講演), 2017年.
16. M. Mimura: Traveling wave solutions of a parabolic-hyperbolic system for contact inhibition of cell-growt. International Conference on Nonlinear Analysis and its Applications (Taiwan) (招待講演), 2017年.
17. M. Mimura: Transient self-organization appearing in the gap between closed and open

- systems. The 18th RIES-Hokudai International Symposium (招待講演), 2017年.
18. M. Mimura: Traveling wave solutions of a parabolic-hyperbolic system for contact inhibition of cell-growth, International Conference on Nonlinear Analysis and its Applications, Tamkang University, New Taipei City, Taiwan, March 23, 2018,
  19. M. Onda, M. Moriguchi and K. Imai: Automatic Drawing for Tokyo Metro Map. European Workshop on Computational Geometry, 2018年.
  20. R. Suzuki, M. Moriguchi and K. Imai: Generation and Optimization of Multi-ViewWire Art. Pacific Graphics, 2017年.

ほか 29 件

〔図書〕(計 7 件)

1. 杉原厚吉: 「スウガクってなんの役に立ちますか?」, 誠文堂新光社, 東京, 223 頁, 2017.
2. 杉原厚吉(監修): 「鏡で変身!? ふしぎ立体セット」, 東京書籍, 東京, 2017.
3. 杉原厚吉(監修): 「杉原厚吉先生のトリック工作」, 主婦と生活社, 東京, 64 頁, 2017.
4. 杉原厚吉: 「錯覚トリックキット」, 幻冬舎, 東京, 16 頁, 2017.
5. 杉原厚吉: 「鏡で変身!? ふしぎ立体セット」, 東京書籍, 東京, 17 頁, 2017.
6. 杉原厚吉: 「錯覚クイズ」, 大和文庫, 大和書房, 東京, 256 頁, 2018.
7. 杉原厚吉: 「新錯視図鑑」, 誠文堂新光社, 東京, 223 頁, 2018.

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 錯視立体群

発明者: 杉原厚吉

権利者: 明治大学

種類: 特許

番号: 特願 2017-187524

出願年: 2017

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

Sugihara Kokichi のホームページ: <http://www.isc.meiji.ac.jp/~kokichis/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 三村昌泰

ローマ字氏名: Masayasu Mimura

所属研究機関名: 明治大学

部局名: 研究・知財戦略機構

職名: 研究推進員

研究者番号(8桁): 50068128

研究分担者氏名: 今井桂子

ローマ字氏名: Keiko Imai

所属研究機関名: 中央大学

部局名: 理工学部

職名: 教授

研究者番号(8桁): 70203289

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 北岡明佳

ローマ字氏名: Akiyoshi Kitaoka

研究協力者氏名: 近藤慎太郎

ローマ字氏名: Shintaro Kondo

研究協力者氏名: 須志田孝道

ローマ字氏名: Takamichi Sushida

研究協力者氏名: 森口昌樹

ローマ字氏名: Masaki Moriguchi

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。