

令和 6 年 4 月 25 日現在

機関番号：32682

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K19801

研究課題名（和文）「超」不可能立体の発掘とその錯視誘発要因の定量化・体系化

研究課題名（英文）Excavation of super-impossible objects and their mechanisms

研究代表者

杉原 厚吉（Sugihara, Kokichi）

明治大学・研究・知財戦略機構（中野）・研究推進員

研究者番号：40144117

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）：両眼で見ても錯視が消えない「超」不可能立体の実例を多数見つけ、それらの観察に基づいて、両眼立体視を欺く錯視の強さの要因を明らかにできた。見つけた実例には、鏡に正面を向けたものが振り向かないで同じ姿勢を保つ平行移動錯視、二つの錯視が同時に起きる回転並進混合錯視、一つの立体と二つの鏡から環状に向きがそろった四つの姿が生まれる独り回遊錯視などが含まれる。これらの錯視をもたらず立体群は、線対称性・面対称性などの立体固有の性質を持つこと、および生き物の姿を素材にしたものであることが両目で見ても錯視が成立する主要因であることを明らかにし、「超」不可能立体理論の基礎を作ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実在する立体を見てあり得ないと感じる不可能立体錯視は特別な視点から片方の目で見ただけ成立するという従来の常識に反して、両目で見ても成立する不可能立体錯視があることおよびその理論的根拠を明らかにできたことは、視覚科学の基本部分に修正をもたらすという学術的意義を持つ。視点位置を厳密に制限しなくても不可能性を表現できる本錯視立体は、視覚芸術の彫刻分野に新しい表現手段を提供するという文化的意義を持つ。さらに、両目で見れば奥行きは正しくわかるという常識を裏切る錯視の存在を明らかにしたことは、見間違いから生じる事故を防ぐ新しい対策の必要性を提言するという社会的意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：The "super-impossible object" is a new type of an illusion object, which is a real physical object but whose behavior looks impossible even if we see it by two eyes. We found many new examples of this type of objects, which include the "translation-illusion object" which appears to translate into a front mirror instead of making a U-turn, and the "double-mirror illusion" which creates the translation illusion and the left-right-reversal illusion simultaneously. Those objects have two special properties: first, they are line-symmetric or plane-symmetric and those symmetries create the illusion, and secondly, they mainly simulate the shapes of living animals and hence we can recognize the category of the animal even if the shape changes due to the change of the viewpoint. We found those properties make the illusion robust against the viewpoint shift, and thus we established the start point of the theoretical scheme of the super-impossible object.

研究分野：数理工学

キーワード：不可能立体 視覚の数理モデル 平行移動錯視 左右反転錯視 回転並進混合錯視 両眼立体視 対称性 生き物

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

錯視には多くの種類が知られておりその研究の歴史も長い、主な対象は 2 次元の図形であった。立体を見るときには両眼立体視によって正しい奥行きが知覚できるため、奥行きを間違えることは特殊な例外を除いてほとんどないというのが視覚科学分野の常識であった。不可能立体と呼ばれる立体錯視は知られていたが、これは特別な視点から片方の目で見ただけで成立するものであった。

一方、本応募者は、立体を両目で見ても錯視が起きる例外があることを偶然見つけた。この錯視の強さは、不可能立体を長年研究してきた本応募者自身にとっても驚きであった。これは右目と左目の対応さえ取れば奥行きはわかるという常識に反するものであり、しかも「顔」などの特別な対象だけで起こる特例ではなくて、抽象的な形に起因して起こる普遍性ももつ。このような発見および観察から、その仕組みの解明は視覚科学にとって新しく重要な課題であるという認識に至った。これが本研究課題を発掘した背景である。

2. 研究の目的

あり得ないものが見えてくる不可能立体錯視は、特別な位置から片方の目で見ただけに起こるものというのが常識であった。本応募者は、この常識に反して、至近距離から両眼で見ても奥行きを誤って知覚してしまう錯視立体を見つけ、これを「超」不可能立体と名付けた。その典型例を図 1 に示す。この図の左は、立体を正面から見下ろしたところであるが、直接見た姿とその後ろに立てた鏡に映った姿が大きく異なり、あり得ないことが起きているという印象をもつ。一般にこの種の錯視は、視点を動かすと（あるいは両眼で見ると）本当の形がわかり錯視は消える。しかし、この立体では同図右に示すように右 45 度の方向から見下ろしても同じように変身した立体が知覚され、錯視が消えない。

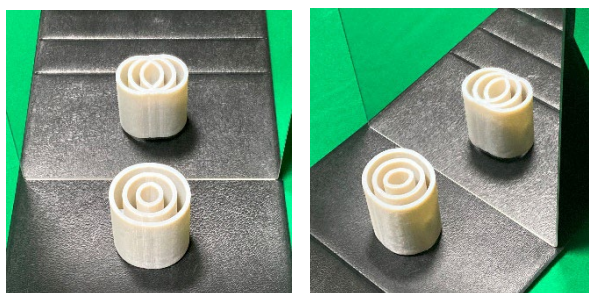


図 1. 視点を大きく移動しても錯視が起き続ける不可能立体の例

この発見の上で、本研究では、この立体群の多様な実例を発掘するとともに、その錯視の誘発要因を定量化することによって、両眼で見ても起こる「超」不可能立体錯視を数理的に説明し、その理論体系を構築する。これは、両眼で見たとき左右の網膜像での点同士の対応さえ取れば両眼立体視の原理に基づいて正しい奥行きが知覚できるはずという視覚科学分野の常識に反省を加え、従来の理論体系に修正をもたらすものである。

3. 研究の方法

次の 3 つの項目を平行に進めることによって研究を遂行する。

① 三角測量と単眼の奥行き推定を並列させた視覚の数理モデルの構築

左右の網膜像が与えられたとき、それから立体を知覚する新しい視覚の数理モデルを構成する。このモデルでは、三角測量の原理に基づく両眼立体視と、単眼の手掛かりによる奥行き推定を並列に実行し、それらが矛盾したときには、何らかの基準で最適な奥行き解釈を選択する。このとき、差が最小となる解釈を選択するという幾何学的な基準だけでなく、行動するうえで最も安全な解釈を選択するなどの生存目的にさかのぼる基準も検討する。

② 「超」不可能立体の探索・創作

ステップ 1 で構成した数理モデルを用いて、錯視が大きく起ると推測される立体形状を探索し、それを 3D プリンタで作って視覚効果を確認しながら、両眼立体視をあざむく「超」不可能立体を創作・収集していく。同時にこの過程で、人の知覚が数理モデルの推定結果と食い違う場合には、その知見に基づいて数理モデル自体を修正・改良し性能を上げていく。

③ 「超」不可能立体錯視の分類と体系化

本研究の中で創作・収集した錯視立体を、その錯視誘発要因の幾何学的・心理学的特徴にしたがって分類し、整理する。これにより「超」不可能立体の理論体系のたたき台を提案し、視覚科学における両眼立体視の新しい研究方向を示す。

4. 研究成果

(1) 「超」不可能立体を含む新しい錯視の発見・創作

両目で見ても成立する不可能立体の錯視要因を探るために、まずは研究の方法②の多くの実例を収集する努力をした。その結果、以下に示す 5 種類の新しい錯視群を見つけることができ、それらの設計原理を構成して多数の実例を創作した。

① 同じ形から異なる形が生まれるトポロジー攪乱立体シリーズの創作

直接見た姿は同じなのに鏡に映すと別の姿に変身する不可能立体の新種シリーズを創作した。その一例を図2に示す。これは、滑らかに繋がった線をまとまりとみなす傾向と、高さ一定の柱体の上端は切り口の平面図形だとみなす傾向によって生まれる錯視だと考えられる。これらの中には両目で見ても錯視が消えないものが含まれており、「超」不可能立体の仕組みを探る材料として利用できた。

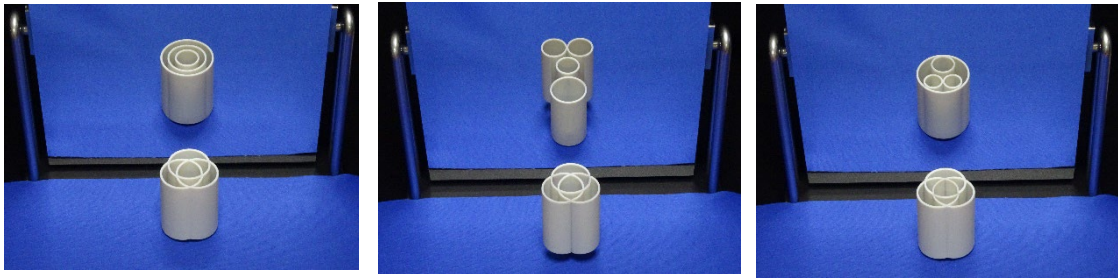


図2. 同じ形から異なる鏡像が生まれるトポロジー攪乱立体の例

② 絵から生じる5種類の錯視の発見

立体を表す絵を水平に置きその後ろに鏡を立てて正面から斜めに見下ろすという共通の光学的過程から5種類の異なる知覚が生まれることを発見した。その5種類の例を図3に示す。左上から順に、横たわったものが起き上がって見える「起き上がり錯視」、左右が反転して見える「左右反転錯視」、高さの順序が逆になったように見える「高さ反転錯視」、上下がひっくり返ったように見える「宙返り錯視」、別のものに置き換わったように見える「置き換わり錯視」である。いずれも、2次元図形が鏡に映っているだけであるが、直角を優先する私たちの脳が立体の知覚から逃れられないために生まれる錯視であると考えられる。

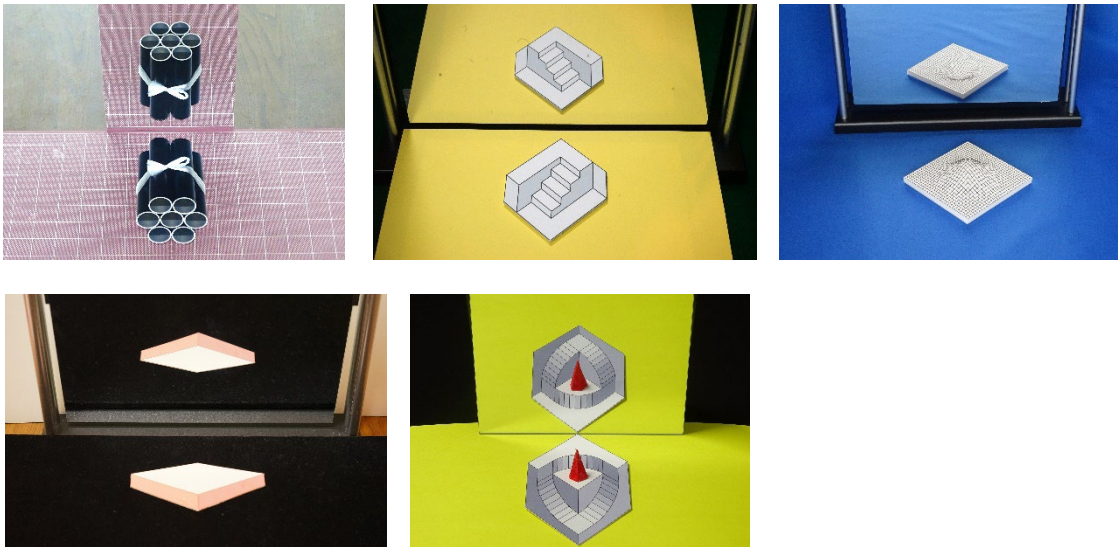


図3. 水平に置いた絵から生まれる5種類の視覚効果

③ 平行移動錯視の発見

鏡に正面を向けたものが、振り向かないで同じ姿勢のまま平行移動して見える立体錯視を発見した。その例を図4に示す。左は鏡を正面から見たところ、右は視点を大きく左へ移動したところであるが、どちらもトカゲが鏡の中へ平行移動したという知覚が起きる。平行移動錯視を起こす立体は、鏡に平行な面に関して面対称という性質を持つ。この性質は視点によらない立体固有のものであるため、直接見た姿と鏡に映った姿が平行移動の関係にあることは視点によらず成立する。これが、この錯視が広い視点範囲で成立する理由であると考えられる。

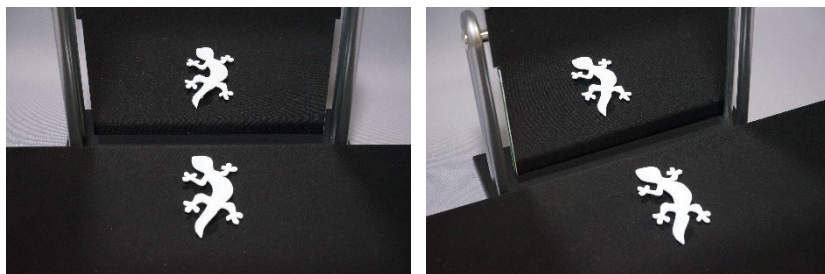


図4. 視点を大きく移動しても成立し続ける平行移動錯視

④ 回転並進混合錯視の発見

直交する 2 枚の垂直な鏡の前に動物の姿をした立体を置くと、正面を向いた鏡では平行移動錯視が起き、横の鏡では左右反転錯視が起きる立体を発見し、「回転並進混合錯視」と名付けた。図 5 にその例を示す。左は、鏡 M1, M2 とその前に置いた立体 S とその鏡像 S1, S2, S3 の関係を表す平面図で、右は錯視の例である。

この錯視立体も面対称である。その対称面は、一つの鏡に平行で、もう一つの鏡に垂直である。

そしてそのことが根拠となって錯視が生じている。面対称性は視点位置に依存しない立体固有の性質であるから、ある範囲で視点を移動しても錯視が成立し続けるのはこの対称性のためであると理解できる。

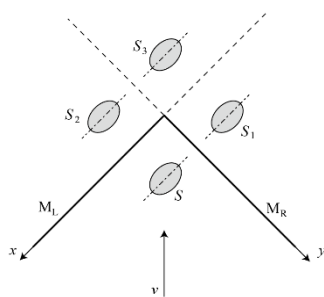


図 5. 平行移動と左右反転が同時に起きる回転並進混合錯視

⑤ 独り回遊錯視の発見

回転並進混合錯視の設計法を少し修正することによって、生き物を表す一つの立体から、同じ向きに輪を成す 4 つの姿が生まれる錯視も発見し、これには「独り回遊錯視」という名前を付けた。例を図 6 に示した。左は、一つの立体から 4 人が盆踊りの輪を成す姿が生まれ、右は二つの立体から 8 匹の犬が同じ向きに輪を成す姿が生まれる。

この錯視も視点位置に頑健なものが多く見つかっている。理論的には視線方向は水平なとき最もきれいな姿になるが、図 6 のように少し上から見下ろす角度で見ても錯視は成立する。



図 6. 独り回遊錯視；右は独り回遊錯視立体を二つ組み合わせた例

(2) 両目で見ても錯視が起こる要因の解明

両眼立体視の常識に反して両目で見ても錯視が消えないのがなぜかという要因を、上で見つけた多数の実例を観察することによって調べた。その結果、従来の不可能立体は平行ではない稜線が平行に見えるなど特別の視点から見たときだけ成り立つ性質が錯視を起こしていたのに対して、本研究対象の立体では、視点によらない立体固有の性質が錯視を起こしていることが分かった。具体的には、次の 3 つの要因を見つけることができた。

① 直角優先性

脳が網膜像から立体の奥行きを知覚するとき、直角を多く含む構造を優先的に思い浮かべる性質があることがわかっている。「超」不可能立体では、この性質のために実際とは異なる奥行きを思い浮かべる傾向があることが分かった。

図 1、図 2 などの立体は、高さ一定の柱体で作られている。これを見た脳は、柱体の上端の曲線を、軸に直角な平面で柱体を切断した断面図とみなす傾向がある。実際には起伏のある曲線で、見る方向を変えると姿が変わるのは当たり前なのだが、平面曲線だと思ってしまうために鏡に映った姿をあり得ないと感じる。つまり、直角優先性のために曲線に起伏があることがわかりにくくなる。

図 3 では、平行四辺形を斜めの方向から見た長方形とみなすために、絵を立体と知覚する。図 4～図 6 の立体は厚み一定の曲面で作られているために、直角を優先する脳にとって曲面に起伏があることがわかりにくくなり、平面に近い立体を思い浮かべるために鏡に映った姿をあり得ないと思ってしまう。このように、網膜像を解釈するとき直角が優先されることが、視点を移動しても錯視が起き続ける要因の一つである。

② 立体固有の対称性

平行移動立体は、その設計原理から鏡に平行な面に関して面対称となる。左右反転立体は、その設計原理から垂直な軸に関して線対称となる。回転並進混合立体は、その設計原理から一方の鏡に平行な面に関して面対称となり、もう一方の鏡に垂直な面に関して面対称となる。これらの対称性のために、鏡に映った姿が平行移動や左右反転に見えてくる。そしてこの対称性は立体固有の性質であって視点位置に依存しないから、視点を移動しても錯視が成立し続ける要因の一つとなっている。

③ 生き物に対する変形許容性

本研究で対象とした錯視立体の多くは、人や動物など生き物の姿を素材として作られている。生き物は、本来形が固定されてなくて変形する。私たちの脳は、姿が変形しても同じ動物であることを認識する能力（すなわちパターン認識能力）をもっている。生き物を表す錯視立体も、視点を移動すると見かけの姿は変わるが、その変化が小さいうちは同じ種類の生き物であるという認識能力が働くために、同じものを見ている（すなわち錯視が起き続ける）という知覚が生じやすいと考えられる。

(3) 視覚の数理モデルの改良

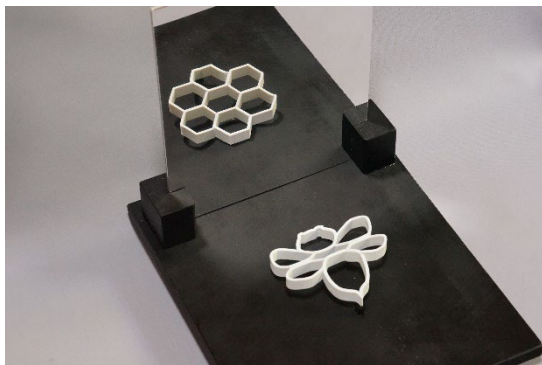
本研究開始当初は、両眼立体視をしのぐ錯視の強さは、単眼立体視の手がかりの方が優位に立つことであろうと予測していたが、なぜ単眼立体視の手がかりが優位に立てるのかは不明であった。本研究を実施する中で、視点位置に依存しない錯視要因が少なくとも3種類あることが分かったが、これらが両眼立体視とは大きく矛盾しない（つまり、二つの異なる視点位置から見ても錯視要因が成立し続ける）ために、単眼立体視の手がかりが優位に立てると説明できることが分かった。本研究者が長年改良し続けている視覚の数理モデルにこの観点を追加することによって、モデルの改良ができた。

(4) 視覚芸術のための新しい表現法の開発

最後に、本研究の成果が、視覚芸術に新しい手法を提供するという側面ももっていることを強調したい。視覚芸術の歴史は、新しい視覚効果をもたらす表現手法の開拓の歴史でもある。遠近法の発見によって幾何学的に忠実な形の表現が可能になり、印象派の提案によって見え方の忠実性より印象を重視する表現方法が認識され、キュビズムの提案により複数視点の情報を1枚の絵に盛り込む効果が発掘された。

あり得ない形を表す不可能図形も、新しい視覚効果をもたらす道具であった。オランダの版画家エッシャーなどが作品作りに応用したことで有名である。ほどなく不可能図形と同じに見える立体を物理的に作る方法もいくつか提案されたが、特定の視点から片方の目で見たときだけ成立するものであったから、絵の延長にすぎなかった。

一方、本研究で対象とした「超」不可能立体は、実在する立体でありながら、両目で見ても（あるいはある範囲で視点を移動しながら見ても）、あり得ないものを見ているという感覚が起り続ける。これは、彫刻芸術に新しい表現手法を提供するものと言える。本研究期間中にこの認識に至り、研究成果としての錯視立体を彫刻作品として見直す作業も行った。具体的には、伝統ある公募展の一つ二科美術展の彫刻部に錯視立体作品を2年間にわたって合計4点応募し、そのすべてで入選を果たした。図7にそれらの入選作品を示す。



(a) 「巣に帰る」(2022)



(b) 「振り向かない」(2022)



(c) 「家族四人」(2023)



(d) 「どっちに行きたいの」(2023)

図7. 二科美術展彫刻部に入選した「超」不可能立体作品

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Sugihara Kokichi、Pinna Baingio	4. 巻 16
2. 論文標題 Rectangularity Is Stronger Than Symmetry in Interpreting 2D Pictures as 3D Objects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Human Neuroscience	6. 最初と最後の頁 1~12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnhum.2022.849159	査読の有無 有
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 該当する
1. 著者名 Sugihara Kokichi	4. 巻 40
2. 論文標題 Room-size illusion and recovery of the true appearance	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 757~773
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s13160-022-00557-4	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 Sugihara Kokichi	4. 巻 125
2. 論文標題 Left-right reversal illusion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 European Mathematical Society Magazine	6. 最初と最後の頁 13~19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4171/MAG/96	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 Sugihara Kokichi	4. 巻 4
2. 論文標題 Five types of anomalous perceptions created by the same mirror-reflection process	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Illusion	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.47691/joi.v4.8993	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Kokichi Sugihara	4. 巻 28
2. 論文標題 3D realization of Penrose polygons using non-rectangularity trick	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Society for Art and Science	6. 最初と最後の頁 269 ~ 276
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 有
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 -

1. 著者名 杉原厚吉	4. 巻 56
2. 論文標題 歩けることを目指した無限ループ階段の設計法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 図学研究	6. 最初と最後の頁 13 ~ 23
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 有
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 -

1. 著者名 Sugihara Kokichi	4. 巻 16
2. 論文標題 Rising object illusion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Mathematics and the Arts	6. 最初と最後の頁 1 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/17513472.2022.2045047	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Sugihara Kokichi	4. 巻 22
2. 論文標題 Translation Illusion of 3D Objects in a Mirror	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of the Society for Art and Science	6. 最初と最後の頁 4_1 ~ 4_12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3756/artsci.22.4_1	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Sugihara Kokichi	4. 巻 4
2. 論文標題 Double-mirror illusion: a new class of 3D illusion that creates anomalous U-turn and anomalous translation simultaneously	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Illusion	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.47691/joi.v4.9839	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 杉原厚吉、阿部富士子	4. 巻 57
2. 論文標題 折りたたみ数に依存しない扇絵と扇の画像変換法	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 図学研究	6. 最初と最後の頁 9~15
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 有
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15件(うち招待講演 3件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 杉原厚吉
2. 発表標題 360度カメラからのシーンのありのままの姿の復元
3. 学会等名 日本応用数理学会2022年度年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉原厚吉
2. 発表標題 絵を鏡に映したとき生まれる5種類の錯視
3. 学会等名 日本図学会2022年度年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉原厚吉
2. 発表標題 振り向かない飛翔
3. 学会等名 日本図学会2022年度ソリッドモデリングコンテスト
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉原厚吉
2. 発表標題 奥行き錯視の仕組みと不可能立体の設計原理
3. 学会等名 日本機械学会最適化シンポジウム2022（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉原厚吉
2. 発表標題 平行移動錯視とその頑健性
3. 学会等名 第17回錯覚ワークショップ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kokichi Sugihara
2. 発表標題 True views from depth-exaggerated images
3. 学会等名 International Display Workshop（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kokichi Sugihara
2. 発表標題 Triply ambiguous objects
3. 学会等名 Asian Forum on Graphic Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kokichi Sugihara
2. 発表標題 Family tree of impossible objects created by optical illusions
3. 学会等名 The 23rd Thailand-Japan conference on Discrete and computational Geometry, Graphs, and Games (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉原厚吉
2. 発表標題 写真から真の姿を知る「ありのままディスプレイ」
3. 学会等名 2021年度日本応用数学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉原厚吉
2. 発表標題 無限ループ階段の描画法と歩ける立体の設計法
3. 学会等名 2021年度日本図学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉原厚吉
2. 発表標題 奥行き誇張画像から真の姿を取り出す「ありのままディスプレイ」の提案
3. 学会等名 映像情報メディア学会情報ディスプレイ研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉原厚吉
2. 発表標題 高さ反転錯視・起き上がり錯視・宙返り錯視～ 共通の光学過程から生まれる3種類の知覚
3. 学会等名 第16回錯覚ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉原厚吉
2. 発表標題 視点位置の変動に頑健な不可能立体の特徴づけ
3. 学会等名 2023年度日本図学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉原厚吉
2. 発表標題 独り盆踊り
3. 学会等名 2023年度日本図学会デジタルモデリングコンテスト
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉原厚吉
2. 発表標題 半身回遊立体～半身から全身が生まれてそれが輪をなす鏡映錯視～
3. 学会等名 第18回錯覚ワークショップ
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 杉原 厚吉	4. 発行年 2021年
2. 出版社 永岡書店	5. 総ページ数 16
3. 書名 鏡のトリック立体キットBOOK	

1. 著者名 杉原 厚吉	4. 発行年 2021年
2. 出版社 誠文堂新光社	5. 総ページ数 80
3. 書名 見て、知って、つくって！ 錯視で遊ぼう	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Kokichi SUGIHARA's Home Page http://www.isc.meiji.ac.jp/~kokichis/</p>
--

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