

明治大学「現象数理学」研究拠点共同研究集会

第16回錯覚ワークショップ

錯覚の解明・創作・応用への諸アプローチ

アブストラクト集



時：2022年3月2日（水）、3日（木）

所：オンライン Web 研究集会

主催：明治大学「現象数理学」共同利用・共同研究拠点

共催：明治大学研究ブランディング事業 Math Ubiquitous 錯視・錯覚チーム

科研費基盤研究（B）「自然環境下での奥行き錯視の数理モデル構築と事故防止・
知育教育への応用」

科研費挑戦的研究（萌芽）『『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』

はじめに

錯覚のさまざまな側面に関する話題を集め、異分野の研究者が自由に交流する機会を提供して、錯覚科学とも言うべき文理融合の新しい学問領域の開拓を目指す目的で続けてきたこの錯覚ワークショップは、今回で16回目を迎えました。今回も昨年に引き続きオンラインで開催いたします。

このワークショップは、数理的手法が十分には発揮されていないという意味での未踏分野への数理科学の応用可能性を探る明治大学先端数理科学インスティテュート（MIMS）の活動理念に沿って、「錯覚」をテーマに2009年にスタートしました。初期の頃は、知名度ゼロのこの研究集会に異分野の方々を講師としてお迎えするために、招待講演のみでプログラムを構成していました。その後、年に2回行ってみたり、国際会議の形をとってみたりと試行錯誤をしてきましたが、次第に年中行事の一つとして認知されるようになり、最近では、毎年3月に、公募型の一般研究発表を中心としてプログラムを構成しています。

今回は、錯視を中心とした錯覚の諸現象に関して、理論・実験・創作・応用などの多様なアプローチから12件の話題を集めることができました。研究発表を応募してくださった講師の皆様、運営にかかわっていただいている組織委員の皆様、講演募集からオンライン会議システムの運用まで支えていただいているMIMS事務室の皆様に心から感謝申し上げます。講演を聴講される皆様も含めて、異分野交流の機会として利用いただければと思います。

このワークショップは、来年も3月上旬に開催する予定です。コロナ問題が終息し、また対面での研究集会が開催できることを祈っております。対面での研究集会が再開できて、講演会場の隣の部屋でセルフサービス型関連展示も復活できるのを楽しみにしております。今後とも、このワークショップに気軽にお付き合いいただけたら幸いです。

2022年3月

第16回錯覚ワークショップ実行委員長
杉原 厚吉（明治大学研究特別教授）

プログラム

3月2日（水）

13:00～13:40

星加民雄（東亜大学）「坂道での速度抑制を目的とした錯視効果によるイメージハンプ施工に向けて」

13:40～14:20

西本博之（高知大学）「錯視が解き明かす視覚の認知機能」

14:20～15:00

一川 誠（千葉大学）「誘導運動と運動捕捉」

15:20～16:00

北岡明佳（立命館大学）「傾き錯視と同居する静止画が動いて見える錯視の探求」

16:00～16:40

谷中一寿*（神奈川工科大学）、渡辺一樹（神奈川工科大学）

「クラウド錯視—主観的輪郭の回転で生ずる錯視」

3月3日（木）

10:00～10:40

杉原厚吉（明治大学）

「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」

10:40～11:20

近藤信太郎（岐阜大学）、森将輝（慶應義塾大学）、須志田隆道*（サレジオ工業高等専門学校）

「網膜情報処理の数理モデルと視覚実験を用いたきらめき格子錯視の理解」

11:20～12:00

スリーピアン ピーラー*（芝浦工業大学）、山口泰（東京大学）「双眼鏡錯視について」

13:30～14:10

間瀬実郎（呉工業高等専門学校）「透視投影によるペンローズの階段のCGアニメーション」

14:10～14:50

日高昇平*（北陸先端科学技術大学院大学）、金山春香（北陸先端科学技術大学院大学）

「自由度を調整できる不可能立体の作図法」

15:10～15:50

大谷智子*（明治大学）・丸谷和史（NTT）・天内大樹（静岡文化芸術大学）

「ガラス建築に対する錯視の危険性の検討」

15:50～16:30

高橋康介*（立命館大学）、日高昇平（北陸先端科学技術大学院大学）

「高次元空間構造の視覚的認識の可能性」

坂道での速度抑制を目的とした錯視効果によるイメージハンプ施工に向けて

星加民雄 / 東亜大学芸術学部客員教授

本研究集会では、坂道での速度抑制を目的としたイメージハンプ施工の要請を受け計画が進められている内容について報告する。施工予定現場の坂道は急勾配な坂道であるため、急速度で坂道を走行する車両に対し、速度を抑制し事故につなげないための対策が地域住民の中で検討されてきた。対象となっている場所は、現在、私が使用しているアトリエの近くで、私自身も同様に危険性を感じながら走行していた場所でもある。今回の施工に至る経緯には、このような地元からの要望にともない菊池市との協議を経て実施することとなった。

現地施工に向け検討した結果、これまでラウンドアバウト進入時の構成要素として組み込んでいるジグザグ形式イメージハンプでのシンプルなデザイン構成で進めていくことになっている。また提案内容には、地域性を活かすための龍のイラスト表示も加える予定である。路面表示でのイラスト表示事例は基本的にならないため、ライン表示との組み合わせと逆遠近法を活用した立ち上がって見える路面イラスト表示の構成に工夫を加えている。

1. イメージハンプの構成要素 1

坂道での速度抑制を目的としたイメージハンプデザインの構成要素として、これまでラウンドアバウト進入口での速度抑制システムとして考案したジグザグ形式イメージハンプを活用する。今回の施工現場では、道幅が比較的狭い道路であるため、ジグザグパターンではなく一方向の傾斜線を活用したデザインとし、音のなるイボ付ライン表示との組み合わせで視覚と聴覚視覚と衝撃の三つの要素で速度抑制を図るデザインとした。錯視効果を高めるための表現要素として 12° という鋭角な傾斜度と傾斜線と横断ライン（イボ付ライン表示）との接合部分にエッジ効果を加えている（図 1 参照）。図 2 は施工イメージ図である。

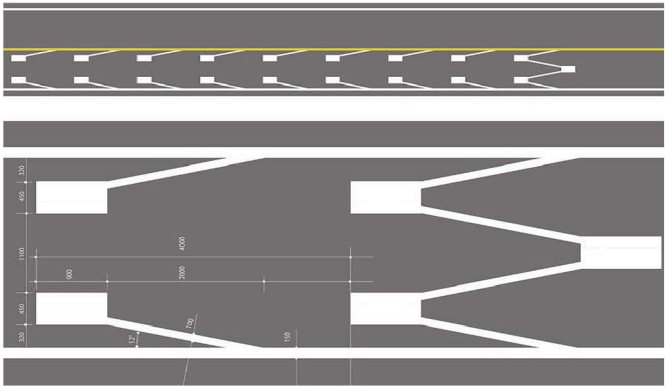


図 1：錯視効果を活用したイメージハンプ施工用図面詳細



図 2：施工イメージ図

2. イメージハンプの構成要素 2

次に地域性を生かした路面表示としてジグザグ形式イメージハンプの先端部分に龍のイラストを路面表示の基本要素としてのラインを活用した龍のイラスト（昇り龍）を入れることにしている。設置予定場所の近くには景勝地もあり地名が龍門であることからストライプパターンイメージハンプの延長上に逆遠近法によって立ち上がる龍の錯視イラストを加える。また路面表示の規制に合わせたストライプパターン表現を活用予定である。

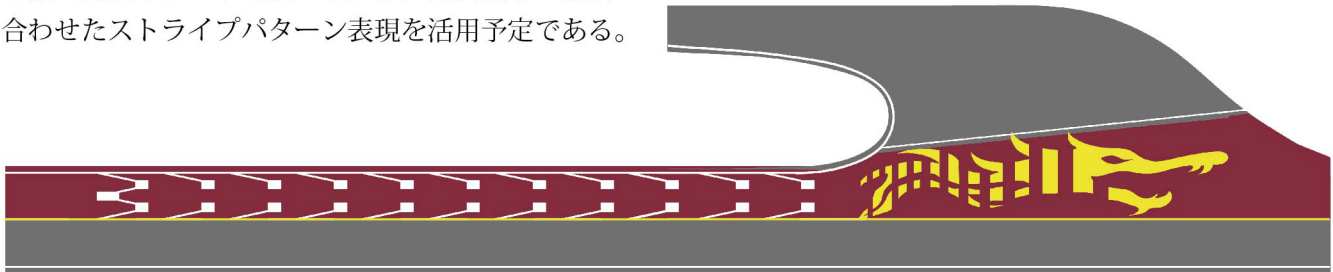


図 3：イメージハンプ全体図

錯視が解き明かす視覚の認知機能

西本博之（高知大学医学部 医療学講座（連繋医工学分野）ヘルスケアイノベーションコース担当）

錯視は心が作り出す単なる幻想ではなく、必要に迫られて身につけた脳力の一つである。実際、北岡明佳博士の作品であるエンボスドリフト錯視（図1～3）からは、①錯視による画像面の歪みにより平面画像を立体視させる射影変換機能、②視覚の画像安定化機能（カメラの手振れ補正に相当）、③平衡感覚を助ける微分フィルタ機能などの認知機能の存在が示唆される。

図1の図形が動いて見えるのは、①遠近法に基づく立体視の能力と、②視覚の画像安定化機能の組み合わせで説明できる。図2の図形は図1と同じ向きに動く。画像を左右反転させると反対向きに動くことから、図1の平行四辺形の傾きと、図2の白黒模様の傾きには相関があると考えられる。

さらに図1を視点から遠ざけると平行四辺形は傾きを増す。同様に図2を視点から遠ざけると模様の間隔は広がり、中心円は楕円に変形する。このように画像面が錯視により歪められると、画像安定化機能が眼球の動きを正しく相殺できなくなりドリフト錯視が現れる。ちなみに図1はポップル錯視がツェルナー錯視を誘発させ、図2はカフェウォール錯視により、画像面の歪みが発生する。

この歪みのメカニズムについて考える。視覚は、現実の空間を、視点から無限遠を半径とする射影球体内に写像させて映像を感じている。この半径（無限遠までの奥行き感）は不変であるが、視点から画像面までの距離を変えても、画像枠内の錯視画像の奥行き感が連動して変わらなければ違和感を覚える。この違和感を解消させようとする視覚の働きが画像の歪みの変化として現れる。

この射影球体内の映像は「逆二乗の法則」に従う。この法則から距離感を情報量という視点で読み解くと、「距離とは、情報の不確かさを示す一つの尺度」という解釈にたどり着く。看護師の方で錯視が全く見えない人がある。視力が抜群に良く、20代の頃には病室の入り口から全ての患者さんの数値を読み取れる程の視力を有していた。錯視が見えない理由を「視力が良い人にはターゲットまでの距離感が必要ななかった。」と文章にすると少し違和感がある。これを「視力が良い人は、ターゲットが遠くても良く見えているので、情報の不確かさを学習する必要が無かった。」と説明すると納得感が増す。真理はシンプルなものとして構造主義者が唱えたように、人間にとって「逆二乗の法則」も「距離＝情報の不確かさ」という真理から派生したものかも知れない。

また、図2の画像を45°傾けると、縦方向の白黒模様の大きさ（図3の三角内）が、横方向の白黒（図3の円内）よりも少し大きく見える。これは視覚の微分フィルタの存在を示唆している。植物は光に向かって伸びる性質があり、景色に多く含まれる縦線を強調することで、視覚の微分フィルタが平衡感覚を助けていると考える。目を閉じると片足で立てなくなるのはこのためである。

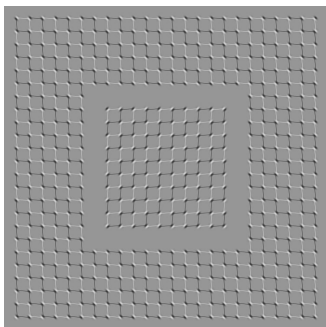


図1.ツェルナー錯視の応用

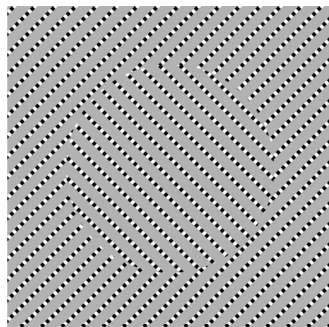


図2.カフェウォール錯視の応用

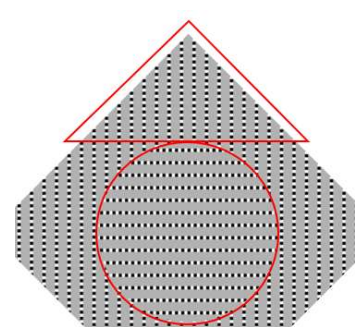


図3.45°傾けた時の見え方

誘導運動と運動捕捉

一川誠（千葉大学人文科学研究院）

運動刺激と静止刺激を同時に観察すると、静止刺激が運動刺激と逆方向に動いて見えたり、同じ方向に動いて見えたりする。前者は誘導運動(induced motion)、後者は運動捕捉(motion capture)と呼ばれる。どちらも、運動刺激の影響を受けて物理的には静止した刺激が動いて見える現象であるが、実際の運動の方向と逆方向の動き、同じ方向の動きが見えるという点で大きく異なる特性を持っている。これらの現象は、それぞれが個別に検討されてきた。そのため、視野内に運動する要素と静止した要素がある際に、どちらの現象が体験されるのかを規定する要因や、両者の関係性についてはほとんど知られていない。

本研究では、傾斜した線分が構成する2重の同心円の観察で生じる運動錯視である Pinna 錯視を用いて、静止刺激の数と視野内の運動の内容によって運動捕捉と誘導運動それぞれの生起頻度や見かけの運動の大きさがどのように変動するのか調べた。Pinna 錯視は、放射線から時計回りもしくは反時計回りに 30 deg 傾けた線分によって構成された同心円（図）をディスプレイ上で運動させることで提示された。静止刺激は中心角 9 deg の扇形とし、傾斜線分の同心円の内側に配置され、その数に 0, 5, 10, 20, 30, 35, 40 個の条件を設けた。刺激運動に、全体の拡大縮小、各同心円の回転、全体の拡大縮小及び各同心円の回転、全体の水平方向の移動及び各同心円の回転の4条件を設けた。各刺激はランダム順で10回提示され、観察者は同心円及び静止刺激の運動の有無、運動が見えた場合の方向と運動の大きさを答えた。実験の結果、同心円のみが回転した運動条件のみ誘導運動が優勢で、誘導運動も運動捕捉も静止刺激数が増えるにつれ減少した。それ以外の運動条件では運動捕捉が優勢で、静止刺激数が多いほど運動捕捉が顕著になる傾向があった。他方、同心円の回転を刺激全体の輝度変動と同期させた追加観察では誘導運動が優勢となった。これらの結果は、運動捕捉の生起には刺激要素間で運動領域での共通運命要因が必要であり、それがない場合には誘導運動が生起しやすくなることを示唆している。

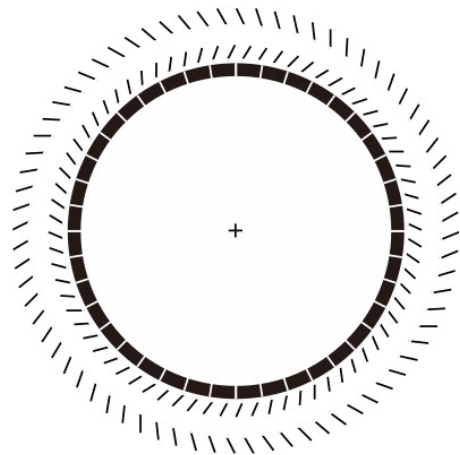


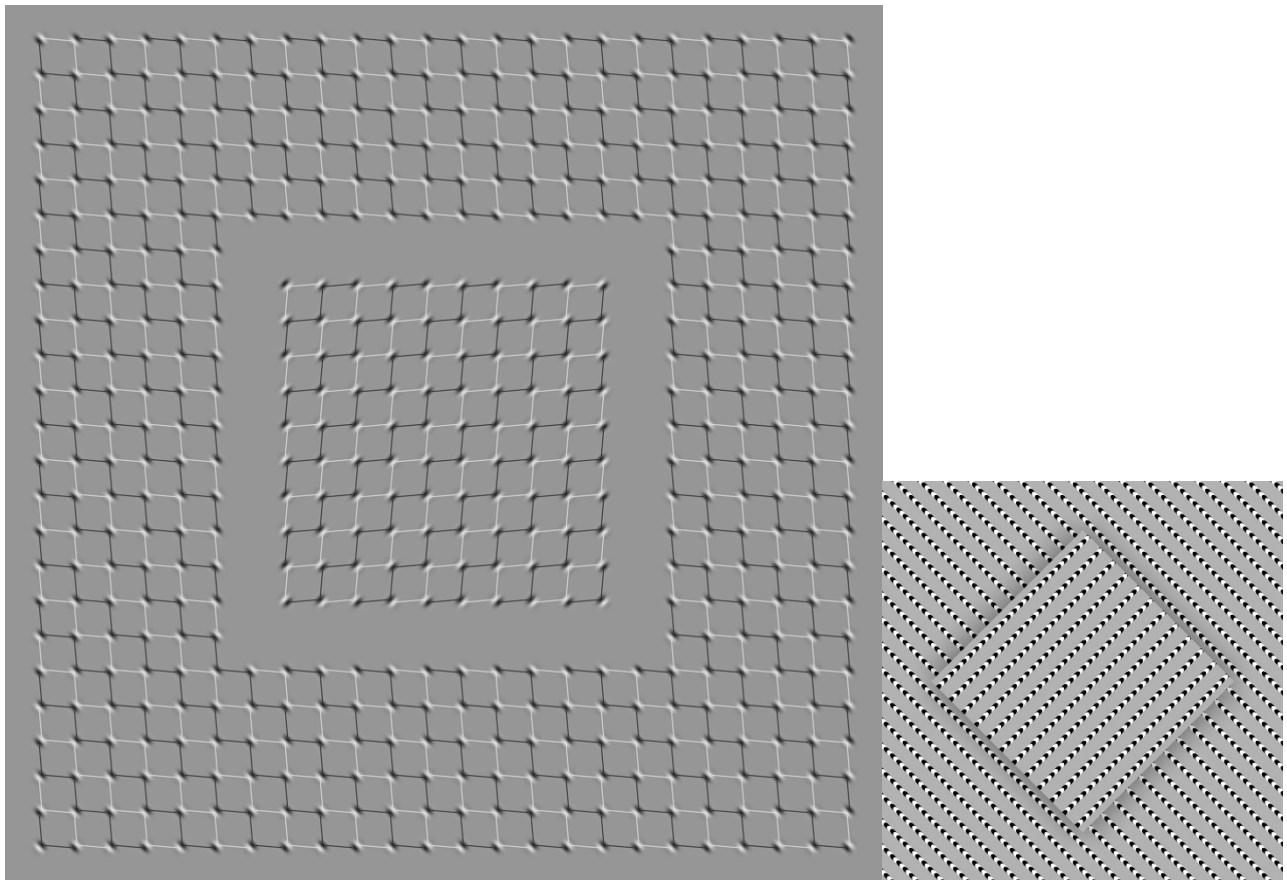
図. 刺激例. 静止刺激 40 個条件.

傾き錯視と同居する静止画が動いて見える錯視の探求

立命館大学総合心理学部 北岡明佳



ツェルナー錯視、ミュンスターベルク錯視（カフェウォール錯視）、フレイザー錯視といった傾き錯視には、静止画が動いて見える錯視が同居している。このことには、筆者は比較的初期に気づき、そのデモをいくつか作成したが、先行研究にそのような記述があることを未だ知らない。筆者は2000年頃までには、市松模様の角に星や丸を置くことで傾き錯視と静止画が動いて見える錯視が同居する錯視画像の作成手法を確立した。その静止画が動いて見える錯視の格段の強さゆえ、その系統の錯視（四色錯視、トゲトゲドリフト錯視、エンボスドリフト錯視等）ばかり注目してきたが、「古典的な傾き錯視の画像に、そこまで強力な静止画が動いて見える錯視は観察できないのはなぜか」という問いを置き去りにしてきた。この点を問い直すことで、筆者がシマシマガクガク錯視と呼ぶ別系統の静止画が動いて見える錯視の関与が見えてくるようになった。

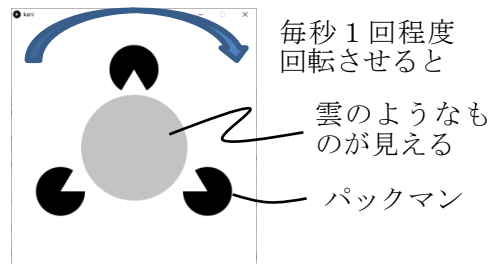
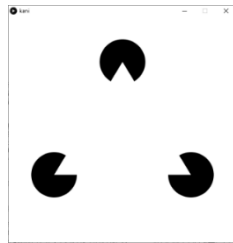


クラウド錯視－主観的輪郭の回転で生ずる錯視

谷中一寿、渡辺一樹（神奈川工科大学）

1. はじめに

「カニツツアの三角形」は、円の一部分が欠けた「パックマン」(形がゲームのキャラクターに似ていることに由来すると思われる)をしかるべく配置すると、本来あるはずのない三角形が見える「主観的輪郭」という錯視である。我々は、この錯視の潜時を調べるため、PC画面上で図形を回転させたところ、回転数を毎秒1回程度にすると、中心部に黒い雲のようなものが現れる現象を偶然発見したので、これを「クラウド錯視」と命名した。



2. 現象

- ・最適な回転速度は約1回転/秒であり、雲がもっとも濃くなる。これより遅いと主観的輪郭が見えやすくなり、速いと雲が薄くなる。
- ・元画像①の三角形（主観的輪郭）の数を増やし②のようにすると錯視量が減る。③のように三角形を小さくすると錯視量が増え、④のように大きくすると錯視量が減る。
- ・⑤のように階調反転すると、雲が白くなるが、錯視量はほぼ同じである。⑥のようにパックマンの色をグレーにすると錯視量が減る。
- ・パックマンの色をカラー（赤緑青のどれか）にすると雲も同じ色になり、⑦のように青なら錯視量がやや減少し、⑧のように赤か、⑨のように緑なら錯視量はかなり減少する。
- ・PCの有限な画素数やフレームレートの影響を受けないようにするため、⑩のようにLCDは使わず実在の円盤をモーターで回転させた場合でも、錯視が観察される。

3. 類似の錯視

- ・⑪のエーレンシュタイン錯視では、弱いながらも雲が発生する。
- ・⑫のヘルマン格子では、静止した状態では交点付近に黒い雲が見えるが、潜時が長いいためか、回転すると消えてしまう。この点でクラウド錯視とは真逆である。

①元画像	②	③三角形小	④三角形大	⑤階調反転	⑥グレー
⑦赤	⑧緑	⑨青	⑩モーター	⑪ エーレンシュタイン	⑫ ヘルマン格子

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

杉原厚吉(明治大学先端数理科学インスティテュート)

水平な面に置いた「もの」をその後ろ立てた鏡に映したとき、形はほぼ変わらないで姿勢だけが大きく変わるタイプの立体錯視を3種類見つけた。階段の高さが左右逆になる「高さ反転錯視」(図1)、横たわったものが起き上がる「起き上がり錯視」(図2)、立体の上下が反転する「宙返り錯視」(図3)である。これらはいずれも立体が鏡の中で期待に反した姿を呈するから、「不可能立体」(物理的な実在物であるが、その姿や振る舞いが不可能に見えるという錯視を生じるもの)に属すとみなしてよいであろう。鏡に映すと姿が変わる「変身立体」は、いろいろなバリエーションのものが作れるが、その中でこれら3種は一つの特徴を持つ。それは、本体が水平に置いた絵であるという特徴である。立体であるという解釈を忘れて、図を無心に眺めると、どれも中央の水平線に関して鏡対称になっていることがわかる。つまり、2次元の絵が鏡に映っているだけである。ただし、図1の赤い錐体と、図2の黒い板は、本当に3次元立体である。

これら3つは光学過程としては全く同じである。いずれも、(1) 立体を写真に撮る(あるいは描く)、(2) その写真を縦方向に $\sqrt{2}$ 倍する、(3) 水平な面に置く、(4) 後ろに鏡を立てる、(5) 斜め45度の方向から見下ろす、という手続きである。にもかかわらず違う知覚が生じるのは、脳が鏡に映った姿を異なる方法で解釈するからであろう。その違いを生じさせている要因を明らかにしたい。

第1に、図1は絵の中にオクルージョンがないが、図2、3にはある。第2に、起き上がり錯視は見下ろす角度が45度でなければならないが、他の二つはそれ以外の角度で見下ろしても錯視が起こる。第3に、図3では、3次元空間において平行で逆を向いた面がどちらも見えているが、他の二つではそういうことがない。これらの性質が三つのうちの一つの解釈を誘発し、他の解釈を拒んでいると考えられる。

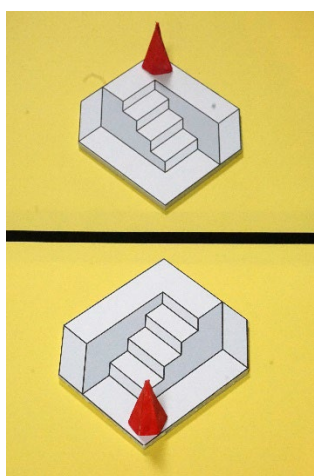


図1. 高さ反転錯視

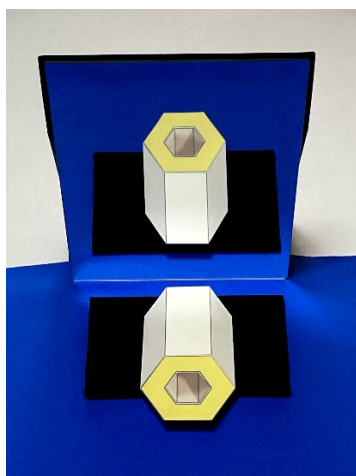


図2. 起き上がり錯視

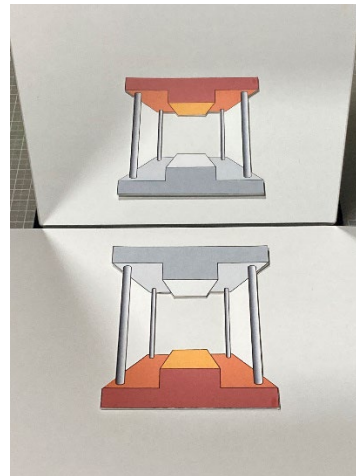


図3. 宙返り錯視

網膜情報処理の数理モデルと視覚実験を用いたきらめき格子錯視の理解

近藤 信太郎（岐阜大学 工学部）

森 将輝（慶應義塾大学 環境情報学部）

須志田 隆道（サレジオ工業高等専門学校 情報工学科）

きらめき格子錯視は Schrauf 氏らによって考案されたものであり、図 1(b)が典型的な例である。図 1(b)において視点を動かすと、少し周辺の視野において灰色格子の交差点に位置する白丸が黒くなり、全体としてきらめいているように見える。最近では松野響氏(法政大学)によって、格子がなくてもきらめくことが視覚実験によって示された(図 1(a))。しかし、どのような視覚メカニズムがこの現象を引き起こしているかについては言及されていない。入力である図形は明るさの対比などの錯視を起こす図形と同じように単純であり、意識とは無関係に起こる現象であることから、明るさの対比などと同様に網膜による情報処理がきらめき格子錯視を知覚させるトリガーの1つであることが考えられる。

網膜に入力された光刺激は、視細胞にて電気信号に変換され、双極細胞、神経節細胞と順番に情報が伝達される。さらに、変換された電気信号は神経節細胞に伝達されるまでに水平細胞やアマクリン細胞によって制御（抑制）される。講演者らは入力刺激が色情報を持つ場合も含めて、網膜情報処理から視細胞同士の局所的な情報伝達と水平細胞による非局所的な制御効果を導入した微分方程式による数理モデルを提案し、水平細胞等が持つ自己制御メカニズムが錯視を引き起こす要因であることを示唆した。

一方で、本研究で議論するきらめき格子錯視では、図 1(b)や図 1(c)のように、視点中心とその周辺での見え方が異なるため、網膜における中心窩付近の構造と周辺の構造を考慮した新しい枠組みの構築が必要である。本講演では、はじめに、図 1(d)のように、きらめき格子の一部を抽出した図形に関して、中心周辺での白色円の見え方を定量的に評価する視覚実験を実施した結果を報告する。次に、視覚実験に対する統計解析結果と神経生理学の知見を基盤とした新しい数理モデルを構築し、コンピュータシミュレーションを用いてきらめき格子錯視の発生について議論する。

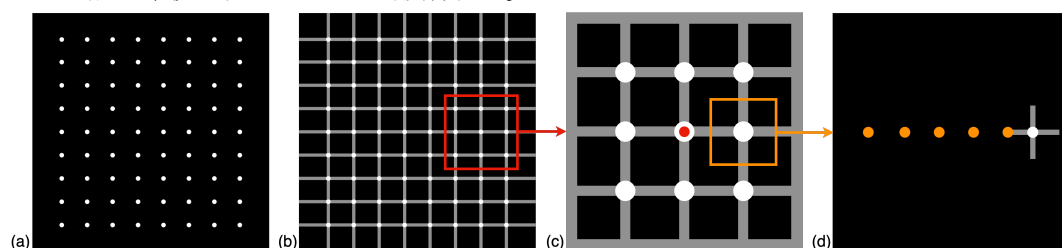


図 1. きらめき格子錯視を起こす二次元画像例. (a) 格子なし. (b) 格子あり. (c) (b)から一部を取り出した図形. 視点位置を赤点に固定して見ると、周りの白丸が暗く見える. (d) (c)から一部を取り出した図形. 橙色で示した場所をそれぞれ視点位置とすると、周辺視野に白丸がある場合に暗く見えるということを観察することができる.

双眼鏡錯視について

スリーピアン ピーラヤー（芝浦工業大学） 山口泰（東京大学）

双眼鏡を覗いているとき、床上の平行線の遠近感が逆転して見えるとの指摘がなされている。すなわち、平行線の先が図1左のように閉じずに、図1右のように広がって見えるという指摘である。本報告では、このような双眼鏡の錯視が起こる原因を検討するとともに、一般的な観察者において双眼鏡の錯視が起きることを検証する。

双眼鏡で錯視が起きる原因として、消失点の移動が考えられる。2次元の画像から直線群の空間的な配置を解釈するために、我々は消失点を1つの手がかりとしている。図2のように床面上の平行な2直線を、裸眼で観察する場合、網膜上での2直線は平行ではなく交点 V_1 を持つ（図2の青い平面）。この交点は消失点と呼ばれ、観察者の水平線上に現れる。しかし、双眼鏡を通して観察する場合、網膜像は拡大される（図2の黄色い平面）。この拡大された双眼鏡内の網膜像を解釈しようとする際に、前提とする仮定によって2本の線の空間的な配置が変わることが想像される。1つは2本の線が平行線であるという仮定である。この場合、消失点の位置が点 V_2 のように上方に移動しているため、空間内の2本の線が上方向に傾く、つまり2本の平行線は水平面上にはなく、傾いた面の上に乗っていると解釈される。もう1つは、2本の線が床面（水平面）上に乗っているという仮定である。この場合には、2本の線は平行ではなくなり、具体的には先が広がって解釈されることになる。

我々は、裸眼と双眼鏡を通した場合とでの、2直線の知覚に関する実験を行った。実験では3m先に置かれた板の上の2直線を観察させて、2直線の載っている面の傾きと2直線のなす角度とを報告してもらった。実験の結果、双眼鏡を通して観察した場合には、面の傾きと2直線の角度は変化するが、ほとんどの被験者に双眼鏡の錯視が生じる、すなわち2直線の角度が先広がりに感じられることが確認された。

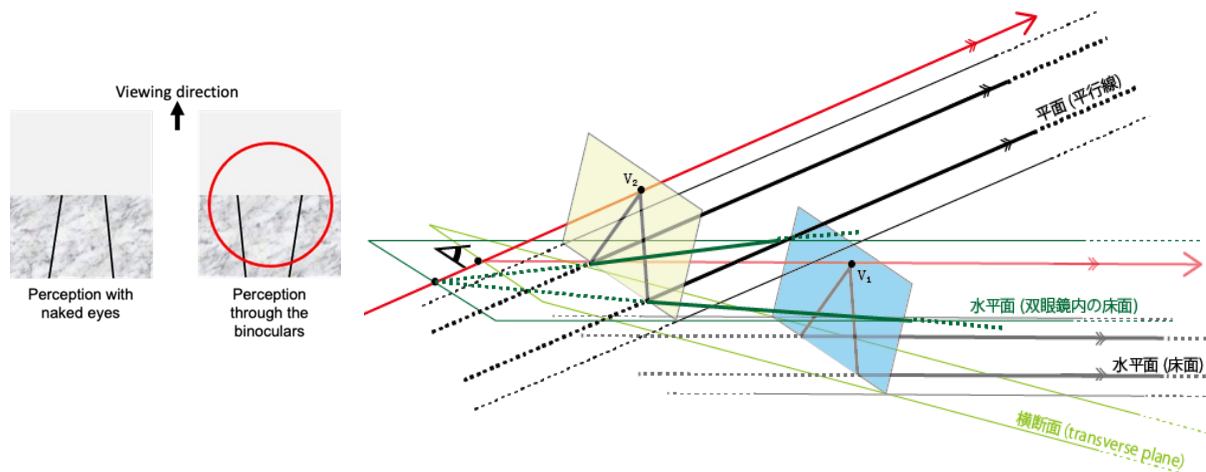


図1 床面の平行線の知覚

図2 双眼鏡を通して見た場合の2直線の解釈

透視投影によるペンローズの階段の CG アニメーション

間瀬実郎（呉工業高等専門学校）

無限ループ階段(ペンローズの階段)を透視投影で 3DCG アニメーションとして表示する手法を, 90 度回転するごとに視点位置をリセットする方法で提案する. 既往研究の例^[1]では, 平行投影で表現されているため, パースによる遠近感が無いことや, 4 つある踊り場間の階段の段数が異なっている. また錯視視点から無限ループ階段が鑑賞できる物理的な模型を示した方法^[2]もある.

本研究では, 透視投影による 3DCG によりバランスのとれた表現を実現し, 階段の各部に色を塗る機能や, 段数, 階段幅等も調整可能なシステムを構築した.

図 1 に示すように踊り場点と基礎点から成る台形のワイヤフレームをスケルトンとし, ここから踊り場とスロープを展開させたモデルを使う. 最終的には, スロープから階段に変換させて階段の形状を完成させる. この手法は同じスケルトンから階段の長さ, 踊り場幅, 高低差が異なる階段全体の形状を生成することができる.

また, スケルトンを回転させたときに, 回転角が 90 度を超えると視点位置がリセットされる手法をとっている. こうする理由は, 発端踊り場と終端踊り場の接合部の処理が簡単にできるためである. 視点位置リセットをせずに回転させると, 接合部が手前に来た時の処理が複雑になると判断したためである.

図 1 のスケルトンの踊り場点(L0)~(L3)の位置から図 2 階段ケースが一意に生成される. つまり視点が少しでも移動すると, その都度踊り場点の位置が計算され, それを基に階段ケースが再度生成される.

図 2 の左の列(a1)(b1)は錯視視点からみたモデルの状態で, 無限階段を回転させても連続的に不可能立体を維持した状態で表示することができる. また透視投影であるため, 立体感のある表現となっている. さらにどの辺から見ても, 段数と全体のプロポーションが

一致しており, バランスのとれた表現になっている. なお図 2 の右の列の(a2)(b2)は, 錯視視点から視点を変えてみたときのモデルである. この処理以外にも, すべての踊り場の大きさ調整や, 中庭の壁の下端部の調整などが, 随所で形を整える操作が必要であった.

図 3 に示すように, 本システムにはポリゴンごとに任意の色を着ける機能を備えた. マウスによって指定した階段の面に色を塗る機能で, カラーパレットは色相バー, および明度と彩度正方形に配置した一般的な形式のものを採用している. この場合, 指定されたポリゴンに直接色を塗ることはできず, 視点位置によって塗るポリゴンを振り分ける関数を介してモデルのポリゴンを塗る方法をとった. 表示する際にもこの関数によって視点位置がどこにあってもポリゴンは適切な色を表示できる. 色塗り機能を設けたことで, 本手法が 90 度回転するごとに視点位置がリセットされていることが認識されなくなる効果も得られる.

本手法では, 階段の各数値をパラメータとして与えて, モデルを生成しているため, これらのパラメータを調整することで, ペンローズの階段のプロポーションを変化させることができる. 階段幅, 段数, 階段勾配, 全体の高さの 4 つのパラメータを調節できるスライドを設け, それらを自由に操作することができる. パラメータを調整した表示の反映はリアルタイムで見ることができる.

今後は本システムを応用して, M.C.Escher の Ascending and Descending (上昇と下降) を CG アニメーションとして表示することを検討中である.

- [1] 中津香奈ほか, “錯視立体を用いたトーラス形状不可能図形のアニメーション”, 画像電子学会 Vol.45, No3, (2016)
- [2] 杉原厚吉ホームページ, 第 1 世代の不可能立体, 無限階段, <http://www.isc.meiji.ac.jp/~kokichis/Welcomelj.html>

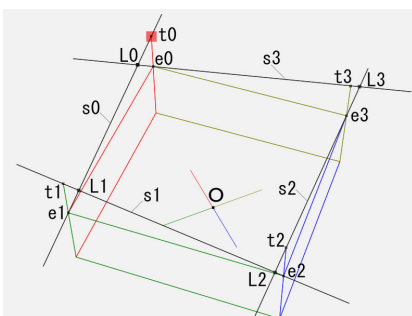


図 1 階段ケースのスケルトン

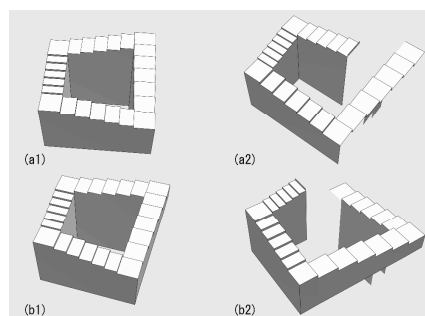


図 2 スケルトンから生成された階段

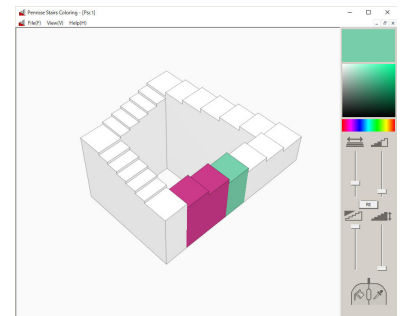


図 3 色塗り機能と CG アニメーション

自由度を調整できる不可能立体の作図法

日高昇平(北陸先端科学技術大学院大学)・金山春香(北陸先端科学技術大学院大学)

ある 2 次元上の線画に対し、人はそれを立体的な図形としては実現できないと判断することがある。こうした立体様の図形は不可能立体と呼ばれる[1]。一方、不可能立体の一部は、実際には立体図形として作図可能であり、杉原[2]は不可能性知覚を誘導する立体図形の作図法を提案している。

杉原[2]の提案手法(以下、「杉原の作図法」と呼ぶ)では、ある平面上への射影での見えを特定の線画として与え、その線画を射影として持つ、図形の各頂点の 3 次元座標を、いくつかの制約条件を満たすように計算する。この方法では、主に(1)同一平面上にある頂点の集合が満たす方程式制約、(2)特定の視点からの重ね順を反映する、複数の平面の間の不等式制約、(3)不等式制約が等式を満たさないように制限するための変数を導入する。そのうえで、(1)-(3)の制約条件を満たす各頂点の 3 次元座標を計算する問題を、制約を満たすときにのみ 0 となる目的関数を導入した線形計画法を数値的に解き、付与の 2 次元線画の見えを持つ立体構造の実現例の一つを求める。

杉原の作図法は、2 つの技術的な問題を抱えている。

(1) 同一平面上の点の存在条件の数理的表現として、陽に平面のパラメタを未知変数として導入するため、図形の頂点の数より大幅に多い未知変数が必要になる。そのため、方程式や不等式の設定で人為的なエラーが発生しやすく、その数理的な構造がとらえにくい。

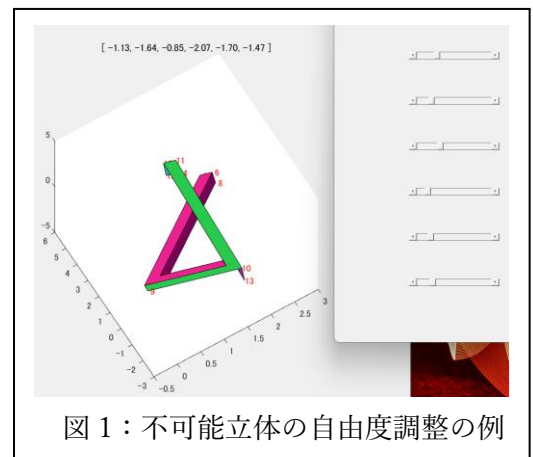
(2) 面の重ね順を反映する不等式制約は、本来は 3 次元座標を一意に定めない。しかし、杉原法では人工的なスラック変数の導入により何らかの 3 次元座標を定める。このため、付与の 2 次元上の線画に由来する制約と、それ以外の自由に設計できる変数が明確には分離できず、意匠的な設計や図形の微調整が困難である。

本研究では、これら 2 つの問題点を解消する新たな不可能立体の作図法を提案する(その実装例を図 1 に示す)。提案法は、未知変数は各頂点の未知なる 3 次元座標のみであるため不要な変数の導入がなく(問題(1)の解消)、かつ設計者が自由に調整できるパラメタを明示する(問題(2)の解消)。

提案法では、同一平面上の頂点の存在に由来する方程式を陰に行列式で表現することで、3 次元図形のもつ頂点の数 N の自由度を、 $(N-K)$ 次元制約部分空間と自由に設計可能な K 次元部分空間に分ける。 $N-K$ は一般に面の数 P と頂点間の共線性によって決まり、同一面上の制約を除いた K 次元が、特定の 2 次元線画を射影として持つ 3 次元図形の自由度となる。この自由度を手動で任意に調整することで、付与の制約条件とは独立に、設計者の意匠的な選好を反映した図形を作図することができる。

具体的には、同一平面の制約は、ある行列式の余因子展開で得られ、その余因子係数行列を特異値分解することで制約されない部分空間(自由パラメタ)を得る。この得られた自由パラメタを手動で設定することで、付与の平面制約を満たす任意の不可能立体を作成することができる。

参考文献 [1] L. S. Penrose and R. Penrose, Impossible objects—A special type of visual illusion, British Journal of Psychology, 49, 31–33, 1958. [2] 杉原厚吉, だまし絵と線形代数, 共立出版, 2012.



ガラス建築に対する錯視の危険性の検討

大谷智子（明治大学総合数理学部）・丸谷和史（NTT コミュニケーション科学基礎研究所）・
天内大樹（静岡文化芸術大学）

近年、外壁面の大部分に鏡やガラスを使った建築物が多く見られるようになった。このような建築に対し、特に出入口や階段などでの人体衝突の危険性は繰り返し指摘されている。この衝突の原因の一つとして、ガラスや鏡の存在が観察者（歩行者）に知覚されないことが挙げられる。透明度が低いガラス面、あるいは鏡面の場合は、何らかの錯視を伴っていると考える必要がある。しかし、筆者らの知る限り、立体物、特に建築のように大きな物体に対してどのような条件で存在の知覚が消失するかという点についての系統的な検討はなされていない。

そこで我々は、この問題に取り組むにあたり、特に閉じた輪郭線が知覚されうるかどうかを切り口として、状況の整理を行った。まずは、その中で物理的に輪郭線の情報があるにもかかわらず知覚されない状況について取り組んだ。具体的には、鏡面周辺のテクスチャによって、鏡面の輪郭線があいまいになり、透明性に違いが起こるかどうかを実物体の写真を用いて検討した。刺激には建造物に使用される鏡カッティングシートが貼り付けられたブロック型玩具を、模様が付された床面上に置き撮影した（図1）。4名の参加者に、鏡面部分に対して知覚される透明度を4件法で評定してもらった。結果、底面の模様によって評定値は大きく変化した。さらに、底面の模様のテクスチャの粗さ、および、鏡面からの反射や屈折によって物体周辺にできる光パターン（コースティクス）と底面の模様の類似度が、評定値の差をもたらす大きな要因である可能性が示された。

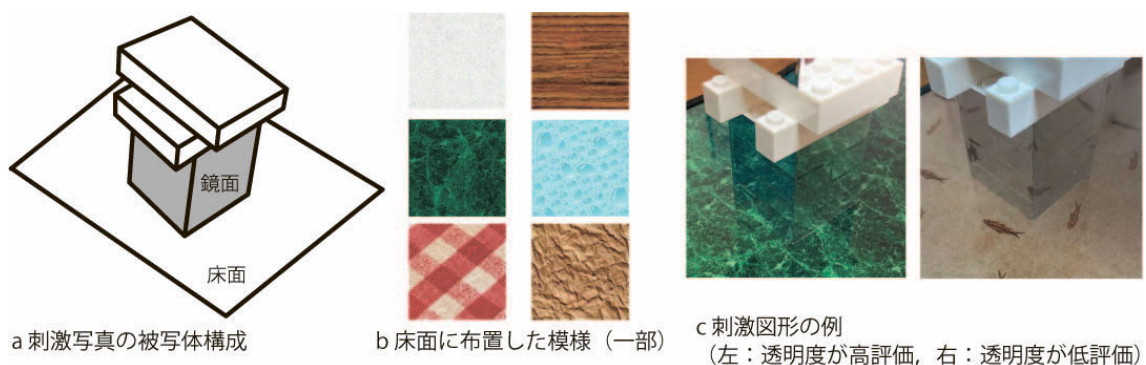


図1. 実験では、床面（a）に模様（b）が布置された写真(c)を提示し、実験参加者は、立体物の灰塗り部分が透明にみえる度合いを報告した。

高次元空間構造の視覚的認識の可能性

高橋康介（立命館大学）・日高昇平（北陸先端科学技術大学院大学）

ヘルムホルツの無意識的推論（及びこれを精緻化した順逆変換モデルや自由エネルギー原理[1]）によれば、視覚的認識は網膜を通した視覚的入力からその原因となる外界の状態についての推論過程である。空間構造のみを考えれば視覚的な入力は2次元であり認識は3次元であるように思われる。 $R^2 \rightarrow R^3$ の変換は不良設定問題で解は一意には定まらない。しかし、無意識的推論の立場では、ヒトはアプリアオリおよびアポストリアオリに獲得する $R^3 \rightarrow R^2$ の順光学等の様々な制約を拘束条件として $R^2 \rightarrow R^3$ の変換を定めるとされる。

本講演では3次元を超える空間構造の認識について考える。19世紀後半にE. Abbottは2次元人の3次元認識や我々3次元人の4次元認識の（不）可能性を鮮明に描写した[2]。一方で高次元空間を認識する方法として、C. Tylerによる多義図形を用いた方法[3]やVRを用いた方法[4]なども提案されている。しかし今のところ3次元を「見る」経験に比類するような4次元以上の空間構造の視覚的認識は報告されていない。

ヒトには3次元以上の空間構造を視覚的に認識することは不可能なのだろうか。仮に不可能なのだとしたらそれは生体の制約、経験的な制約のいずれかであると思われる。しかし高次元空間構造の認識は非可視光などセンシング不可能な情報を必要とするわけではなく、さらに現実として生体において $R^2 \rightarrow R^3$ （正確には R^2 も所与ではない）を実現しているのだから、網膜や脳という生体の特性が制約となる可能性は低いように思われる。一方で我々が経験する世界が3次元であるが故に内部モデルが $R^3 \rightarrow R^2$ として獲得されるという環境の制約は強力である。VRを用いた人工的な環境を与えることでこの制約は超えることが可能である[4]。しかし、単純に高次元空間の3次元射影（の2次元視覚入力）を与えるだけでは既存の内部モデル（ $R^3 \rightarrow R^2$ ）が導く R^3 が局所最適解として採用されてしまい、 $R^4 \rightarrow R^3 (\rightarrow R^2)$ としての内部モデルの学習、更新は困難のように思われる。逆に言えば R^3 を解として持ちにくい環境が生成できれば $R^4 \rightarrow R^3 (\rightarrow R^2)$ が獲得される可能性がある。あるいは局所最適解から抜け出しリフレーム[3]するような訓練により $R^4 \rightarrow R^3 (\rightarrow R^2)$ に到達する可能性もある。本講演では以上のような考察やKopfermann cube/tesseractなど次元の問題に関わる視覚現象を紹介し、高次元空間構造の視覚的認識の可能性について幅広く議論する。

[1] 乾敏郎・坂口豊 (2021) 自由エネルギー入門. 岩波書店.

[2] E.アボット, 竹内薫(訳) (2017) フラットランド たくさんの次元のものがたり. 講談社.

[3] Tyler, C. W. (2021). A Live Experience of Four-Dimensional Structure. *Perception*, 50, 165-169.

[4] Matsumoto, K. et. al. (2019). Polyvision: 4D Space Manipulation through Multiple Projections. In SIGGRAPH ASIA Emerging Technologies (pp. 36-37).

参考資料: <https://tinyurl.com/ycomhgha>; <https://tinyurl.com/ybnh6atm>



明治大学「現象数理学」共同利用・共同研究拠点



私立大学研究ブランディング事業 Math Ubiquitous 錯視・錯覚
チーム



科研費基盤研究（B）「自然環境下での奥行き錯視の数理モデル構築と事故奉仕・知育教育への応用」

科研費挑戦的研究(萌芽)『『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』