

明治大学「現象数理学」研究拠点共同研究集会

第17回錯覚ワークショップ
錯覚のモデリング・解析とその応用
アブストラクト集



時：2023年3月2日（木）、3日（金）

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 錯覚・錯視チーム

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

錯覚とは、感覚器官を通して得た情報から外界の状況を実際とは違うように知覚してしまう現象です。不思議で面白いので芸術表現やエンタテインメント素材として積極的に利用したいという側面と、事故や誤解の原因となるために避けたいという側面の両方を持っています。本ワークショップは、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もので、今回で17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下さった講師の皆様、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明治大学MIMS事務室の皆様にご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して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。

2023年3月

第17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(木)】 司会:北岡明佳(立命館大学)

13:30~14:10

日高昇平*(北陸先端科学技術大学院大学)、鳥居拓馬(東京電機大学)、高橋康介(立命館大学)「対称性に基づく主観的な立体度の予測モデル:立体的多面体の射影ではない線画による実験的検討」

14:10~14:50

西本博之(高知大学)「錯視が解き明かす視覚の認知空間」

15:10~15:50

下村海渡(神奈川工科大学)、谷中一寿*(神奈川工科大学)「曲面と曲線を用いた不可能モーション」

15:50~16:30

一川誠*(千葉大学)、高橋紀香(千葉大学)「フロー体験時の時間長錯覚に関する要因分析的検討」

【3月3日(金)】

【午前の部】 司会:一川誠(千葉大学)

9:00~9:40

杉原厚吉(明治大学)「平行移動錯視とその頑健性」

9:40~10:20

間瀬実郎(呉工業高等専門学校)「ペンローズの階段の動的な特徴」

10:40~11:10

花木優寿*(関西大学)、友枝明保(関西大学)「光の屈折を利用した変身立体について」

11:10~11:50

振原 知希*(明治大学)、宮下芳明(明治大学)「SSVEP ベース BCI に対する輝度変化による運動錯視の有用性」

【午後の部】 司会:杉原厚吉(明治大学)

13:30~14:10

北岡明佳(立命館大学)「並置混色による色の錯視」

14:10~14:50

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)、近藤信太郎(岐阜大学)「きらめき格子錯視の周辺視野特性」

15:10~15:50

竹島 遥貴*(立命館大学)、高橋康介(立命館大学)「太斜線の傾き歪み錯視に関する実験的検討」

15:50~16:30

丸谷和史*(NTT コミュニケーション科学基礎研究所)、大谷智子(明治大学)「鏡面消失を起こす底面パターンの条件の検討」

対称性に基づく主観的な立体度の予測モデル：立体的多面体の射影ではない線画による実験的検討

日高昇平(北陸先端科学技術大学院大学)・鳥居拓馬(東京電機大学)・高橋康介(立命館大学)

点と線分だけで平面上に描かれた線画のように絵画の手がかりに乏しい視覚刺激に対しても、人はそれを立体的に知覚することがある。その顕著な一例は、ネッカーキューブ(Necker, 1832)と呼ばれる平面線画である。ネッカーキューブは、立方体やそれに類する平行六面体のある種の平面上の射影の一つであり、その他の立体的に知覚される線画の多くも何らかの立体的多面体の射影であることが多い。そのため、平面線画の立体的知覚は、それを射影にもつ立体的多面体と関連づけて議論をされてきた。一方で、コッファーマンキューブ(Kopfermann, 1938)など、立体的多面体の射影であるにもかかわらず、立体的には知覚しにくい平面線画も存在する。

こうした種々の平面線画の主観的立体度(subjective tri-dimensionality)は、長きにわたって知覚心理学の研究対象であり、線画を構成する線分などの特徴量による説明(Hochberg & Brooks, 1960)、符号化の観点からの説明(Vitz & Todd, 1971)、視点空間上の位相的分類に基づく説明(Nakayama & Shimojo, 1992)、などいくつもの仮説が提案されてきた。大別すれば、初期(1960年代以降)の研究群では、線画の特徴や視覚的情報の符号化の立場から線画を分析する研究群が多く、1990年代からは構造記述理論(Marr & Nishihara, 1978; Biederman, 1987)や view-based model (Tarr, M. J., & Bülthoff, 1998)等の影響を受けて、立体的表象や多視点からの立体の見えに着目した仮説が提案されている。前者の符号化による説明は、視覚の計算機序に必ずしも関連づけられていない点に、後者の仮想立体に基づく説明は、立体の射影ではない線画にも立体知覚が起きる現象を説明できない点に課題がある。

以上の背景を踏まえ、本研究は、先行研究の課題を解消し、情報符号化の観点から包括的に立体知覚を説明するモデルを提案する。この提案モデルでは、平面線画に潜在する対称性を利用した符号化がされ、最も高い対称性を持つ視覚的表現が、人の知覚像に対応すると考える。これを対称性モデルと呼ぶ。対称性モデルは、ネッカーキューブは3次元表現をしたときに最大の対称性を達成できるが、コッファーマンキューブは2次元表現でも最大の対称性を達成できるため、立体知覚が起きにくいと予測する。この考えを拡張し、必ずしも立体対面体の射影ではない線画にもモデルを応用可能にした。これにより、厳密な対称性を持たない平面線画でも、厳密な対称を持つ平面線画までの距離(対称性誤差)を計算できる。

本研究は、この対称性誤差がある線画の主観的な立体度と相関すると予測し、実験的に検討をした。位相的には同一である平面線画の族に関して、その平面上の配置を系統的に摂動させることで対称性誤差を統制した線画対を作成し、一対比較法によりその主観的立体度の高低を回答する実験を行った。46名の各実験参加者は、3種の位相(図2)、3種の見え、2つの摂動方向の計18条件のそれぞれに、7水準の異なる対称性誤差を設定した刺激セットを2セット、計756試行の一対比較を行った。この回答データを基に Bradley-Terry モデルにより被験者・18条件それぞれに対し7つの選択強度パラメタを求め、その被験者平均を推定立体度とし、刺激の対称性誤差との相関を分析した(図2)。その結果、どの条件においても推定立体度と対数対称性誤差の間に $-0.704 \sim -0.992$ の有意な負の相関が見られた($p < .001$)。

この実験結果は、対称性モデルが立体対面体の射影とは限らない広い範囲の線画の主観的立体知覚を予測することを示唆する。また、対称性モデルは、この実験結果のみならず、ある線画に対して一つの立体知覚が生起する場合には、その鏡像も立体知覚として生起することも説明できる。発表ではこのモデルの含意についても考察・議論する。

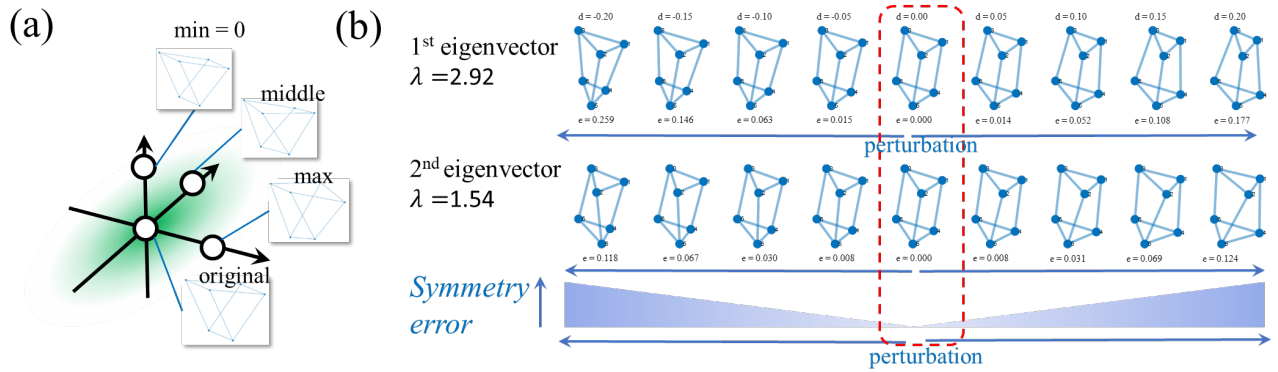


図 1: 実験計画の概要. (a)解空間からの距離に基づき、2次元線画の“摂動”と立体度(symmetry error)の関数を定義し、(b)それに基づき立体度の異なる線画を系統的に生成した。

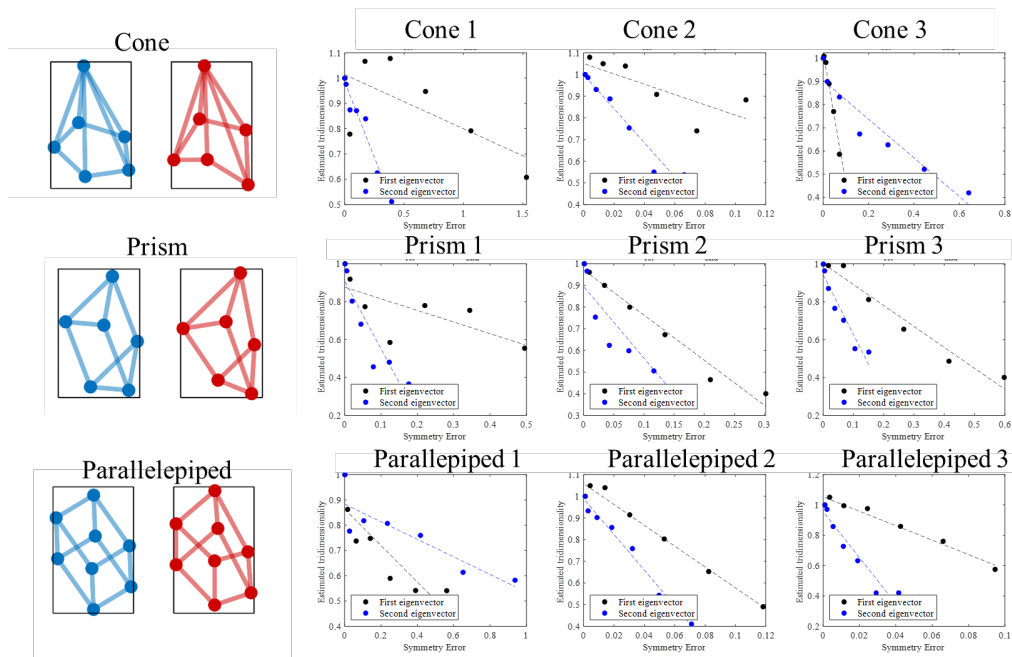


図 2: 対称性誤差と推定された平均立体度の散佈図 (3種類の図形とそれぞれ3つのパターンごとに)。

謝辞 本研究は JST さきがけ JPMJPR20C9 および科研費挑戦的研究(萌芽) JP22K19790 の助成を受けた。

参考文献

Biederman, I. (1987). Recognition-by-components: a theory of human image understanding. *Psychological review*, 94(2), 115.

Hochberg, J., & Brooks, V. (1960). The psychophysics of form: Reversible-perspective drawings of spatial objects. *The American Journal of Psychology*, 73(3), 337-354.

Necker, L. A. (1832). LXI. Observations on some remarkable optical phenomena seen in Switzerland; and on an optical phenomenon which occurs on viewing a figure of a crystal or geometrical solid. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1, 329–337. doi: 10.1080/14786443208647909

Marr, D., & Nishihara, H. K. (1978). Representation and recognition of the spatial organization of three-dimensional shapes. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 200(1140), 269-294.

Nakayama, K., & Shimojo, S. (1992). Experiencing and perceiving visual surfaces. *Science*, 257(5075), 1357-1363.

Tarr, M. J., & Bülthoff, H. H. (1998). Image-based object recognition in man, monkey and machine. *Cognition*, 67(1-2), 1-20.

Vitz, P. C., & Todd, T. C. (1971). A model of the perception of simple geometric figures. *Psychological Review*, 78(3), 207.

錯視が解き明かす視覚の認知空間

西本博之

(高知大学医学部医学科 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)

視覚が認識している映像は実体とは少し異なる。視空間における映像は単なる幻想にすぎない。しかしながらそこには確かな物理法則が存在する。それは光学である。図1の左図のように足元から左右に伸びる直線と、これに平行な目の前の直線は無遠慮で交わる。この事は目の前に見えている直線が、実は湾曲して見えていることを示唆している。これは人間の眼に特有の現象ではなく、カメラのレンズも同様の画像を映し出す。図1の右図のように視空間がプラネタリウムのような球体で、視点が球体の中心にあれば、球面に投影された垂直な直線も立体的に考えると湾曲していると理解できる。従って平行線が交わる現象も、球面上では当たり前となる。この事から視空間の形状は球体であり、物理空間とは全く異なる形状と言える。

この事実をヘリング錯視(図2)は教えてくれる。物理空間では平行線は決して交わらない。しかしながら視空間を忠実に再現した写真の中では平行線は交わる。言い換えると、平行線の延長線上に消失点という交点が存在する。このため直方体を立体的に描く時、つまり視空間が丸いことを意識して直方体を描くと、消失点から延びる補助線に合わせて直方体の各辺は傾く。これが透視図法(遠近法)である。しかも三点透視図法において、きちんと直線を引いたにも関わらず、消失点付近で違和感を覚える(図3)。これは丸い視空間を平面に描くことで生じた誤差である。我々は、視覚を通して視空間が丸いことを無意識に学習している。錯視はこれを教えてくれる。(図4)。

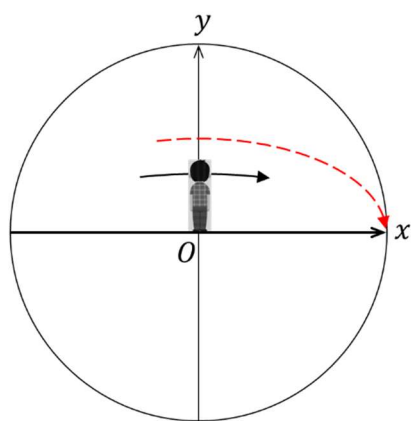


図1. 平行線が交差して見える理由

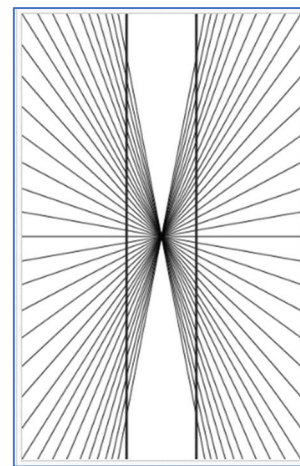


図2. ヘリング錯視

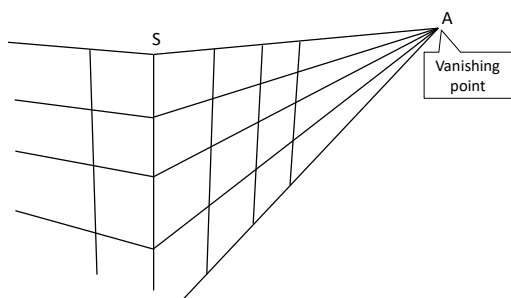


図3. 三点透視図法(錯視)

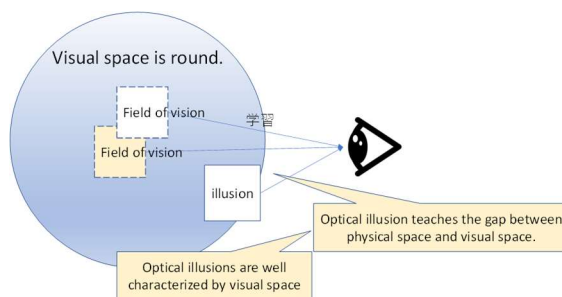


図4. 視覚は視空間が丸いことを学習している

曲面と曲線を用いた不可能モーション

下村海渡, 谷中一寿 (神奈川工科大学)

不可能モーションは、物理的にあり得ない動きをしているかのように見える錯視であり、杉原の「なんでも吸引四方向滑り台」などの研究がある。従来は、直線や直角のみを利用したものに限定されているが、本研究では図1に示すような曲線や曲面を利用した新たな不可能モーションを提案する。中央が凹んだ塗装された放物面鏡に、プロジェクタで幾何学図形(球面の一部を簡易なワイヤーフレームで表したものであり、ここでは「ドーム」と呼ぶ)を投影し、図2に示すようにプロジェクタと同じ位置から観察すると、透視図的遠近法(perspective)によりドームが立体的に盛り上がって見える。この状態で、実物体の球を転がすと、実際には球は重力により中心部に向かって軌道を描いて落ちてゆくのだが、球が重力に反してドームを登ってゆくかのような錯覚が生ずる。

従来の不可能モーションは、剛体(ごうたい、力を加えても変形しない固い実物体)のみで作られている。これに対し本作品では、ドームは透視図的遠近法で描かれた「絵」にすぎないため、本作品を従来の不可能モーションと単純に同一視することはできない。しかし透視図的遠近法の使用を許容するなら、たとえば京急羽田空港国際線ターミナル駅にあるような錯視サインの原理で床面にくぼみを作り、その上を人が歩けば、空中浮遊しているように見せることができる。空中浮遊は物理法則に反するので、言葉の意味の上ではそれも不可能モーションに違いないので、その意味での様々な不可能モーションを比較的容易に制作することができる。



図1 曲面と曲線を用いた不可能モーション

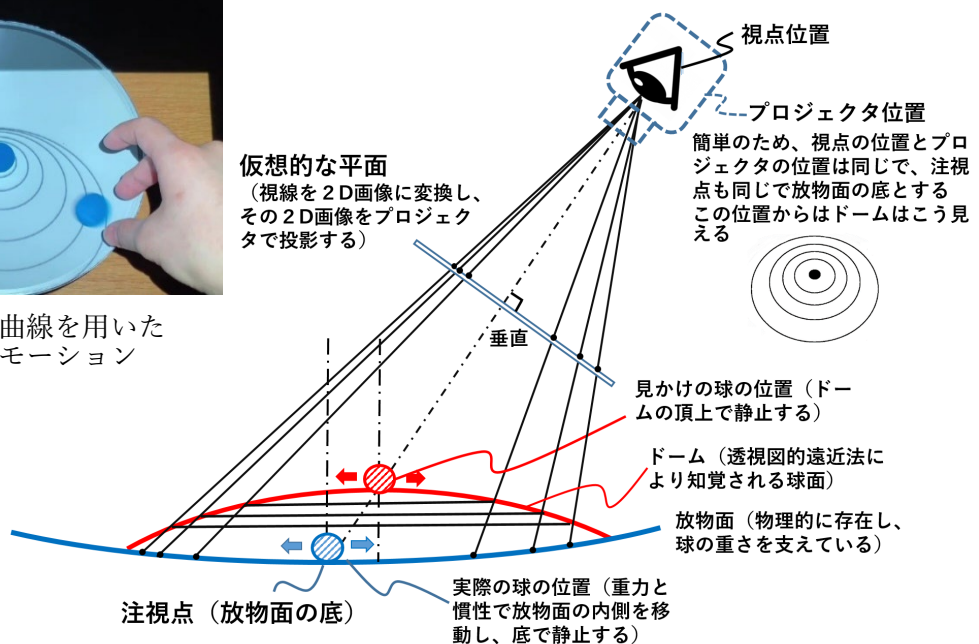


図2 面と曲線を用いた不可能モーションの原理

フロー体験時の時間長錯覚に関する要因分析的検討

一川誠（千葉大学人文科学研究院）・高橋紀香（千葉大学文学部）

時間の知覚は固有の感覚器を持たないため、知覚系は事象の時間的特性の多くに直接的に対応する情報を得ることができない。その都度の時点で得られる点的（0次元）情報には、事象の持続時間長や事象間の間隔（1次元）についての情報が欠けている。各時点で得られる0次元情報から事象の1次元特性を推測する過程は、一義的な解のない「不良設定問題」を解く過程であり、必然的に、事象の時間特性の知覚には多くの錯覚が生じることになる。

特に大きな時間長に関わる錯覚を引き起こす事態にフローがある。フローについては、経験サンプリング法に基づくチクセントミハイによる研究がよく知られる。何かに没頭し、それ以外の世界がなくなったように思えるとき、人は最も満たされると感じる。この状態のことを「フロー」と呼ぶ（スポーツ関連の状況では「ゾーンに入る」と言うこともある）。このフロー体験時、感じられる時間長は、日常と比べると極端に長くなったり、短くなったりして、「歪む」ことが多く報告されてきている。

本研究では、フロー体験時の時間長知覚の歪みに関連した要因を特定し、時間長知覚の歪みに関するモデルを構築した上で、感じられる時間の長さの操作の方法を探ることを目的とした。オンラインでのタイピングゲームを遂行している際に感じられる時間と実際の時間の際（時間の歪み）を測定する実験を実施し、一般的フロー体験チェックリスト 10 要因、気分評定 12 要因、フロー体験に関わる客観的指標 6 要因との関係を検討した。その結果、フロー試行のうち、時間長を過小評価した試行では、チェックリストの集中度、目標志向性、制御感で時間の歪み（短縮）の 6 割以上を説明できるモデルが得られ、時間長を過大評価した試行では、気分のうち気力の充実とチェックリストの集中度が時間の歪み（拡張）の 8 割以上を説明できるモデルが得られた。フロー時の時間長錯覚の方向性（短縮、拡張）を決定するのは目標志向性、制御感、気力であることが示された。さらに、非フロー時の時間長の過小評価についても、制御感、緊張で時間の歪み（短縮）の 7 割以上を説明できるモデルが得られた。

これらの成果に基づき、満足度の高い時間の使い方に関する提案が可能となった。具体的には、課題遂行時の目標の明確化、制御感の増大、気力の充実により、課題遂行を楽しく感じる時間を拡張する上で有効と考えられる。

平行移動錯視とその頑健性

杉原厚吉（明治大学先端数理科学インスティテュート）

立体を鏡に映すと鏡面に関して面対称な姿へ変わるはずであるが、鏡に向いた生き物の姿が向きを変えないでそのまま鏡の中へ平行移動したように見える錯視を見つけた。この錯視立体の設計法、数学的性質、知覚的頑健性について論じる。

図 1 に立体の例を示す。鏡に向かうエイが向きを変えないでそのまま鏡の中に入ったという知覚が生じる。この立体を作るためには、図 2 に示すように、互いに逆を向く二つの目標図形 P と Q を水平面上に固定し、二つの視線方向 v_1, v_2 から見たときそれに一致する空間曲線を求めてその中を曲面で張り、最後にそれに厚みをつければよい。鏡を垂直に立てて、それに向かう姿勢で立体を固定して見下ろせば、錯視を楽しむことができる。

この錯視は、立体の向きと視点の位置にある程度の揺らぎを与えても、形がほとんど崩れないで錯視が起き続けるという頑健性を持つ。図 3 には、3 種類の昆虫を使った錯視立体を示したが、それぞれは正面から少し左右に向きが乱れており、さらにそれを眺める視線方向も斜めへ変化させてある。それでもしっかりと錯視が知覚できる。この頑健性は、次のような性質から来るものと考えられる。

第 1 に、この方法で作った立体は、鏡面に平行な面に関して面対称となる。したがって、直接見た姿と鏡に映った姿が互いに他を平行移動したものとなることは、視点位置に依存せず、どこから眺めても成り立つ。

第 2 に、選択した生き物の形自体が左右線対称なので、それから作った立体も左右面対称となる。その結果、立体の向きを鏡に対して正面から左右に動かしたとき、鏡の中の像は立体とは逆方向へ向きを変える。したがって、立体とその鏡像は鏡面に垂直な面に関して面対称となる。

第 3 に、選んだ図形が生き物の形なので、少しぐらいの見え方の変化は、知覚的に許容されると考えられる。目標図形が抽象的で規則的な場合は、対応する錯視立体の向きや視点の変化が知覚されやすい。それに対して、そもそも生き物は形を変えるものなので、見かけの姿が少し変化しても、「チョウ」や「トンボ」などのカテゴリーは変わらず、同じものが見え続けているという知覚が強く働くものと考えられる。

本研究は、科研費基盤(B) (21H03530)、挑戦的研究 (21K19801) の支援を受けている。

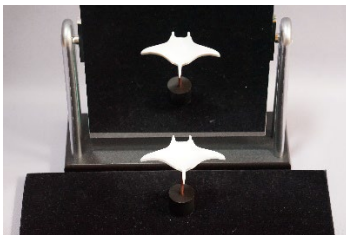


図 1. 振り向かないエイ

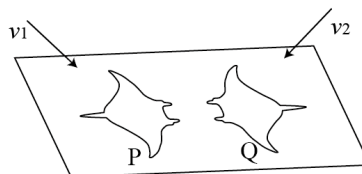


図 2. 平行移動立体の作り方



図 3. 振り向かない虫たち

ペンローズの階段の動的な特徴

間瀬実郎（呉工業高等専門学校）

不可能立体として有名なペンローズの階段を 3DCG 動画アプリを使って、その特徴を動的に分析した。その結果、静止画では見えなかった特徴を紹介する。

三者の関係

図 1 の俯角、階段勾配、プロポーションの三者は連動しており、3つの内の2つが決まると、残り1つは一意に決まる性質があることが明らかになった。例えば、俯角と階段勾配の値を決めると、全体のプロポーションが一意に決まる。なお、視線方位角は影響しないこともわかった。

段数均等方式と踏面均等方式

段数均等方式とは、図 2（左）のように各辺の踏板の数が同じになるようにペンローズの階段を描く方法とする。一方、踏面均等方式とは図 2（右）のようにすべての踏面の長さがほぼ同じになるように描く方法とする。現実の階段では通常踏面は均等であるため、静止画でペンローズの階段を描く場合も右のように踏面を均等に描くことが圧倒的に多い。ただし、ペンローズの階段は各辺の長さがことなるため、段数は不均等になる。一方、動画として描いた場合、回転時に辺の長さが変化するため、踏面均等方式にすると段数が目まぐるしく変化し、図形的な矛盾が発生する。段数均等方式で描けば、図形的な矛盾は発生しない。このようにペンローズの階段は静止画と動画とでは描き方を変える必要があることが分かった。

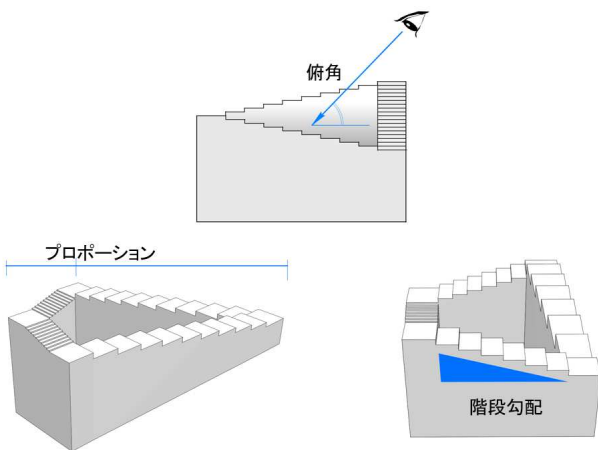


図 1 俯角・階段勾配・プロポーションは連動する

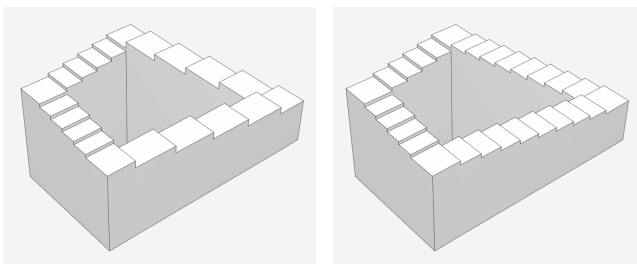


図 2 動画にすると段数均等（左）が矛盾しない

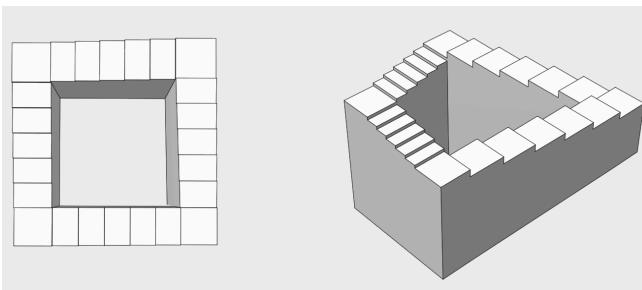


図 3 4 回回転対称の上面（左）と斜視（右）

均等方式で描けば、図形的な矛盾は発生しない。このようにペンローズの階段は静止画と動画とでは描き方を変える必要があることが分かった。

回転対称の対称性

図 3 のようペンローズの階段は真上から見ると正常なプロポーションで見えるが、斜視するとプロポーションが崩れる。仮に真上から見た図形が本来の図形として、斜視は不可能立体を描くための特殊な変換方法によって変形した図形だとする。真上から見た図形が 4 回回転対称であれば、そのペンローズの階段は 4 回回転対称だといえる。つまりペンローズの階段の対称性は真上から見たときに評価することで対称性か否かを判断することができるという仮説を提案する。

また斜視のペンローズの階段を 90° 回転させると全く同じ図形になる。このことは 4 回回転対称の条件と一致する。ペンローズの階段は斜視時においては不可能立体を描画するための変換によってプロポーションが崩れるため、一見すると対称に見えないが、実は対称性が存在し、それを確認する方法もあると考える。

参考文献

- [1] 杉原厚吉, “歩けることを目指した無限ループ階段の設計法”, 図学研究, 56.1, (2022), 13-23.
- [2] 中津香奈, 高橋時市郎, “階段不可能図形のアニメーション手法”, 画像電子学会, 第41回年次大会予稿集(2013)

光の屈折を利用した変身立体について

花木優寿(関西大学総合情報学部), 友枝明保(関西大学総合情報学部)

「不可能立体」とは、実際に作ることのできる立体でありながら、それを見た人に、「あり得ない姿や振る舞いが見えてくる錯視を生じさせる」立体のことであり、杉原氏によって数多くの立体が創作され続けている。この不可能立体群は、一枚の線画と呼ばれる二次元画像から立体構造を復元する手続きを、数学の問題として定式化して作られている。しかし、線画には奥行きがないため、視点と線画の一つのペアの情報だけでは、復元する立体の候補が一意に定まらず、何らかの追加情報が必要となる。不可能立体の一種の「変身立体」は、鏡に映すと全く違った形に見える立体のことであり、鏡を利用することでもう一つの視点を増やし、その視点と線画のペアを追加情報として用いることで、復元する立体の形を求めている。この変身立体は鏡と光の反射を利用してもう一つの視点を実現している。本講演では、もう一つの視点を増やす方法として、光の屈折に注目し、その屈折を利用した変身立体の構築手続きとその作品例について紹介する。

図1のように、視点 E から立体 R までの間に異なる媒質(水)がある場合、光は屈折し、水がない場合の視点 F から見ている状況となる。つまり、水がない場合の視点 E と水がある場合の視点 E (~水がない場合の視点 F) という二つの視点を作ることができる。実際に、視点 F に対する屈折角 θ_2 はスネルの法則により、視点 E の入射角 θ_1 を用いて次の式で与えられる。

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1\right)$$

ここで、 n_1, n_2 はそれぞれ空気と水の屈折率を表す。これら二つの視点およびそれぞれの線画を条件として、両者を実現する形を求めることで、光の屈折を利用した変身立体を作ることができる。

図2にこの方法で作った立体の例を示す。「変身するガレージ屋根」を参考に、W型とO型の線画を用意して立体を構築し、視点の高さ移動に伴って二つの異なる形が見えることを確認した。当日の発表では、3Dプリンタで印刷した立体とともに、水に沈めた時のデモも紹介する予定である。

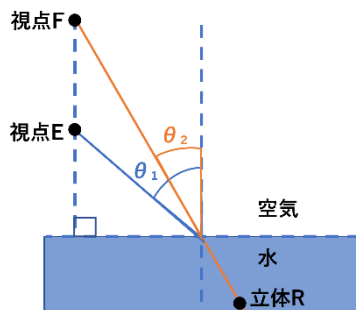


図 1. 視点 E と F の位置関係

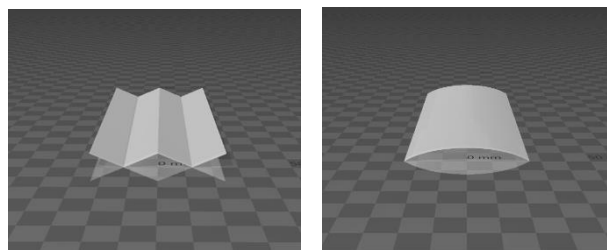


図 2. 光の屈折を利用した変身立体の例
(左) 視点 F から見た状況, (右) 視点 E から見た状況

SSVEP ベース BCI に対する輝度変化による運動錯視の有用性

振原知希, 宮下芳明 (明治大学)



図1. 輝度変化による運動錯視を用いた SSVEP ベースの BCI 向け UI の提案イメージ.

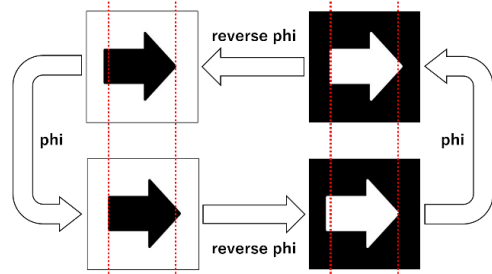
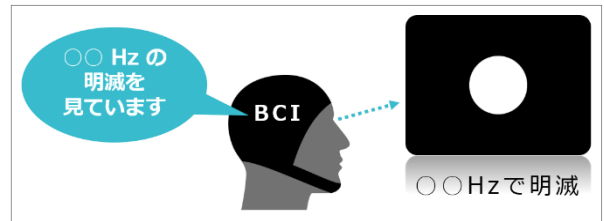


図2. 実験で用いた運動錯視のフレーム遷移. ファイ現象とリバースファイが交互に起こる.

Brain-Computer Interface (BCI) は、脳波など脳から取得される情報を用いることで、感情の可視化や文字の入力などコンピュータとのインタラクションを可能にする。BCI の一つに、一定周期で明滅を繰り返すフリッカ刺激を注視することで UI を操作するインタフェースが存在する。フリッカ刺激の周波数が 1-90 Hz 程度のとき、それを注視すると視覚野において同じ周波数で振動する成分が観測される。この成分は定常状態視覚誘発電位 (Steady-State Visual Evoked Potential : SSVEP) と呼ばれ、高い識別精度や短時間のキャリブレーションを実現したことから、BCI を介して GUI の操作を行う際、最も一般的かつ効率的なアプローチとして用いられる。しかし、BCI 用に作られる UI コンポーネントは全て明滅させる必要があるため、UI デザインが乏しいものになりやすい。



ところで、錯視の一つとして、少数の静止画の繰り返しであるにも関わらず、刺激が一方へ動き続けているように知覚される運動錯視が存在する。図2のように、ファイ現象とリバースファイを交互に発生させることで、無限運動が生じたように知覚される。このような運動錯視を UI に導入することにより、ユーザはアプリケーションの操作時に錯覚を楽しむことができるようになるため、UX の向上が期待される。その上、ユーザが直感的に UI を操作することも可能になるだろう。例えば、図1の右側のように円環の UI コンポーネントを2つ用意し、一方は拡大し続けているように知覚される運動錯視、他方は縮小し続けているように知覚される運動錯視を付与する。すると、拡大して見えるコンポーネントには“+”、縮小して見えるコンポーネントには“-”の意味が生じる。また、図1の中央下部にある2つの円環上に矢印が並ぶデザインに対し、無限に回転し続けているように知覚される運動錯視を用いることで、矢印が持つ意味合いを補強することができる。しかし、輝度変化による運動錯視は明滅刺激であるため、UI コンポーネントに用いた場合、カーソルの視認性の低下や目の疲れなどの問題が生じ、選択効率が低下してしまう可能性がある。

輝度変化による運動錯視を UI に用いる欠点として明滅の存在を挙げたが、SSVEP ベースの BCI において明滅は不可欠な要素である。従ってこれらを組み合わせることで互いの欠点が打ち消され、質の高い BCI 向け UI の設計も可能になることが期待される。そこで、SSVEP ベースの BCI 向け UI に対し、輝度変化による運動錯視の有用性を示すことを目的とし、運動錯視を用いてターゲットの選択をどれほど正確に行えるか実験を行った。その結果、半数の参加者から 85%以上の精度が得られ、BCI 向け UI における有用性が示唆された。

並置混色による色の錯視

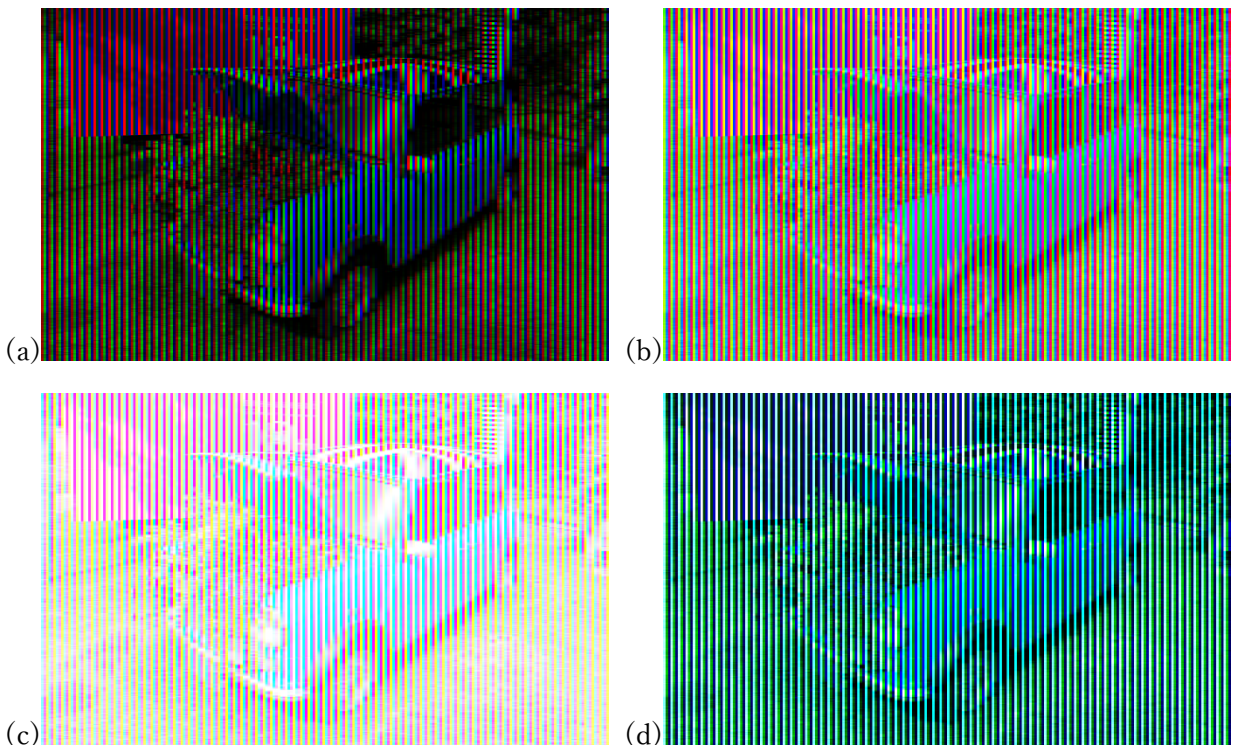
北岡明佳（立命館大学総合心理学部）

適切な 3 つの色を選べば、その混色でフルカラーを表現できることが知られている。その混色のやり方として、絵の具のように色を物理的に混ぜ合わせてつくるのではなく、3 原色を空間的に並べて、知覚的に混色させるという方法がある。これを並置混色と呼ぶ。ディスプレイのフルカラー表示は、作りとしては並置混色であるが、それぞれの原色は弁別できない程度に小さく表示されるという点で、絵の具のような混色に近い。ただし、絵の具の混色は減法混色であり、ディスプレイの混色は加法混色という違いはある。

ここでは、並置混色を、それぞれの原色が十分弁別・知覚できる大きさで表示される画像における混色に限定する。そのような並置混色の画像に、点描の絵画がある。もっとも、点描の絵画は必ずしも 3 原色で描かれるわけではない。もし並置混色を 3 原色で表現しようとするならば、原色として赤・緑・青を選ぶことが自然である (a)。

ここにおいて、並置混色ならでは色の操作が可能である。赤・緑・青の領域は空間的に独立しているので、たとえば赤が表現されている領域に一樣な緑を、緑が表現されている領域に一樣な青を、青が表現されている領域に一樣な赤を混ぜるといったことが可能である。そうすると、もともと赤の領域は黒から赤までの色が表現されていたのだが、そこに緑が加法混色されることで、緑から黄までの色が表現されることになる。同様に、緑の領域は黒から緑までの色が表現されていたのだが、それは青からシアンまでの色が表現されることになる。また、青の領域は黒から青までの色が表現されていたのだが、赤からマゼンタまでの色が表現されることになる (b)。さらに、それぞれに青・赤・緑を加法混色することができ、それぞれシアンから白、マゼンタから白、黄から白までの色が表現されるようになる (c)。このように変換しても、問題なくフルカラー画像として知覚できる。

上記は赤・緑・青を等量加えていくという操作を行ったが、たとえば緑と青だけを加えるといったやり方でも、元の画像と同様のフルカラー画像として十分知覚できる場合がある (d)。このような時に派生する色の錯視について考察する。



きらめき格子錯視の周辺視野特性

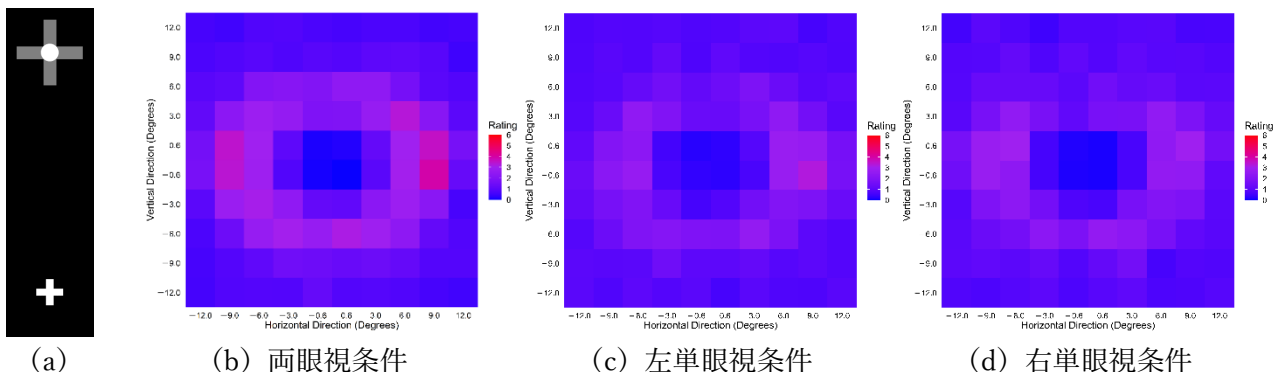
森将輝（慶應義塾大学），須志田隆道（サレジオ工業高等専門学校），近藤信太郎（岐阜大学）

きらめき格子錯視は，灰色格子の交差部に布置された白色円に黒色のきらめきを知覚するという現象である[1]。先行研究では，パッチ・格子のサイズ[2]や背景の明るさ[3]がきらめき格子錯視に影響を及ぼすことが報告されている。ただし，きらめき格子錯視が中心視で生じず周辺視で生じることはよく知られているが，きらめき格子錯視が周辺視野のどの領域で生じているかは十分に理解されていない。

本講演では，きらめき格子錯視の周辺視野特性について，単純化きらめき格子錯視図形（図 a）を用いて実施した心理実験により得られた最新の知見を紹介する。実験 1 では，水平方向の偏心度によりきらめき格子錯視図形の見えが異なるかを検討した[4]。その結果，偏心度が ± 6.0 ， ± 9.0 度である場合は，他の偏心度（ ± 0.6 ， ± 3.0 ， ± 15.0 ， ± 18.0 度）である場合よりも錯覚的黒色度が高いことが示された。実験 2 では，水平方向および垂直方向の偏心度によりきらめき格子錯視図形の見えが異なるかを検討した[5]。平均以上の錯覚的黒色度である座標点をもとに主成分分析を行った結果，第 1 軸（水平方向）は，第 2 軸（垂直方向）の約 1.68 倍であることが示された（図 b）。上下左右で平均化された錯覚的黒色度について，水平方向の偏心度および垂直方向の偏心度を要因とする 2 要因分散分析を行った結果，きらめき格子錯視は，垂直（水平）方向に対する偏心度の大きさにより錯覚的黒色度が最大となる水平（垂直）方向の偏心度が異なることが示された。実験 3 では，単眼視によるきらめき格子錯視を検討した（未発表内容）。結果として，左単眼視（図 c）と右単眼視（図 d）では，両眼視と同程度の異方性が生じていることが示された。これらの心理実験から得られた知見および神経生理学的知見を踏まえ，きらめき格子錯視の視覚処理機構およびその数理モデリングについて議論する。

- [1] Schrauf, M., Lingelbach, B., & Wist, E. R. (1997). The scintillating grid illusion. *Vision Research*, 37(8), 1033–1038.
- [2] Matsuno, T., & Sato, Y. (2019). Dissociation of perceived size and perceived strength in the scintillating grid illusion. *Journal of Vision*, 19(13):15, 1–15.
- [3] Qian, K., Kawabe, T., Yamada, Y., & Miura, K. (2012). The role of orientation processing in the scintillating grid illusion. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74(5), 1020–1032.
- [4] 森将輝・須志田隆道・近藤信太郎（2022）. きらめき格子錯視における偏心度の影響とその数値シミュレーション 日本視覚学会 2022 年夏季大会，ポスター発表 1p23.
- [5] 森将輝・須志田隆道・近藤信太郎（2022）. きらめき格子錯視における異方性 日本基礎心理学会 第 41 回大会，ポスター発表 1-26.

図. 単純化きらめき格子錯視図形 (a) と錯視的黒色度のヒートマップ (b-d)



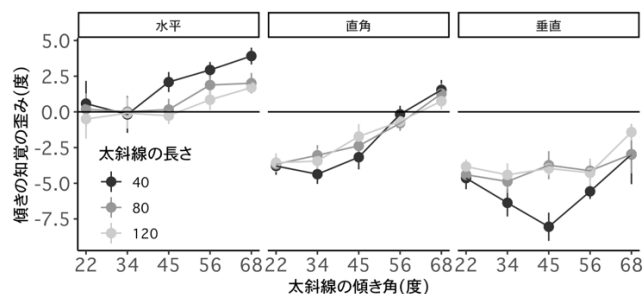
太斜線の傾き歪み錯視に関する実験的検討

竹島 遥貴・高橋 康介（立命館大学総合心理学部）

線分の傾きの知覚は歪みやすい。例えば線分の本来の傾きが水平に近い場合は水平方向に、垂直に近い場合は垂直に歪んで知覚される（oblique effect）。また、ツェルナー錯視は主線と交差する線のなす鋭角が過大視される錯視である。本講演では新たに発見した「太斜線の傾き歪み錯視」図1, 第14回錯視・錯聴コンテスト入賞）の現象とその要因に関する実験研究について報告する。

この錯視では、太さのある線分（＝細長い平行四辺形）の傾きが線分終端の角度と線分の長さの影響により歪んで知覚される。長い線分に比べて短い線分では、終端が水平の場合に垂直方向、終端が垂直の場合に水平方向に傾いて見える。この錯視の性質を明らかにするため、線分の長さ、傾き、終端の角度を操作し、調整法を用いた実験により錯視量を測定した（N=8, <https://bljzmkij64.cognition.run/>）。各試行では黒色背景上に灰色の線分刺激（太さ 0.27 度）を呈示し、小さな円のプローブの位置が線分の延長線上に見えるようにマウスで調整することを課題とした。線分の長さ 3 水準（視角 1.09 度, 2.18 度, 3.27 度）、線分の傾き 5 水準（22.50° から 67.50°, 3 時方向が 0° で反時計回りに正）、終端の角度 3 水準（水平, 線分方向に直角, 垂直）の 3 要因参加者内計画とした。従属変数は知覚された傾きと刺激の線分の傾きの差分とした。分散分析の結果、線分の傾きと終端の角度の主効果、終端の角度と線分の傾きの交互作用、終端の角度と長さの交互作用が有意であった（図2）。終端の角度の効果について、水平条件では垂直方向に、垂直条件では水平方向に線分の傾き知覚が歪むことがわかった。また線分の長さが短いほど終端の角度の効果が大きくなった。以上の結果から、太さのある線分の傾き知覚において、線分が短いときには終端の角度に直交する方向に線分全体の傾きが歪んで知覚されることが明らかとなった。

この結果は線分終端と主軸の間での鋭角過大視が平行四辺形の上底・下底と斜線の間でも起こっていると理解できる。つまり鋭角過大視が線分の交差から四角形の輪郭にも拡張できる可能性を示すものである。また線分が短くなるほど錯視量が大きい点は、ツェルナー錯視について誘導線の間隔が小さいほど効果が大きいという先行研究に合致する。以上の結果を踏まえ、本講演では傾き知覚のメカニズムの一側面について議論する。



左：錯視図。長い斜線より短い線分の方が傾きが垂直に見えるが、全て同じ角度の傾きである。右：実験結果。上部ラベルは終端の角度を示す。エラーバーは標準誤差を示す。

鏡面消失を起こす底面パターンの条件の検討

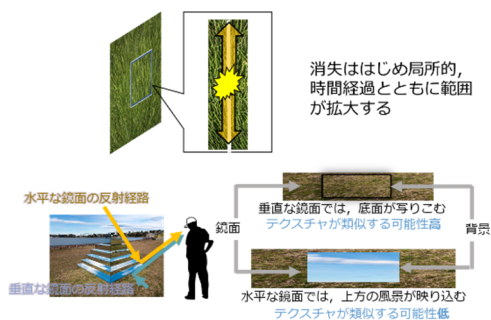
丸谷和史 (NTT コミュニケーション科学基礎研究所) ・ 大谷智子(明治大学)

鏡面の視覚認知には少なくとも3つのモードが存在する。一つ目は、鏡にその前面の風景が映り込んでいるという認知である。二つ目は、鏡面が透明なガラス面のように知覚され、その奥に空間が広がっているという認知である。三つ目は鏡面自体の存在知覚が消失し、鏡面の手前と奥の空間がシームレスに連続しているという認知である。

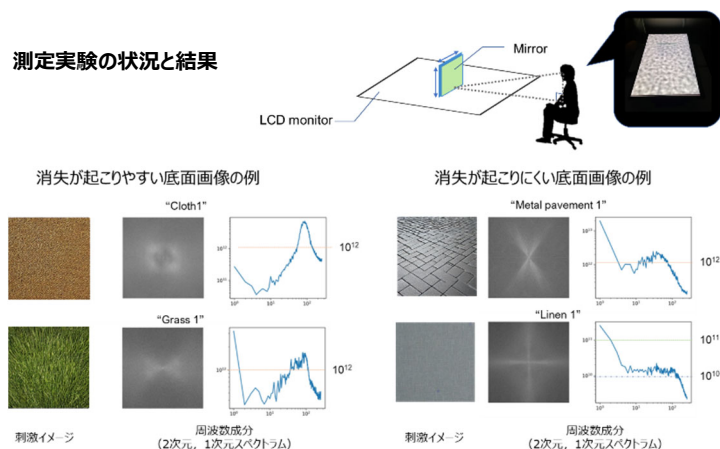
これまでの視知覚研究の中では、前者二つの知覚については多く触れられてきた。三つ目の鏡面知覚の存在が消失するモード(“鏡面消失“)は、光学的迷彩技術などへの応用可能性があり、また建築や美術作品などでは取り上げられてきており、現象としてはおそらく既知であると考えられる。しかし、この鏡面消失については系統的な検討が行われておらず、Troxler 効果や迷彩現象などの知覚認知が消失するという点で類似する諸現象との関係、鏡面においてこのモードが起こりやすい条件等、不明点が多い。本研究では、鏡面消失をいくつかの状況で観察・検討した。その結果、以下のような点が明らかになった。(1) 視点位置と映り込んだ画像の種類によって起こりやすさが変わり、特に鉛直方向に広がる鏡面に底面が写りこんでいるときに起こりやすい。(2) 消失はすべての箇所ですべて同時に起こるわけではなく、はじめ鏡面の境界線の一部の知覚が局所的に失われ、消失部が時間とともに鏡面の境界線に沿って拡大していく。(3) この拡大は鏡面の輪郭線部分にのみ起こり、鏡面内部に映り込んだ像は知覚され続ける。

さらに本研究では、心理学実験を実施し、AI で生成した自然(様)画像とバンドパスフィルタリングノイズ画像に対して、消失の程度(鏡面内の空間範囲) 評定とその反応時間を計測した。結果、自然(様)画像では現象観察で見られたように、消失に程度差があり、中程度の空間周波数帯(数 c/deg 程度)に鋭いスペクトル分布のピークがある画像に対して消失の程度が大きくなった。さらに、画像による消失の程度差は、バンドパスフィルタリングノイズ刺激に対する消失程度の変化で少なくとも部分的に説明できることが明らかになった。これらの結果、消失は、Troxler 効果を説明するモデルなどで提案されてきた局所順応による輪郭線処理の抑制で少なくとも部分的に説明できる可能性が高いことが明らかになった。ただし、その説明力は限定的であり、特に局所的に生じた消失の拡大を決定する要因については検討の余地が残された。

現象観察のまとめ



測定実験の状況と結果



明治大学「現象数理学」研究拠点共同研究集会

『錯覚のモデリング・解析とその応用:第17回錯覚ワークショップ』

組織委員長 杉原厚吉(明治大学)

組織委員

山口智彦(明治大学)、宮下芳明(明治大学)、北岡明佳(立命館大学)

一川誠(千葉大学)、谷中一寿(神奈川工科大学)、星加民雄(東亜大学)

近藤信太郎(岐阜大学)、須志田隆道(サレジオ工業高等専門学校)

大谷智子(明治大学)



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 錯覚・錯視
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』