

# 視線追跡型 VR による曖昧な線画の立体知覚の定量的評価

## Quantitative evaluation of stereognosis of ambiguous line drawings by using eye-tracking VR device

月田 諒弥<sup>†</sup>, 日高 昇平<sup>†</sup>  
Masaya Tsukida, Shohei Hidaka

<sup>†</sup>北陸先端科学技術大学院大学  
Japan Advanced Institute of Science Technology  
s2230025@jaist.ac.jp

### 概要

本研究では、ネッカーキューブをはじめとする平面線画でありながら三次元構造に知覚されやすい図形の立体知覚を調べるために視線追跡型 VR を用いた知覚心理学実験を Unity で開発し、実験を実施した。実験中の参加者の眼球運動を計測し視線の奥行方向の推定距離を算出することで、平面線画に対する立体知覚と眼球運動の関係を分析した。その結果、図形に対する主観的な立体評価と図形を観察中の視線から算出された Gaze Depth の中央値の間に相関が確認された。

キーワード：曖昧図形, 視線追跡, 視覚, 立体知覚, ネッカーキューブ, 錯視, VR

### 1. はじめに

曖昧図形がもたらすヒトの知覚の研究は古くからされており、そうした曖昧図形の一つとしてネッカーキューブ[1]が挙げられる。ネッカーキューブは一つの線画でありながら複数の知覚像が得られる図形であり、その知覚像の切り替わり（以下、知覚交代という）に関する研究は多く存在する。例えば、Wolfgang Einhäuser ら[2]は知覚交代と眼球の位置の関係性について指摘している。一方でネッカーキューブなどの平面線画からもたらされる立体知覚像そのものの研究もされている。例えばコンピューターグラフィックスで作成されたネッカーキューブ立方体を被験者に操作させてその際の認知過程を追っている研究[3]やネッカーキューブや立体知覚の数理モデルを提案している先行研究もある[4]。しかし、後者の切り口であるネッカーキューブからもたらされる知覚像自体の研究は眼球運動を補完的に使っている事例はあるものの[5]、口頭や質問紙など被験者の主観的な報告による評価に大きく依存しているため、被験者が感じている立体知覚を詳細に分析する方法は限られる。

そこで、本研究は主観的な報告とは独立に得られる客観的な指標の一つとして図形を観察する際の視線に着目し、視線の情報から知覚的な立体性を推定する方法の開発を目的とした。具体的には、視線追跡の可能なバーチャルリアリティ (VR) 提示機器を使用し統

制された VR 空間内で被験者が視覚刺激を知覚している際の視線および眼球運動を測り、そこから推定される視線の奥行座標などの値と、心理量的な主観の評価である立体知覚の評価の関係を分析した。この分析により立体知覚の客観的な指標としての眼球運動を検討した。

### 2. 立体知覚に関する理論的な予測

日高、高橋[4]の提示する線画の立体知覚に関する数理理論によれば、知覚される立体度と、平面図形のある種の潜在的な対称性には相関があると予想される。これを具体的に定量化する指標として本研究では、それぞれの平面図形に対称性誤差と呼ぶ量を計算した。この対称性誤差が低い図形はより立体的に知覚しやすいと予想される。本実験は、この立体知覚に関する予測を検討すべく計画された。

### 3. 実験方法

#### 3.1. 実験設計

本研究では実験の提示刺激をゲームエンジン Unity[6]で作成した。Unity はゲーム用途のみならず認知心理学研究の文脈でも利用されている実績がある。また刺激の提示装置として FOVE 社の VR 機器 FOVE 0 を用いた。FOVE 0 はゲームから学術分野まで幅広い用途で利用されている視線追跡機能が付加された VR 機器であり、コミュニケーションを調べる目的で FOVE 0 を利用した研究[7]がある。これらゲームエンジンと VR 機器を組み合わせることで被験者に 2 次元および 3 次元視覚刺激を統制された環境下で呈示でき、その際の視線データを得られる。

#### 3.2. 実験参加者

実験参加者は日本語での実験教示が十分に理解でき、正常な視力(補正含む)を持つ大学院生男女 14 名を対象に実施した。実験の説明を行い、VR 装着後、実験参加者それぞれに対して FOVE 0 のキャリブレーション

を行なった上で実験を実施した。

### 3.3. 実験手続き

実験参加者にはヘッドマウントディスプレイ (HMD) の装着と VR 空間に慣れるための課題として、VR 空間内で呈示された赤い球を目で追った後、実験セッションに入った。図 1 で示す CONE 型、PARALLELEPIPED 型、PRISM 型の三つの平面図形を各型 10 事例のうち、各試行ではその 1 事例を VR 空間上で呈示した。

3 型の平面図形が 10 種類ずつ呈示されたのち、今回は同型で実際に数理モデルを基に計算された奥行座標 (z 座標) を持つ 3D 立体図形として 3 型×10 種類図形を呈示された。視覚刺激それぞれ 1 つの図形につき、赤い注目点が現れずフリーに刺激を見る時間 5 秒と順に頂点が着色されそれぞれの頂点を見る時間が 5 秒ずつ与えられた。実験参加者は最初自由に図形をみた後に赤く着色された頂点を順に観察してもらった (図 2, 図 3)。図形を観察中に見え方が変化した場合、実験参加者はキーボードのスペースキーを押して報告した。一つの図形に対して全ての頂点を観察後、その図形の主観的な立体度を報告する画面 (評価フェイズ) に切り替わり実験参加者はマウスのホイールと左クリックを使用して先ほどまでに観察した図形の立体度をスライダ (図 4) で調節して回答した。

なお、実験のカウンターバランスをとる施策として背景を単純な白背景か Unity の VR 空間のデフォルトの背景である skybox 背景 (図 1 の図形の背後に映る背景である) の 2 パターンを用意しており、実験参加者に対してランダムでどちらかを割り付けている。これは、空間に 3 次元的な空間の手掛かりがある背景と全く手がかりのない背景を用意することにより背景による副次的な効果を制御する意図がある。また、CONE, PARALLELEPIPED, PRISM の型の呈示順を 3 パターン用意し、実験参加者にランダムに割り付けることで順序効果を全体では相殺されるように実験は設計された。

### 3.4. 実験結果データについて

実験結果データとして 14 人分の視線追跡データ (視線の奥行き推定距離となる Gaze Depth, 瞳孔間距離 (IPD), 視線の方向ベクトル, 座標など FOVE 0 が内部ソフトウェアで算出し API から取得できるデータ) と実験内容データ (タイムスタンプ, 刺激の内容, 実験参加者のキー入力など筆者が Unity で実験アプリケーションを開発した上での制御項目) が一つのテーブルに記録された。また別 csv ファイルには立体性評価の

フェイズで実験参加者がスライダーで入力したものが数値 (初期値 0.5, 最大値 1.0, 最小値 0) として記録されている。

自作アプリケーションによるテーブルの記録のリフレッシュレートは 120fps だったものの FOVE 0 の視線追跡計算の内部フレームレートとはタイミングが整合しなかったため記録された視線追跡データは同一の眼球画像から計算されたレコードが複数記録されるという課題があり、重複を削除すると視線追跡データの実効的なフレームレートはおおむね 60~70fps であった。分析はこの重複削除後のデータを用いた。このように視線運動のフレームレートは通常の視覚研究のフレームレートと比較すると低いものの、そもそも VR 空間で呈示している視覚刺激は実空間とは違い FOVE 0 の画面更新リフレッシュレートの 70fps で描写が更新されているため大きな問題にならないと考える。

今回収集した視線追跡データ項目について FOVE 社の提供する記載 [8] をもとに説明する。Combined Gaze Ray(position, direction) は FOVE 0 が左右視線データを信頼性の加味を行いながら統合したものであり、VR 空間内でどこを見ているかを指し示す項目になっている。IOD は左右眼球の回転中心を結んだ距離の推定値であり、IPD は瞳孔間距離の推定値である。FOVE 0 では IOD は (眼球モデル計算上変化はするものの) バイオメトリクス定数と考えるに対して、IPD は眼球の動きによって動的に変化する指標で、近いものを見る際には輻輳によって眼球間の距離は近くなると考える。Gaze Depth はユーザが VR 空間内で見ている目標物との距離を計算している指標であり FOVE 0 の内部の計算では IOD と IPD の比を利用して視線の深度を計算している<sup>1</sup>。また Pupil Radius は瞳孔の大きさである。これら指標は FOVE の視線追跡 API からすべてメートル単位で値を取得している。

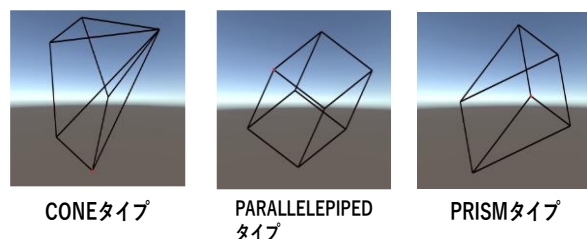


図 1 実験で使用した視覚刺激の例

<sup>1</sup> FOVE 社より情報提供

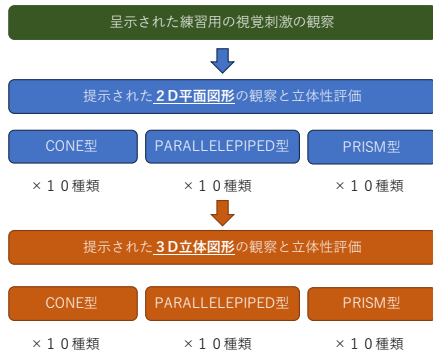


図2 実験全体のプロセス

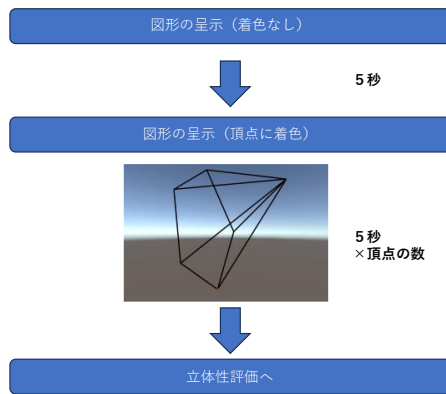


図3 1試行のプロセス

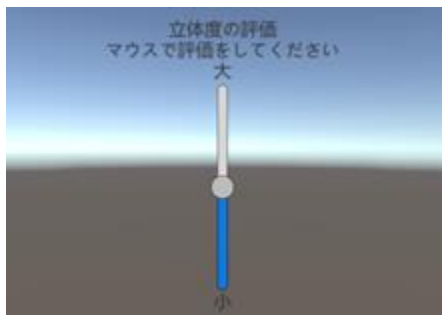


図4 評価フェイズで表示, 利用されるスライダー

#### 4. 結果

まず, 実験参加者の視線を正確に計測できていたかを確認するために, 視線の起点及び方向を指し示す Combined Gaze Ray (position/direction) を  $x, y$  座標に散布図としてプロットした. 実験参加者 1 人の 2D 平面図形を見ている際の視線プロットを図形ごとに図 5 とし示す. おおむね提示した図形と同型の形が視線のプロットとして浮かび上がっており被験者が正しく図形を観察していたことがわかる. つづいてこの参加者の 2D 平面図形と対応する 3D 立体図形観察時の Gaze Depth を散布図としてプロットしたところ, PRISM 型,

対応する PRISM3D 型間, および CONE 型, CONE3D 型間の Gaze Depth 中央値にある程度の相関性がみられており (PRISM 型の散布図を図 6 とし示す), 相関係数は CONE (2D  $\leftrightarrow$  3D) 型において 0.218, PRISM (2D  $\leftrightarrow$  3D) 型は 0.271 であった. ほかに実験参加者においても平面図形と同型の立体図形観察時の Gaze Depth の中央値に相関関係がみられる者がいたが基本的に平面図形と対応する立体図形観察時の Gaze Depth 中央値の相関係数は大きくなかった. また, それぞれの図形を提示された際の Gaze Depth の中央値と評価フェイズでの実験参加者の主観的な立体評価との相関係数を求めたところ, CONE 型で 0.403, PRISM 型で 0.254, PARALLELEPIPED 型で -0.611 とそれぞれ相関が認められた. それぞれの型の中でもっとも相関係数の絶対値が大きい PARALLELEPIPED 型の Gaze Depth と立体評価の散布図を示す (図 7). 立体性評価の回答と Gaze Depth の相関も同様にほかの実験参加者にも見られたが, PARALLELEPIPED 型における全実験参加者の立体評価と Gaze Depth の相関係数をプロットした図 8 を見ると相関係数の大きさや正負にはばらつきがあった.

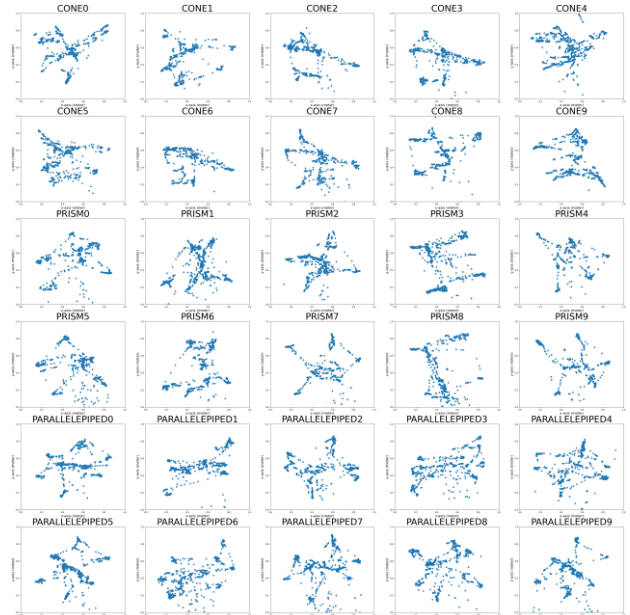


図5 実験中の被験者の視線プロット (平面図形)

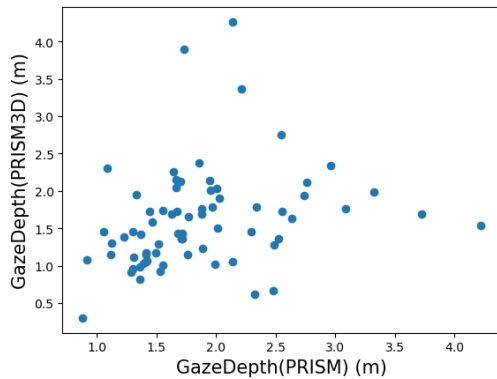


図 6 PRISM 型および PRISM 3D 型の視覚刺激呈示時の Gaze Depth の散布図 (ID1)。1 プロットは一つの図形のフリービューおよび各頂点を見ていた際の Gaze Depth 中央値である。

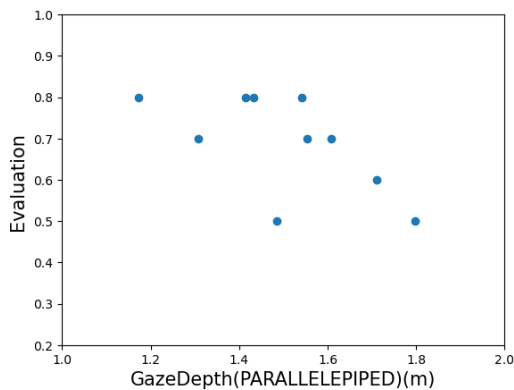


図 7 PARALLELEPIPED 型観察時の Gaze Depth 中央値と立体評価の散布図 (ID1)。1 プロットは一つの図形を見ていた際の Gaze Depth 中央値およびその図形の立体評価である。

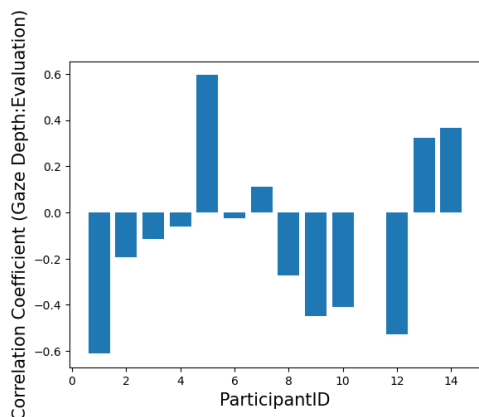


図 8 PARALLELEPIPED 型観察時の Gaze Depth 中央値と立体評価の相関係数を参加者ごとにプロットした図。実験参加者 ID11 はうまく視線データの収集ができていなかったため空欄となっている。

## 5. 考察

今回の実験で見られた実験データの重複については、実験アプリケーション側のリフレッシュレートに同期させたのが原因と考えられる。FOVE 0 の眼球画像の計算に同期させることで解決できると考えられる。

実験結果から Gaze Depth と主観的な立体性評価の相関性がみられたため立体知覚の客観評価に Gaze Depth が利用できるのではないかと示唆が得られた。しかしながら相関性の強度や正負は実験参加者によってばらつきがあること、本実験は VR 空間という実空間とはまた異なった環境下で実施していることを留意する必要がある。相関性の正負に一貫性がないことについては今回の視覚刺激は多義図形であるため理論上は二種類の図形に見える可能性があるため被験者によっては同一の図形を見ているも奥に広がっている図形として知覚している、もしくは手前に飛び出している図形として知覚しているなどその立体知覚の方向が異なる可能性がある。今後はさらに実験の条件を制御することや多義図形の知覚している図形が交代 (switch) した瞬間の眼球運動をよりフレームレートが高い VR 機器を使い検証するなどの追加検証が必要となる。

## 参考文献

- [1] L.A. Necker Esq. (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, 1:5, pp.329-337
- [2] Einhäuser, W., Martin, K.A.C. and König, P. (2004) "Are switches in perception of the Necker cube related to eye position?," European Journal of Neuroscience, Vol. 20, pp.2811-2818..
- [3] 谷部好子, 藤波努, (2000) "3次元物体の認知過程における主体的操作の特徴について~ ネッカーキューブ操作行動に見られた共通点.", ヒューマンインタフェースシンポジウム (2000), pp.483-486.
- [4] 日高昇平, 高橋康介, (2021) "ネッカーキューブはなぜあの立体に見えるのか.", 認知科学 28.1, pp.25-38.
- [5] 谷部好子, 藤波努, (2001) "図形操作行動に見られる共通性- インタラクティブ不可能図形を用いた実験", インタラク ション 2001.
- [6] Unity Technologies, <https://unity.com/ja/our-company>
- [7] 大庭 知也, 鈴木 凱, 黒木 春樹, 岡田 将吾, (2022) "マルチモーダル面接対話コーパスを用いた面接スキルと面接者の自信度の分析", 人工知能学会全国大会論文集, 2022, JSAI2022 巻, 第 36 回
- [8] <https://support.fove-inc.com/the-fove-eye-tracker-every-field-explained-jp.html>

## 謝辞

本研究は科研費基盤研究 B(一般) JP23H0369, 挑戦的研究 (萌芽) JP22K19790, JST さきがけ JPMJPR20C9 の助成を受けて行われた。