



# 一対比較法を用いた蛇の回転錯視の補償パラメータチューニング

Parameter Tuning Method for Compensating Rotating Snakes Illusion Using Pairwise Comparison

久保田祐貴, 早川智彦, 深山理, 石川正俊

Yuki KUBOTA, Tomohiko HAYAKAWA, Osamu FUKAYAMA, Masatoshi ISHIKAWA

東京大学 情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, yuki\_kubota@ipc.i.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** 多くの錯視の見え方は人により異なるため, これらの錯視の映像補償を考える際には, 個々人に合わせたパラメータチューニングが必要となると考えられる. 本研究では, 適応的な心理物理学的測定手法である PEST 法を拡張し, 一対比較法における提示パラメータの組を適応的に変化させることによって個々人に合わせた最適な補償パラメータを求める手法である区間縮小型 PEST 法 (DI-PEST 法) を提案する. 蛇の回転錯視を用いた被験者実験により, DI-PEST 法を用いた適切なパラメータ設定による映像補償が蛇の回転錯視の錯視効果を減退させる傾向があることを示した.

**キーワード:** 心理計測, 蛇の回転錯視, 一対比較法, 心理物理パラメータチューニング

## 1. はじめに

脳による視覚情報の補正処理が顕在化した錯視現象は, 人間の形・色・動きなど多様な知覚・認知機能の解明の糸口として古くから注目されてきた. 例えば, 赤・白・青の3色の斜線からなる床屋のポール (バーバーポール) (図 1a) は, 横方向のみの回転運動に対して縦方向への並行移動が知覚される [1]. また, 蛇の回転錯視 [2] と呼ばれる錯視 (図 1b) は, 白黒の静止画のパターンに動きが知覚され, 長時間の観察により映像酔いに近い症状を引き起こす [3, 4]. そのため, 本来の物理的な視覚情報パターンとの齟齬をなくすことは, これら錯視によって生じる映像酔いや認知の歪みの低減ができ, 新たな知覚体験を創出することにもつながると考えられ, 蛇の回転錯視については, Murakami, Kubota によりその補償が試みられてきた [5, 6].

しかし, 錯視現象の多くは個々人で知覚特性が異なるため, 各々の知覚特性を迅速に測定する必要がある. 心理物理学では, 被験者の回答に応じて提示パラメータを適応的に変化させる適応的心理物理学的測定法として PEST 法や QUEST 法が存在する [7, 8]. これらの手法は, 被験者の回答に応じて刺激強度を適応的に変更することで閾値となる刺激強度を決定する測定法であり, 測定したい閾値付近のデータを用いて心理物理関数の決定を行うことができる. しかし, この場合に得られるパラメータは, 刺激に対する反応が最も低い/高い値 (最適値) ではなく, 刺激が弁別できるかできないかの境界値 (閾値) である. そのため, 錯視映像の補償を個々人にチューニングし最適値である補償パラメータを求めるためには, これらの手法の改良が必要となる.

本研究では, ノンパラメトリックな閾値測定法である PEST 法を参考に, 一対比較で提示する画像のパラメータを適応的に変更することによって最適なパラメータを求める区間縮

小型 PEST 法 (Diminishing Intervals PEST 法: DI-PEST 法) を提案する. その上で, 二肢強制選択試験 (2AFC-test) を用いて蛇の回転錯視を提示する被験者実験を行い, その有効性を検証した.

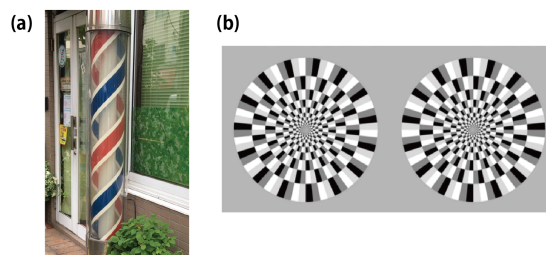


図 1: (a) バーバーポール錯視, (b) 蛇の回転錯視

## 2. 区間縮小型 PEST 法 (DI-PEST 法)

### 2.1 DI-PEST 法のアルゴリズム

DI-PEST 法は, 二組一対の画像を提示する一対比較法による検証の際に適応的にパラメータを変化させ測定を行う手法である. 本節では, 元となる PEST (Parameter Estimation by Sequential Testing) 法のアルゴリズムについて概説したのち, 本研究で考案した DI-PEST 法について述べる.

PEST 法は, PEST ルールと呼ばれるヒューリスティックな規則に基づき, 被験者の回答に応じて刺激強度を変更することによって閾値における刺激強度を決定する測定法である. 初めの刺激強度を  $I_0$  に対して, 正しい反応 (正反応) が得られた場合, 刺激強度を  $d_0$  だけ低下させる. 逆に, 誤った反応 (誤反応) が得られた場合, 刺激強度を  $d_0$  だけ増加させる. さらに, 連続して反応が得られた回数に応じ

て刺激強度の変化  $d_0$  を増加させるとともに、反応が反転するごとに  $d_0$  を半分にしていく。反転した回数がある一定以上を超えた場合に実験を終了とし、終了前の一定回数の平均を閾値における刺激強度とする。PEST 法を適用した際の刺激強度変化の模式図を図 2 に示す。

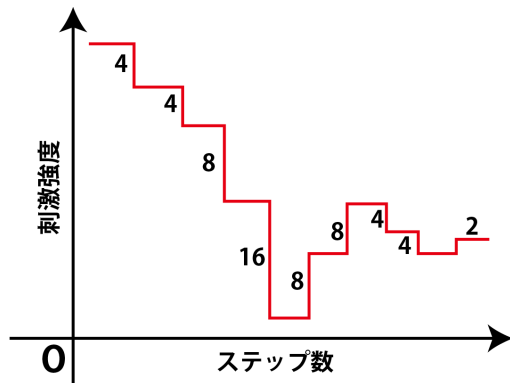


図 2: PEST 法を適用した際の刺激強度変化の模式図

DI-PEST 法では、刺激強度を一つに定めず幅をもたせた上で、被験者の回答に応じてその提示幅を適応的に変化させることで、最適な補償パラメータを求める手法である。アルゴリズムは以下の通りである。

初期値として、刺激強度の組  $[I_0^+, I_0^-]$  ( $I_0^- < I_0^+$ ) と縮小率  $r$  ( $0 < r < 1$ ) を与える。  $n$  回目の反復では  $[I_n^+, I_n^-]$  を提示し、被験者の回答に応じて下記のように値を変化させる。

- 1) 被験者が  $I_n^+$  を選択したとき 区間幅を  $d = I_n^+ - I_n^-$  としたとき、  $I_n^-$  を  $d_n \cdot r$  だけ増加させる (図 3a)。ただし、連続して  $I_n^+$  がその時点までに  $N$  回選択されているとき、  $I_n^+$  を  $d \cdot r^2 N$  だけ増加させる (図 3b)。

- 2) 被験者が  $I_n^-$  を選択したとき  $I_n^+$  を  $d \cdot r$  だけ減少させる。ただし、連続して  $I_n^-$  がその時点までに  $N$  回選択されているとき、  $I_n^-$  を  $d \cdot r^2 N$  だけ減少させる。

- 3) 終了条件 区間幅  $d$  がある一定値  $\epsilon_0$  を下回ったとき、実験を停止し、その時点での  $[I_n^+, I_n^-]$  の中点  $I_f = \frac{I_n^+ + I_n^-}{2}$  を最適パラメータとする。

以上のアルゴリズムを適用した際の刺激強度変化の例を図 3 に示す。

## 2.2 蛇の回転錯視の補償アルゴリズム

本節では、本研究の被験者実験で用いた蛇の回転錯視への補償アルゴリズムについて説明する。蛇の回転錯視 (Rotating Snakes Illusion: RSI)[2] は、白黒 4 色のパターンを円盤状に配置することによって生じる運動錯視の一種であり、先行研究により次のような仮説が提案されている。

- 1) リフレッシュ後の順応時間の違い 瞬きやサッカドなど、眼球の大きな運動に伴って抑制が生じた後、高輝度部分と低輝度部分の順応時間が違うことによって生じる [9]。
- 2) 眼球の微小運動による網膜の更新 眼球は固視微動やマイクロサッカドによって常に微小な運動をしているため、その網膜像が更新されることによって運動が知覚される [5]。

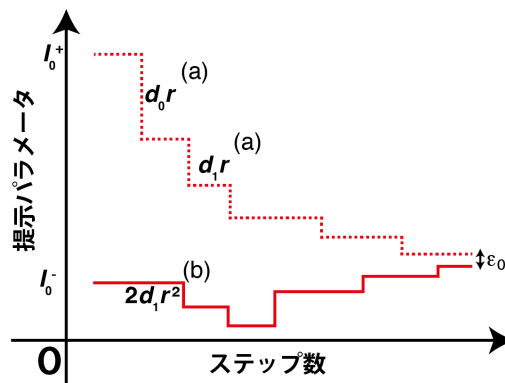


図 3: DI-PEST 法 (提案法) を適用した際の提示パラメータ変化の模式図

これをもとに、本研究では、[6] に倣ったアルゴリズムを用いて視線情報に基づき動的に蛇の回転錯視の補償を行った。まず、アイトラッカーによって視線位置  $p_{\text{now}}(X, Y)$  を計測し、一フレーム手前の視線位置  $p_{\text{prev}}(X, Y)$  との差から、眼球運動の大きさ  $\Delta d$  を求めた。これが、ある一定の値  $\Delta d_{\text{th}}$  を超えた場合、「サッカドの発生」とした。また、視線位置  $p_{\text{now}}(X, Y)$  が計測できなくなった時を、「瞬きの発生」とした。このいずれかが生じた場合に補償を行う場所を決定した。表示されている各蛇の中心座標  $r_{\text{in}}$  と視線位置の距離がある一定の値  $r(\text{RSI})_{\text{th}}$  以上であるときを「周辺視野に入っている」として、周辺視野の蛇の錯視のみを一定角速度の回転により補償した。

## 3. 被験者実験の条件と手順

DI-PEST 法のアルゴリズムとこれを用いた蛇の回転錯視の補償パラメータチューニングが有効に働くかどうかを検証するため、一対比較の二肢強制選択法 (2AFC-test) による被験者実験を行なった。蛇の回転錯視を縦 3 行横 2 列に並べた 6 つを 1 組として左右 2 組を提示し、両方 (実験 1) または片方 (実験 2) を 2.2 節に示したアルゴリズムに従って回転させた。被験者はこの画像対を 5 秒から 10 秒程度の間観察し、キーボードを用いて左右どちらがより動いて見えるかを回答した。実験は、時計回り (clockwise: CW)・反時計回り (counterclockwise: CCW) に知覚されるパターンそれぞれについて、以下の 2 段階を順に各 2 回行なった。なお、先行研究 [9, 3] と予備実験から、サッカドの距離の閾値  $\Delta d_{\text{th}}$  を 10.5 deg./fr. , サッカドの継続時間の閾値  $\Delta t_{\text{th}}$  を 300 ms とし、周辺視の閾値  $r(\text{RSI})_{\text{th}}$  を 8 deg. とし、いずれも一定値とした。

1) **Calibration Phase** DI-PEST 法を用いて一対比較で提示する画像対それぞれの補償角速度を設定した。初期値は  $[I_0^+, I_0^-] = [2.5 \text{ deg./s}, -2.5 \text{ deg./s}]$  とし、縮小率は  $r = 0.1$ 、終了条件は  $\epsilon_0 = 0.02 \cdot d_0$ ,  $d_0 = I_0^+ - I_0^-$  とした。被験者の「より動いて見えた」という回答に応じて 2.1 節に示したアルゴリズムに従って  $[I_n^+, I_n^-]$  を更新し、最適な補償パラメータのチューニングを行なった。

2) **Test Phase** 片方を 1) で求めた補償パラメータにより回転させ、もう一方を静止画として提示し、左右どちらがより動いて見えるかについて被験者に回答を求めた。提示場所は左右をランダムに設定し、統制条件として両方静止画の場合を実験中ランダムに挿入した。各条件 30 回、統制条件を各 10 回ずつ挿入して実験を行い、統制条件のデータは初めの 3 セット (30 回) について解析に用いた。被験者は 3 名 (20 代および 30 代女性) であり、実験は 30 分程度で終了した。

実験には、眼球運動を計測するために 90Hz で駆動するアイトラッカー (Tobii Eye Tracker 4C)、ラップトップ PC (ThinkPad T440p)、ディスプレイ (BENQ G2411HD 1920 x 1080) からなるシステムを用いた。

以上の実験の様子を図 4 に示す。本研究における実験は、東京大学大学院情報理工学系研究科研究倫理委員会により承認されている (審査番号: UT-IST-RE-181107-1)。

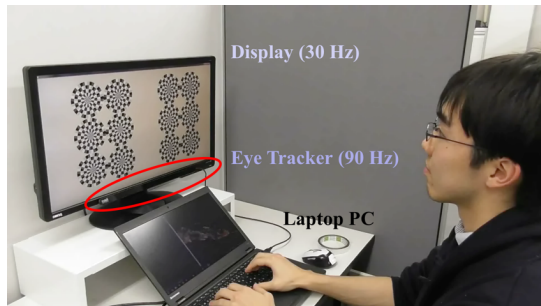


図 4: 実験の様子。実験にはアイトラッカー、ラップトップ PC、ディスプレイからなるシステムを用い、左右一対の画像のどちらが「より動いて見えるか」を被験者に選択させた。

#### 4. 結果と考察

3. 節で述べた実験 1 の結果を図 5 に示す。グラフは実験 1 のキャリブレーション過程における提示パラメータの変化を個々人ごとにプロットしたものである。横軸に反復回数、縦軸に CW 方向の回転を正として提示したパラメータ対の値を取り、実線が  $I_n^-$ 、破線が  $I_n^+$  の値の変化を示す。また、赤・橙線が CW の錯視画像を提示した場合の結果であり、青・水線が CCW の錯視画像を提示した場合の結果である。各被験者とも CW に知覚される錯視において負 (CCW) の値、CCW に知覚される錯視において正の値 (CW) に収束しており、その値は被験者ごとに弁別閾と見られる範囲で一定になっていることがわかる。

この結果は視線情報を元に蛇の回転錯視の補償を行なった先行研究 [6] を再現し、視線を固定した状態での研究 [3, 5] にも矛盾しない。このことから、各反復における被験者の選択誤りや詳細な選択に依らず、共通した傾向を持つ心理物理パラメータを得ることができたと言える。

次に、3. 節で述べた実験 2 の結果を図 6 に示す。横軸が提示条件、縦軸が静止画との二肢強制選択において被験者が

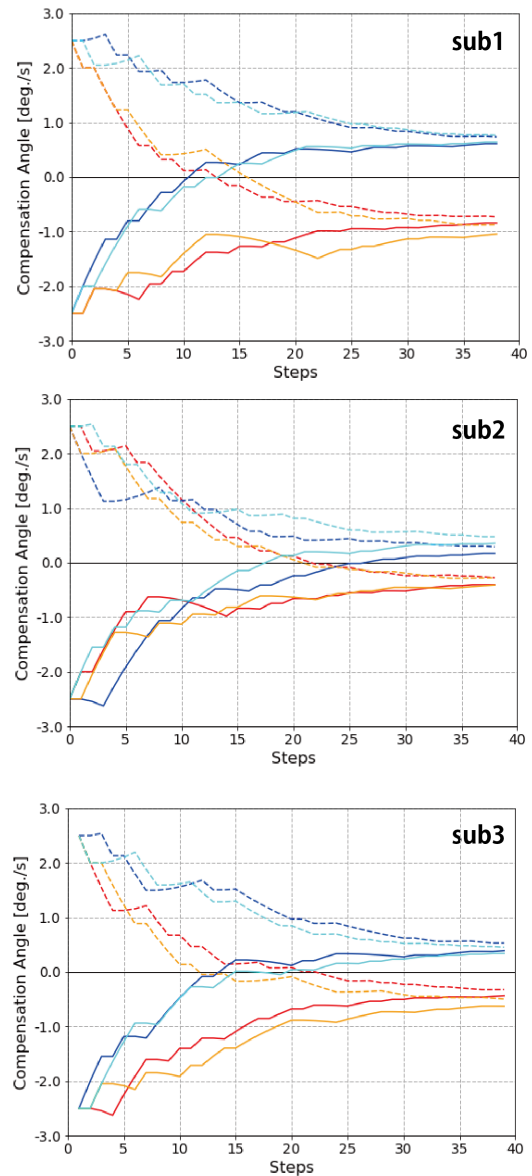


図 5: 実験 1 (Calibration Phase) の結果。横軸に反復回数、縦軸に各反復において提示したパラメータ対の値 (時計回り方向の回転を正とする) を示す。実線は  $I_n^-$ 、破線は  $I_n^+$  の値であり、赤・橙線が CW の錯視画像を提示した場合であり、青・水線が CCW の錯視画像を提示した場合の結果を示す。

「より動いている」と選択した割合を示す。選択率は被験者ごとにばらついており、全体として有意な差は見られなかった。特に被験者 2, 3 の一部の試行についてはランダムに選択した場合の 0.5 を超えた値が出ていたことが見て取れる。

この原因として、被験者 2, 3 は被験者 1 と比べて得られた補償パラメータの値が小さく、実験 2 における静止映像と補償映像の差が少なかったために、被験者が細部の変化に敏感になり十分な補償効果が得られなかったことが考えられる。さらに、チューニングアルゴリズムにおけるハイパーパラメータの決定がアドホックであることや、シン



グルパラメータのチューニングのみでは上手く機能しないことも原因として考えられる。

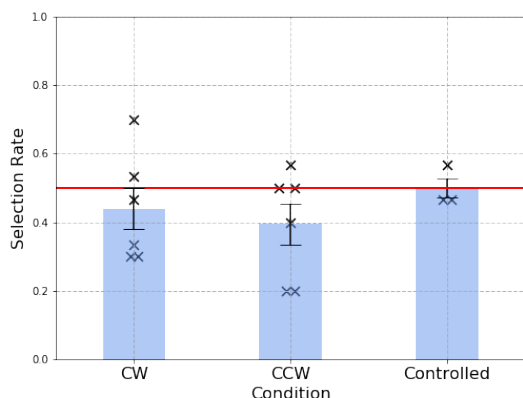


図 6: 実験 2 (Test Phase) の結果。横軸が提示条件 (各 30 回)、縦軸が静止画との二肢強制選択において「より動いている」と選択した割合を示す。誤差棒は標準誤差を示し、各条件における被験者の選択率をプロットしている。

以上の結果から、個々人ごとに適応的に補償パラメータをキャリブレーションする DI-PEST 法は蛇の回転錯視の補償パラメータチューニングに有効に働き、錯視効果を低減する傾向があることがわかった。一方で、個々人ごとの結果を見てみると、特定の被験者の一部の試行では選択率が減少しないケースも見られた。

本研究では補償角度のみを周辺視領域において一様に変化させるという戦略を取ったが、蛇の回転錯視は視野中心からの偏角によって錯視量が非一様に変化し、また時間的にも非一様に変化することが知られている。また、補償角度以外のパラメータにも依存すると考えられ、これらのパラメータも合わせて最適化し、決定するアルゴリズムの考案が必要になると考えられる。

## 5. 結論と今後の課題

本研究では、ノンパラメトリックな閾値測定法である PEST 法を参考に、一対比較を利用して最適パラメータを求める区間縮小型 PEST 法 (DI-PEST 法) を提案し、蛇の回転錯視の補償パラメータのチューニングを行なった。等比級数的に収束し、被験者のエラーを加味した補正をかける提案アルゴリズムは、被験者ごとに補償パラメータを決定し、補償を有効に働かせることがわかった。

今後は、確率・統計論に根ざした QUEST 法などの手法を取り入れていくこと、マルチパラメータのチューニングに対応することに取り組んでいく。また、本手法を他の心理物理実験に応用することで新たな見地から心理物理パラメータを得ることが可能となるかの検討も行なっていく。

## 参考文献

- [1] Li-Ting Huang, Alice MK Wong, Carl PC Chen, Wei-Han Chang, Ju-Wen Cheng, Yu-Ru Lin, and Yu-Cheng Pei. Global motion percept mediated through integration of barber poles presented in bilateral visual hemifields. *PloS one*, Vol. 8, No. 8, p. e74032, 2013.
- [2] Akiyoshi Kitaoka and Hiroshi Ashida. Phenomenal characteristics of the peripheral drift illusion. *Vision*, Vol. 15, No. 4, pp. 261–262, 2003.
- [3] Rumi Hisakata and Ikuya Murakami. The effects of eccentricity and retinal illuminance on the illusory motion seen in a stationary luminance gradient. *Vision Research*, Vol. 48, No. 19, pp. 1940–1948, 2008.
- [4] Katsunari Shibata and Shunsuke Kurizaki. Emergence of color constancy illusion through reinforcement learning with a neural network. In *2012 IEEE International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics (ICDL)*, pp. 1–6. IEEE, 2012.
- [5] Ikuya Murakami, Akiyoshi Kitaoka, and Hiroshi Ashida. A positive correlation between fixation instability and the strength of illusory motion in a static display. *Vision research*, Vol. 46, No. 15, pp. 2421–2431, 2006.
- [6] 久保田祐貴, 早川智彦, 石川正俊. 眼球運動に同期した運動錯視画像の補償提示と評価. 電子情報通信学会技術研究報告, 第 118 巻, pp. 29–31. 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会, 2019.
- [7] MiM Taylor and C Douglas Creelman. Pest: Efficient estimates on probability functions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 41, No. 4A, pp. 782–787, 1967.
- [8] 原澤賢充. 適応的心理物理学的測定法による閾値の推定. *Vision*, Vol. 15, No. 3, pp. 189–195, 2003.
- [9] Benjamin T Backus and Ipek Oruç. Illusory motion from change over time in the response to contrast and luminance. *Journal of vision*, Vol. 5, No. 11, p. 10, 2005.