



視野反転研究における前後反転の導入による回転と並進の分離

山崎駿¹⁾, 横山喜大¹⁾, 原彰良¹⁾²⁾, 古川正紘¹⁾²⁾, 前田太郎¹⁾²⁾

1) 大阪大学大学院情報科学研究科 (〒 565-0871 吹田市山田丘 1-5, <https://www.ist.osaka-u.ac.jp/japanese/>)

2) 脳情報通信融合研究センター (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-4, <https://cinet.jp/japanese/>)

概要: 視覚運動協応学習の解明を目的とする逆さめがねを用いた視野の左右反転・上下反転の研究は、光学系の制約から前後反転条件が未実施でありかつ、反転条件における回転と並進の分離がなされてこなかった。そこで本研究では、左右・上下・前後の3軸の反転の組合せ全8条件を網羅することで、頭部の並進・回転の反転条件を独立に設定した実験統制法を確立させた。歩行タスク・頭部回転タスクいずれにおいても、全反転条件が無反転条件と所要時間が最小化する傾向が再現されたことから、実験統制法の妥当性が示された。

キーワード: 反転視、前後反転視野、視覚運動協応

1. はじめに

空間知覚を伴う感覚運動協応の理解のため、変換視が多用される。変換視は、網膜に入る光路を光学素子などを用いて、外界座標に基づく客観的定位と網膜座標に基づく主観的定位との間に矛盾を生じさせる手法を指す。変換視研究では、変換視中の主観・客観座標関係の再順応過程を観察することで、空間表象様式が明らかにされてきた。

変換視研究の中で最も代表的な手法の一つが、反転視である。従来の反転視研究では、「左右反転」「上下反転」「上下左右反転」の3種が「逆さめがね」と呼ばれる光学装置によって実現されてきた。これらの装置は、鏡やプリズムを用いて反転効果を実現する。これら3種の反転は、上下軸・左右軸といった視野を構成する軸の反転を伴う点が特徴的である。

しかしながら、左右軸・上下軸の両者に直交する前後軸に関する反転も理論的には定義可能であるにも関わらず、実験はほとんど行われていない。なぜなら、従来の光学装置は頭部が障害物となり物理的に実装することが不可能なためである。それゆえ、既知の反転条件も含め数理的な整理が十分とはいえず、視覚運動協応の理解に重要な反転条件としての並進と回転が分離されてこなかった。

そこで本研究では、まず左右・上下・前後の3軸の反転の組合せ全8条件を網羅することで、頭部の並進・回転の反転条件を独立に設定した実験統制法を提案する。さらに、本統制法に基づき設計されたタスク実験を実施することで、視野反転研究における網羅性のある実験統制法の有用性を検証することを目的とする。

2. 全反転条件の網羅と並進回転の分離

左右軸・上下軸の両者に直交する前後軸に関する反転を理論的に定義することで、全ての反転条件を網羅し、表として整理したものが表1である。視野内で観察される運動は、頭部座標系における上下軸・左右軸・前後軸の3つの互

いに直交する軸に従属であると考えることができる。正常視野を基準に、いずれの軸を反転させるかの組み合わせは、3軸それぞれに対し正転・反転の2通りあるため、合計で $2^3 = 8$ 通りとなる。反転自由度数は、並進3自由度と回転3自由度の計6自由度である。各軸における反転状態は「反転」しているか「正転」している(=反転していない)かのいずれかをとる。表では、正転している要素を黄色で、反転している要素を水色で示している。これら以外の組み合わせは数理的に存在しない。

左右反転・上下反転・前後反転を観察すると、ある軸の反転は、その軸方向の並進要素と、その軸以外の2軸周りの回転要素を同時に反転させることがわかる。この規則性が全条件において矛盾なく成立することが、この数理的な整理に肝要である。また、この規則から導かれる興味深い性質として、「3軸全てを並進反転させると、各軸に関する回転要素が2回ずつ反転され、結果的に元に戻る」という

| | 軸 | 通常 | 左右 | 上下 | 前後 | 上下前後 (-左右) | 左右前後 (-上下) | 上下左右 (-前後) | 全 (-通常) |
|----|-------|----|----|----|----|---------------|---------------|---------------|------------|
| 並進 | 前後 | 通常 | 反転 | 反転 | 反転 | 通常 | 通常 | 通常 | 反転 |
| | 左右 | 通常 | 反転 | 通常 | 通常 | 反転 | 通常 | 通常 | 反転 |
| | 上下 | 通常 | 通常 | 反転 | 通常 | 通常 | 反転 | 通常 | 反転 |
| 回転 | roll | 通常 | 通常 | 通常 | 反転 | 通常 | 通常 | 通常 | 反転 |
| | pitch | 通常 | 通常 | 通常 | 通常 | 反転 | 通常 | 通常 | 反転 |
| | yaw | 通常 | 通常 | 通常 | 通常 | 通常 | 反転 | 通常 | 反転 |

表1: 「並進」反転条件基準の反転条件一覧表

| | 軸 | 通常 | 全 | 左右 | 上下前後 | 上下 | 左右前後 | 前後 | 上下左右 |
|----|-------|----|----|----|------|----|------|----|------|
| 並進 | 前後 | 通常 | 反転 | 反転 | 反転 | 通常 | 通常 | 通常 | 反転 |
| | 左右 | 通常 | 反転 | 通常 | 通常 | 反転 | 通常 | 通常 | 反転 |
| | 上下 | 通常 | 通常 | 反転 | 通常 | 通常 | 反転 | 通常 | 反転 |
| 回転 | roll | 通常 | 通常 | 通常 | 反転 | 通常 | 通常 | 通常 | 反転 |
| | pitch | 通常 | 通常 | 通常 | 通常 | 反転 | 通常 | 通常 | 反転 |
| | yaw | 通常 | 通常 | 通常 | 通常 | 通常 | 反転 | 通常 | 反転 |

表2: 「回転」反転条件基準の反転条件一覧表

数理的必然性がある。つまり、通常視野を基準に並進 3 軸すべてを反転させた全反転条件は、回転に関してのみ言えば通常視野と等価となる。前後軸の反転を導入しない限り、この回転の等価性が現れない。この性質に基づいて表の列を並び替えると、表 2 を得る。この表は、頭部回転運動にも着目した条件統制を可能とするだけでなく、反転条件を包括的に横断した対比実験の実験設計に利用できる。

2.1 従来研究の再解釈

数々の従来研究（例えば [1], [2], [3], [4] など）において、上下反転と左右反転を比較した際に左右反転の方が難しいという旨が述べられている。その理由として吉村 [5] は、左右反転視野は現実との対応関係が強く誤った視覚情報に導かれやすい一方、上下反転視野は天地逆転などにより現実との対応関係が弱く非視覚情報をより頼りにするようになるためだと述べた。

この事実を表 2 を基に再解釈する。上下反転と左右反転は、roll 回転の反転を伴う点で共通である。それ以外では、上下反転は上下方向のオプティカルフローを伴う上下並進・pitch 回転がともに反転し、左右反転は左右方向のオプティカルフローを伴う左右並進・yaw 回転がともに反転する。両者共通して、反転させる軸方向のオプティカルフローを伴う並進・回転の組がともに反転しており、対称的であることが読み取れる。これは、従来研究で見られた上記 2 条件の難易度の差を直接は説明しない。我々が主に水平面上で運動し鉛直方向の運動をほとんど行わないため、水平方向のオプティカルフローの反転への順応の重要度がより高いことが根本的な理由であるように考えられる。この分析も、表 2 に基づく整理がなければ不可能である。

3. 実験方法

3.1 歩行タスク実験

3.1.1 タスク概要

被験者には、VR 空間内に実装した反転視野下において、2 つの半透明な赤い円柱の間を一方の円柱の方を向いたまま往復してもらう。円柱間には赤および黄色で色づいた幅 20cm の直線が引かれており、被験者はこの直線上を歩くことになる。往路と復路の折り返し（向いている方向は変わらないが）の目安として、歩行経路（7m）の端まで進むと HMD から音が鳴るようになっていく。一方の円柱の方を向いたまま往復するため、必然的に行きか帰りの一方は前歩きに、他方は後ろ歩きになる。この設定は、前後軸が反転した場合に後ろ歩きを行うことを好むことが想定されるが、その場合でも実験全体を通して統制をとるという目的がある。最大 10 往復（10 試行）行うと終了する。

3.1.2 実験環境

図 1 に示された 4m × 9m の点対称な部屋を VR 空間内に Unity 2021.3.24f1 を用いて作成する。実験開始時の視座は VR 空間上では部屋の中央（直線の中央でもある）に位置し、視野はどの反転条件においても常に同一となる設計になっている。また、実空間における実験開始時の位置

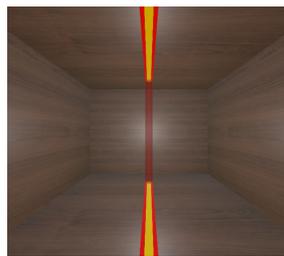


図 1: 歩行タスク

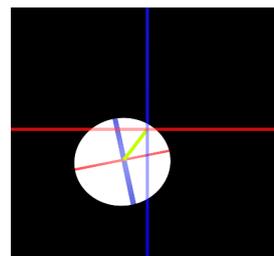


図 2: 回転タスク

及び姿勢も統一することで、被験者は自己の頭部並進運動および回転運動に伴うオプティカルフロー以外を起因とした、被験者自身の知覚・応答への影響を受けない。VR 空間において被験者の視界を映すカメラと HMD (Meta Quest 2) の運動は並進運動・回転運動の両方が同期される。

3.1.3 被験者

4 名の被験者 Y, S, H, M で実験を行う。被験者 S は過去に簡易的な反転視実験を行ったことがあるが、それ以外の被験者は今回ほぼ初めて反転視実験を体験するナイーブな被験者である。この 4 名の内、被験者 H, M は酔いにより結果として十分なデータが得られなかったため、以後は Y, S に関する情報のみを記す。

3.1.4 実験条件

8 つの反転条件（うち 1 つは無反転であり、ベースラインとなる）すべてで行う。実施順はベースラインとして無反転条件を最初に行うことを除き、被験者ごとに異なる。

- 被験者 Y: 通常→上下→上下前後→前後→上下→左右前後→上下左右→全
- 被験者 S: 通常→左右前後→左右→全→前後→上下前後→上下→上下左右

3.1.5 実験手順

被験者には実験前に、体調不良時には自由に実験を中断・中止できる旨を伝える。被験者は決められた位置に決められた向きで立ち、HMD を装着する。まずベースラインとして無反転条件でタスクを行い、その後被験者ごとに異なる順序で残り 7 つの反転条件でタスクを実施する。各条件の開始前には正面を合わせたのち（正面を合わせるためのターゲットを正面に提示しておく）視野を暗転し、その間に実験者が反転条件を切り替え、合図とともに暗転を解除し実験を開始する。実験中は、被験者が経路の端から端まで歩行するのにかかる時間、および HMD の位置・姿勢のトラッキングデータを記録する。条件間には被験者の酔い状況に応じた、最低でも 5 分以上の休憩をとり、脱順応および酔いの解消を図る。このインターバル中、被験者には開眼のまま実空間で自由に行動してもらう。

3.2 回転タスク実験

3.2.1 タスク概要

本実験では、回転に関する支配的なタスクを設定する。被験者の周囲の VR 空間上に、ある方位にターゲットを提示する。被験者の周囲には VR 空間上である方位にターゲッ

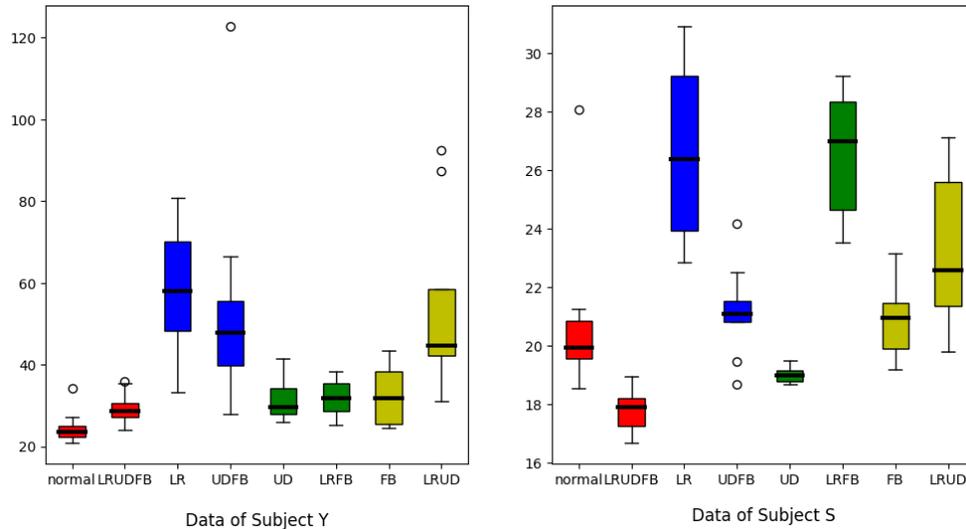


図 3: 歩行タスクにおける各試行毎の所要時間 [s]

トが提示される。ターゲットは被験者の方を正面に向いており、十字の模様が記されている。被験者の視野には、視野端まで広がる十字が追従し、その交点は視野中央（視軸上）に位置する。視野中央からターゲットへの方位手掛かりとして、常に2つの十字の中心間を線分で結ぶ。被験者は、視野に固定された十字をターゲットの十字に重ねることを要求される。これを1試行とする。ここでの「重ねる」の基準は、十字の中心の方位ずれが 3° 以下かつ十字の傾きの角度のずれが 3° 以下の状態を0.2秒以上継続することである。重なると、0.3秒間ターゲットが消失した後、視野内の別の位置に再提示され、次の試行が開始される。この視野内における提示位置（網膜座標系であり、世界座標系ではない）はあらかじめ定められた系列に従っており、この系列は全条件間で共通である。40試行行くと終了とする。

3.2.2 実験環境

図2に示す本タスクの実験環境はUnity 2021.3.24f1を用いてVR空間内に作成する。被験者にはタスクに関わるターゲット・十字・線分以外は提示されない。背景は黒に統制されている。VR空間において被験者の視界を映すカメラとHMD (Meta社製Oculus Quest 2)の運動は、回転運動のみ同期され、並進運動は同期されず無視される。

3.2.3 被験者

3名の被験者I, F, Tで実験を行う。全員が今回ほぼ初めて反転視実験を体験するナイーブな被験者である。

3.2.4 実験条件

8つの反転条件（うち1つは無反転であり、評価基準となる）すべてで行う。実施順は評価基準として無反転条件を最初に行うことを除き、被験者ごとに異なる。

- 被験者 I: 上下反転→前後反転→左右反転→全反転→左右前後反転→上下左右反転→上下前後反転
- 被験者 F: Iの逆順
- 被験者 T: 上下反転→左右反転→前後反転→全反転→左右前後反転→上下前後反転→上下左右反転

3.2.5 実験手順

被験者には実験前に、体調不良時には自由に実験を中断・中止できる旨を伝える。被験者は胸当てに上体を押し付けた上体の運動を固定した状態で椅子に座り、HMDを装着する。実験開始前に、タスクの説明と各反転状態で各2回の練習を通じてタスク内容を事前に被験者に体験させた。

まずベースラインとして無反転条件でタスクを行い、その後被験者ごとに異なる順序で残り7つの反転条件でタスクを実施する。各条件の開始前には正面を合わせるためのターゲットを正面に提示した上で正面を合わせた後、被験者に目を閉じてもらい、その間に実験者が反転条件を切り替える。合図と共に被験者は開眼し、実験を開始する。実験中、HMD内部で各試行の所用時間およびHMDの位置・姿勢を記録する。条件間には6分間のインターバルを設ける。ただし、被験者からの申請があればインターバルを延長可能である。このインターバル中、被験者には実空間に戻り開眼状態で自由に行動してもらう。

4. 結果

歩行タスク実験の結果を図3に、回転タスク実験の結果を図4にそれぞれ示す。これらは各被験者における、1試行当たりの所用時間[s]を箱ひげ図としてプロットしたものである。条件名を以後ボールド表記とすると、図において条件名は、normal（通常=ベースライン）、LRUDFB（全反転）、LR（左右反転）、UDFB（上下前後反転）、UD（上下反転）、LRFB（左右前後反転）、FB（前後反転）、LRUD（上下左右反転）として記されている。また、回転に関して等価な条件対は隣接し同じ色で塗られている。

図3を読み取ると、両被験者で全反転および上下反転は通常に対し中央値も分散も近いように見える。逆に左右反転および上下左右反転は両被験者で中央値および分散がともに大きくなっているようである。TurkeyのHSD検定を用いて平均値に有意差があるかを検定したところ、通常に対し、被験者Yでは左右反転・上下前後反転・上下左右反転で、

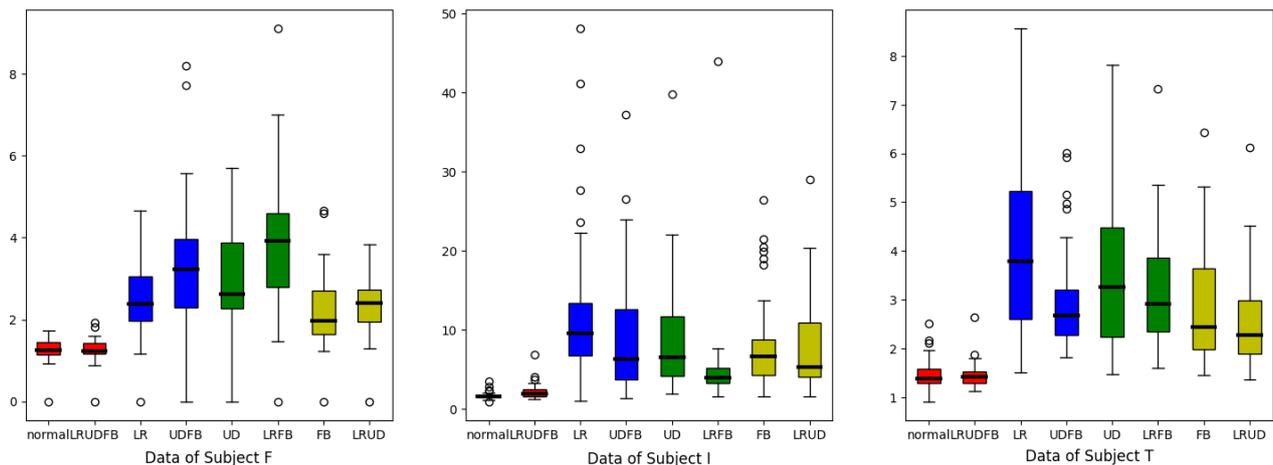


図 4: 回転タスクにおける各試行毎の所要時間 [s]

被験者 S では**左右反転・左右前後反転**で有意差 ($p < 0.01$) が見られた。

一方、図 4 を見ると、全被験者で**全反転が通常**に等価である点で共通性が認められ、図 3 と同じ傾向を示した。その一方、**上下反転は通常**と大きな差が見られた。Turkey の HSD 検定をかけたところ、**全反転**および被験者 I の**左右前後反転**を除き、すべての条件で**通常**と有意差が認められた ($p < 0.01$)。回転等価な対内では、いずれも後に実験を行った方の条件が短いという結果になった。

5. 考察

いずれの実験においても、**全反転条件は通常**と極めて近い結果を示した。これは**全反転**において、回転が無反転であるという**通常**との共通性によるものであると考えるのが妥当である。歩行タスクでは並進反転の影響を受けるはずであるが、回転反転条件が**通常**と一致すれば歩行タスク遂行に支障が生じていない点は特筆に値する。

歩行タスクでは**上下反転は通常**に類似した結果を示したが、回転タスクでは明確な差が生じた。これは、歩行タスクにおいては pitch への順応がタスクの遂行に不要であるが、回転タスクにおいては必要であることの差が表れていると考えられる。pitch への順応が不要である理由は、歩行タスク実験条件が 2 次元平面内の移動に制約されており、視覚刺激が上下対称性を有していたためと推察される。

また、**roll 反転**が等価な対内において、後に実験を行った方の条件において所要時間が短いという結果になった。これは反転条件に対する順応残効を示唆しており、roll 軸に顕著であった。

回転タスクの性質として、pitch と yaw は十字中心の 1 点一致が求められるのに対し、roll は十字端点の 4 点を合わせることが求められるという、回転軸間における難易度の異質性があった。この性質からは roll の反転の有無によっ

てタスク結果に差が生まれることが予想されるが、今回の実験ではその傾向は顕著には見られなかった。

6. おわりに

本研究では、左右・上下・前後の 3 軸の反転の組合せ全 8 条件を網羅することで、頭部の並進・回転の反転条件を独立に設定した実験統制法を確立させた。実験統制法の妥当性検証のため、頭部回転が支配的な頭部回転実験と、並進運動を含む歩行実験を実施し所用時間を計測した。その結果、両実験間で共通して無反転・全反転条件下での所用時間の最小化が認められた。一方で、並進と独立した回転の等価性に基づく結果が得られたことから、実験統制法の妥当性が示された。

謝辞 本研究は、コマツみらい建機協働研究所との共同研究の成果である。

参考文献

- [1] Ito et.al.: Rapid learning by walking observers wearing a reversing or inverting prism, Perception, Vol. 39, pp. 1354–1364, 2010.
- [2] Yoshimura et.al.: Effects of up–down reversed vision and left–right reversed vision on walking tasks, Psychologia, Vol. 26, pp. 159–166, 1983.
- [3] 吉村：3つの逆さメガネ 変換された見えの世界への冒険 [改訂版], ナカニシヤ出版, 1997.
- [4] 佐々木, 他: 視野変換 3 事態における移動方略とその変換過程 - 上下反転, 左右反転, 上下反転 + 90degree 左回転-, 弘前学院大学文学部紀要, 第 54 号, 2018.
- [5] Yoshimura: A historical review of long-term visual-transposition research in Japan, Psychological Research, Vol. 59, pp. 16–32, 1996