

# 無限運動錯視の重畳が物体の運動の知覚に与える影響の評価

新井 好明<sup>1,a)</sup> 奥 寛雅<sup>1,b)</sup>

**概要：**移動体に対して無限運動錯視を誘起する映像を追従しながら重畳させた場合、移動体の移動方向と運動錯視の運動方向とが相互に作用すると予想され観察者にどのように知覚されるのかは不明である。本稿では、被験者実験から観察者の知覚を明らかにすることを目的とし、被験者実験を実現するために開発した無限運動錯視をダイナミックプロジェクションマッピングする手法および実験システム系の試作内容、さらに被験者実験を実施した結果について報告する。

## 1. はじめに

実際には物理的運動が存在しないにもかかわらず、特定の画像系列を連続的に提示することで観察する人間には物体が運動して見える現象は仮現運動と呼ばれる。例えば、物体を適当な間隔で移動した静止画像を連続的に表示することで生じる代表的な仮現運動にはベータ運動があり、映画やアニメーションの原理となっている。特に、提示するパターンを工夫すると、提示するパターンの位置は同一にも関わらず、同一の方向の運動を人間に知覚させることができる。これは無限運動錯視などと呼ばれ、近年では個人が作成した無限運動錯視のアニメーションがエックス(旧：ツイッター)や動画共有サイトなどを通じて度々話題になっている。また、無限運動錯視は単純なパターンを繰り返すだけで人間に運動を知覚させることができるため、VR/AR/MRなどに応用できる可能性もある。

無限運動錯視では、提示しているパターン自体の位置は空間的に固定されているのに対し、それを人間が目で見ることによって運動を知覚するものである。しかし、無限運動錯視が移動する場合、移動方向と運動錯視の運動方向とが相互に作用すると予想され観察者にどのように知覚されるのかは不明である。例えば錯視の進行方向とは反対向きの無限運動錯視を重畳させた場合に、錯視が動いている実際の速度より遅く動いているように見えたり、逆に進行方向と同じ向きの無限運動錯視を重畳させた場合に、物体の実際の速度よりかなり速く動いているように見えるなどの可能性がある。

我々はこの疑問を解明するため、実験的に検証するための実験系を構築している。これまで知覚計測のために構築



図 1 提示パターン系列の例

した実験系の原理と試作した実験系を用いて、被験者実験を実施した結果について報告する。

## 2. 運動錯視

運動錯視は心理学の分野で盛んに研究され、上述したベータ運動の他に様々な現象が知られている。無限運動錯視の生成原理に関係が深い現象としてファイ現象やリバースファイ現象がある。

ファイ現象では刺激となるパターン自体は動いていないように見えるが、代わりに、拡散した無定形の影のような物が刺激の前を高速に移動して一時的に刺激のパターンを遮るように見える [1]。

リバースファイでは、最初に提示するパターンに対し、その明暗を逆転させたネガティブなパターンを少しだけ位置をずらして提示するものである [2]。この場合、位置をずらした方向と逆の方向の運動を人間は知覚する。

基本的なリバースファイはポジティブとネガティブの2パターンでの提示だが、提示するパターン系列を増やすなどの工夫をすると、提示するパターンの位置は同一にも関わらず、同一の方向の継続的な運動を人間に知覚させることができる [3]。図 1 に単純な提示パターン系列の例を示す。このパターン系列を順に提示すると一方向に運動する知覚が得られる。左から右の順に提示すると右方向に運動する知覚を得られ、逆に右から順に提示すると左方向に運動する知覚を得られる。

<sup>1</sup> 群馬大学大学院理工学府

<sup>a)</sup> t221d003@gunma-u.ac.jp

<sup>b)</sup> h.oku@gunma-u.ac.jp

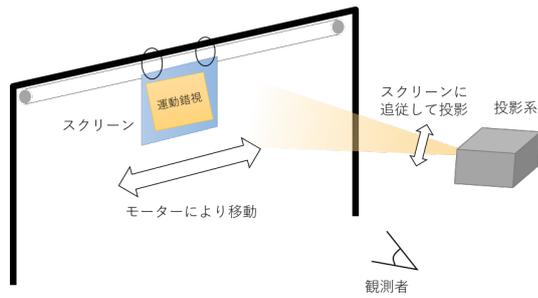


図 2 実験系の概要

### 3. 無限運動錯視の運動を実現する手法

無限運動錯視自体が移動している状態を人間に提示するためには、(1) 無限運動錯視を提示しているディスプレイや投影像上で運動錯視の提示位置を変更する、(2) 無限運動錯視を提示しているディスプレイ自体を物理的に移動させる、(3) 投影を利用して投影像を光学的に移動させる、などの方法が考えられる。(1) のようにディスプレイや投影像上での表示位置の変更でアニメーションの運動を表現する場合、実際には画素数単位の離散的な移動しかできないため、この制約が人間の眼の知覚に影響を与える可能性が排除できないという問題が予期された。これを避ける一つのやり方は(2)のようにディスプレイ自体の物理的な位置を移動させる手法になるが、この場合、無限運動錯視の周囲にあるディスプレイの枠の運動も視野に入り、無限運動錯視自体の運動の知覚にディスプレイ枠の運動の知覚が影響を与える可能性が懸念された。そこで、今回は(3)のプロジェクターの投影像を光学的に移動させる方法を選択した。

これまで我々の研究室では運動する対象に光学的に追従するプロジェクションマッピング技術を研究・開発してきており、この技術を利用して移動するスクリーンに追従して無限運動錯視を投影することとした。図 2 にその概要を示す。

### 4. 開発した実験システム

以上の原理に基づき、無限運動錯視の運動を提示する実験システム系の試作を行ってきている [4]。試作した実験システム系は研究室で開発された広範囲を光学的に追従可能な映像投影システムである 180 Projector [5], [6] により、移動するスクリーンに無限運動錯視をプロジェクションマッピングしている。スクリーンには再帰性反射材製の ArUco マーカー [7], [8] を付与し、スクリーン位置と姿勢を検出している。180 Projector は追従対象を画像処理により検出しており、再帰性反射材製の ArUco マーカーを検出し、検出した位置・姿勢にあわせて無限運動錯視をホモグラフィ変換して投影することで、スクリーンの位置に

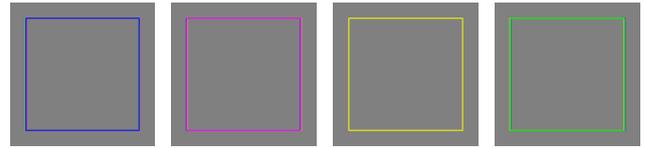


図 3 実験でを使用した提示パターン系列

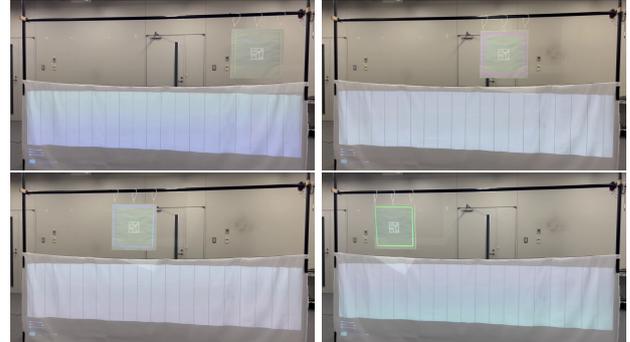


図 4 実験結果の連続写真

関わらず歪みなく無限運動錯視を投影できるようにした。実験ではスクリーンを一定速度で移動させる必要があるため、スクリーンは直線状のポールに沿って移動できるようにし、その移動は DC モーターで制御するようにした。無限運動錯視の投影が物体の移動速度に与える影響を調べるために観察者が知覚する速度を数値化する必要がある。無限運動錯視の投影とは別に速度計測用比較対象映像を行うようにした。縦縞パターンが左右に移動し続ける映像が投影され、その移動速度を観察者が制御できるようにした。観察者が知覚する速度を知覚速度と呼ぶことにする。

### 5. 実験システムの動作

ここでは実験システムの具体的な動作について紹介する [4]。180Projector から 2[m] の位置にスクリーン移動機構を配置した。観察者がマウスのホイールを操作できるように手にマウスを持ってもらい、スマートフォンから制御し移動スクリーンをスクリーン移動機構の右端から左端まで左移動させる。観察者がマウスホイールで速度計測用比較映像の加減速を行う。マウスホイールを回転させることで映像の 1 フレームあたりに動くピクセル数を 0.1[px] 単位で調整ができる。移動スクリーンの移動方向と同じ左方向の無限運動錯視の提示パターンを使い 10[fps] で順番に切り替える。図 3 に移動スクリーンに重畳する提示パターン系列を示す。このパターン系列は色を利用しており、左から右の順に提示すると四角のフレームが左方向に継続的に運動する知覚を得られる。動作の連続写真を図 4 に示す。

### 6. 被験者実験

実験系を用いて被験者実験を行った。知覚速度計測用比較対象映像を被験者が自身で調整し、合計 10 名の知覚速度のデータ収集を行った。6.1 節に実験結果、6.2 節に解析

表 1 実験結果

No.	$v_s$	$v_i$	$v_1$	$v_2$
1	1.5	0.7	2.1	1.3
2	1.6	0.5	1.0	0.8
3	1.6	0.7	2.3	1.0
4	1.3	0.2	0.9	0.6
5	1.7	0.7	1.7	1.7
6	1.6	2.9	1.4	1.6
7	1.7	5.0	2.4	2.2
8	1.7	0.4	1.8	1.5
9	1.4	5.0	5.0	4.1
10	1.4	1.1	1.6	1.4

結果を示す。

## 6.1 実験結果

被験者実験により収集された 4 種類の知覚速度のデータは、(1) スクリーンの移動の知覚速度  $v_s$ 、(2) 無限運動錯視の知覚速度  $v_i$ 、(3) 無限運動錯視が物理的移動と同方向に運動する状況での知覚速度  $v_1$ 、(4) 無限運動錯視が物理的移動と逆方向に運動する状況での知覚速度  $v_2$  である。ただし、スクリーンの物理的移動の移動速度は全て同じである。表 1 に実験結果の表を示す。

## 6.2 解析結果

実験結果から  $\Delta v = v_1 - v_2$  と置き、表 2 に  $(v_1, v_2)$  ペアの解析の表を示す。

母平均の検定を用いて解析を行った。今回、母平均が 0 であるかどうかを検定することとし、帰無仮説と対立仮説は、帰無仮説 ( $H_0$ ):  $\mu = 0$  (母平均は 0 である)、対立仮説 ( $H_1$ ):  $\mu \geq 0$  (母平均は 0 以上である) とした。有意水準  $\alpha = 0.05$  とし、棄却域  $R: |t_0| \geq 1.833$  (サンプル数  $n = 10$ , 自由度  $\phi = 9$ ) と設定する。検定統計量  $t_0$  の値を計算する。表 2  $\Delta v$  より、サンプル数  $n = 10$ , 標本平均  $\bar{x} = 0.4$ , 標本標準偏差  $s = 0.457$ , 検定統計量  $t_0 = 2.767$ . 検定統計量  $t_0$  は  $|t_0| = 2.767 \geq 1.833$  で棄却域  $R$  にあるため、帰無仮説 ( $H_0$ ) を棄却し、対立仮説 ( $H_1$ ) を採択する。したがって、この検定の結果から、統計的に有意な差があり、母平均は 0 以上であると言える。このことから、 $v_1$  のほうが  $v_2$  よりも速い知覚速度で運動しているように知覚することが言える。つまり、前者の場合と後者の場合を比較すると、前者の場合では後者の場合よりも速い運動を知覚し、後者は前者よりも遅い運動を知覚する。

また、 $(v_s, v_1)$  ペアおよび  $(v_s, v_2)$  ペアに対して同様の検定を行なった結果については有意差を得ることはできなかった。

その他、(i): 被験者 2/4/7/9 では  $v_1$  および  $v_2$  が物理的運動の知覚速度  $v_s$  よりも速い知覚速度もしくは遅い知覚速度を観測した (ii): 被験者 2/4/6 では  $v_1$  に示すように同

表 2  $(v_1, v_2)$  ペアの解析

No.	$v_1$	$v_2$	$\delta v$
1	2.1	1.3	0.8
2	1.0	0.8	0.2
3	2.3	1.0	1.3
4	0.9	0.6	0.3
5	1.7	1.7	0.0
6	1.4	1.6	(0.2)
7	2.4	2.2	0.2
8	1.8	1.5	0.3
9	5.0	4.1	0.9
10	1.6	1.4	0.2

方向の場合でも  $v_s$  よりも遅い知覚速度を観測した (iii): 被験者 5 では  $v_1$  および  $v_2$ ,  $v_s$  とが等しい知覚速度を観測し、無限運動錯視を重畳しても知覚速度に影響を及ぼしていない (iv): 被験者 6 では  $v_2$  よりも  $v_1$  で遅い知覚速度を観測した等の特徴を持つデータが得られた。

VR/AR/MR において単純なパターンを繰り返すだけで、知覚速度に個人差があるものの、移動体に無限運動錯視を重畳することで同方向では逆方向よりも速く、逆方向では同方向よりも遅い運動を観察者に知覚させることができることがわかった。

## 7. まとめ

移動体に対して無限運動錯視を誘起する映像を追従しながら重畳させた場合、移動体の移動方向と運動錯視の運動方向とが相互に作用すると予想され観察者にどのように知覚されるのかは不明である。本稿では、開発した実験システムを利用して被験者実験を行い、無限運動錯視の重畳が人間の運動知覚にどのような影響を与えるのかを計測した結果について報告した。無限運動錯視を重畳することで VR/AR/MR などにおいて観測者に異なる知覚速度を提示できる可能性がある。今後はより効果的な無限運動錯視のパターン系列の考察および追加の被験者実験を実施してみたい。

## 参考文献

- [1] Vebjørn Ekroll, Franz Faul, Jürgen Golz: *Classification of apparent motion percepts based on temporal factors*, Journal of Vision, Vol. 8, No. 4, 31, pp. 1–22 (2008).
- [2] Stuart M. Anstis, Brian J. Rogers: *Illusory reversal of visual depth and movement during changes of contrast*, Vision Research, Vol. 15, No. 8–9, pp. 957–961 (1975).
- [3] George Mather, Linda Murdoch: *Second-order processing of four-stroke apparent motion*, Vision Research, Vol. 39, No. 10, pp. 1795–1802 (1999).
- [4] 新井好明, 奥寛雅: 無限運動錯視を誘起する映像が運動する状況を提示する投影系の開発, 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会 VRSJ2022, 2E1-1 (2022).
- [5] 奥寛雅, 飯田和久: 3 枚の回転鏡による高速・広範囲視線制御機構の試作, 第 33 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 1H1-03 (2015).

- [6] 樋口詩乃, 奥寛雅: 3枚鏡方式の視線制御系による広範囲かつ高速な動的プロジェクションマッピング手法, 第24回一般社団法人情報処理学会シンポジウム インタラクション2021, pp. 668–672 (2021).
- [7] Francisco J.Romero-Ramirez, Rafael Muñoz-Salinas, Rafael Medina-Carnicer: *Speeded up detection of squared fiducial markers*, Image and Vision Computing, Vol. 76, pp. 38–47 (2018).
- [8] S.Garrido-Jurado, R.Muñoz Salinas, F.J.Madrid-Cuevas, R.Medina-Carnicer: *Generation of fiducial marker dictionaries using mixed integer linear programming*, Pattern Recognition, Vol. 51, pp. 481–491 (2016).