



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

新井好明¹⁾, 奥寛雅¹⁾

1) 群馬大学大学院理工学府 (〒 376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1, t221d003@gunma-u.ac.jp)

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。本発表では、この計測を実現するための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の開発および実験システム系の試作の内容について報告する。

キーワード: 視覚, プロジェクタ, 無限運動錯視, プロジェクションマッピング

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。本発表では、知覚計測のために構築した実験系の原理と試作した実験系について報告する。

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。



図 1: 提示パターン系列の例

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。

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近く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

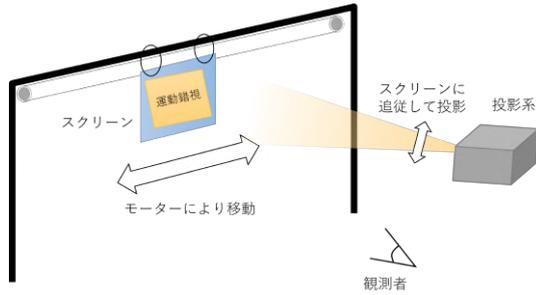


図 2: 実験系の概要

(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. 構築した実験系

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系を構築した。構築した実験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 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 マーカーを付与し、スクリーン位置と姿勢を検出している。検出した位置・姿勢にあわせて無限運動錯視を補正して投影することで、スクリーンの位置に関わらず歪みなく無限運動錯視が投影されるようにした。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。以下に各要素の詳細を述べる。

4.1 180 Projector[4][5]

180 Projector は、3 枚の回転鏡を含む光学系であるサッカドミラー 3[4] とプロジェクター、高速ビジョンを組み合わせることで、投影システムを中心に 180 度以上の広範囲で移動体を高速追従し映像を投影し続けることができるシステムである [5]。このシステムの写真を図 3 に、接続図を図 4 に示す。

4.2 スクリーン位置・姿勢検出

180 Projector は追従対象を画像処理により検出しており、本実験では位置検出を安定させ、またスクリーンの姿勢も検出するために再帰性反射材でできたマーカーを付与した。姿勢を検出するのは、実際に移動する物体に対して無限運動錯視を誘起する映像を投影すると、物体までの距離や角度によって提示された像が歪んでしまう問題が発生するからである。



図 3: 180Projector の写真 [5]

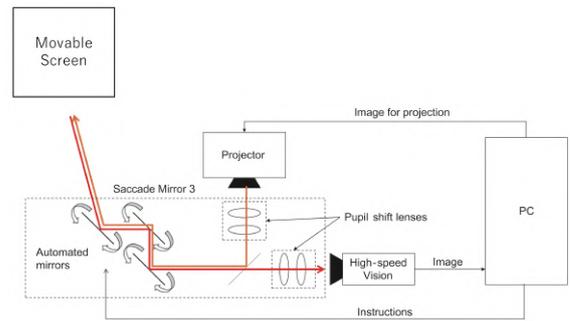


図 4: 180Projector のシステム接続図 [5]

マーカーは ArUco マーカー [6][7] を利用した。以下、単にマーカーと呼ぶ。このマーカーは白黒のパターンを内包する正方形で構成されており、この投影像の形状から位置・姿勢を推定するものである。図 5 にマーカーの一例を示す。本実験ではマーカーの位置から投影方向を制御し、またコーナーの 4 点の位置からホモグラフィを計算してリアルタイムに提示像に補正をかけるために使用する。

投影像の補正はホモグラフィ変換を利用した。ホモグラフィ変換は 3 次元空間中の平面と、その平面を中心射影した面との間の変換であり、同次座標を用いて以下の式で表される。

$$s\tilde{x}' = H\tilde{x} \tag{1}$$

ここで、 \tilde{x} は変換前の同次座標を表すベクトル、 \tilde{x}' は変換後の同次座標を表すベクトル、 H は変換を表す 3×3 のホモグラフィ行列である。ホモグラフィ行列は 4 組以上の対応する点から推定できるので、本実験ではマーカーのコーナーの位置をもとにホモグラフィ行列を推定し、無限運動錯視をホモグラフィ変換してプロジェクターの投影像を補正した。

投影のためのスクリーンは剛性と重量の兼ね合いと、加

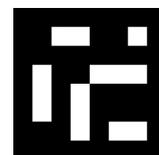


図 5: ArUco マーカー



図 6: スクリーンの写真

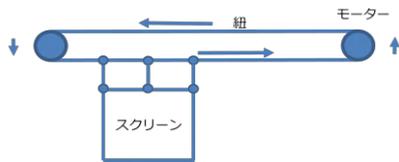


図 7: スクリーン移動機構

工のしやすさから発泡スチロールを 42.0[cm] 四方の正方形に切り出した物を使用することとした。また投影のために発泡スチロールの表面には再生紙を貼り付け、スクリーンの中央部に 10.5[cm] 四方のマーカーを付与した。図 6 に投影のためのスクリーンの写真を示す。以下、スクリーンまたは移動スクリーンと呼ぶ。

4.3 スクリーンの移動機構

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物体の移動速度を自由に調整できる必要がある。安定した計測を実現するためにモーターを使用した実験環境を構築する。

スクリーンは高さ 1.5[m] に渡された長さ 2.5[m] のポールから 3 本のリングを介して吊り下げられ、紐を利用してポールに沿って直線的に移動できるようにした。ポールの左端と右端に滑車に相当する部分があり、リング状の紐が掛けられている。一つの端の滑車は減速機を介してモーターに接続されており、モーターの回転に伴って紐全体が左右に移動する。この紐はスクリーンにも固定されており、これにより、モーターの回転に伴ってスクリーンが移動するようになっている。図 7 にスクリーン移動機構を示す。また、実験を容易にするために、モーターはマイコンにより制御され、回転の on/off や回転速度は手元のスマートフォンから制御できるようにした。この装置のブロック図を図 8 に示す。

4.4 速度計測用比較対象映像

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。そのために無限運動錯視の投影とは別に映像の投影を行う。図 9 に速度計測用比較対象映像を示す。この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する。速度計測用比較対象映像の投影のためのスクリーンはスクリーン移動機構下部に取り付ける。以下、固定スクリーンと呼ぶ。

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

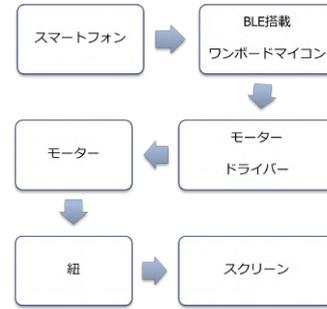


図 8: モーターのブロック図



図 9: 速度計測用比較対象映像

りに動くピクセル数を 0.1[px] 単位で調整ができる。観察者が手元のマウスのホイールを回転させることで固定スクリーンに投影された速度計測用比較対象映像の加減速を行うこととし、(1) スクリーンの移動速度、(2) 無限運動錯視の知覚速度、(3) 無限運動錯視が空間的に運動する状況での知覚速度、などの数値化を行う。

固定スクリーンの横幅 2.5[m] に合わせて速度計測用比較対象映像のためのプロジェクターを固定スクリーンの中央から 1.2[m] 離して投影を行う。図 10 に投影を行った状態の写真を示す。

5. 実験

5.1 提示像の補正結果

提示像の補正の効果を検証するために予備実験を行った。移動体に見立てたホワイトボードを 180Projector に正対するように 1.5[m] 離れた場所に置き、接線上でホワイトボードを動かす。マーカーはホワイトボード上に貼付する。また、補正の比較がしやすいようにホワイトボード上には目印を置く。

提示像の補正前後の比較結果として補正前および補正後の様子をそれぞれ図 11 の左側および右側に示す。補正前

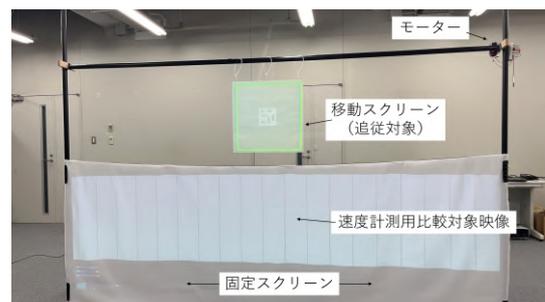


図 10: 実験システム系の写真



図 13: 実験結果の連続写真

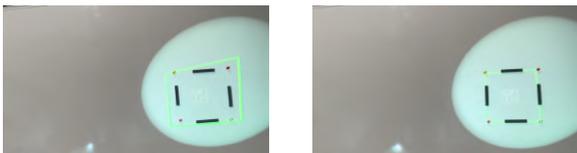


図 11: 提示像の補正結果 (左:補正前, 右:補正後)

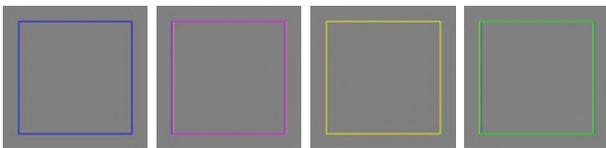


図 12: 実験で使用した提示パターン系列

は投影された像が歪んでしまっている。補正後ではリアルタイムにマーカーに合わせて映像に補正をかけて投影することができた。

5.2 構築した実験系の動作結果

システム全体が正常に動作しているかを確認するために簡単な実験を行った。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。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 16[fps] で順番に切り替える。図 12 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。実験した際の連続写真を図 13 に示す。

構築したスクリーン移動機構でマーカーを付与した移動スクリーンを空間的に左/右に移動させ、移動スクリーンを追従し提示像を補正しながら移動方向と同方向もしくは逆方向の無限運動錯視映像を重畳し続けることができ、180Projector を利用した一連のシステムが正常に動作した。また、観察者が速度計測用比較映像の加減速を行うことにより知覚速度を数値化することができ、(1) スクリーンの移動速度、(2) 無限運動錯視の知覚速度、(3) 無限運動錯視が空間的に移動する状況での知覚速度、などの速度を計測することができた。

6. まとめ

本発表では、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ことを指摘した。また、この計測を実現するために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計測系を提案し、実際に試作した計測系について説明した。さらに、基礎的な実験を行った結果を紹介した。

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] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.