



# 投影型錯視に基づく エアホッケーの知覚操作の体験向上に向けた検討

村田 有生<sup>1)</sup>, 佐藤 健吾<sup>1)</sup>, 寺島 裕貴<sup>2)</sup>, 西田 真也<sup>3)</sup>, 渡辺 義浩<sup>1)</sup>

1) 東京工業大学 工学院 情報通信系 (〒 226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-G2-31, murata.y.an@m.titech.ac.jp)

2) NTT コミュニケーション科学基礎研究所 (〒 243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1)

3) 京都大学 大学院情報学専攻 知能情報学専攻 (〒 606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

**概要:** 高速プロジェクタ・カメラによる錯視型投影を行うことで、実世界の運動物体を知覚操作することが可能である。これまでに、エアホッケーのバックの不可視化や運動方向・速度の操作が実現された。本稿では、本システムにおけるさらなる体験向上に向けて、手法の改善を試みた。具体的には、不可視化において投影ずれを低減する手法を導入した。また、方向・速度操作に関して、新たに Reversed phi を用いた手法を提案し、定性評価により効果が得られることを確認した。

**キーワード:** 視覚, プロジェクタ, 錯覚

## 1. はじめに

高速プロジェクタを用いて、人間の知覚を操作する試みが報告されている。例えば、ギター弦に対して投影を行い、振動の可視化や色・形状を変化させる研究 [1] や、周期運動する物体に投影を行うことで、リアルなテクスチャや反射特性を再現する研究 [2, 3] が行われている。また、実体の未知の運動に合わせて、疑似的な動きが副次的に錯覚されるように投影を行うことで、剛体が弾性を持った柔らかい物体に変化したように見せる知覚操作も示されている [4]。

特に本稿では佐藤らの研究に着目する [5]。これは、高速プロジェクタ [6] を用いた錯視型投影により、未知の運動をするエアホッケーのバックの知覚操作を実現するものである。具体的には、バックが消えたように見える不可視化と、Curveball illusion [7] を用いたバックの運動方向と速度の操作が実現された。一方、不可視化の手法では投影のずれが高い頻度で起こっており、バックが完全には不可視化されない問題があった。また、運動方向・速度操作に関しては、他の錯視現象を導入する余地が残されていた。

そこで、本稿では不可視化手法の投影ずれの原因として、処理が想定している画像投影の周期を上回る問題の解決を図った。具体的には、投影画像の生成と画像投影の処理を並列化して、縞画像の投影開始時点での投影ずれを改善した。また、運動方向・速度操作手法について、新たに Reversed phi による速度過大視を利用した手法を提案し、定性評価により効果の確認を行った。

## 2. システム概要

図 1 に本稿で使用したシステムを示す。本システムは佐藤らと同じ構成である [5]。高速カメラを用いてバックをトラッキングし、その位置に応じたパターン光を遅延 7.6 ms

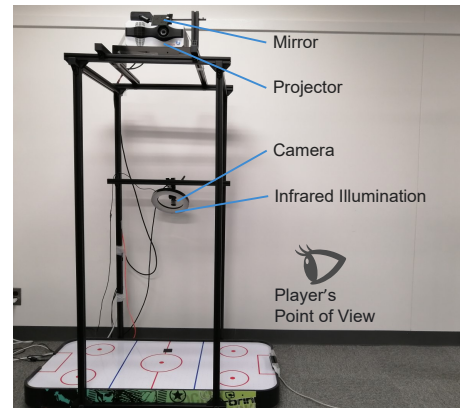


図 1: 本稿で使用したシステム。ミラーを用いて投影光の方向を変更している。カメラは赤外画像を撮るため、投影中でも対象物体を捉え続けることができる [5]。

以内に高速プロジェクタから投影することができる。また、カルマンフィルタによりこのシステム遅延分の運動予測を行うことで、遅延のない投影を可能としている。使用したカメラの解像度は  $720 \times 540$ 、フレームレートは 500 fps である。プロジェクタの解像度は  $1024 \times 768$ 、フレームレートは 1000 fps である [6]。計算機は Xeon E5-2687W v4 dual を搭載したものをを用いた。

## 3. 不可視化手法の投影ずれの改善

### 3.1 投影ずれの要因

まず、本稿で注目する投影ずれの要因について述べる。佐藤らの不可視化手法は、縞画像の投影によりバックへの遮光と背景の輝度補正を行うものである [5]。バックが低速であるときは輝度  $L$  の空間的に一様な画像を投影し、バックが十分高速な場合には輝度  $2L$  の白い領域と輝度  $0$  の黒い領域が交互に並んだ縞画像をバックに追従して投影する。バック

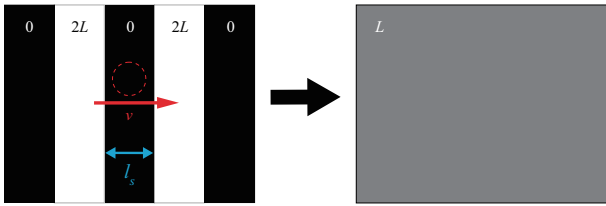


図 2: 不可視化手法の概要. パックに対して縞画像を投影し, パックが高速移動することで知覚積分が起これり, 右図のように輝度一定の画像として知覚される [5].

クには光が当たらないように, 黒い縞の内部にパックが収まった状態を維持する. このような投影により, 縞がパックに追従して高速に移動することで, 図 2 のように人間の目には積分輝度  $L$  のような画像として知覚され, 不可視化が実現された.

佐藤らは縞の幅を固定した手法も提案しており, この手法では投影ずれが発生することなく不可視化を実現した [8]. しかし, この手法では, プロジェクタのフレームレートが有限であるために図 3 のように積分輝度が空間上で一定にならず, アーティファクトが知覚される問題があった. この問題を解消するため, 佐藤らは, トラッキングで得たパックの速度  $v$  に合わせて投影画像を生成する手法を提案した [5]. この手法では, 白または黒の各縞の通過時間  $T_s$  が一定となるように縞の幅  $l_s$  を決定している. なお, パックは等速運動していることを仮定しており,  $v$  は定数である. このとき, 縞の通過時間  $T_s$  はプロジェクタのフレームレート  $f_P = 1000$  fps の逆数の整数倍であり, 縞の幅  $l_s$  は以下の式で決定される.

$$l_s = vT_s \quad (1)$$

なお, 前回の実装 [5] では  $T_s = 10$  ms としていたため, 縞画像の枚数は  $N = 20$  である.

このとき, 佐藤らの実装 [5] では, マルチスレッドで撮像やトラッキングなどの処理が実行されている. このうちのプロジェクタへの画像転送を指示するスレッド (以下, 投影スレッドと呼ぶ) 内で 1 フレームにつき 2 枚の縞画像生成が行われている.  $N = 20$  枚の生成後, その次のフレーム, すなわち 10 フレーム (10 ms) 後から縞投影が開始される想定で実装されていた. しかし, 調査の結果, 縞画像生成を含めた投影スレッドの処理時間が画像投影の周期 1 ms を上回る場合があることがわかった. よって, 投影スレッドが 1000 fps では実行されないため, 画像が上述の前提とした 10 ms 後に投影されない現象が生じていた. これが投影開始時点でのずれの原因のひとつと考えられる.

### 3.2 画像生成の並列化

本稿の手法では, 投影スレッドが 1 ms 周期で実行されるように, 同スレッドでは縞画像を生成しない. 代わりに, 縞画像生成のスレッドを新たに設ける. これにより, パックの速度  $v$  が決定した後, 投影スレッドと縞画像生成スレッドが並列に処理される. その後, 20 枚の縞画像の生成が完了した直後から, 投影スレッドで投影する画像を輝度一定

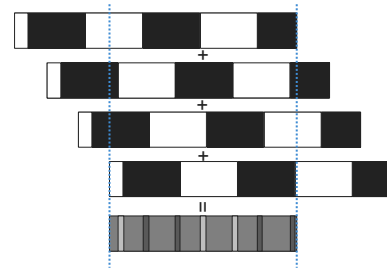


図 3: 積分輝度が一定にならない例. 連続的に縞が移動すれば積分輝度は一定となるが, 実際にはプロジェクタが離散的に投影を行うために積分輝度が一定にならない場合がある [5].

の画像から縞画像に切り替える. このように, 従来手法では同一スレッド内で処理されていた画像投影と縞画像生成をマルチスレッドで並列処理することで, 投影スレッドが 1 ms で実行されるようになり, 投影開始時点での投影ずれが改善されることが期待できる.

### 3.3 実験

投影スレッド 1 回の実行に要する時間を, 従来手法と提案手法で比較した. パックを 15 回打った際の平均時間を計測した結果, 従来手法ではプロジェクタのフレームレート 1000 fps の周期 1 ms に収まっていなかった処理が, 本手法では収まっていることを確認した.

次に, 実際に投影開始時点での投影のずれ量を確認した. 使用したパックの直径は 50 mm である. 確認する画像取得のために, 高速カラーカメラ (解像度  $640 \times 240$ , フレームレート 1000 fps) でプロジェクタとの同期撮像を行った. 撮像結果を大津の手法により二値化処理し, パックと背景の境界を明確にして, ずれを画像のピクセル数で計測した. その後, エアホッケー台上でのプロジェクタの投影範囲の実寸とピクセル数の対応から, ずれを実際の長さ (mm) に変換した. プロジェクタの投影範囲は約 940 mm, 撮像画像上でのピクセル数は 564 px だった. また, ずれが 0 である場合を投影の成功とみなし, 不可視化の成功率を算出した. 従来手法と本手法でそれぞれ 15 回の試行を行った.

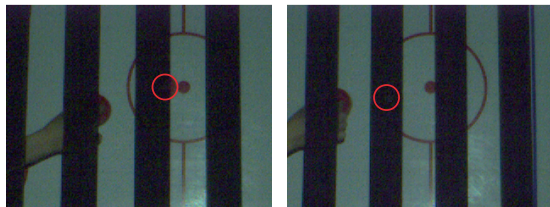
表 1 にずれの平均と最大値, および不可視化の成功率を示す. また, 撮像結果の例を図 4 に示す. 成功率を比較すると, 従来手法では 26.7% であったのに対し, 提案手法では 86.7% となっており, 成功率が上昇していることが分かる. 平均と最大値のいずれも本手法のほうが低い値を示しており, 投影のずれが改善していることが確認できた. 一方, 本手法においてもずれが 15 回の試行中で 2 回観測されており, 本手法で投影開始時点でのずれを完全に解消することはできなかった.

### 3.4 考察

縞画像の投影開始時点での投影の成功率が従来手法に比べ向上したことから, 本手法で投影スレッドの処理が 1 ms を超過することによる投影ずれを改善できたと考えられる. 一方, 本手法により投影開始時点での投影ずれを完全になくすることはできなかった.

表 1: 従来手法と提案手法で発生するずれの平均と最大値および投影の成功率 (試行回数: 15 回) .

	従来手法 [5]	提案手法
平均 (mm)	9.44	1.33
最大値 (mm)	51.7	15.0
成功率 (%)	26.7	86.7



(a) 投影の失敗例 (b) 投影の成功例

図 4: 実験結果として撮像された画像の例. 赤い円でパックの位置を示している. (a) ではパックが黒い縞に収まっておらず, 完全には不可視化されない. 一方, (b) ではパックが完全に黒い縞の内部に収まっており, 不可視化される.

現在まだ解消できていないずれは, 従来手法でパックの等速運動を仮定しているのに対し, パックが実際には等速運動をしていないために発生する速度誤差が原因ではないかと考えられる. 実際に, 今回は投影開始時点でのずれのみに着目したが, 従来手法ではパックが進むにつれて増加していくずれも確認されており, これもまた上記の誤差が原因と考えられる. これらのずれの発生原因について, 特に上記の速度誤差に着目して調査し, さらに投影ずれを改善することが今後の課題である.

## 4. Reversed phi による運動方向・速度操作

### 4.1 提案手法

新たな運動方向・速度操作の手法として, Reversed phi を導入したものを提案する. Reversed phi とは, あるパターンが輝度コントラスト極性を反転させて移動すると, 移動した方向と反対方向の仮現運動を引き起こすものである. 北岡は, この Reversed phi を応用した刺激を提示することで速度が過大・過小に知覚されることを報告した [9].

本稿では, この北岡の Reversed phi をパックに投影することで, 運動方向・速度操作を行うことを提案する. パックに投影する模様を図 5 に示す. 1, 3 フレーム目では, 刺激の中心から距離  $l_{phi}$  離れた点を中心とした白黒の円を提示し, 白黒の円の重なる部分については灰色の光を提示する. 2, 4 フレーム目ではパックと同じ大きさの白黒の円を提示する. このパターンを時間  $T_{phi}$  おきに順に提示すると, 観測者はパターンが静止している場合にも右方向への運動を知覚する. また, パターンの提示順を逆にすると, 左方向への運動を知覚する.

このようなパターンをパックの速度と同じ方向に運動が

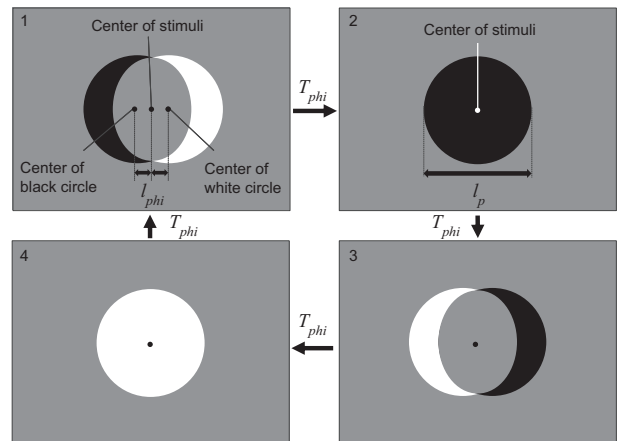


図 5: Reversed phi による運動方向・速度操作手法での投影画像.

知覚されるように重畳投影することで, 観測者にパックの速度が増加あるいは減少したように感じる錯覚が発生すると考えられる. さらに, パックの速度と垂直方向に運動が知覚されるように重畳投影すれば, パックの速度と錯視で知覚される速度が足し合わされ, 方向操作を行うことが可能になると考えられる.

### 4.2 実験

ここでは, 観測者から見て左から右に視界を横切るように運動するパックに対して, Reversed phi を用いた運動方向・速度操作を行い, 観測者 1 名による定性評価を行った. 対象物体として, 直径  $l_p = 50$  mm の白いエアホッケーのパックを使用した. 投影画像には図 5 の 4 枚を用い,  $l_{phi} = 10$  mm,  $T_{phi} = 20$  ms として実験を行った. これらのパラメータは, 観測者 1 名による定性評価の結果, 比較的強い効果が得られることが確認されたものを用いた. 方向操作では, 図 6 の左のように, パターンの運動方向を 2 回反転させた. 速度操作では, パターンの運動方向を 1 回反転させた.

定性評価により, 周辺視野で観測すると, パックの運動方向・速度が変化したように知覚されることを確認した. また, 観測者の視点を変更すると, 方向や速度の変化の大きさや感じやすさが異なることが確認された.

### 4.3 考察

実験の結果, Reversed phi を用いた投影により, パックの運動方向や速度が変化したように知覚されることが確かめられた. このとき, 効果が認められたのは周辺視野で観測した場合であった. Reversed phi を用いた刺激は, 中心視野で観測した場合にも効果が認められているものであるため, 従来の知見と一致しない結果となった. これは, パックに張り付けたマーカが注視の目印となり, パックの中心を視野の中心で捉え続けやすい環境になっていたことが考えられる. 実際に, モニター上で刺激の中心に点を表示し, そこを注視した状態で刺激を提示すると, 錯覚が発生しないことが定性的に確認された.

また, 観測者の視点の位置によって効果が変化することが確認された. これは, 偏心度の違いによって発生する差



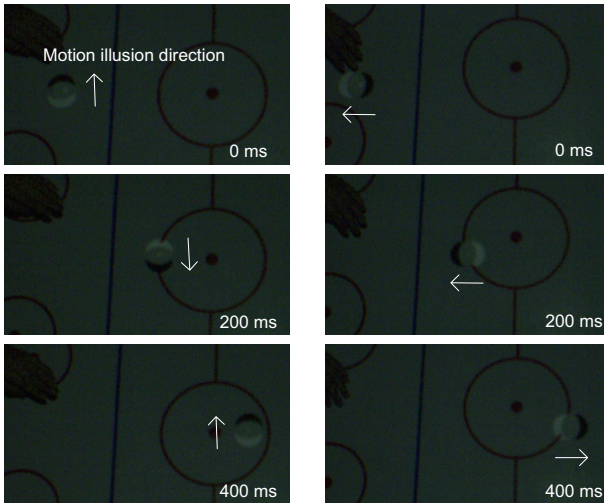


図 6: Reversed phi による運動方向操作（左列）と運動速度操作（右列）の様子（200 ms 間隔）。

であり、より偏心度が大きくなるにつれて運動方向・速度操作の効果が高くなるのではないかと考えられる。

## 5. 結論

本稿では、スポーツのエアホッケーのパックに対する知覚操作に注目した。パックを不可視化する手法では、パックへの投影ずれが発生する場合があります、これにより完全に不可視化が行われない問題があった。これに対し、本稿では縞画像生成をマルチスレッドにより並列処理する手法を提案し、画像投影が想定通り 1 ms 周期で行われるようにすることで、これが原因として発生していた投影ずれを改善した。今後は、現在まだ残っているずれについて、パックの等速運動の仮定による速度誤差に特に注目して調査を行い、さらに不可視化の精度を高めることが必要である。

また、パックの運動方向・速度操作について、新たに Reversed phi を用いた手法を提案し、定性評価を行って効果が認められることを確認した。一方、今回提案した手法および従来手法のいずれも中心視野での効果は得られておらず、この実装で実際にエアホッケーのゲームの最中に効果を体感することは難しいと考えられる。そのため、中心視野でも効果が得られる手法を提案することや、ゲーム中に人間の視線を誘導するような工夫を行うことが改善案として挙げられる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20H05959 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] Shogo Fukushima and Takeshi Naemura. Wobble strings: Spatially divided stroboscopic effect for augmenting wobbly motion of string instruments. *Entertainment Computing*, 19:101–111, 2017.
- [2] Leo Miyashita, Kota Ishihara, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. ZoeMatrope for realistic and augmented materials. In *SIGGRAPH ASIA Emerging Technologies*, 2016.
- [3] Takatoshi Yoshida, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Phyxel: Realistic display of shape and appearance using physical objects with high-speed pixelated lighting. In *UIST*, page 453–460, 2016.
- [4] Kentaro Fukamizu, Leo Miyashita, and Masatoshi Ishikawa. ElaMorph projection: Deformation of 3D shape by dynamic projection mapping. In *ISMAR*, pages 164–173, 2020.
- [5] 佐藤 健吾, 寺島 裕貴, 西田 眞也, 渡辺 義浩. 追跡型投影による人間の視覚特性を利用した運動物体の不可視化と方向・速度操作. 第 27 回バーチャルリアリティ学会大会, (3E1-2), 2022.
- [6] Yoshihiro Watanabe, Gaku Narita, Sho Tatsuno, Takeshi Yuasa, Kiwamu Sumino, and Masatoshi Ishikawa. High-speed 8-bit image projector at 1,000 fps with 3 ms delay. In *IDW*, pages 1064–1065, 2015.
- [7] Arthur Shapiro, Zhong-Lin Lu, Chang-Bing Huang, Emily Knight, and Robert Ennis. Transitions between central and peripheral vision create spatial/temporal distortions: A hypothesis concerning the perceived break of the curveball. *PLOS ONE*, 5:1–7, 2010.
- [8] 佐藤 健吾, 渡辺 義浩. 追跡型構造化光による運動物体の不可視化の検証. 第 26 回バーチャルリアリティ学会大会, (3B1-3), 2021.
- [9] 北岡 明佳. 動画を使った錯視 13. <http://www.psy.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/movie13.html>, 2020. accessed: 2023-06-30.