



追跡型構造化光による運動物体の不可視化の検証

Preliminary experiments to make moving target invisible by structured lighting with tracking

佐藤 健吾¹⁾, 渡辺 義浩¹⁾

Kengo SATO and Yoshihiro WATANABE

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, sato.k.cc@m.titech.ac.jp)

概要: 人間の視覚の時間分解能を超える速度の高速プロジェクタと、高速カメラを用いたトラッキングにより、未知の運動をする物体に遅れなく追従する投影が可能である。本稿では、対象に光が当たらない状態を維持する投影によって、物体の色や位置に対する不可視化を検証する。同時に、この際発生する背景の変化を補正する投影を、視覚的持続が保たれている間に行うことによって、同変化に対する不可視化を検証する。

キーワード: 高速プロジェクタ, 臨界融合周波数, ストロボ効果, トラッキング

1. はじめに

人間の視覚の特性を利用して、観測者に現実で起こっているのとは異なる現象を知覚させることが可能である。本稿では、このように視覚を変化させる行いを、視覚操作と呼ぶ。特に、照明を制御することにより、時間的な刺激の変化を利用した視覚操作に注目する。

様々な視覚特性のなかでも、時間的に変化する刺激に対する知覚に大きく関わるのが、視覚的持続である [1]。視覚的持続とは、視覚刺激が消滅した後も視覚情報がしばらくの間持続して知覚されることである。持続している間に新たに別の視覚情報が与えられた場合、それらは積分されて知覚されることが知られている。これにより、人間の視覚は一定以上の速度で点滅する光に対してちらつきを感じなくなる。このちらつきを感じなくなる最も低い周波数を、臨界融合周波数 (Critical Flicker Fusion Frequency: CFF) と呼ぶ。

近年では、高速で領域ごとに光を制御できる高速プロジェクタ [2] を用いることで、運動する対象物体の位置に対して適応的なパターンを持つ構造化光を投影して視覚操作を行う研究が報告されている [3, 4, 5]。しかし、これらの研究で対象となっている運動物体は、振動するギターの弦や、回転する円盤など、周期的なものに限られている。

一方、拡張現実の分野では、未知の運動物体に対しても、映像を追従投影可能なダイナミックプロジェクションマッピングのシステムが開発されている。この分野では、対象物体と投影映像の間の位置のずれが大きいと、観測者が幾何学的不整合を知覚する問題がある。近年開発された、1000 fps の高速なビジョンシステムやプロジェクタを用いることで、この問題を解決するシステムが報告されている [6, 7]。

そこで本稿では、ダイナミックプロジェクションマッピングを応用して、未知の運動物体に対する視覚操作を実現

することを目的とする。この目的に向けて、対象物体の位置を追跡し、高速プロジェクタを用いてその位置に応じたパターン光である追跡型構造化光を高速に生成・投影することで、対象物体以外に対する知覚はそのままに、未知の運動をする物体のみを不可視化する手法を提案する。本手法は、対象に光が当たらない状態を保つことで物体を消去し、消去によって発生する背景の変化を視覚的持続が保たれている間に補正することにより、対象物体の位置と背景の変化に対する不可視化を行うものである。

さらに本稿では、以上の提案のもとで行った定性評価について述べる。その結果、対象物体の位置の不可視化を達成した。また、背景変化の不可視化は達成できなかったため、原因を考察し、解決策を提案した。

2. 手法概要

本稿では、対象物体にプロジェクタの投影光が当たらない場合も追跡が可能、対象物体の位置と投影画像のずれが少ない、観測者の視点位置に関わらず視覚操作が可能である、以上の3点を満たすシステムを提案する。また、対象物体は1つで一定以上の速度で単純な運動をしていること、プロジェクタ以外の光源がない暗所で動作させることを前提とする。

システムの構成を図1に示す。本システムでは、高速カメラ1台と高速プロジェクタ1台を使用し、赤外画像を用いて対象の追跡を行う。また対象物体として、エアホッケーの台上を移動するバックにマーカを取り付けたものを使用する。このように、対象物体が背景と同じ平面上を移動することが保証されているシーンを対象とすることで、消去した物体が背景を遮ることで間接的に位置が知覚される問題を回避し、任意視点の観測者に対する視覚操作を実現する。また、対象が常に同一平面上にあるため、プロジェクタとカメラはホモグラフィによってキャリブレーションする。

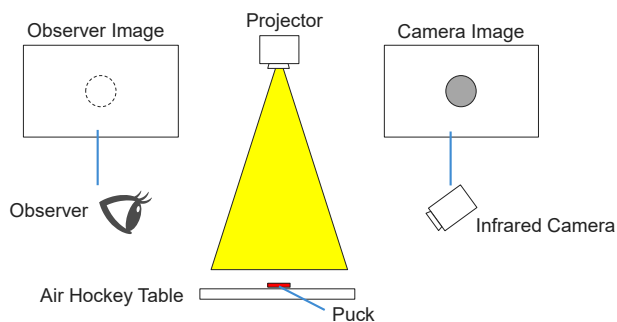


図 1: システム構成図。投影により、観測者には対象物体が見えなくなる。一方、カメラは赤外画像を撮るため、対象物体を捉え続けることができる。

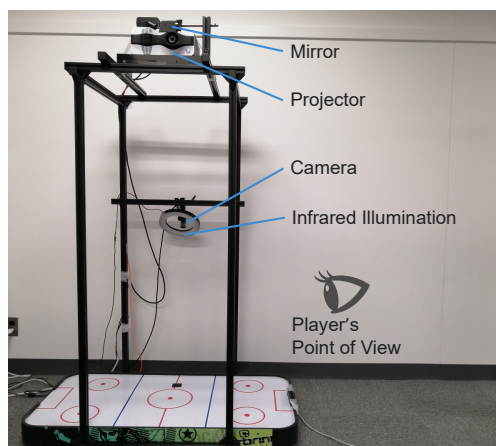


図 2: 構築したシステム。ミラーを用いて投影光の方向を変更している。

システムに撮像結果が投影に反映されるまでの遅延 dT がある場合、時刻 t における対象物体の位置 u_t と、 u_t を元に生成した画像が投影される際の対象物体の位置 u_{t+dT} の間には対象物体が移動することによるずれが生じる。本システムでは、ずれが生じると対象物体に光が当たるなどの問題が生じるため、対象が等速運動をしている仮定のもと、カルマンフィルタを利用して \hat{u}_{t+dT} を予測し投影に用いることで、対象物体とずれのない投影を実現する。

構築したシステムの外観を図 2 に示す。プロジェクタとして 1000 fps 以上で 8 bit 階調投影が可能な高速プロジェクタ (DynaFlash, 解像度 1024×768) を用いた。カメラとして、525 fps でモノクロ撮影可能な高速カメラ (Basler acA720-520um, 解像度 720×540) に可視光カットフィルタを装着したものを用いた。計算機は、Xeon E5-2687W v4 dual を搭載したものを用いた。赤外画像を撮影するための照明として赤外リング照明を使用した。以降では、本システムを用いて 2 つの追跡型構造化光生成手法を検証する。

3. 能動的手法

消去を行うための消去投影と、補正を行うための補正投影を交互に行う手法について述べる。補正のために後から画像を投影するため、この手法を能動的手法と呼ぶ。図 3 に能動的手法により生成される追跡型構造化光の一例を示す。

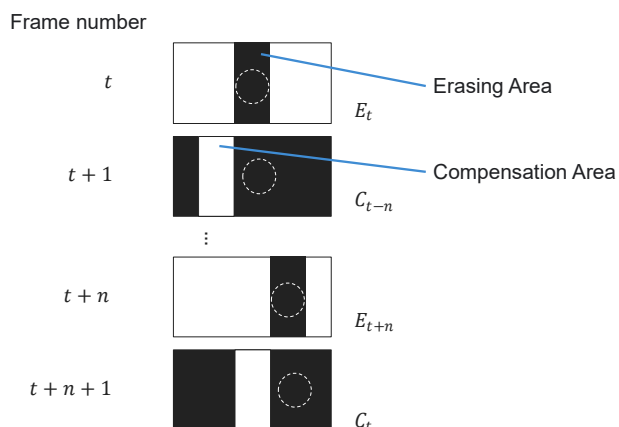


図 3: 左から右へ移動する対象物体に対する能動的手法で生成された追跡型構造化光の例。点線は対象物体の位置。

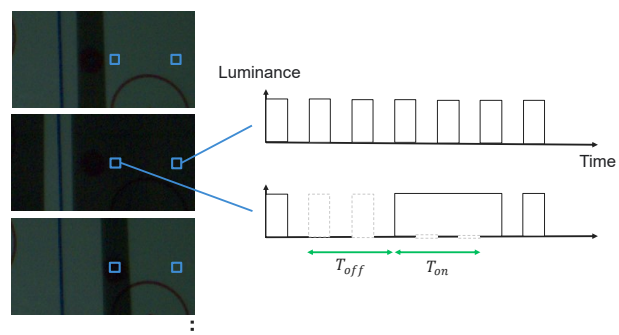


図 4: 能動的手法を用いる際の輝度変化。左図に示す位置から右に向かって対象物体が移動する場合の点ごとの輝度変化を右図に示す。

同図最上段は消去投影の一例を示しており、これに対する補正投影は同図最下段に示されている。

t フレーム目に投影した消去投影画像を E_t 、 E_t に対する補正投影画像を C_t とする。 E_t を投影した直後に C_t を投影した場合、対象物体に光があたり、不可視化できない可能性がある。したがって、対象物体が E_t の消去領域を完全に通過するまで待機した後に、 C_t を投影する必要がある。例えば n フレーム待機した後に補正を行う場合、図 3 に示すような順序で投影を行う。

物体が通過する点と通過しない点の輝度の変化を図 4 に示す。この変化が知覚されないためには、全ての点滅が臨界融合周波数 f_{CFP} の 1 周期以内に完了し、積分輝度が一定となっている必要がある。本手法では、消去投影とそれに対する補正投影を 1 回ずつ行うことで、積分輝度を一定にする。したがって、ある点が消去領域に含まれている時間を T_{off} 、補正領域に含まれている時間を T_{on} とすると、 $T_{off} = T_{on}$ となる。このとき、全ての点滅が f_{CFP} の 1 周期以内に完了するために T_{off} が満たすべき条件は式 (1) より定まる。

$$T_{off} < \frac{1}{2f_{CFP}} \quad (1)$$

また、消去投影が行われている間、対象物体は消去領域内に収まり続ける必要がある。消去投影が行われている間も

対象物体が移動し続けることを考慮すると、対象物体の運動方向の長さ l 、速度 v 、プロジェクタのフレームレート f_P より、最低限必要な消去領域の物体運動方向の長さは式 (2) 左辺で表すことができる。また、式 (1) により定まる T_{off} の条件を満たす消去領域の最大の長さは式 (2) 右辺で表すことができる。これにより、対象物体の速度が満たすべき条件が定まる。

$$l + \frac{v}{f_P} < vT_{off} \quad (2)$$

3.1 実験環境

対象物体として直径 $l = 50$ mm のエアホッケーのパックを使用した。実験環境における CFF は観測者 1 名による定性的評価を行い、 $f_{CF} = 60$ Hz 程度とした。 T_{off} は 8 ms とした。プロジェクタは $f_P = 1000$ fps、カメラは 500 fps で使用した。対象運動として、静止しているパックを打って、 $v = 8$ mm/ms 程度で運動したものを使用した。また、プレイヤー視点にカメラ (Basler acA640-750uc、解像度 640×480) を設置し、30 fps、グローバルシャッターで動画を撮影した。

また、カルマンフィルタに基づく予測に用いるシステム遅延 dT を求めるために予備実験を行った。パックに対して予測した投影時点での重心位置に点を投影する実験を dT を変化させて行い、高速カメラによる撮像結果から最もずれなくマーカに投影できていたときの dT を採用した。その値は 7.6 ms だった。

3.2 実験

プレイヤーから見て奥から手前に向かってくるパックに対して消去投影と補正投影による視覚操作を行い、観測者 1 名により定性的な評価を行った。また比較実験として、空間的に一様な光を投影した場合についても同様の評価を行った。視覚操作を行った場合の撮影結果を図 5 中段に、比較実験の撮影結果を図 5 上段に示す。視覚操作を行った場合、主観評価・撮像画像の双方から、パックの位置が特定できないことを確認した。一方で、ちらつきが通過するような背景の変化が知覚されることを確認した。比較実験について、主観評価・撮像画像の双方から、パックの位置が特定できることを確認した。

3.3 考察

実験の結果、プレイヤーからみて横方向のパックの位置が特定できないことを確認した。しかし、対象物体の位置にちらつきが発生するために背景の変化が知覚され、そこから間接的に奥行き方向の位置が特定されることを確認した。

このようなちらつきが発生する原因として Transient Twinkle Perception (TTP) の影響が考えられる [8]。TTP は、CFF を超える周波数領域において、波形が変化したときに知覚される瞬間的なものであり、点滅から一様な波形への変化や、点滅周波数の変化が起こった際に知覚されるという報告がある。図 4 右下のグラフからわかるように、本手法では対象物体の位置で点滅周波数が変化しており、この際に TTP の影響を受けているのではないかと考えられる。

4. 受動的手法

3 章で議論した条件を満たしつつ、対象物体が等速で運動している場合に TTP が対象物体の位置に発生することを回避する手法を提案する。本手法では、式 (2) の条件を満たす高速時と条件を満たさない低速時で、異なる構造化光を投影する。高速時は、図 6 左上に示すような光を当てる領域と当たらない領域を並べた縞模様を、パックに追従して光が当たらない状態を保つように投影する。これにより、補正のためだけの投影を行わなくても消去と補正が交互に行われる。そのため前節で提案した能動的な手法に対して、この手法を受動的な手法と呼ぶ。また低速時は、図 6 左下に示すような空間的に一様な点滅を投影する。

物体が通過する点と通過しない点の輝度の変化を図 6 右に示す。ここから、高速時は各点において光の当たる領域と当たらない領域が時間的に一定周期で切り替わるため、TTP は発生しないことがわかる。また、高速と低速が切り替わる瞬間には TTP が発生することに加え、積分輝度が一定でなくなることをわかる。しかし、TTP 及び積分輝度の違いによる背景の変化は対象物体の位置に関わらず発生するため、ここから対象物体の位置が間接的に知覚されることは無い。

4.1 実験

実験 1 と同様の環境で実験を行った。プレイヤーから見て奥から手前に向かってくるパックに対して縞模様を投影し、観測者 1 名により定性的な評価を行った。視覚操作を行った場合の撮影結果を図 5 下段に示す。主観評価・撮像画像の双方から、パックの位置が特定できないことを確認した。一方、全体がちらつくような背景の変化が知覚されることを確認した。

4.2 考察

実験の結果、プレイヤー視点から対象物体の位置が特定できないことを確認した。しかし、高速時に絶えず背景のちらつきが発生することで、低速時と高速時の切り替わる瞬間に限らず背景の変化が知覚されることを確認した。

切り替わる瞬間のみでなく、縞模様投影時に投影面全体にちらつきが発生した原因として、各点の積分輝度が一定になっていないことが考えられる。原因として、投影に使用される対象物体の位置は、時間・空間的に量子化されているため、輝度が図 6 に示すような均等な波形になっていないことが考えられる。

5. 結論

本稿では、プロジェクタを用いた構造化光によって、運動物体に対する知覚を変化させることに着目した。従来の研究では、対象となる物体は周期運動をするものに限られていた。そこで本稿では、高速カメラによるトラッキングを用いることで、未知の運動をする物体に対する視覚操作を行った。具体的な視覚操作として、エアホッケーのパックに対する視認を妨げるシステムを提案した。

本稿では、提案手法によってパックの位置を特定できなくすることを達成した。また、背景の変化に対する知覚を

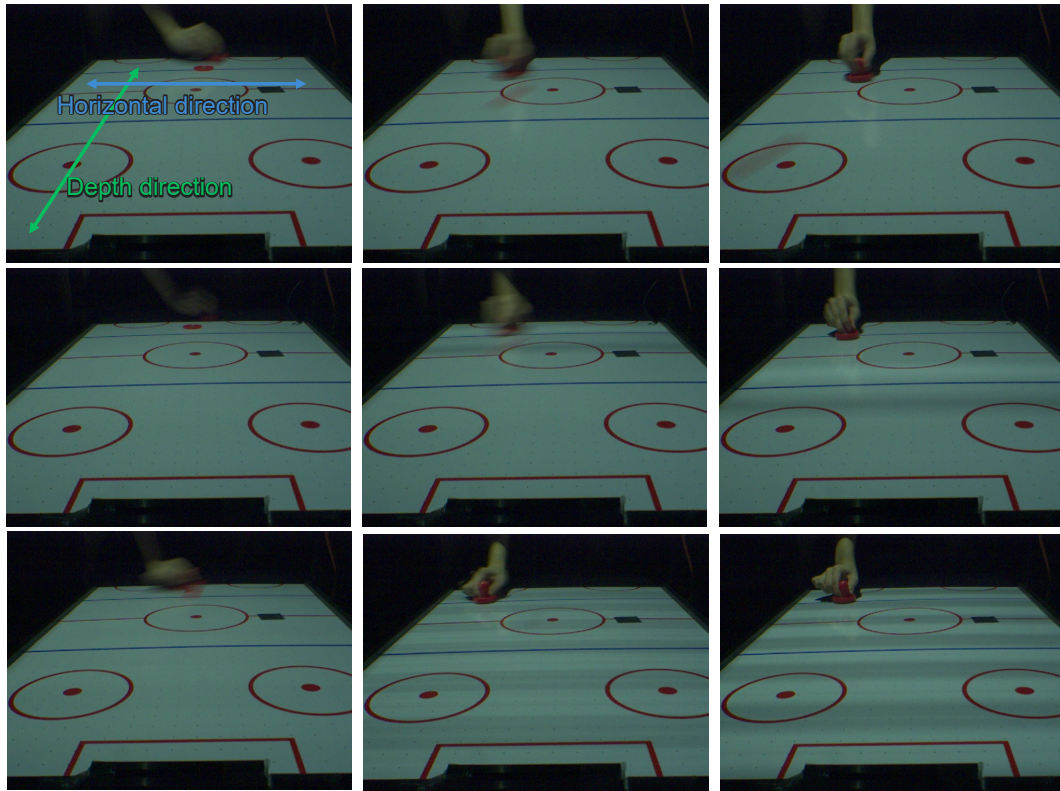


図 5: 比較実験の結果（上段），能動的手法の実験結果（中段），受動的手法の実験結果（下段）を 30 fps で撮影した時系列画像（2 フレーム間隔）．上段では，パックの残像が写っているのに対し，中段右・下段右では写っていないことから，位置を特定できないことがわかる．また，中段では背景から間接的にパックの奥行き方向の位置が知覚できるのに対し，下段では知覚できない．

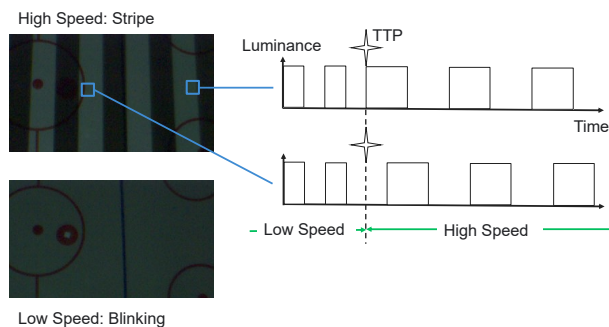


図 6: 高速時の投影画像（左上）と低速時の投影画像（左下），各点の輝度変化（右）．

妨げることを提案したが，これにより背景の変化を完全に知覚させない提示は難しかった．解決策として，本稿で提案した 2 つの手法を統合し，TTP の発生しない能動的な手法を提案することが考えられる．

参考文献

- [1] Richard Langton Gregory. 脳と視覚：グレゴリーの視覚心理学. プレーン出版, 2001.
- [2] 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 *The International Display Workshops*, pp. 1064–1065, 2015.
- [3] Shogo Fukushima and Takeshi Naemura. Wobble strings: Spatially divided stroboscopic effect for augmenting wobbly motion of string instruments. *Entertainment Computing*, Vol. 19, pp. 101–111, 2017.
- [4] Takatoshi Yoshida, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Phyxel: Realistic display of shape and appearance using physical objects with high-speed pixelated lighting. *UIST '16*, p. 453–460, 2016.
- [5] Leo Miyashita, Kota Ishihara, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. ZoeMatrope: A system for physical material design. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 35, No. 4, July 2016.
- [6] 渡辺義浩. 高速ビジョンの要素技術と応用展開の進化. 日本ロボット学会誌, Vol. 35, No. 8, pp. 574–578, 2017.
- [7] 渡辺義浩, 末石智大, 石川正俊. 6. ダイナミックプロジェクトクシオンマッピング. 映像情報メディア学会誌, Vol. 72, No. 5, pp. 332–335, 2018.
- [8] Yutaka Nakajima and Yutaka Sakaguchi. Transient twinkle perception is induced by sequential presentation of stimuli that flicker at frequencies above the critical fusion frequency. *Attention, perception and psychophysics*, Vol. 77, pp. 2711–2727, 2015.