



輝度と色の遅延知覚の違いと その投影型見かけ操作への応用に関する検討

樊 錦元¹⁾, 天野 敏之²⁾, 渡辺 義浩¹⁾

1) 東京工業大学 工学院情報通信系 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 G2-31, fan.j.ab@m.titech.ac.jp)

2) 和歌山大学大学院 システム工学研究科 (〒 640-8510 和歌山県 和歌山市栄谷 930)

概要: 人間は、物体の運動を主に輝度の変化によって知覚する。このため、輝度と色の間に異なる遅延がある場合でも、人間はその違いを知覚できない可能性がある。本稿では、このような輝度と色の遅延知覚の違いを検証した結果を報告する。このような特性を利用して、プロジェクタ・カメラシステムを用いた動的シーンの投影型見かけ操作における知覚上の遅延を低減できることが期待される。

キーワード: 視覚, 拡張・複合現実, プロジェクションマッピング, 見かけ操作

1. はじめに

近年、人間が裸眼で観察可能な投影型拡張現実が注目されている。特に本稿では、動的な物体へ投影を行うダイナミックプロジェクションマッピング (DPM) に着目する。DPM には、レイトレーシングを用いて高い現実感を実現する手法 [1] や、人の顔へ投影する事例 [2] などがある。本稿では、その中でも投影によって現実物体の見かけ操作を行う応用に着目する。ここでの見かけ操作とは、物体もとの見かけに基づいて、補正光の投影を行い、人間が知覚する物体の色を変化させる技術を指す。

このような目的を達成するため、様々な手法が提案されている [3, 4, 5]。Amano らは、カメラフィードバックを用いた手法を提案した [3]。しかし同手法では、目標シーンとシステムの距離が大きく変化するときには操作結果の明るさを整合させることが難しいと考えられる。また、同手法で開発されたシステムのスループットは 14 fps であり、運動時にはシステムの遅延による色ずれが発生していた。

この制限を解決するために、柳澤らは埋め込み白色投影を行い、深度情報を用いて補正光の距離減衰を調整する手法を提案した [4]。同手法では、高速プロジェクタ [6] の導入及びフィードフォワード手法の使用によってシステム遅延が 10 ms まで低減された。しかし、同手法では、対象物体の反射率が瞬間撮像による一枚の白色照明下画像によって計算されるため、誤差が生じる。また、同手法はフィードフォワード系によって補正画像を生成するため、同誤差を修正することができなかった。

上記の 2 つの問題点を同時に解決するため、深度情報とカメラフィードバックを用いる手法が提案された [5]。同手法では、カメラフィードバックを用いた手法と深度情報を用いた手法を統合し、高精度かつ深度変化へロバストな見かけ操作を実現した。しかしフィードバック手法では、収束に時間を要するため、図 1 に示されるように、人間が知覚できる遅延が生じる。



図 1: 知覚できる遅延: 左は静止状態で新聞紙の色消去した結果, 右は新聞紙が動くことで投影がずれる様子

一方、人間の視覚システムは、シーンの内容を輝度情報と色情報の別々の要素として知覚しており、輝度のディテールに対しては色に比べて高い感度を持っていると報告されている [7, 8]。テレビや動画の分野では、このような特性を利用することで、サンプリングのデータ量を減らす手法が用いられている [8]。具体的には、輝度情報より色情報を低い解像度でサンプリングしても、人間の知覚上では、復元される動画の品質の低下は少ない。また、運動は主に対象物体と背景の輝度情報によって検出されることも報告されている [9, 10]。

そこで本稿では、このような人間の知覚特性に着目し、輝度成分と色成分の間にある程度の遅延があっても、人間はそれを知覚できない仮説のもと、検証を行った。また、このような特性に基づいて、カメラフィードバックを用いる投影型見かけ操作の知覚上の遅延低減を検討した。

2. 関連研究

2.1 投影型見かけ操作

投影型見かけ操作では、対象物体の反射率の計算及び目標画像の生成を行い、最終的に補正投影を導出するのが一般的な流れである。

Amano らは補正投影下の対象物体の見かけから対象物体の反射率を推定し、カメラフィールドバックを用いて結果を修正する手法を提案した [3]。しかし、同手法では、深度に応じた反射率及び補正光の補償がされていないため、対象物体とシステム間の距離が限られていた。また、開発システムが低速のため、対象が動く場合に投影のずれが生じた。

これに対し、柳澤らは、深度計測を用いた見かけ操作システムを提案した [4]。同手法では、対象シーンの深度画像を高速取得する手法を導入することで、白色照明下画像及び補正画像の調整を行う。これによって、距離の変化に関わらず、深度方向へ運動する物体へのロバストな見かけ操作を達成した。また、高速プロジェクタ・カメラを用いて、500 fps スループットと 10 ms システム遅延の高速見かけ操作を達成した。しかし、同手法では取得された反射率の精度が低い問題があった。これによって、見かけ操作の結果が目標に合わない問題を抱えていた。

見かけ操作を応用した研究として、Asayama らはマーカーベースのトラッキングによって取得される深度情報とカメラフィールドバックを用いてマーカーを不可視化する色補償を行う手法を提案した。同手法は、マーカーベースのプロジェクトンマッピングにおいて、没入感を向上させることができる。[11]。

上記のようなフィードバックと深度情報を用いて投影画像を補償する手法を見かけ操作へ適用するため、樊らは、深度情報とカメラフィールドバックを統合する見かけ操作手法を提案した [5]。しかし同手法では、カメラフィールドバックで結果を修正することから、最適結果まで収束するには時間を要するため、人間に知覚される遅延が生じる。これによって動く対象物体と補正投影の間にずれが発生し、没入感が低下する問題がある。

2.2 人間の視覚特性とテレビ信号の色空間

人間の視覚は輝度情報より色情報への感度が低い [7, 8]。具体的には、対象物体の動きを判断するとき、色情報よりも、背景と対象物体の間の輝度情報によって主に判断すると報告されている [9, 10]。

運動知覚に関する研究で、Bilodeau らは、色の知覚システムは、人間が全体的な運動を判断するときの貢献が小さいと報告した [10]。同報告において、被験者は色情報によ



図 2: 使用したサンプル画像

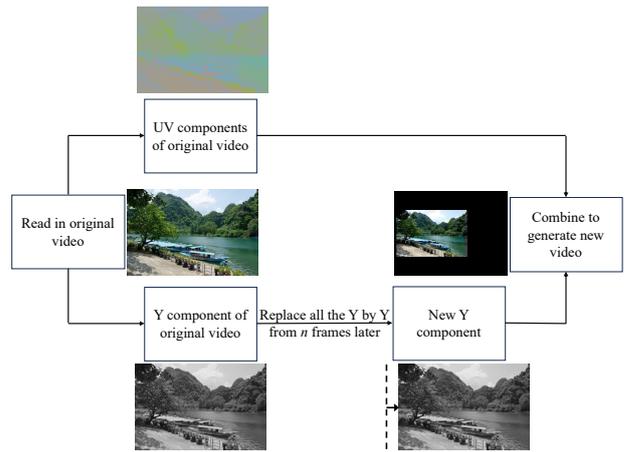


図 3: シミュレーション動画を生成する流れ

て対象物体の動きを検出できたが、正しい運動方向を判断することができなかった。これによって、色情報は人間が全体的な運動を判断するときに信頼性の高い情報源ではないことが示された。

また、Ramachandran らは、色情報と運動知覚は別々の部分として人間の視覚システムに管理されると報告した [9]。色情報は最大でも「暗示」(cue) 程度のものを運動知覚に提供すると記述されている。

このような特性はビデオのコーディングに幅広く使われている [8, 12]。H.264/AVC では、色を YCbCr 色空間でコーディングされ、色成分は輝度成分の四分の一の解像度でサンプリングされる [8]。また、テレビ信号の転送において、ヨーロッパ (YUV) とアメリカ (YIQ) のテレビ信号でも、似たようなサンプリング方法が使われており、これによって色成分の転送帯域幅を小さくすることができる [12]。

3. 輝度と色の遅延知覚の違いに関する検証

3.1 被験者実験の設計

本節では、輝度と色の遅延知覚に関する仮説とその検証実験について述べる。具体的には、色成分と輝度成分の間にある程度の遅延があっても、人間はそれを知覚できない仮説を提案する。

この仮説を検証するために、動画を用いた被験者実験を行った。動画を生成する流れを図 3 に示す。具体的には、動画を読み込んで、YUV 色空間に変換する。次に、すべてのピクセルの Y 成分を n フレーム後の Y 成分で差し替え、RGB 空間に戻し動画を生成する。 n の計算を下式で表す：

$$n = fz \quad (1)$$

ここで、 f は動画のフレームレート、 z は設定したい Y 成分と UV 成分の間の遅延である。

3.2 実験条件

今回の検証では、対象シーンの動きは左右に等速運動で、運動の速さは一定とする。運動速度を 0.25 pixel/frame, 0.5 pixel/frame, 0.75 pixel/frame, 1.0 pixel/frame の 4 つに

表 1: 違う対象シーンの速度に対する遅延知覚の結果

対象シーンの速度	知覚遅延の閾値
0.25 pixel/frame (12.5 cm/s)	55 ms
0.5 pixel/frame (25 cm/s)	30 ms
0.75 pixel/frame (37.5 cm/s)	25 ms
1.0 pixel/frame (50 cm/s)	20 ms

設定した。動画のフレームレートは 800 fps に設定した。生成した 0.5 pixel/frame の動画の一部を図 4 に示す。使用した画像を図 2 に示す。同画像は [13] より入手した。また、被験者と投影に使う白いスクリーンの距離は 1 m とし、プロジェクタとスクリーンの距離も同じように設定した。この場合、対象シーンの実際の速度はそれぞれ約 12.5 cm/s, 25 cm/s, 37.5 cm/s, 50 cm/s である。遅延の間隔を 5 ms に設定し、被験者に 0 ms から、順番に遅延 z が 5 ms, 10 ms, ..., 100 ms までの動画を提示して、それぞれに対して「遅延がある」、「遅延がない」のうち 1 つを答えさせた。被験者は 1 名とした。

ハードウェアとして、最大 947 fps でのカラー投影が可能な高速プロジェクタ [6](解像度 1024 × 768) を用いた。計算機は、CPU に Core i9-12900K, GPU に GeForce RTX 3090 を搭載したものをを用いた。実験環境の様子を図 5 に示す。

3.3 実験結果

被験者実験の結果を表 1 に示す。4 つの速度に対してそれぞれ、遅延が 50 ms, 25 ms, 20 ms, 15 ms まで、オリジナル動画 (色成分と輝度成分の間に遅延がない動画) と同じように遅延を知覚できず、「遅延がない」と答えた。55 ms, 30 ms, 25 ms, 20 ms の遅延がある動画を観測すると輝度と色がずれる違和感を感じはじめ、「遅延がある」と答えた。これによって、遅延が約 15~50 ms 以下の場合、輝度と色の間に遅延があっても人間には知覚できない可能性があることを確認した。

4. 投影型見かけ操作への応用に関する検討

本節では、前節で検証した人間の視覚特性を利用し、投影型見かけ操作の遅延低減に関して検討する。精度が高いかつ深度変化へロバストな見かけ操作を実現するため、カメラフィードバックと深度情報を用いた手法が提案された [5]。しかし同手法では、収束するまでに時間を要するため、人間に知覚される遅延が発生する。そこで、前節の検証結果に基づき、人間が輝度情報より色情報への感度が低く、2 つの成分の間にある程度の遅延があっても知覚できない特性を利用する補正投影の生成手法を提案する。

具体的には、輝度成分をフィードフォワード手法 [14] で補正し、色成分をフィードバック手法 [5] で徐々に修正する。この手法は、人間の目にとって感度が高い輝度成分をフィードフォワード手法で高速に補正し、色成分は収束時間を要

するフィードバック手法で補正することによって、人間が知覚する遅延を低減しつつ、高精度な見かけ操作が実現できる可能性がある。

5. まとめ

本論文では輝度と色の間に、ある範囲内の遅延があっても知覚できない仮説を提案した。この仮説を動画を用いた被験者実験で検証した。また、このような視覚特性を利用し、投影型見かけ操作への応用を検討した。提案手法によって、輝度成分の位置ずれが低減されるとともに、フィードバック制御による色成分の補償ができるため、見かけ操作の高精度化が期待できる。

一方、今回の実験では、被験者は 1 名だけのため、信頼度が低い。より厳密な結論を出すには被験者人数を増やしていくことが望ましい。

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] T. Nomoto, R. Koishihara, and Y. Watanabe, "Realistic dynamic projection mapping using real-time ray tracing," in *ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies*, 2020, pp. 1–2.
- [2] A. H. Bermano, M. Billeter, D. Iwai, and A. Grundhöfer, "Makeup lamps: Live augmentation of human faces via projection," in *Computer Graphics Forum*, vol. 36, no. 2, 2017, pp. 311–323.
- [3] T. Amano, and H. Kato, "Appearance control using projection with model predictive control," in *2010 20th International Conference on Pattern Recognition*, 2010, pp. 2832–2835.
- [4] 柳澤昂輝, 野元貴史, 角野究, 上田晋寛, 加瀬部秀訓, 山下徹, 湯浅剛, 天野敏之, 渡辺義浩, "高速プロジェクタ・カメラとリアルタイム 3 次元計測を用いた実世界の色操作", *SIG-MR*, vol. 2021, no. 23, pp. 1–6, 2021.
- [5] 樊錦元, 彭浩倫, 天野敏之, 渡辺義浩, "深度計測とカメラフィードバックを用いた投影型色操作の検証", *SIG-MR*, vol. 2023, no. 36, pp. 1–5, 2023.
- [6] Y. Watanabe, and M. Ishikawa, "High-speed and high-brightness color single-chip DLP projector using high-power led-based light sources," in *26th International Display Workshops*, 2019, pp. 1350–1352.
- [7] 吉澤達也, "視覚モダリティにおける色情報の役割とその機序", *視覚の科学*, vol. 36, no. 1, pp. 12–14, 2015.
- [8] T. Wiegand, G. J. Sullivan, G. Bjontegaard, and A. Luthra, "Overview of the h. 264/avc video coding standard," *IEEE Transactions on circuits and*

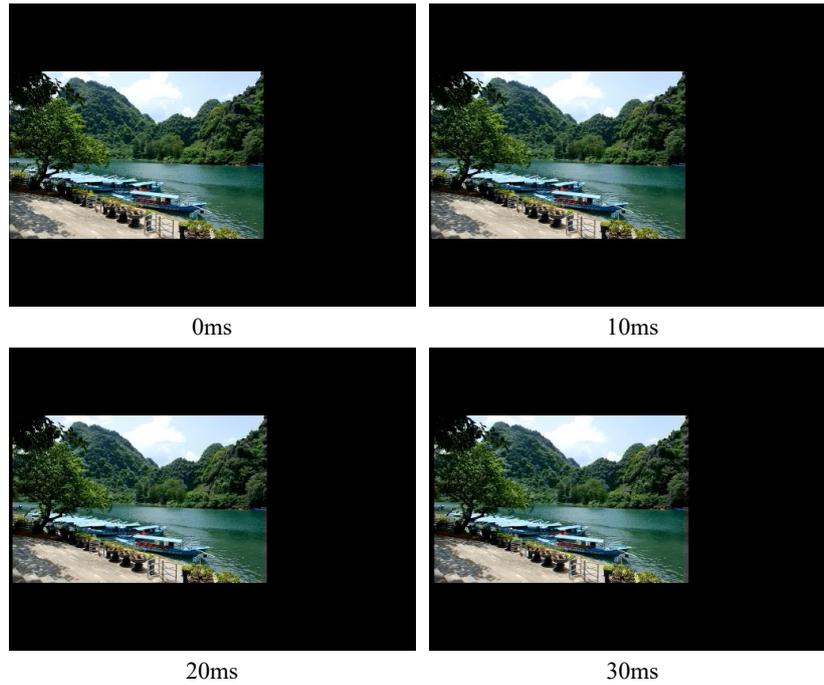


図 4: 色成分と輝度成分の間に違う遅延を設定し生成する動画。数字は各動画の色成分と輝度成分の間の遅延量を指す。0 ms は遅延なしの状態、オリジナル動画である

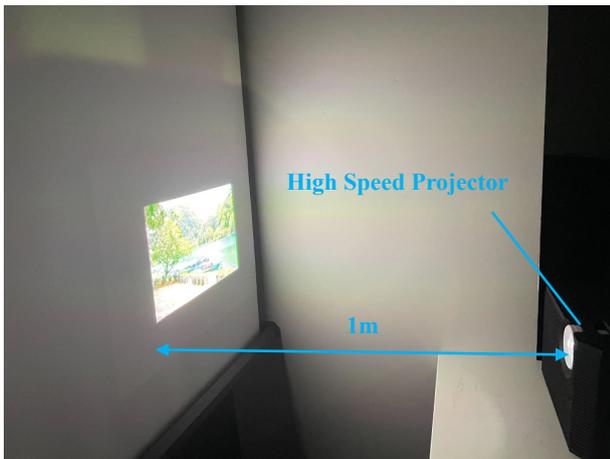


図 5: 被験者実験を行うシステム

systems for video technology, vol. 13, no. 7, pp. 560–576, 2003.

- [9] V. Ramachandran, and R. Gregory, “Does colour provide an input to human motion perception?” *Nature*, vol. 275, no. 5675, pp. 55–56, 1978.

- [10] L. Bilodeau, and J. Faubert, “Global motion cues and the chromatic system,” *JOSA A*, vol. 16, no. 1, pp. 1–5, 1999.
- [11] H. Asayama, D. Iwai, and K. Sato, “Fabricating diminishable visual markers for geometric registration in projection mapping,” *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, vol. 24, no. 2, pp. 1091–1102, 2017.
- [12] A. Ford, and A. Roberts, “Colour space conversions,” *Westminster University, London*, vol. 1998, pp. 1–31, 1998.
- [13] Pixabay, <https://pixabay.com/photos/river-boats-phong-nha-vietnam-8105970/>, 2023. accessed: 2023-07-13.
- [14] 柳澤昂輝, 野元貴史, 渡辺義浩, “高速プロジェクタ・カメラを用いた動的環境下における見かけ操作の基礎検証”, *SIG-MR*, vol. 2020, no. 9, pp. 1–5, 2020.