



高速 DMD プロジェクタを用いた 運動追従多値画像の知覚の評価

大城和可菜¹⁾, 鏡慎吾^{2)†}, 橋本浩一²⁾

1) 東北大学 工学部 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)

2) 東北大学 大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)

† swk(at)ic.is.tohoku.ac.jp

概要:

近年 DMD (Digital Micromirror Device) を用いて高速な運動追従を実現するディスプレイシステムが複数提案されている。DMD において多値画像は、異なる時刻に提示される複数の二値画像の重ね合わせとして表現されるため、提示方法やその諸元によっては画質劣化や追従遅れが知覚されることが懸念される。しかしながらその定量的な評価は十分に行われていない。そこで本稿では、異なる方式で表示される運動追従映像の知覚を比較する実験について報告する。

キーワード： 視覚, 入出力デバイス, 高速プロジェクタ

1. はじめに

実世界に対する映像プロジェクションをインタラクティブなコンテンツの表現に利用する際、運動検出から映像提示に至るレイテンシを低減することが重要な課題となる。DLP (Digital Light Processing) プロジェクタの光変調素子として用いられる DMD (Digital Micromirror Device) は高速駆動が可能であり、高フレームレートの映像生成や低レイテンシの映像切り替えを実現できる。素早く動く対象面上に追従投影を行うプロジェクタ [1, 2, 3] や、光学シースル型ヘッドマウントディスプレイ [4, 5], スタイラス型インタラクティブディスプレイ [6] といった低レイテンシが要求されるシステムのほか、画素ごとに可視光通信の可能なディスプレイ [7] など、さまざまな応用が提案されている。

DMD は画素に対応する微小ミラーからなる反射型の空間光変調素子であり、2 値モノクロ画像を数 kHz から数十 kHz のレートで表示することができる。これによって高速に切り替わるバイナリフレーム群が観察者の目で時間積分されることで多値映像として知覚される。光源の明るさが一定の場合、 $(2^N - 1)$ 時刻のバイナリフレームで 1 ビデオフレームを構成し、ミラーのオン・オフによるパルス幅変調 (PWM) によって各画素の輝度を表現することで、 N ビット多値画像を表示できる。また、光源の色を切り替えることでカラー多値映像が表現される。

映像を低レイテンシで運動追従させる方法には、大別して 2 つのアプローチがある。1 つはビデオフレーム時間自体を短縮するアプローチである。光源の明るさをバイナリフレームごとに変化させることができれば、PWM 変調に比べて少ないバイナリフレーム数で同じ階調の輝度を表現

することができる [8, 9]。運動追従に要求される時間粒度までビデオフレーム時間を十分に短くすることで、高速な追従が実現される。

もう 1 つのアプローチは、ビデオフレーム時間自体を短くするのではなく、現時刻において表示するバイナリフレームにのみ運動情報を反映させることで素早い適応を行う方法である。著者らはこれまで、PWM 変調により生成するグレイスケール画像 [10, 11, 1] や PWM と光源輝度変調を組み合わせて生成するカラー画像 [3] に対して、最新バイナリフレームのみを単純に運動追従させる方式を検討してきた。ヘッドマウントディスプレイ用途でも類似の方式が検討されており、運動に適応した理想画像に投影結果が近づくようなバイナリフレームを各時刻で算出し表示する方法が提案されている [4, 5]。

後者のように最新のバイナリフレームのみを運動追従させるアプローチは、データ帯域や DMD の駆動周波数への要求を低く抑えることができ、また、光源からの光の利用効率を高めやすい。したがってシステムの低コスト化を見込むことができる。一方、実際に高フレームレート映像を生成する前者のアプローチと比べて、本当に同様の映像視認性が確保できているのか、特に追従遅れが知覚されることがないのかといった点が懸念されるが、そのような観点での定量的な評価は著者らの知る限り報告されていない。

そこで本研究では、運動する平面へのカラー多値映像の追従投影を模擬した映像提示系を構築して、実際に高フレームレート映像を生成して運動追従させる場合とバイナリフレームごとの運動追従のみを行う場合について、視認性や遅れの知覚についての主観評価実験と、両者を区別できる

かどうかの識別実験を通じて比較検討する。

2. 映像提示法

著者らの過去の研究 [10, 11] では、PWM 変調によるモノクロ多値画像を平行移動させながら表示する際に、通常の DLP プロジェクタと同様にビデオフレームごとに位置を更新する場合をベースラインとして、バイナリフレームごと (あるいは複数のバイナリフレームごと) に位置を更新することの効果を主観評価により検討した。その結果、ベースラインに比べて動きぼけの少ない映像を知覚できることを報告している。これに対して本研究では、高フレームレート映像を表示する場合をベースラインとして比較検討を行うことと、運動追従に際する遅れ知覚の有無の検討を行うことを目的とする。

2.1 表示モード

上記の目的のため、4 ビットカラー画像を提示する以下の 4 つの表示モードを実装する。

- (1) バイナリフレーム更新モード (長ビデオフレーム): BFU_L
- (2) バイナリフレーム更新モード (中ビデオフレーム): BFU_M
- (3) バイナリフレーム更新モード (短ビデオフレーム): BFU_S
- (4) 高フレームレートモード: HFR

ベースラインとなる HFR モードでは、光源の相対輝度を $(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8})$ の 4 レベルで変化させながらそれぞれに対応する重みのビットプレーンを DMD 上に表示することで 4 ビット多値画像を表示する。RGB 3 チャンネルの表示には 12 バイナリフレームを要する。バイナリフレーム時間を 0.14 ms と設定することで、ビデオフレーム時間を 1.68 ms (ビデオフレームレート 595 fps 相当) とする。

バイナリフレーム更新モードでは、PWM 変調により $2^4 - 1 = 15$ バイナリフレームで 4 ビット多値画像を表示する。3 チャンネルの表示には 45 バイナリフレームを要する。ビデオフレーム長を変化させることによる効果を見るため、バイナリフレーム時間を 0.84 ms, 0.42 ms, 0.21 ms と設定したものをそれぞれ BFU_L, BFU_M, BFU_S (それぞれビデオフレームレートは 26 fps, 53 fps, 106 fps 相当) とする。光源の輝度は一定値であるが、HFR モードと明るさの違いが知覚されないよう調整する。

いずれのモードでも、アーティファクト低減のため、表示順序は各カラーチャンネルが 1 時刻ごとに現れるように配置し、BFU モードではカラーチャンネル内の表示順序に標準的なビット分割を適用する。

2.2 運動追従投影の模擬

遅れの知覚の有無を検証するためには、基準となる運動の提示が必要となる。仮に投影対象面を物理的に動かしてそれに対する追従投影を行うとすると、比較実験に際して動きの再現性を担保するのが難しく、また、運動追跡処理や通信に起因する遅れや誤差の影響を排除するのが難しい。

本研究では、表示モードによる影響のみを純粋に評価するため、追従の基準となる運動も映像として表示することとする。具体的には、白色のバイナリ画像として表現され

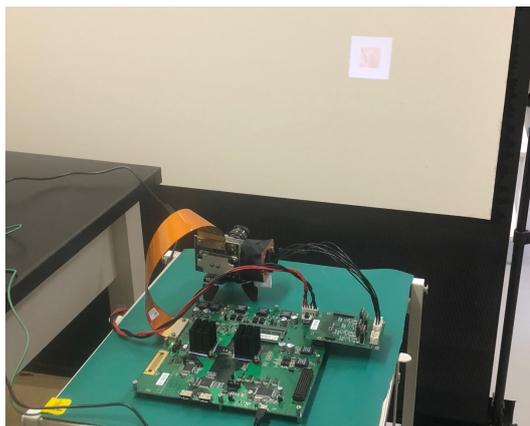


図 1: 評価に用いた映像提示環境。実際には室内照明を消灯した上で実験を行った。

た四角形を表示し、その中央にカラー多値画像を表示する。両者は運動して固定スクリーン内を運動する。

BFU モードでは PWM 変調が採用されているため、白色領域の画素はすべての時刻において最大輝度で点灯している。RGB のカラーチャンネルは順次表示されているが、それらは十分に短い時間で切り替わっており、実際にいずれの条件においても実験参加者から色の分離が知覚されたと報告されることはなかった。すなわち隣接 3 時刻の RGB はほぼ同時に投影されているとみなしてよく、したがって白色領域の表示はバイナリ画像の表示と等価であり、HFR モードと同様に知覚されると考えてよい。よって、これを基準として中央のカラー画像領域の遅れ知覚の有無を評価することができる。

3. 映像評価実験

3.1 方法

3.1.1 装置と参加者

本実験では、Texas Instruments 製 0.7" XGA DMD (DLP7000) に ViaLUX 製光学系 STAR CORE-07 Optics と Luminus 製カラー LED 光源 SBM-40 を組み合わせ高速カラープロジェクタ [3] を用いた。LED の輝度は電流量によって制御される。

一辺が 300 pixel の白色正方形の中心に一辺 150 pixel の SIDBA Lenna 画像を配置したものが、580 pixel の距離を一定速度で水平に往復する映像を提示した。白色正方形の一辺がスクリーン上で約 90 mm となるようプロジェクタを配置し、その距離で焦点が合うよう DMD と投影レンズ間の距離を調整した。1 往復にかかる時間が約 1.4 s となるよう各表示モードでの単位時間あたりの画素移動量を定めた。

実験は室内照明を消灯した 0.1 ~ 0.5 lx の環境光下で行った。白色を投影した際のスクリーン上の照度は約 70 ~ 80 lx であった。

健常な視力あるいは矯正によって健常な視力を有する大学生と大学院生 (21 歳から 24 歳までの男性) 8 名が実験に参加した。参加者はスクリーンから約 1,200 mm の位置から投影画像を観測した。LED 電流ドライバから生じるスイッ

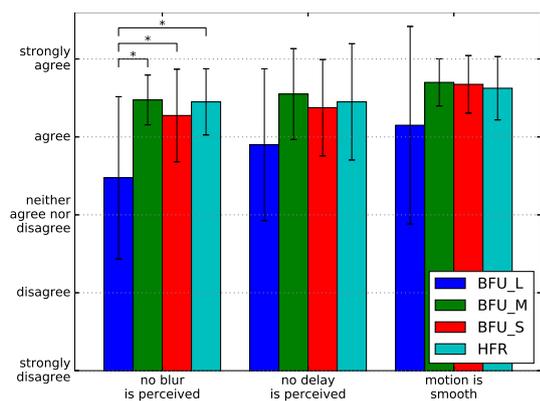


図 2: 主観評価実験の結果。エラーバーは標準偏差を表す。

チング雑音が無作為に選ばれる表示モードを推測する手がかりにならないよう、実験中の参加者は白色雑音を再生するヘッドフォンを装着した。

3.1.2 手順: 主観評価実験

映像の質の主観評価実験を行った。参加者は、無作為な順序で提示される各表示モードの映像を観察し、(a) ボケがなくはっきり見える、(b) 白色正方形に対して遅れなく追従している、(c) 動きがなめらかであるの 3 項目について「非常にそう思う」、「そう思う」、「どちらともいえない」、「そう思わない」、「非常にそう思わない」の 5 段階で評価した。1 人あたり、4 つの表示モードを 5 回ずつ、計 20 回の評価を行った。各回の間には静止した対象画像を提示して評価のための基準とした。1 回あたりの提示時間は参加者がその都度自由に選ぶことができるものとした。

3.1.3 手順: 表示モード識別実験

HFR モードと BFU モードを参加者が識別可能かどうかの実験を行った。参加者は、1 対の表示モードの映像を観察した後、そのうちどちらが HFR モードかを推測し回答した。1 対のうち無作為な一方は HFR であり、他方は BFU 3 種類のいずれかである。参加者は実験に先立って各モードの映像を見ながら説明を受けた。1 人あたりの識別の試行は、3 種類の BFU それぞれにつき 10 回ずつ、計 30 対とした。

3.2 結果

主観評価実験の結果を図 2 に示す。表示モードを要因とする 4 水準分散分析の結果、評価項目 (a) 「ボケがなくはっきり見える」に対してのみ表示モードの有意な主効果が 1% 水準で認められた。Ryan の方法による水準間の多重比較を行ったところ、BFU_L とそれ以外のすべてのモード間で 5% 水準の有意差が認められた。

表示モード識別実験の結果を図 3 に示す。1 要因 3 水準分散分析の結果、BFU モードの種類は正解率に対して 1% 水準で有意な主効果を持つことが認められた。Ryan の方法による水準間の多重比較の結果、BFU_L と他の 2 つのモード間で 5% 水準の有意差が認められた。

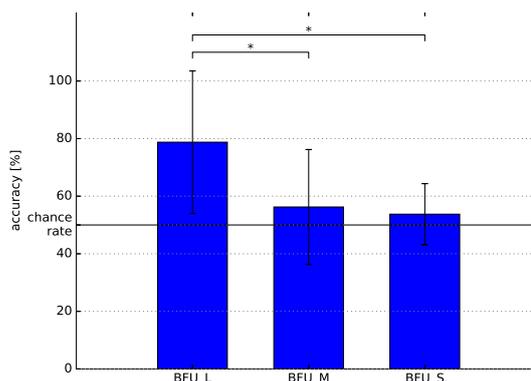


図 3: モード識別実験の正解率。

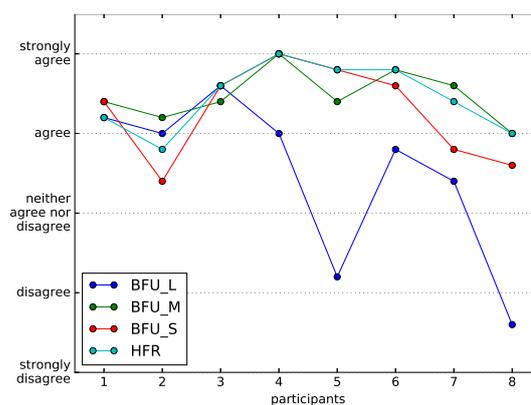


図 4: 「ボケがなくはっきり見える」ことの参加者ごとの主観評価。

4. 考察

主観評価およびモード識別のいずれの実験結果からも、BFU モードでビデオフレーム時間を 30 fps 相当程度よりもビデオフレーム時間を長く取ると、知覚される映像の質に悪影響が現れることがわかる。特にぼけの知覚が顕著に現れるが、追従性やなめらかさに関しても平均評価値を落としている。これに対して、ビデオフレーム時間を 60 fps 相当程度まで短くすれば、BFU 技術によって 500 fps を超える高フレームレート表示に対して遜色のない映像知覚を与えられることが示唆された。なお、これらの結果には個人差の影響も大きいことに注意を要する。3 項目の参加者ごとの評価結果を図 4, 5, 6 に示す。

また、BFU_S と BFU_M が HFR と比較して遜色のない映像品質を実現できることと、これらが全く同等に知覚されることは別の話であることにも注意を要する。図 3 を見ると BFU_S と BFU_M の結果はほぼチャンスレートであるが、わずかに正解が上回っている。図 7 に示す参加者ごとの識別結果を見ても正解側への偏りは否めない。個別に見ると、例えば参加者 5 は BFU_M と HFR を 10 回中 9 回正しく識別しており、これが偶然であるとは考えにくい。主観評価値としては差異が出ないものの、識別の助けになる何らかの手がかりが現れている可能性はある。しかし自由コメントから判断する限り、そのような手がかりを意識的に用いていた参加者はいなかったと思われる。

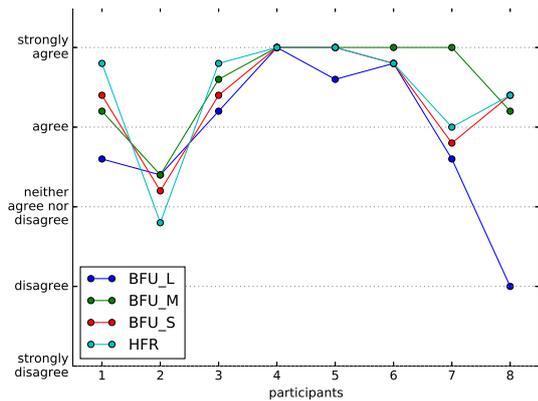


図 5: 「遅れなく追従している」ことの参加者ごとの主観評価。

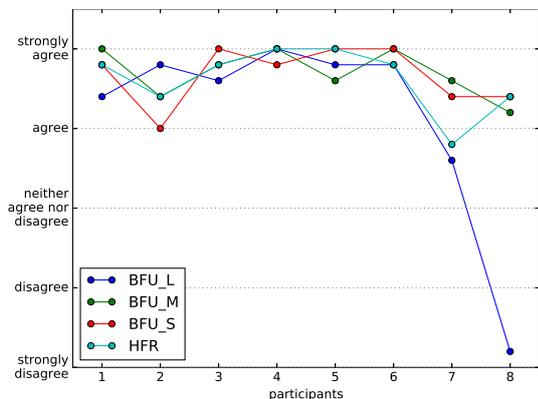


図 6: 「動きがなめらかである」ことの参加者ごとの主観評価。

5. 結言

高速な運動追従投影を実現するための DMD を用いた多値画像表示方法について、評価実験を行った。500 fps 程度の高フレームレート映像を実際に提示するのと比較して、60 fps 程度の映像を構成する個々のバイナリフレームを即座に運動追従させる方式は、少なくとも主観評価においては遜色のない知覚を与えることができることが示唆された。今後の課題として、異なるタイプの映像の場合や複雑な運動を行う場合などについての検討や、バイナリフレームへの運動反映を行う他の手法 [4, 5] との比較検討を行うこと

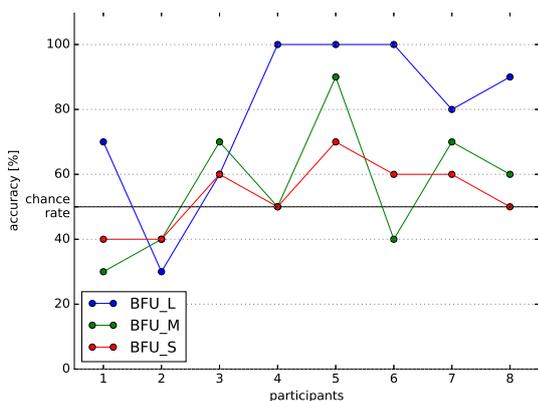


図 7: モード識別実験の参加者ごとの正解率が挙げられる。

謝辞 本研究の一部は JST ACCEL JPMJAC1601 および 科研費 16H02853, 16H06536 の支援を受けた。

参考文献

- [1] Shingo Kagami and Koichi Hashimoto. Sticky projection mapping: 450-fps tracking projection onto a moving planar surface. In *SIGGRAPH Asia 2015 Emerging Technologies*, 2015. Article no.23.
- [2] Gaku Narita, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Dynamic projection mapping onto deforming non-rigid surface using deformable dot cluster marker. *IEEE TVCG*, Vol. 23, No. 3, pp. 1235–1248, 2017.
- [3] Shingo Kagami and Koichi Hashimoto. A full-color single-chip-dlp projector with an embedded 2400-fps homography warping engine. In *SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies*, 2018.
- [4] Feng Zheng, Turner Whitted, Anselmo Lastra, Peter Lincoln, Andrei State, Andrew Maimone, and Henry Fuchs. Minimizing latency for augmented reality displays: Frames considered harmful. In *ISMAR 2014*, pp. 195–200, 2014.
- [5] Peter Lincoln, Alex Blate, Montek Singh, Turner Whitted, Andrei State, Anselmo Lastra, and Henry Fuchs. From motion to photons in 80 microseconds: Towards minimal latency for virtual and augmented reality. *IEEE TVCG*, Vol. 22, No. 4, pp. 1367–1376, 2016.
- [6] Albert Ng, Michelle Annett, Paul Dietz, Anoop Gupta, and Walter F. Bischof. In the blink of an eye: Investigating latency perception during stylus interaction. In *CHI 2014*, 2014.
- [7] 平木剛史, 小泉実加, 周磊杰, 福嶋政期, 苗村健. 可視光通信プロジェクタの表現力向上に向けたデータ転送と光源制御の研究. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 21, No. 1, pp. 197–206, 2016.
- [8] Oliver Bimber, Daisuke Iwai, Gordon Wetzstein, and Anselm Grundhöfer. The visual computing of projector-camera systems. In *State-of-The-Art Report, EUROGRAPHICS 2007*, 2007.
- [9] 成田岳, 江連悠貴, 湯浅剛, 角野究, 渡辺義浩, 石川正俊. 1000fps・8bit 階調と低レイテンシ投影を実現する高速プロジェクタの開発. 第 20 回日本バーチャルリアリティ学会大会, pp. 162–165, 2015.
- [10] 井上智之, 鏡慎吾, 橋本浩一. 高速 DMD プロジェクタを用いた動きボケの少ない映像投影. *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008*, pp. 2P2–E15, 2008.
- [11] 吉越太郎, 鏡慎吾, 橋本浩一. DMD プロジェクタのための動きボケ低減手法の評価. 計測自動制御学会東北支部第 264 回研究集会, pp. 264–7, 2011.