



DMD プロジェクタにおける運動追従多値画像表示のための バイナリフレーム更新手法の比較検討

Comparative study of binary frame updating methods for displaying
motion-adaptive multi-valued images with a DMD projector

大城和可菜¹⁾, 鏡慎吾^{1)†}, 橋本浩一¹⁾

Wakana OSHIRO, Shingo KAGAMI, and Koichi HASHIMOTO

1) 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: DMD (Digital Micromirror Device) を用いたプロジェクタシステムは高速な投影を可能にするため、投影対象が運動する際の追従投影に適している。高速な運動追従投影には大別してビデオフレームレートを高速にする方法とバイナリフレームごとに運動適応を行う方法がある。後者の方法は光源の利用効率やデータ帯域などの観点から低コストであるという利点がある一方で、提示方法によっては画質劣化が懸念される。本研究ではバイナリフレームごとに運動適応する複数の手法によってカラー画像の運動追従投影を行い、主観評価実験を実施することで知覚に及ぼす影響の検討を行う。

キーワード: 心理物理実験, 運動追従投影, 視覚, プロジェクションマッピング

1. 緒言

プロジェクタによる投影コンテンツとのインタラクションを考える上で、遅延の削減は重要な課題である。DMD (Digital Micromirror Device) は数十 kHz 程度で高速に駆動することが可能なため、低遅延なプロジェクタシステムに広く用いられている。DMD は画素数分の小さなミラーから構成されており、ミラーの傾きを変えて ON/OFF の状態を作りだすことで二値画像の投影を可能にする。グレースケール画像やカラー画像のような多値画像は、複数のバイナリフレームの時間積分が知覚されることにより表現される。

運動する投影対象に対して追従して投影を行う運動追従投影では低遅延な投影が望まれる。高速な運動追従投影には大別して2つの方法があり、1つ目は実際にビデオフレームレートを高速化する方法 [1] で、2つ目はバイナリフレームごとに運動適応を行う方法である。前者の方法はバイナリフレームごとに光源の輝度変調を行うことで、多値画像表現に必要なバイナリフレーム数を削減し、ビデオフレーム時間の短縮を図る方法である。この方法には光の利用効率が落ちるといった短所がある。また、インタラクションに必要なフレームレートは数 kHz 程度であるのに対し、この方法ではカラー化や階調の表現のためにバイナリフレームレートを数十 kHz 程度まで高める必要がある。したがって、数 kHz 程度で駆動する廉価な DMD は使用できないという短所がある。

後者の方法には Zheng ら [2] や Licoln ら [3] の手法の

ように新たなバイナリフレームの生成段階において最新の位置情報に適応する方法がある。本稿ではそれぞれの手法を残差二値化法 (Residual Thresholding), 確率的二値化法 (Random Thresholding) と呼ぶ。同様のアプローチとして、著者らのグループが提案した BFW (Binary Frame Warping) 法 [4][5] がある。BFW 法では、通常の DMD プロジェクタと同様に、ミラーの ON/OFF の時間の割合を変化させる PWM (Pulse Width Modulation) 方式によって輝度を表現するが、DMD に送出する最新のバイナリフレームに対して、最新の位置情報を用いて座標変換を行う。

一方で、DMD は複数のバイナリフレームが時間積分されることで多値画像を表現するために、バイナリフレームごとに運動適応を行う手法では過去のバイナリフレームが知覚に影響を与えることでぼけや遅れなどの画質劣化が現れることが懸念される。著者らは前報にて BFW 法でビデオフレーム時間を変更した場合の知覚評価実験を実施した [6]。ぼけ、滑らかさ、遅れの3つの項目についての投影画像の主観評価実験および、高フレームレート投影と BFW 法による投影の識別実験を行ったところ、ビデオフレームレート 60 fps 相当の BFW 法は、500 fps を超える高フレームレート投影と遜色のない映像の質が提供できることが示唆された。

本研究ではバイナリフレームごとに運動適応を行う方法である BFW 法、残差二値化法、確率的二値化法と高フレームレート投影による運動追従模擬投影を比較するための検討を行う。前報との違いとして、新たに投影対象の運動と

して回転運動を考慮し、ITU-R の勧告 [7] を参考に改善された主観評価実験を実施する。また、残差二値化法、確率的二値化法に関して、原著者らが検討していないカラー画像の投影およびバイナリフレームレートの制限について検討する。検討結果から、特にバイナリフレームレートに制限がある場合には、残差二値化法や確率的二値化法は知覚される画質の劣化が無視できず、一方 BFW 法では高フレームレート投影と同等の主観評価が得られることを示す。

2. 高速な運動追従投影手法

先述したように、DMD を用いて高速に運動追従多値画像を表示する手法は大別して 2 種類ある。1 つ目は実際にビデオフレームレートを高速化する方法で、本稿では HFR (High Frame Rate) 法と呼ぶ。2 つ目はバイナリフレームごとに運動適応を行う方法で、本研究では BFW 法、残差二値化法、確率的二値化法について検討を行う。

HFR 法はバイナリフレームごとに輝度変調を行うことで多値画像の表示に必要なビデオフレーム数を削減し、実際にビデオフレーム時間を短縮することで投影の高速化を図る。

BFW 法は PWM で多値画像からバイナリフレーム列を生成し、各バイナリフレームに対して座標変換によって、その時刻での最新の運動情報に適応させる。

残差二値化法 [2] は最新の移動情報を元にバイナリフレームの生成を行う手法の 1 つである。この手法では過去の複数フレームの平均を観察者が知覚している画像と考える。以下ではこれを積分画像と呼ぶ。ある時刻で表示したい理想画像と積分画像の輝度値の大小を比較して、積分画像の輝度値よりも理想画像の輝度値が大きければ DMD のミラーを ON に、小さければ OFF にする。

確率的二値化法 [3] は Zheng ら [2] と同じグループの改良手法であり、最新の移動情報を元にバイナリフレームの生成を行う手法の 1 つである。バイナリフレーム生成のたびに乱数をしきい値として二値化を行う。ある時刻で投影したいグレースケール画像の輝度値と、その時刻での乱数値の大小を比較し、乱数値よりも投影したいグレースケール画像の輝度値が大きければ DMD のミラーを ON に、小さければ OFF にする。

3. 実装および実験の予備検討

実験条件を定めるため、各手法について予備検討を行った。映像提示には Texas Instruments 製 0.7" XGA DMD (DLP7000) と ViaLUX 製光学系 STAR-07 CORE Optics と Luminus 製カラー LED 光源 SBM-40 から構成されている高速プロジェクタ [5] を用いた。この装置はバイナリフレーム時間を最短で 0.14 ms に設定することができる。

本研究の目的は、投影手法による知覚比較なので通信による遅れを防ぐため一連の運動画像は予めメモリに入れたものを投影しており、リアルタイムでの画像生成は行っていない。使用機器の画像保存に使用できるメモリ領域は約 3.75 Gbyte で、これはバイナリ画像約 38,000 枚に相当する

ため、予めロードできる画像の枚数を考慮して投影画像は 4 ビットのカラー画像とした。また、4 ビット画像とすることで高フレームレート投影を約 595 fps に高めることができるという利点もある。また、知覚の比較実験を行うにあたって、投影対象物体については運動の再現性を担保し、通信に起因する遅れや誤差の影響を排除するために白色正方形を投影することで投影対象である運動物体の模擬とした。

3.1 HFR 法

HFR 法では、4 ビット RGB カラー画像の各チャンネルについて光源の相対輝度を $(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8})$ の 4 レベルで変化させながらそれぞれの重みに対応するビットプレーンを表示することで、各チャンネルあたり 4 バイナリフレームを用いて画像を表示するので合計で 12 バイナリフレームが 1 ビデオフレームに相当する。バイナリフレーム時間は機器の最短である 0.14 ms に設定したため、ビデオフレーム時間は 1.68 ms であり、これはビデオフレームレート約 595 fps に相当する。

3.2 BFW (Binary Frame Warping) 法

BFW 法では、RGB カラー画像の投影では各チャンネルにつき $2^4 - 1 = 15$ バイナリフレームを要するので、合計で 45 バイナリフレームが 1 ビデオフレームに相当する。前報の結果 [6] を参考にバイナリフレーム時間は 0.42 ms と設定したため、ビデオフレーム時間は 18.9 ms であり、これはビデオフレームレート約 53 fps に相当する。

3.3 残差二値化法 (Residual Thresholding)

残差二値化法の実装に先立って、積分画像の計算に用いる適切なバイナリフレーム数を定めるために予備実験を行った。

グレースケール画像を対象とした Zheng らの先行研究では、過去 64 フレームから積分画像を計算しており、彼らの使用機器のバイナリフレーム時間は 0.04 ms であったので、計算に用いられたフレームは実時間 2.56 ms に相当する。

そこで Zheng らの先行研究における積分時間と同じ設定になるようにバイナリフレーム時間を 0.14 ms、各チャンネルで積分画像の計算に用いるフレーム数を 6 として投影を行ったところ、画像の階調が落ちて表示された。

画像の階調が落ちる理由について、ここでは簡単のために静止画の投影を行う場合について考える。積分画像生成の計算に用いるフレームを N とすると、積分画像は $(N + 1)$ 階調になる。理想画像の輝度値を k とすると、はじめ積分画像の輝度値は 0 なので輝度値が k 達するまで DMD を ON にする。 k フレーム目で理想の輝度値に達するので、 $(k + 1)$ フレーム目以降 $(N - k + 1)$ 回は DMD を OFF にする。そして理想輝度値に達するまで k 回 DMD を ON にするということを繰り返すため、バイナリフレーム列は周期 $(N + 1)$ フレームの繰り返しとなる。すなわち生成画像は、理想画像の階調数に関わらず $(N + 1)$ 階調に量子化されてしまう。

そこで、実時間で先行研究の条件と揃えるのではなく、輝度変調を行わない 4 ビット画像の投影には階調を維持するために最低でも 15 バイナリフレームが必要であることを鑑みて、1 チャンネルあたり 15 バイナリフレームを積分画像

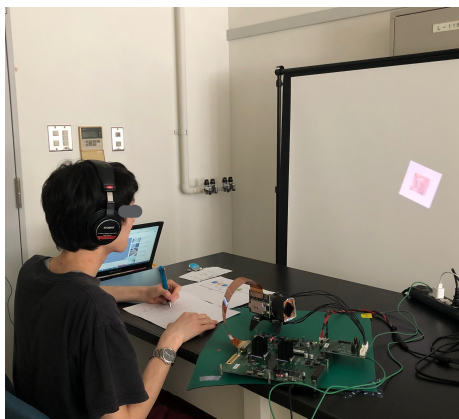


図 1: 実験の映像提示環境. 実験は室内照明を消灯した 0.1~15 lx の環境光下で実施された.

計算に用いるフレーム数と定めて投影を行った. その結果, 縞状のアーティファクトが明瞭に知覚された. 積分画像計算に用いる適切なフレーム数の設定が難しいこと, および実験参加者の負担を鑑みて Zheng の手法は実験から除いた.

3.4 確率的二値化法 (Random Thresholding)

Lincoln らの先行研究においてはグレースケール画像の投影を行っていたため, カラー画像の投影を行うにあたって, 適切なバイナリフレーム時間を調べるため予備実験を実施した. バイナリフレーム時間を機器の最短の時間である 0.14 ms と設定したところ, ちらつきが知覚された. ちらつきの影響を少しでも削減するために, 実験でのバイナリフレーム時間は 0.14 ms とした.

4. 主観評価実験

HFR 法, BFW 法, 確率的二値化法について画質の知覚評価を行うため, 主観評価実験を実施した. 映像提示に使用した機器は 3 章で述べた予備検討時と同じものである.

4.1 参加者と実験条件

実験の参加者は 21 歳から 25 歳までの大学生および大学院生 15 名 (男性 10 名, 女性 5 名) で, 参加者全員が健常な視力あるいは矯正により健常な視力を有している. 実験の様子を図 1 に示す. 参加者はスクリーンから約 1,000 mm 離れた位置から投影画像を観測し, 評価を行った. また, 実験は室内照明を消灯した 0.1~15 lx の環境光下で実施された.

参加者が観測する画像を図 2 に示す. 白色正方形は運動追従対象の模擬であり, 評価対象画像と同様にプロジェクタによって, ただし二値画像として投影する. 白色正方形の一边は 300 pixel となっており, その中心に一边が 150 pixel の 4 ビット画像 Lenna を配置した画像が水平方向 450 pixel の幅を一定速度で往復しながら, スクリーンに垂直な軸周りに回転運動する映像の投影を行う. 往復の速度は 1 往復にかかる時間が約 1.5 秒, 回転速度は 1 往復の間に約 45 度傾いて元に戻るように一定の回転角速度に定めた. プロジェクタは白色正方形の一边がスクリーン上で約 450 mm となるように配置した.

ITU-R による勧告 BT.500-11[7] を参考に DSCQS 法

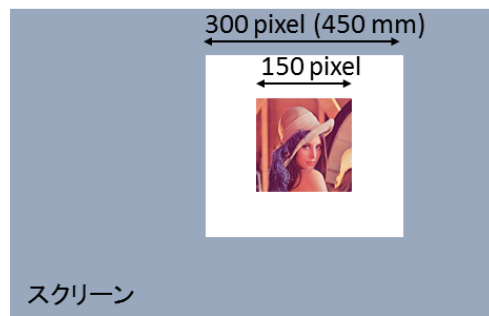


図 2: 映像評価における投影画像. 白色正方形は追従投影対象の模擬であり, 評価対象画像とともに並進運動と回転運動を組み合わせた運動をする.

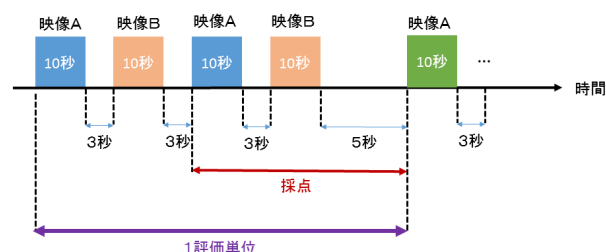


図 3: DSCQS 法による映像評価の流れ. 評価映像 A, B の間には投影画像の平均輝度値のグレー画像を提示する.

(Double Stimulus Continuous Quality Scale Method) によって画質の主観評価実験を実施した. 図 3 に概要を示す. 参加者は 1 つの問題ごとに一對の映像 A, B を各 2 回観測する. 対のうち 1 つは HFR 法による投影であり, 残りの一方は HFR 法, BFW 法, 確率的二値化法のうちいずれか 1 つによる投影である. 3 種類のモードそれぞれにつき 5 回ずつ評価をつけてもらった. 映像の投影時間は 10 秒であり, それぞれの投影の間には画像の平均輝度をもつ単一グレーの画像を 3 秒表示する. また, 評価の記入は 2 回目の投影開始以後に行うものとする. 参加者には白色正方形の中心に画像が追従投影されているかという点についても考慮したうえで, 画質という観点から評価するように指示をした. 評価紙には, 垂直方向の長さが 100 mm の線分が印刷されており, 20 mm ごとに「非常に良い」「良い」「普通」「悪い」「非常に悪い」の項目を付けた. 参加者は線分上に印をつけることで評価を記入するが, 5 段階の評価ではなく連続値として評価をした. 毎問に必ず含まれる HFR 法を基準として, HFR 法と評価対象の長さの差を 1 mm あたり 1 点と換算して得点とした.

4.2 実験結果

主観評価実験の結果を図 4,5 に示す. HFR および BFW については標準偏差が約 3 点で両者の平均得点の差は約 0.2 点であるのに対して, 確率的二値化法では, 標準偏差は 21.99 点で平均得点は HFR 法を約 44 点下回る結果となった.

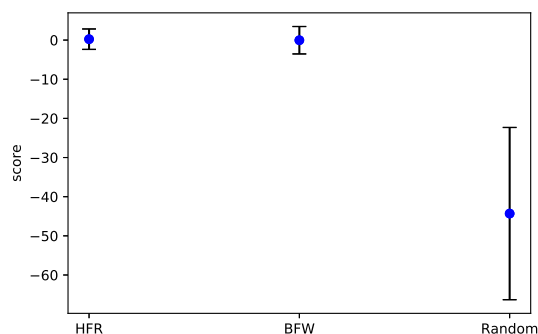


図 4: 各手法の平均得点および標準偏差。エラーバーは標準偏差を表す。

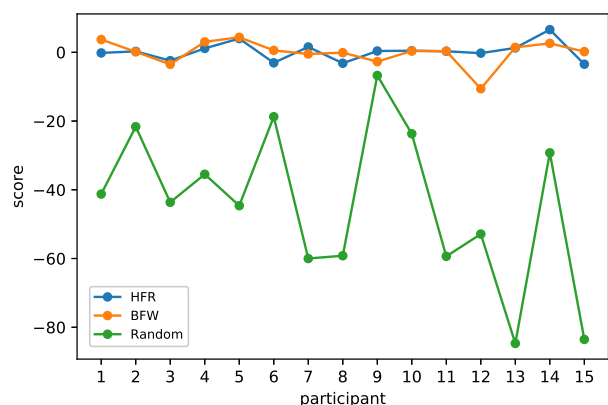


図 5: 参加者ごとの評価得点。縦軸が得点，横軸が参加者を表している。

5. 考察

実験結果から、BFW 法はビデオフレームレート 60 fps 相当で HFR 法と少なくとも主観評価においては遜色のない画質が提供できるといえる。また、BFW 法と同様にバイナリフレームごとに最新の位置情報に適應できる手法である確率的二値化法は全体の傾向として得点値は大きく負の値に偏っており、HFR 法の映像と比較して画質評価値が下がっていることが読み取れる。実験参加者の自由コメントでちらつきが知覚されたと報告する者が多かったことから、これはちらつきが知覚されたことによる影響だと考えられる。

また予備実験から残差二値化法について、バイナリフレームレートが数 kHz オーダーに制限されると本研究の運動条件では縞が知覚されるあるいは低階調になるということがわかる。したがってバイナリフレームレートに制限がある場合、バイナリフレームごとに運動適應する手法の中でも BFW 法においてのみ、ビデオフレームレート 500 fps 相当の高フレームレートな映像と同等の画質が提供できる可能性が示唆された。

6. 結言

本研究ではバイナリフレームごとに運動適應を行う方法である BFW 法、残差二値化法、確率的二値化法と、HFR 法による運動追従模擬投影を比較するための検討を行った。4 ビットカラー画像の投影で、バイナリフレーム時間が数 kHz オーダーに制限されている場合、残差二値化法や確率的二値化法では画質劣化が知覚された。主観評価実験で確率的二値化法は HFR 法や BFW 法と比較して得点を落とした一方で、ビデオフレームレート約 60 fps に相当する BFW 法による投影はビデオフレームレート約 500 fps の HFR 法による投影と同等の画質を提供できると示唆された。

謝辞 本研究の一部は、JST ACCEL JPMJAC1601 および科研費 19H04146, 16H02853, 16H06536 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] O. Bimber, D. Iwai, G. Wetzstein, and A. Grundhöfer, “The visual computing of projector-camera systems,” *EUROGRAPHICS 2007 State of The Art Report*, 2007.
- [2] F. Zheng, T. Whitted, A. Lastra, P. Lincoln, A. State, A. Maimone, and H. Fuchs, “Minimizing latency for augmented reality displays: Frames considered harmful,” *2014 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp.195–200, 2014.
- [3] P. Lincoln, A. Blate, M. Singh, T. Whitted, A. State, A. Lastra, and H. Fuchs, “From motion to photons in 80 microseconds: Towards minimal latency for virtual and augmented reality,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.22, No.4, pp. 1367–1376, 2016.
- [4] S. Kagami and K. Hashimoto, “Sticky projection mapping: 450-fps tracking projection onto a moving planar surface,” *SIGGRAPH Asia 2015 Emerging Technologies*, Article No.23, 2015.
- [5] S. Kagami and K. Hashimoto, “A Full-color single-chip-DLP Projector with an Embedded 2400-fps Homography Warping Engine,” *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies*, No.1, pp. 1–2, 2018.
- [6] W. Oshiro, S. Kagami, K. Hashimoto, “Perception of Motion-Adaptive Color Images Displayed by a High-Speed DMD Projector,” *International Workshops on Perception-driven Graphics and Displays for VR and AR 2019 (PerGraVAR2019)*, 2019.
- [7] ITU-R BT.500-11, “5 The double-stimulus continuous quality-scale (DSCQS) method,” pp.14–18, 2002.