

DMD プロジェクタのための動きボケ低減手法の評価

Evaluation of Motion Blur Reduction Methods for a DMD Projector

吉越太郎*, 鏡慎吾**, 橋本浩一**

Taro Yoshikoshi*, Shingo Kagami**, Koichi Hashimoto**

* 東北大学 工学部

** 東北大学 大学院情報科学研究科

* School of Engineering, Tohoku University

** Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

キーワード： 表示デバイス (Display Devices), パルス幅変調方式 (Pulse Width Modulation)

連絡先： 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01 東北大学 情報科学研究科
システム情報科学専攻 橋本・荒井研究室 / 鏡研究室 吉越太郎

TEL 022-795-7020, FAX 022-795-7020, E-mail: yoshikoshi@ic.is.tohoku.ac.jp

1. はじめに

人間は視覚を通して多くの情報を取得する。このため、表示デバイスは視覚情報を与える手段として重要である。表示デバイスは発光型と非発光型の大きく 2 種類に分類される¹⁾。発光型とは素子自体が発光することで画像を表示するタイプのデバイスであり、非発光型とは素子自体は発光せず、光の透過や反射を利用して表示するタイプのデバイスである。

非発光型の表示デバイスの多くは通常、1 フレーム間は常に同じ画像を表示し続けるホールド型表示方式である。視覚対象が動く場合、人間の眼は視覚対象を追従し注視する追従性眼球運動を起こす。このため、ホールド型表示方式により移動する画像を人間が見た場合、1 フレーム間で眼の動きと画像の表示位置との間にズレが生じ、画像がボケて見える。この現象は動き

ボケと呼ばれる。非発光型の表示デバイスである DMD は、多数のマイクロミラーから構成される MEMS デバイスである²⁾。多数のミラーは独立して ON (投影) および OFF (非投影) に切り替えが可能である。ON により白画像を、OFF により黒画像を表示する。よって、各ミラーを独立して駆動させることで、ミラー 1 枚を 1 画素として 2 値パターンの投影が可能である。グレースケールの中間色は、白画像と黒画像の表示時間の比率を制御するパルス幅変調方式により表現する。このため、1 フレームの表現には多くの 2 値パターンが必要となる。例として 1×32 pixels の 4 ビット (16 階調) グレースケール画像を表示する場合を Fig. 1 に示す。この表示方式は 1 フレームすべての時間が表示に利用されるため、ホールド型表示方式と同様に移動する画像に動きボケが生じやすい。

一方、発光型の表示デバイスの多くは、表示素子が発光後直ちに減衰し、画像の表示時間は1フレームよりも短い。このような表示方式はインパルス型表示方式と呼ばれる。インパルス型表示方式はホールド型表示方式と比べて動きボケが発生しにくく、「動きに強い」と言われる。しかし、光源からの光が発光後直ちに減衰するため、光源からの光の強度がホールド型表示方式と等しい場合には、ホールド型表示方式よりも得られる輝度が低い。

動きボケを低減するためには、各デバイスの表示方式の特性に応じた対策が必要となる。我々の研究室ではDMDの動きボケに対する対策としてフレーム分割法を提案している³⁾。しかし、その動きボケ低減効果については定量的に明らかにされていない。本稿では、この低減効果を明らかにすることを目的とする。

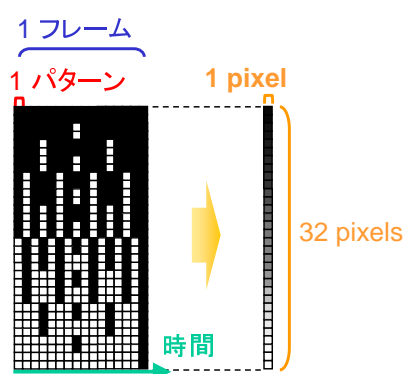


Fig. 1: パルス幅変調方式・4ビット(16階調)グレースケール画像を表示する例。

2. 画像投影手法

2.1 通常の投影手法

4ビット(16階調)グレースケール画像が静止している場合、すなわちフレームが変化しても各画素の輝度値が変化しない場合は、この1フレーム分のパターンが同じ位置に繰り返し投影される。一方、表示画像が移動する場合は通常、1フレームごとに画像の表示位置を移動する。Fig. 1の画像を1フレームごとに表示位置を

移動する場合をFig. 3に示す。横軸が時間、縦軸が位置である。この投影手法による表示を人間が見た場合、1フレーム間で追従性眼球運動による目の動きと移動画像の表示位置との間にズレが生じる。このズレがボケとして認識されるため、移動画像がボケて見える動きボケが生じる。

2.2 倍速駆動法

1つの動きボケ対策手法として、Fig. 2に示す倍速駆動法と呼ばれる手法が提案されている。倍速駆動法は表示するフレームの枚数を増やし、強制的に1フレームあたりの表示時間、つまりホールド型表示時間を短くする技術である。倍速駆動法をDMDに適用すると、Fig. 4のようになる。この手法により画像の表示位置を移動させた場合、目の動きと移動画像の表示位置との間のズレが低減されるため、動きボケが低減される。しかし、倍速駆動法では前後のフレームから画像処理によって補間した中間フレームをその前後のフレーム間に挿入しなければならない。このため、 m 倍速駆動させる場合、通常の手法の m 倍のデータが必要となる。また、DMDのパルス幅変調方式では、1フレームは複数の2値パターンから構成される。このため、1フレームの時間を短くするためには、1パターンを生成するミラーの切り替え速度を上げる必要がある。

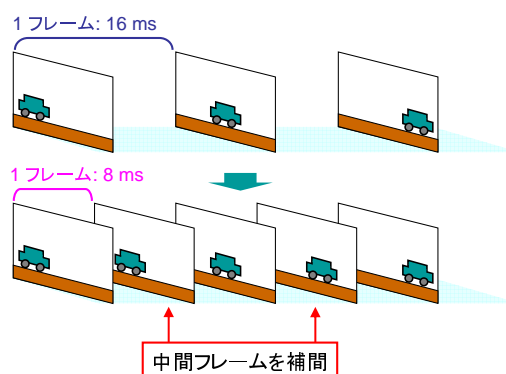


Fig. 2: 倍速駆動法

2.3 フレーム分割法

DMD の動きボケに対する他の対策手法としてフレーム分割法が提案されている³⁾。フレーム分割法では DMD の表示方式であるパルス幅変調方式の特性を利用して 1 フレームを分割する。移動画像を表示する場合、通常は 1 フレームごとに画像の表示位置が移動されるが、フレーム分割法では 1 フレームを n 分割し、 $1/n$ フレームごとに表示位置を移動する。これによりホールド表示時間が実質 $1/n$ 倍されることにより、画像の動きが眼の動きに近づき、動きボケが低減される。4 ビットグレースケール画像で 1 フレームを 16 分割し、 $1/16$ フレームごとに表示位置を移動する場合を Fig. 5 に示す。この手法においては倍速駆動法のように中間フレームを補間する必要はない。また、必要となるデータの量も通常的手法と同等で済む。しかし、この手法では分割したフレームごとに画像の表示位置を計算しなければならない。そのためには、表示画像の移動する方向が既知である必要がある。

1 フレームを 16 分割し、 $1/16$ フレームごとに表示位置を移動する場合には、移動画像の表示位置を $1/16$ フレームごとに計算する必要がある。従来は 1 フレームを 16 分割し、 $1/16$ フレームごとに表示位置を移動する場合と、1 フレームを分割せず、1 フレームごとに表示位置を移動する場合のみについて評価が行われていた。しかし、1 フレームを 16 分割した場合と分割しない場合の中間の場合についての評価は行われていない。1 フレームを 4 分割し、 $1/4$ フレームごとに表示位置を移動する場合を Fig. 6 に示す。このような中間の場合にも動きボケの低減効果が得られるのであれば、16 分割する場合よりも画像の表示位置計算コストを削減できるのではないかと考えられる。

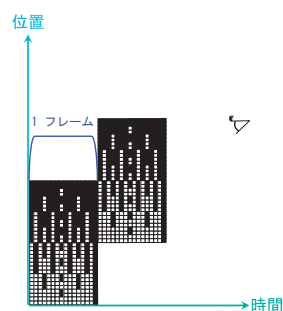


Fig. 3: 通常手法 . 1 フレームごとに画像の表示位置を移動する .

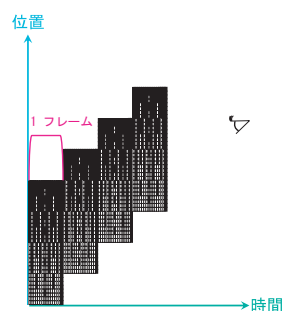


Fig. 4: 倍速駆動法 . 1 フレームの時間は Fig. 3 の $1/2$ になる .

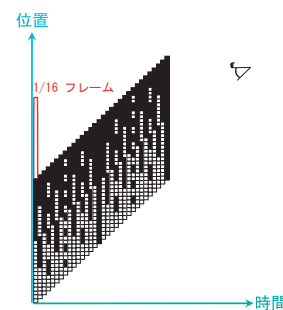


Fig. 5: フレーム分割法 . 4 ビット (16 階調) グレースケール画像を 16 分割する例 .

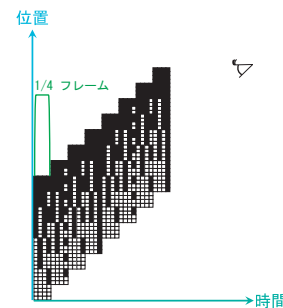


Fig. 6: フレーム分割法 . 4 ビット (16 階調) グレースケール画像を 4 分割する例 .

3. 画質評価実験

3.1 概要

2章で挙げた各投影手法の動きボケ低減効果を定量的に評価するため、画質評価実験を行った。本実験に用いる評価画像は4ビット(16階調)グレースケール画像であり、1フレームは16パターンから構成される。本実験で評価する投影手法は m 倍速、 n 分割して $1/n$ フレームごとに画像の表示位置を移動するとし、

$$(m, n) = (1, 1), (1, 2), (1, 4), (1, 8), (1, 16), \\ (2, 1), (3, 1), (4, 1)$$

の計8種類である。本実験は、用いているメモリボードのメモリ容量の制限から、4ビット画像を用いて、4倍速駆動まで行うことが可能である。また、評価回数が多く実験時間が長時間であると評価者の負担が大きいという理由から、以上の8種類の投影手法を選択して実験を行った。評価者は各投影手法により呈示された評価画像がどのように見えるかを主観的に評価する。画像がどのように見えるかは直接評価する指標がない。そのため、本実験には心理学的測定法を用いる必要がある⁴⁾。心理学的測定法とは、直接観察できない構成概念を数量的に測定する方法である。

実験終了後、各投影手法間の画質に有意な差があるかどうかを評価するために、評価結果を統計的に分析する。本実験では8種類の投影手法(水準)の各投影手法間に有意な差があるかを調べるため、結果の分析として多重比較を行う。多重比較とは、複数の水準がある場合にどの水準間に有意な差があるかを統計的に検定する方法である。

3.2 方法・条件

本実験は、テレビジョン放送画質の主観評価実験を対象にITU-R (International Telecommunication Union-Radiocommunications Sector)

において勧告されている基本的な項目に従って行った⁵⁾。本実験では、評価者に評価画像を計16回呈示する。具体的には、評価画像が8種類の投影手法でそれぞれ2回ずつ計16回呈示される。また、この16回の呈示が行われる順序は完全にランダムである。実験中、各呈示画像がいずれの手法で投影されているかは、実験者および評価者のいずれにもわからない。評価画像と黒画像が30秒間ずつ交互に投影され、評価者は評価画像が投影されている30秒間の間に主観的な評価を行う。評価者は評価用紙に書かれた100mmの線分上の評価値に相当する位置に横線を記入することにより回答する。線分の最上端のスコアを100、最下端のスコアを0とし、記入した横線の位置をスコアとして測定する。

DMDプロジェクタはスクリーンから約1,000mmの位置に設置し、評価者はスクリーンから約2,000mmの位置にて投影画像を観測する。DMDは、Texas Instruments社製Digital Micromirror Device (DMD 0.7XGA 12DDR)を用いた。DMDの制御にはTexas Instruments社製Discovery1100 Controller Boardおよびその表示機能拡張ボードであるViALUX社製ALP-1 (Accessory Light modulator Package)メモリボードを用いた。また、プロジェクタの光源にはDolan Jenner社のFiber-Lite MH-100を用いた。DMDの画素数は $1,024 \times 768$ pixelsであり、スクリーンに投影される画像全体の大きさは約 $500 \text{ mm} \times 375 \text{ mm}$ である。スクリーンの被写体照度はプロジェクタからの投影がない状態で約 0.7 lx 、白画像を投影した状態で約 280 lx である。評価画像には4ビットグレースケールの 512×512 pixelsの画像を用い、DMDによる1フレームの表示には $2^4 = 16$ パターンが必要となる。この画像はスクリーン上では約 $248 \text{ mm} \times 248 \text{ mm}$ の大きさで表示される。画像が移動する範囲はスクリーン上で左右に336 pixelsとする。

4. 結果および考察

3.2 節で述べた方法を用いて、男性 7 名による評価実験を行った。Fig. 7 は各投影手法と画質の平均スコアの関係を示したグラフである。各投影手法を横軸に、画質の平均スコアを縦軸に示した。

4.1 実験結果に対する考察

1 倍速駆動の場合については、分割数の低下に従ってスコアの値も下がっていることがわかる。従来は評価されていなかった 2 分割、4 分割、8 分割については、1 分割と 16 分割の中間的な画質が得られていることがわかる。これより、4 ビットグレースケール画像において分割数を 16 から下げていく場合には、分割数の低下に従い画質は下がるが、画質の低下に伴って画像の表示位置計算コストを削減できると考えられる。

分割数を 1 とした各倍速 (1 倍速、2 倍速、3 倍速、4 倍速) 駆動法については、倍速数を増加させるに従ってスコアの値も高くなっていることがわかる。特に 1 倍速駆動から 2 倍速駆動に変化させた場合におけるスコアの変化は、2 倍速駆動から 4 倍速駆動まで変化させた場合におけるスコアの変化よりもかなり大きくなっている。これより、倍速数を 1 倍速から増加させる場合には、駆動に必要となるデータ量が増加してしまいが、それに伴って画質は改善されることが考えられる。このとき、画質の改善効果は 1 倍速から 2 倍速にした場合が最も大きい。

また、1 倍速駆動において最も分割数が大きい 16 分割は、4 倍速 - 1 分割とほぼ同等のスコアが得られていることがわかる。これより、1 倍速 - 16 分割は 4 倍速 - 1 分割とほぼ同等の画質が得られていると考えられる。また、1 倍速 - 8 分割は 2 倍速 - 1 分割ほどではないが、それに近いスコアが得られていることから、1 倍速 - 8 分割は 2 倍速 - 1 分割とほぼ同等の画質が得られていると考えられる。

4.2 実験結果解析

各投影手法の平均スコアから、各投影手法の画質に有意な差があるかどうかを評価するために多重比較を行った⁶⁾。本論文では、多重比較の中でも基本的な方法の 1 つである Tukey 法を用いた。Tukey 法は各投影手法間の平均スコアの間に有意な差があるのかを統計的に判定する方法である。

各手法の画質に有意な差があるか判定した結果を Fig. 7 中に赤線と * 記号で示す。Fig. 7 中、* は有意水準 5 % で画質に有意な差があることを、** は有意水準 1 % で画質に有意な差があることを示している。心理学領域では有意水準として、5 % 水準を用いて有意な差があるかを判定することが一般的である。1 % 水準で有意な差があることは、5 % 水準よりも厳しい水準で有意な差があり、非常に有意な差があるということを示している。

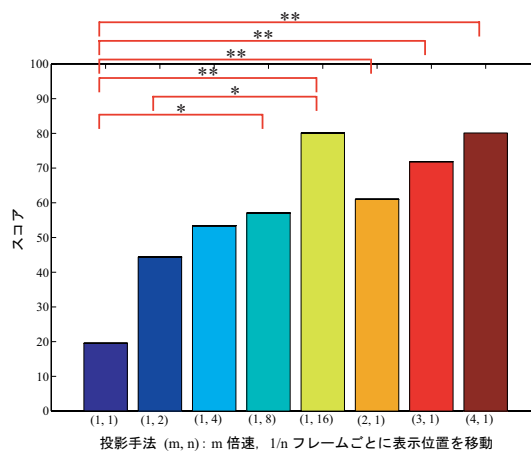


Fig. 7: Tukey 法により各投影手法間に有意な差があるかを判定した結果。* : 有意水準 5 % で画質に有意な差がある。** : 有意水準 1 % で画質に有意な差がある。

4.3 解析結果に対する考察

4.1 節では, 1 倍速 - 16 分割は 4 倍速 - 1 分割とほぼ同等の画質が得られていると述べた. Fig. 7 より, 1 倍速 - 16 分割と 4 倍速 - 1 分割のどちらも 1 倍速 - 1 分割に対しては, 有意水準 1% で有意な差が出ている. しかし, 1 倍速 - 2 分割と 1 倍速 - 16 分割の間には有意水準 5% で有意な差が出ているが, 1 倍速 - 2 分割と 4 倍速 - 1 分割の間には有意な差が出ない. これより, 1 倍速 - 16 分割は 4 倍速 - 1 分割と同等以上の画質が得られていると期待できる.

また, 4.1 節では, 1 倍速 - 8 分割は 2 倍速 - 1 分割とほぼ同等の画質が得られていると述べた. しかし, 1 倍速 - 1 分割に対する有意差を見てみると, 1 倍速 - 8 分割は 5% 水準で有意差が出ているが, 2 倍速 - 1 分割は 5% 水準よりも厳しい 1% 基準で有意差が出ていることがわかる. これより, 1 倍速 - 8 分割, 2 倍速 - 1 分割のどちらも 1 倍速 - 1 分割に対しては有意な画質が得られているが, 1 倍速 - 8 分割よりも 2 倍速 - 1 分割の方が有意な差がある, ということが示唆される. ただし, 示唆されるだけであって, 厳密にはそうであると断定することはできない.

5. おわりに

本稿では, DMD プロジェクタによる投影を想定し, DMD プロジェクタのための動きボケ低減手法をいくつか挙げた. その中でも, フレーム分割法の動きボケ低減効果については, 定量的に明らかにされてはいなかった. そのため, この手法による動きボケ低減効果がどれほどであるのかを定量的に明らかにするために, 画質評価実験を行った.

その結果, 4 ビット (16 階調) グレースケール画像において, 分割数を 16 から下げていく場合には, 分割数の低下に従い画質は下がるが,

画質の低下に伴って画像の表示位置計算コストを削減できることがわかった. 1 倍速 - 16 分割は 4 倍速 - 1 分割と同等以上の画質が得られていると期待できる.

参考文献

- 1) 日本光学会: 光学界の今とこれから, http://annex.jsap.or.jp/OSJ/50th_cd/main/ronbun/index.htm (2002) (as of 2011/02/25)
- 2) D. Dudley, W. Duncan: DLP technology — not just for projectors and TVs, *Photonikinternational*, 98/101 (2006)
- 3) 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 (2008)
- 4) 加藤司: 心理学の研究法 — 実験法・測定法・統計法, 北樹出版 (2007)
- 5) 三橋哲雄, 畑田豊彦, 矢野澄男: 映像情報メディア基幹技術シリーズ 8 映像情報メディア学会編 画像と視覚情報科学, コロナ社, 141/212 (2009)
- 6) 石村貞夫, 石村光資郎: 入門はじめての分散分析と多重比較, 東京図書 (2008)