

ディスプレイの動画質向上のための信号処理技術と  
パルス密度変調による階調表示方式に関する研究

薄井 武順

電気通信大学大学院 情報理工学研究科

博士（工学）学位申請論文

2022年3月

ディスプレイの動画質向上のための信号処理技術と  
パルス密度変調による階調表示方式に関する研究

博士論文審査委員会

主査 志賀 智一 教授

委員 岡田 佳子 教授

西岡 一 教授

山口 浩一 教授

高橋 裕樹 准教授

著作権所有者

薄井 武順

2022年3月

## Abstract

Active-matrix organic light-emitting diode (AM-OLED) displays have been developed as next-generation flat-panel displays (FPDs) for applications such as large-sized televisions and smartphone displays, because of their wide viewing angle, high contrast, fast response time, ultrathin profile, light weight, and compatibility with a flexible substrate. In order to further improve the image quality, it is required to improve the moving image quality. In the digital driving, the pulse width modulation (PWM) method has been mainly used. However, the PWM method suffers from false image contour problems because of the incompatibility of the human vision system. Since high-speed driving is required to mitigate this false image contour, it is difficult to achieve the high framerate that requires further speeding up. Therefore, we proposed a pulse-density modulation (PDM) using a random dither matrix for signal processing. The signal processing method for the PDM driving method have not been studied. Therefore, we investigated a method to realize a driving method of the PDM by using random dither matrix. In order to evaluate the basic image quality of the proposed method, the relationship between the display image quality and the driving frequency was investigated. For the evaluation, the SSIM (Structural Similarity) was used as an objective image quality evaluation. As a result, it was found that a drive frequency of about 15000 Hz is required to obtain a SSIM value of 0.98 using a white-noise mask as a random dither. On the other hands, when using a blue-noise mask as a random dither matrix, it was found that the SSIM value was 0.98 even at a drive frequency of about 6000 Hz.

Finally, our proposed PDM method, the conventional PDM method and the PWM method were compared in moving image quality by image simulation. As a result, it was confirmed that a well-known false image contour was generated in the PWM method at the same driving frequency as the proposed method. Furthermore, even with the conventional PDM method, there was a problem that noise increased, but it was confirmed that the proposed PDM method had good video quality and was excellent in high framerate display.

## 概要

近年、8K などの高精細ディスプレイの実用化が進み、高精細映像による高い臨場感を体験することが可能となっているが、さらなる高画質化のために、動画質の向上が求められている。そのためには、発光時間の短縮や高フレームレート化が有効であるが、発光時間を短くすると高い瞬時輝度が必要となる。有機 EL ディスプレイや LED ディスプレイで用いられるパルス幅変調方式では、偽輪郭の発生による動画質低下や高フレームレート化が難しいなどの問題があった。本論文では、動画質低下の原因である動きぼやけの発生メカニズムを調査し、発光時間の短縮による輝度の低下を抑えつつ動きぼやけの発生を抑えるために三角波形発光に着目した。まず、三角波形発光における動画像の空間周波数と動きぼやけの関係について詳細の解析し、通常のホールド型発光よりも優れていることを示した。さらに、その解析結果から、動きぼやけを抑制するために、三角波形発光に適した補償フィルタを用いた信号処理技術を開発した。画像シミュレーションの結果、三角波形発光と開発した補償フィルタを用いることで、動きぼやけを改善できることを示した。

また、デジタル駆動による安定駆動が可能で、高フレームレート化に適するランダムディザを用いたパルス密度変調による階調表現方式を提案した。信号処理にランダムディザを用いることで、空間解像度を落としても、高フレームレート表示することで動画質を改善し、見た目の空間解像度を向上させることが可能になると考えられる。そこで、画質シミュレーションを用いてその画質を評価した。ランダムディザにブルーノイズマスクを用いた信号処理や、時間方向制御の導入による表示画質と駆動周波数の関係を検証し、実用的な駆動周波数で良好な画質を得られることを示すとともに、動画像においても高フレームレート表示が可能であり、動きぼやけの少ない映像が表示可能なことを示した。

# 目次

目次.....	vi
第1章 序論.....	1
1.1. 研究の背景.....	1
1.2. 本研究の目的.....	4
1.3. 論文の構成.....	5
第2章 有機ELディスプレイの駆動手法.....	7
2.1. 緒言.....	7
2.2. 有機ELディスプレイの基本構造.....	7
2.3. 階調表示方式.....	11
2.3.1. アナログ駆動方式.....	11
2.3.2. デジタル駆動方式.....	12
2.4. 各階調表示方式における動画質の課題.....	13
2.4.1. ホールド型発光による動きぼやけ.....	13
2.4.2. PWM方式による動画質劣化.....	14
2.5. 動画表示における視認画像のシミュレーション.....	15
2.6. 動画質の改善に向けた課題.....	17
2.7. 結言.....	19
第3章 三角波形発光による動画質改善技術.....	20
3.1. 緒言.....	20
3.2. 三角波形発光の空間周波数特性.....	21
3.3. 最適化補償フィルタの設計.....	24
3.4. 補償フィルタ性能評価.....	28
3.5. 画像シミュレーションによる評価.....	34
3.5.1. 水平方向への移動における評価.....	34
3.5.2. 二次元平面での評価.....	38
3.6. 結言.....	41
第4章 パルス密度変調による階調表示方式.....	42
4.1. 緒言.....	42
4.2. デジタル駆動の特徴.....	42
4.3. ランダムディザマトリックスを用いたパルス密度変調による階調表示方式.....	45
4.3.1. 提案方式の特徴.....	45
4.3.2. ランダムディザにホワイトノイズマスクを用いたときの画質.....	47
4.4. 駆動周波数と画質に関する考察.....	53
4.5. 空間変調を利用した信号処理の検討.....	54

4.5.1.	2×2 ディザとブルーノイズマスク .....	54
4.5.2.	シミュレーションによる画質評価 .....	56
4.5.3.	実機による検証.....	61
4.6.	時間方向閾値制御技術の導入.....	65
4.7.	空間変調と時間制御の効果に関する考察.....	70
4.8.	PDM 階調表示方式の動画質 .....	70
4.8.1.	シミュレーションによる動画質の評価 .....	70
4.8.2.	実機による動画質の検証 .....	73
4.9.	結言 .....	74
第 5 章	結論 .....	75
謝辞	.....	78
本論文に関する発表論文	.....	79
参考文献	.....	80
付録	.....	84

# 第1章 序論

## 1.1. 研究の背景

国内でテレビ放送が開始された 1953 年以降、50 年近くに渡りブラウン管テレビが主役であった。2003 年の地上デジタル放送の開始にともない、高精細なハイビジョン放送が始まると、大画面でテレビを楽しみたいという要望が大きくなり、40 型以上の薄型平面ディスプレイ (FPD: Flat Panel Display) が徐々に普及していった。特に、プラズマディスプレイ (PDP: Plasma Display Panel) や、液晶ディスプレイ (LCD: Liquid Crystal Display) の開発が盛んに進められ、家庭への FPD の普及に貢献した。さらに、2016 年には 4K/8K 試験放送が開始されると、大画面で高精細のディスプレイが求められ、より高画質が期待される有機 EL (Electro-Luminescence) ディスプレイも市販が開始された。

PDP は、ガス放電により励起された蛍光体が、赤・緑・青色に発光する自発光デバイスであるため、視野角が広く動画性能に優れる。さらに、パネル構造が LCD ほど複雑ではないため、50 型以上の大型テレビに適するなどの特徴があるが、高精細化が難しく、消費電力も LCD より大きくなるなどの問題があった。一方、LCD は、液晶の回転により光の透過量を制御するため、応答が遅いことから動画性能が不十分で、コントラストが低いという問題があった。しかし、様々な改良によりこれらの欠点が改善されるとともに、大型の LCD も開発されるようになり、現在では、ブラウン管に置き換わる存在として社会の幅広い分野で利用が進んでいる。有機 EL ディスプレイは、有機発光ダイオード (OLED: Organic Light Emitting Diode) に電流を流すことで発光する自発光デバイスであるためコントラストが高く、応答速度も速いことから画質に優れる。さらに、LCD のようなバックライトを必要としないことから低消費電力であるとともに、薄型化しやすくフレキシブル基板との相性も良いことから、スクリーンのように柔軟なフレキシブルディスプレイとしての応用も期待されている。また、発光ダイオード (LED: Light Emitting Diode) は高輝度で低消費電力であるため、大画面サイネージに多く利用されてきたが、近年、マイクロ LED の研究開発が盛んになっており、テレビへの応用も期待されている。

LCD や OLED ディスプレイなどのアクティブマトリックス型表示デバイスは、高精細

化や高コントラスト化が進み、高画質化が実現されてきた。しかし、これらの表示デバイスは、1フィールド期間、一定の強度で発光するホールド発光型の表示デバイスである。このため、表示デバイスの応答特性が高速であったとしても、視認上のぼやけによる動画質の劣化が生じることが知られている[1-3]。これは、表示物体は、1フィールド期間、ディスプレイ上に静止して表示されているのに対して、人の視覚システムは表示物体が滑らかに動いているとして追従視してしまうため、その不一致により動きぼやけが発生する。この動画質の劣化を改善するためには、映像の高フレームレート化や、1フィールドの発光時間を短くし、インパルス発光に近づけるなどの手法が有効であり、フレームレート 240Hz 以上が必要であることが示唆されている[4,5]。

栗田らは動きぼやけに対する主観評価実験の結果などから、観察者が許容できる画質を得るためには、フレームレート 360Hz 以上が必要であるとしている。しかしながら、大画面・高精細のディスプレイで、360Hz の高速フレームレートを実現することは、高いデバイス性能の改善が求められることから、フレームレート 120Hz で発光時間を3分の1にすることで、動きぼやけを360Hz 相当にするシステムを提案している[6-8]。一方で、OLEDディスプレイの輝度は、駆動電流にほぼ比例することから、1フィールド内での発光時間を短くして同等の輝度を実現しようとした場合、高い瞬時輝度が必要になる。OLEDディスプレイの寿命は、駆動電流の累乗に反比例することから[9,10]、発光時間の短縮を補う瞬時輝度の上昇により、OLEDの寿命は加速的に劣化するという課題があった。図1.1に示すように、1フィールド期間の間一定の強度で発光すると、発光強度は低く抑えられるため、寿命劣化は抑制されるが動きぼやけが生じてしまう。一方で、発光時間を短くしインパルス発光に近く近づけると、動きぼやけは改善されるが、高い発光強度が必要になり、寿命劣化が加速する。そこで、寿命の劣化を抑えながら動画質を改善する手法として、発光時間を適応的に制御する駆動手法なども提案されてきた[11,12]。

また、アクティブマトリックス型のOLEDディスプレイでは、画素電流を制御するために、TFT (Thin-film-transistor) が用いられているが、TFTは駆動電流や熱、光などによるストレスにより、特性が変動し、輝度の不均一性による画質劣化が生じてしまう問題がある[13,14]。TFTやOLEDの特性変動による輝度の不均一性を抑制する手法として、電圧プログラミング方式[15-17]や電流プログラミング方式[18-22]などさまざまな補償方法が報告されている。しかしながら、これらの方法は複雑なパネル構造や画素回路、信号処理など

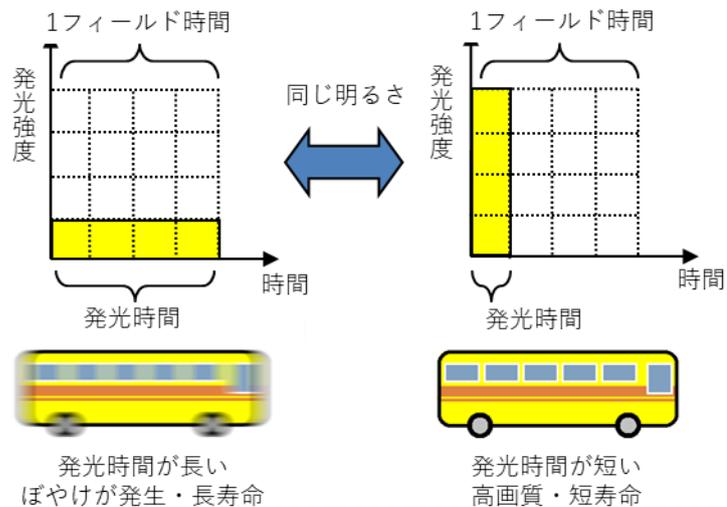


図 1.1 発光時間と動きぼやけ

を必要としている。

そこで、駆動 TFT の特性変動や劣化による輝度の不均一性を改善するために、パルス幅変調 (PWM : Pulse Width Modulation) による駆動技術が提案されている。パルス幅変調では、駆動 TFT は電流量を調整するためではなく、単なるスイッチとして機能するために、印加された電圧のほとんどが OLED に印加されることになり、駆動 TFT の特性変動の影響を小さくすることができる。PWM 方式には、画素回路内でアナログ電圧値をパルス幅に変換するアナログ PWM 方式[23-27]や、デジタル電圧値により発光重みの異なるサブフィールドを用いてパルス幅に変換するデジタル PWM 方式[28-30]がある。前者は画素回路が複雑になってしまう問題がある。一方で、後者はシンプルな画素回路で実現できるが、人の視覚システムとの不一致により偽輪郭が発生してしまうという問題がある。偽輪郭を抑制するために、いくつかの手法が提案されているが[31-34]、これらの手法は動き量を推定するなどの複雑な信号処理と多くのサブフィールドを必要とすることから、高フレームレート化することが難しいという問題もあった。

PWM 方式は、PDP や OLED で使用されてきたが、近年開発が盛んになっている LED ディスプレイでも多く用いられている。画素サイズが数mm程度の LED ディスプレイは、サインージ用として様々な場面で用いられているが、画素サイズがサブミリメートル以下のマイクロ LED ディスプレイの開発は特に盛んになってきており[35-37]、今後テレビ用途への展開が期待されている。LED は、OLED と同様に流れる電流量により発光強度が決

まるが、電流密度により発光波長が変化してしまうため[38,39]、OLED 同様にデジタル駆動方式の高画質化が望まれている。そこで、本研究では、動画質劣化の原因となる動きぼやけについて詳細に検討し、その解決方法を示す共に、シンプルな画素回路で実現できるデジタル駆動方式において動画質の改善が望める高フレームレート化に適した信号処理方法や階調表示方式を開発することを目的としている。

## 1.2. 本研究の目的

こうした背景を踏まえて、本研究は、ディスプレイの動画質向上に主眼を置いた。OLED ディスプレイはデバイスの応答速度に優れることから、動画品質の高い映像表示が可能であるため、OLED ディスプレイの駆動方式を中心に動画質向上手法について検討した。筆者はまず、動画質劣化の原因となる動きぼやけの基本原理について調査し、動画質の改善に向けて発光時間を短くする手法を応用することについて検討した。その結果、これまでに検討されてきた発光時間を単純に短くする方式では輝度が著しく低下するなどの問題があることから、発光波形を三角波形にすることで、輝度の低下を抑制しながら動画質を向上させることが可能であると考え、動画質の空間周波数特性を画質シミュレーションにより解析し、その結果から画像信号処理技術を用いて動きぼやけを改善するための指針を得た。

一方で、複雑な画像信号処理を必要とせず動画質を向上させるために、高フレームレートに適したデジタル駆動による階調表示方式について検討した。OLED ディスプレイや LED ディスプレイにおいて、安定した表示が可能なデジタル駆動方式では、これまで主に PWM 方式が用いられてきた。PWM 方式では、1 フィールド間の発光する期間で階調を表現する方式であり、明るい階調を表現するためには長い時間発光し、暗い階調では短い時間発光している。しかし、1 フィールドの中での発光期間や発光タイミングが階調ごとに異なり一定ではなく、発光の偏りが生じるため、人の視覚システムとの相互作用で、動画質の劣化が起こることが知られており、特に、偽輪郭による画質劣化が問題となっている。この偽輪郭を低減し、動画質を向上させるためには高速な駆動が必要であるため、さらに高速化が必要な高フレームレート化への対応は困難であった。

そこで、デジタル駆動において、高フレームレート化が可能で動画質の向上が見込めるランダムディザを用いたパルス密度変調 (PDM : Pulse Density Modulation) による階調表示

方式を提案した。PDM方式では、1フィールド間の発光の密度により階調を表現するため、明るい階調を表現するためには、発光間隔を短くし、暗い階調では、発光間隔を長くする。このため、階調による発光の偏りがほとんどなく、動画質の劣化が起こりにくいと考えられる。したがって、PWM方式より動画質が優れ、高フレームレート化が期待できる。また、PDM方式では、発光間隔により明るさを制御していることから、一定の間隔で発光しておよどの期間で区切ったとしても、ほぼ同じ階調となることから、様々なフレームレートに柔軟に対応できるという特徴がある。デジタル駆動方式では、発光パルス数により階調を表現するため、1秒間に表示できるパルス数、すなわち、駆動周波数が画質を決めることになる。しかし、これまでに述べてきたように、フレームレートが低い場合、動いている物体は、動きぼやけや偽輪郭の発生により画質が低下し、結果的に空間解像度の低い映像が表示されることになる。そこで、信号処理にランダムディザを用いることで、空間解像度を落とすとしても、高フレームレート表示することで動画質を改善し、見た目の空間解像度を向上させることが可能になると考えられる。よって、本論文では、ランダムディザを用いたPDMによる階調表示方式を実現するための信号処理方法を提案し、画像シミュレーションを用いて、駆動周波数と画質の関係について調査するとともに、低い駆動周波数でも良好な画質が得られる駆動方法を検討し、提案手法の高フレームレート表示への適性を評価することを目的とした。

### 1.3. 論文の構成

本論文では上記の観点から、OLEDディスプレイの動画質向上に資する研究成果を5章の構成にまとめたものである。

まず、第2章では、OLEDディスプレイの基本的な駆動手法について述べた後、ホールド発光表示とパルス幅変調方式における動画質劣化メカニズムについて、人の視覚システムとの関係から説明する。

第3章では、動画質と輝度の両立を図ることが可能と考えられる三角波形発光における動画質について、動き速度と空間周波数特性の関係を解析し、その結果から、三角波形発光に最適化された動きぼやけ改善のための補償フィルタを設計した。この三角波形発光に最適化した補償フィルタによる動きぼやけの抑制効果を、画像シミュレーションを用いて評

価した。その結果、発生する動きぼやけを低減し、歪みを抑制できることを述べる。

第4章では、高フレームレート化による動画質の向上とディスプレイの安定駆動を目指して、パルス密度変調を用いたデジタル駆動について、駆動周波数と画質の関係を調査するとともに、画質改善手法について取り組んだ成果について述べる。

第5章は結論であり、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の発展について考察し、本研究の結論を述べる。

## 第2章 有機 EL ディスプレイの駆動手法

### 2.1. 緒言

OLED ディスプレイは、自発光でコントラストが高く応答速度も速いことから画質に優れ、さらに、フレキシブル基板との相性の良さから将来のディスプレイとして期待されている。本章では、OLED ディスプレイにおける、デバイスの基本構造と、OLED ディスプレイの等価回路について説明する。さらに、アナログ駆動、及び、デジタル駆動における主な階調表示方式について説明し、それぞれの階調表示方式における動画質劣化の基本原理について述べる。

### 2.2. 有機 EL ディスプレイの基本構造

一般的な OLED の構造を図 2.1 OLED 素子の積層構造図 2.1 に示す。ガラス基板上に陽極を最下部にして、正孔注入層、正孔輸送層、発光層、電子輸送層を積層し、陰極には金属電極を使用している。一般的な構成では、ガラス基板側から光を取り出す構造となっているため、陽極には ITO 透明電極が用いられる。この積層構造はすべて合わせても 100nm 程度であるため、この陽極と陰極の間に 5V 程度の電圧を印加するだけで非常に高輝度の発光が得られる。電圧が印加されると、陽極からは正孔が、陰極からは電子が注入され、発光層において正孔と電子が結合することで光が放出される。図 2.2 に OLED の発光過程を示す。励起状態には励起一重項状態と励起三重項状態の 2 種類が存在し、励起一重項状態が 25% であり、残りの 75% が励起三重項状態とされている。励起一重項状態からの発光を蛍光、励起三重項状態からの発光をりん光というが、励起三重項状態は、室温状態では熱エネルギーとして失われてしまう。ただし、近年では発光に必要なエネルギーよりも高い励起三重項エネルギーが得られるりん光材料を用いることで、りん光を有効利用する OLED の研究開発が進んでいる [40,41]。現在市販されている OLED ディスプレイでは、赤色や緑色に発光する OLED は主にりん光を利用しており発光効率や寿命も改善されている。青色に発光する OLED は蛍光を利用していることが多く、青色 OLED の効率改善が望まれている。

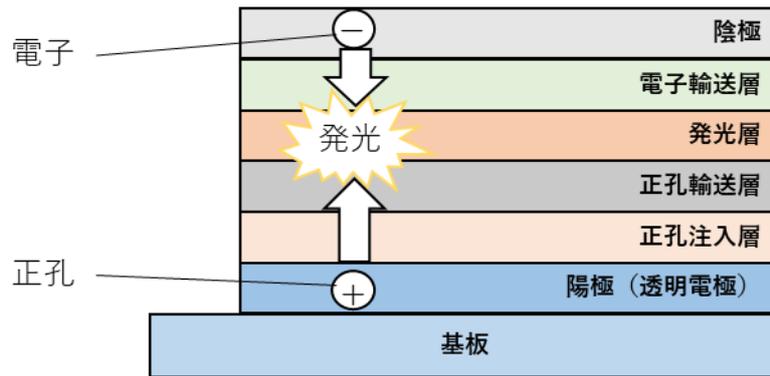


図 2.1 OLED 素子の積層構造

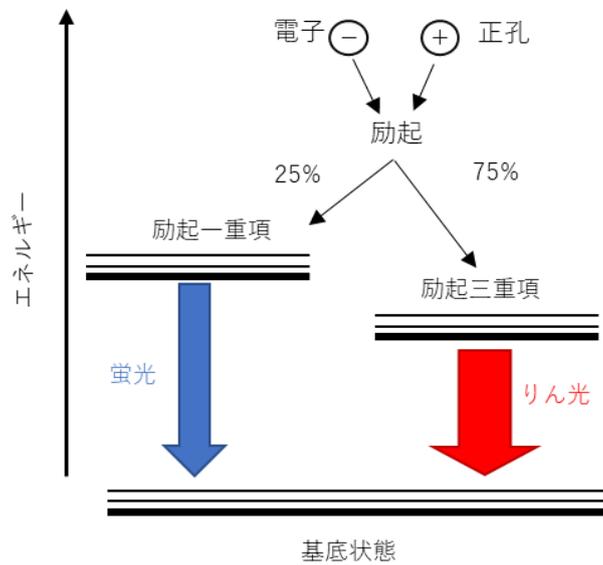


図 2.2 OLED 素子の積層構造

OLED ディスプレイにはパッシブ型とアクティブ型の 2 種類のパネル構造がある。図 2.3 にはパッシブマトリクス型 OLED (PM-OLED) の等価回路を示している。PM-OLED では、上から順に選択した走査ラインに対して、データラインに信号に応じた一定の電圧を印加し発光させる。走査ラインの表示期間が終了すると、次の走査ラインを選択し、同様にデータラインの信号に応じた電圧を印加し発光させる。これを繰り返すことで、画像を表示する。したがって、PM-OLED では、発光時間は走査ラインを選択している時間と等しくなり、走査ラインの数が増加すると著しく発光時間が減少するため、高解像度のディスプレイでは高輝度を得るのが困難である。そのため、パネル構造は単純であるが、高画質が求められるテレビ用ディスプレイではほぼ使用されていない。

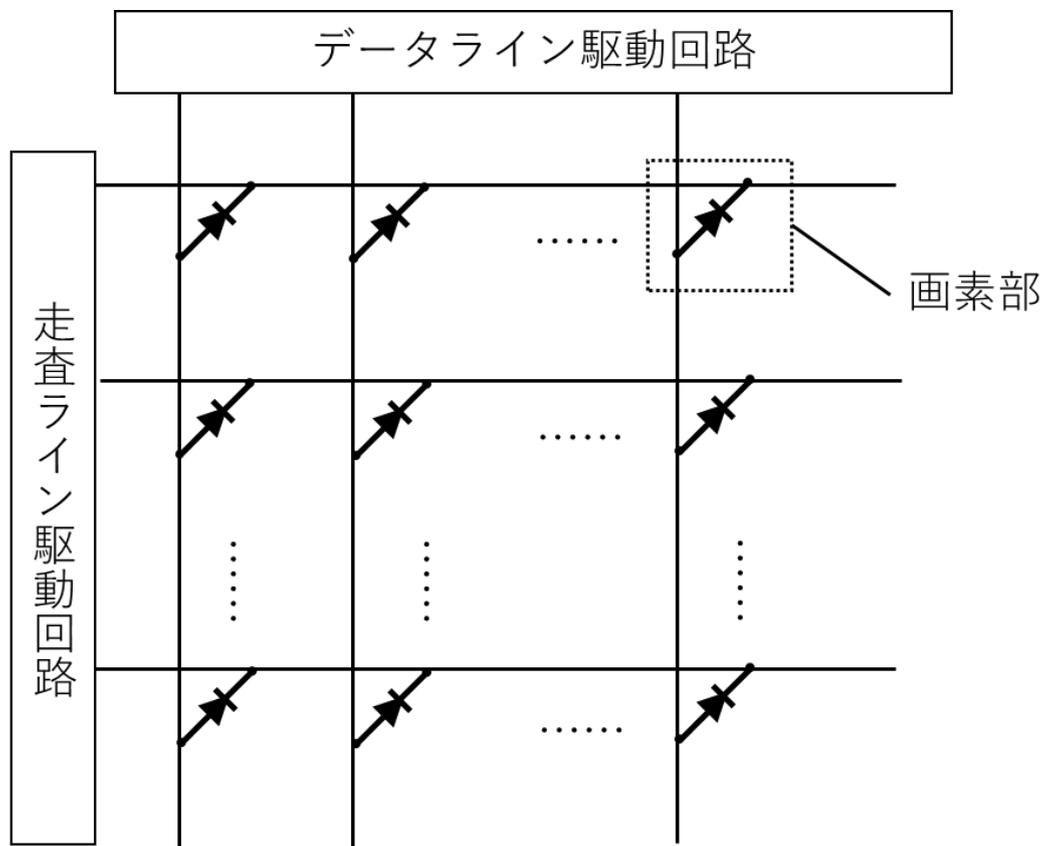


図 2.3 PM-OLED の等価回路

図 2.4 にはアクティブマトリックス型 OLED (AM-OLED) の等価回路を、図 2.5 には画素回路を示している。AM-OLED では、OLED 素子の発光を制御するために、各画素回路内に 2 つの TFT と 1 つのキャパシタが配置されている。走査ラインには上から順に電圧が印加（走査）され、スイッチング用 TFT のスイッチがオン状態になる。電圧が印加されている間に、垂直ラインから電流が流れ画素回路内のキャパシタに電荷が蓄積される。これにより駆動用 TFT のソース・ドレイン間にはキャパシタに蓄積された電荷に応じた電流  $I_{ds}$  が流れ、OLED が発光する。この電荷は、TFT のスイッチがオフになった後も維持され、次の走査まで発光が維持される。よって、PM-OLED と異なり発光時間を長くすることが可能であるため高輝度表示に向いており、高画質が求められるディスプレイにおいて用いられている。

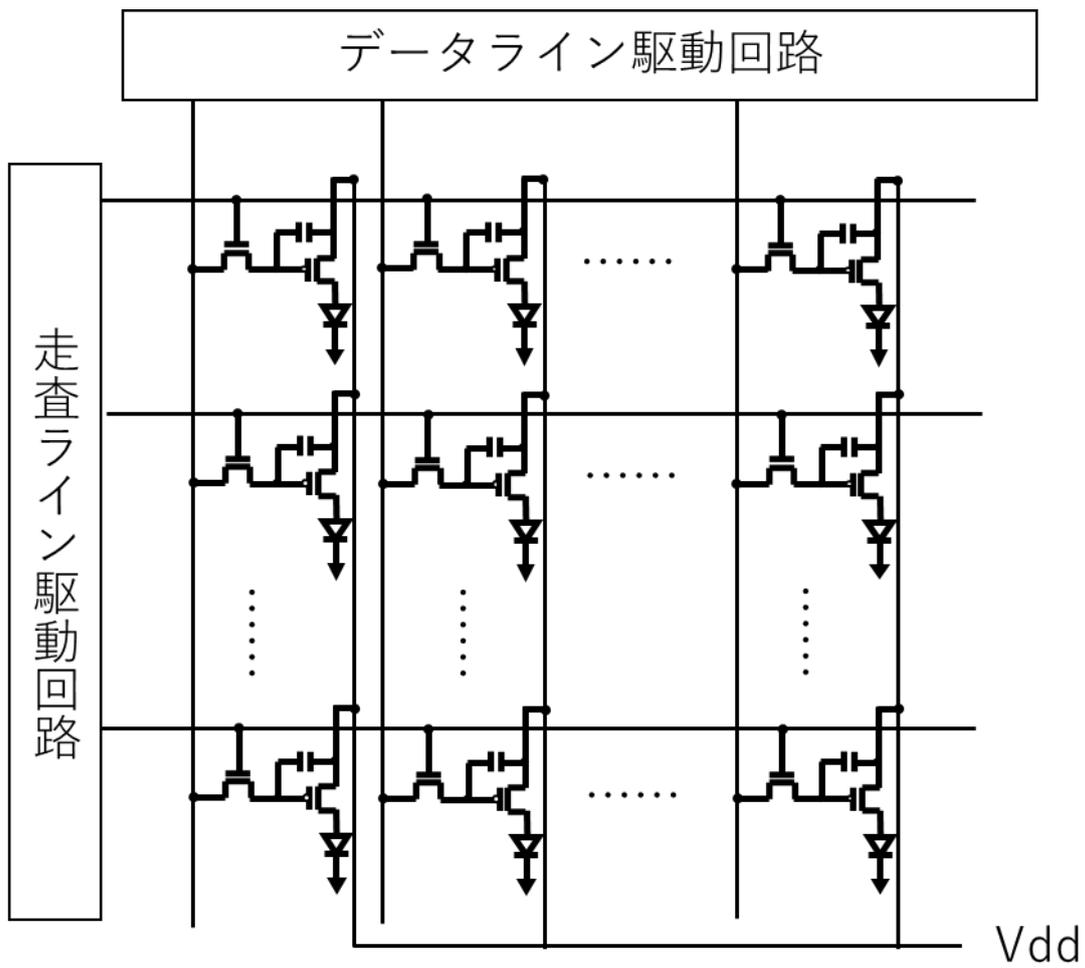


図 2.4 AM-OLED の等価回路

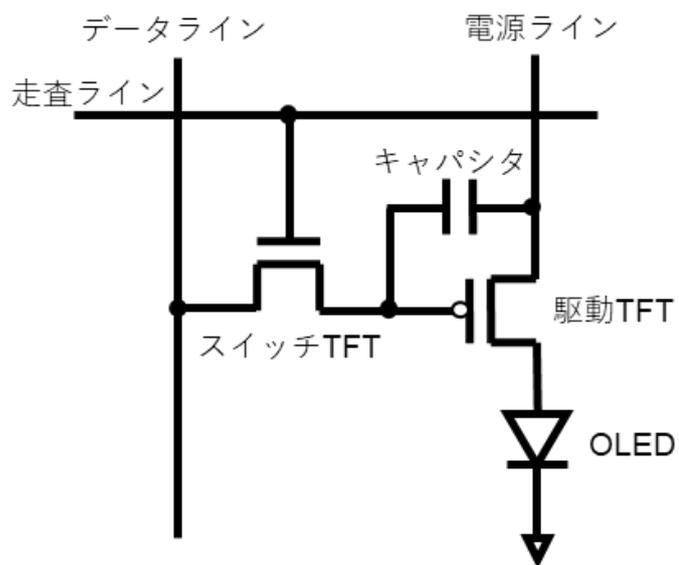


図 2.5 AM-OLED の画素回路

## 2.3. 階調表示方式

### 2.3.1. アナログ駆動方式

スマートフォンやテレビで用いられる高精細な AM-OLED ディスプレイで用いられている階調表示方式は、主にアナログ駆動による振幅変調方式である。PM-OLED ディスプレイにおいても同様に駆動することは可能であるが、ここでは AM-OLED ディスプレイを用いて説明する。標準的なディスプレイでは、1 秒間に 60 枚の画像を表示しており、1 枚あたりの表示時間は約 16.7ms (1 フィールド期間) となり、図 2.6 に示すように、1 フィールド期間、一定の輝度で発光する。その発光強度は画素回路内のコンデンサに蓄積される電荷量によって制御される。発光強度の振幅による階調を表示しているため振幅変調方式とされる。

1 フィールドに 1 回の走査のみで発光強度が決まるため、高解像度のディスプレイとの相性がよく様々なディスプレイで使用されているが、画素回路内の駆動用 TFT の特性変動の影響を受けやすいというデメリットがある。AM-OLED ディスプレイは電流駆動のデバイスであり、OLED の輝度は電流にほぼ比例するため、電流の増減が発光輝度へダイレクトに影響を与え、駆動用 TFT のばらつきにより輝度の変動が生じてしまう。そのため、様々な補償方式が提案されている [42-45]。

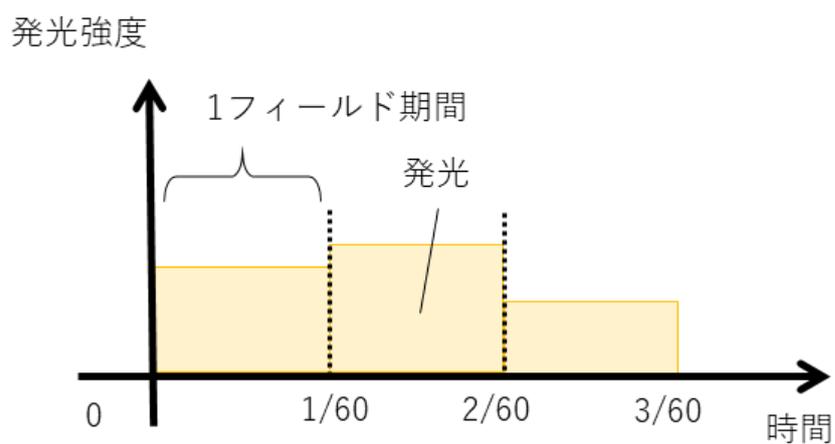


図 2.6 振幅変調による階調表示方式

### 2.3.2. デジタル駆動方式

アナログ駆動に比較して簡素なドライバやシステムで駆動できるために、AM-OLED ディスプレイの開発初期や、従来のデジタル駆動方式のディスプレイで採用されているのが2のべき乗の発光重みをもつサブフィールド（SF）で構成されるパルス幅変調方式（Pulse-width modulation）である。このPWM方式を図2.7に示す。以後、これを本論文ではPWM方式と呼ぶ。1フィールド期間を複数のSF期間に分割し、各SF期間内では、画面の垂直方向に1ラインずつ線順次走査し、発光する画素を選択し、所定の期間の発光を行う。各SFにおける発光期間の足し合わせにより階調を表現する。例えば、1フィールドを8つのSFに分割し、2のべき乗となる1、2、4、8、16、32、64、128の輝度値となるように発光期間を設定しされているとすると256階調を表現でき、輝度値が78であれば、SF2とSF3、SF4、SF7において発光することで、 $2+4+8+64=78$ となり、目の時間的な積分効果を利用した重ね合わせにより階調を表示できる。ただし、高い階調性を表現するためには、非常に高い駆動周波数が必要になるが、デジタル駆動では、駆動TFTが電流制御としての役割ではなく、スイッチとしての役割であるため、駆動TFTの特性変動の影響を受けにくく、安定した駆動が可能であるという特徴がある。

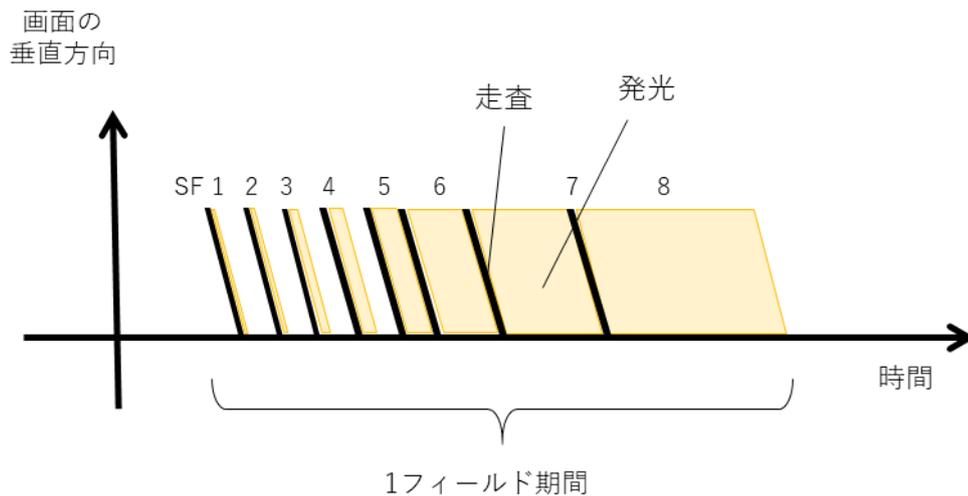


図 2.7 パルス幅変調（PWM）による階調表示方式

## 2.4. 各階調表示方式における動画質の課題

### 2.4.1. ホールド型発光による動きぼやけ

振幅変調を用いた階調表示方式では、1フィールド期間発光が持続する。この1フィールド期間発光が持続するホールド型ディスプレイにおける動きぼやけの基本原理の概要を図2.8に示す。図2.8(a)は、白と黒の境界が、1フィールドあたり4ピクセル(ppf: pixel per field)で右に移動する様子を示している。観察者もその境界の動きを追って右への動きを4ppfで追跡すると、網膜上は、図2.8(b)のように白と黒の境界が投影される。結果として得られる明るさは、1フィールド期間の光の強度の積分であるため、図2.8(c)に示すように人間の目で認識される。このように、白と黒の境界がぼやけて見える。これは、1フィールド期間の間は、白と黒の境界がディスプレイ上に静止して表示されているのに対して、人の視覚システムは白と黒の境界が滑らかに動いていると認識してしまうため、その不一致により動きぼやけが発生する。この動画質の劣化を改善するためには、高フレームレート化や、1フィールドの発光時間を短くし、インパルス発光に近づけるなどの手法が必要とされる[8]。

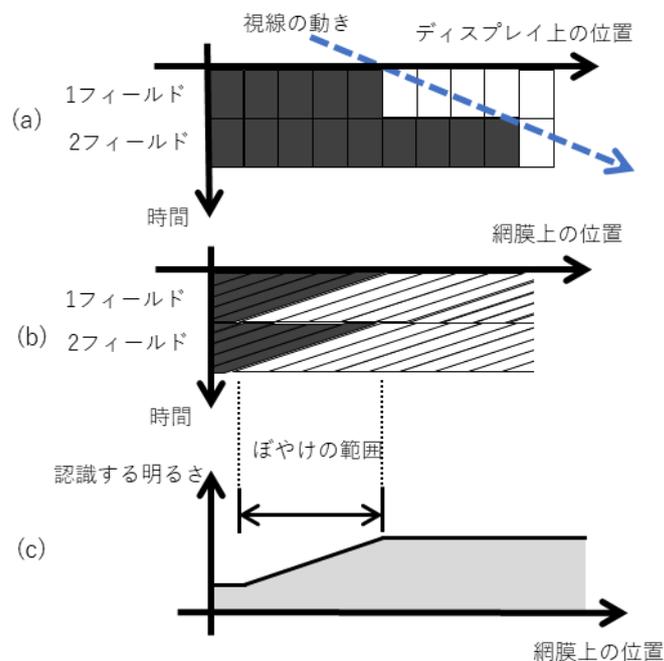


図 2.8 動きぼやけが発生する基本的な原理

#### 2.4.2. PWM方式による動画質劣化

PWMによる階調方式では、動画において、本来表示されないはずの明るさで認識されてしまう偽輪郭による画質劣化が知られている[31-34]。その画質劣化の基本原理について説明する。例えば、256階調のディスプレイにおいて、図2.9(a)に示すように信号レベル127と128が隣接して表示されているとする。さらに、その境界が2ppfで動くと同時に、視線も2ppfで動いているとする。この時、信号レベル127は1フィールド期間の前半部分に発光が集中しており、信号レベル128は1フィールド期間の後半部分に発光が集中することになる。これにより、網膜上では図2.9(b)のように積算されることになるため、図2.9(c)にあるように信号レベル127と128の境界において、極端に明るく認識されてしまう可能性がある。実際の画像にない輪郭として認識されることから、偽輪郭と呼ばれている。これは、1フィールド期間内での発光重心が表示階調によって異なってしまふことに起因している。偽輪郭は動画表示において顕著となるが、静止画においても視線を早く動かすことによって認識されることも知られている。これを解決するためには、さらに、SFを細かく分割する手法などが提案されているが、SF数が多くなると1フィールド期間が長くなるため、走査線数の増加や高フレームレート化が困難になるため、新しい階調表示方式が求められている。

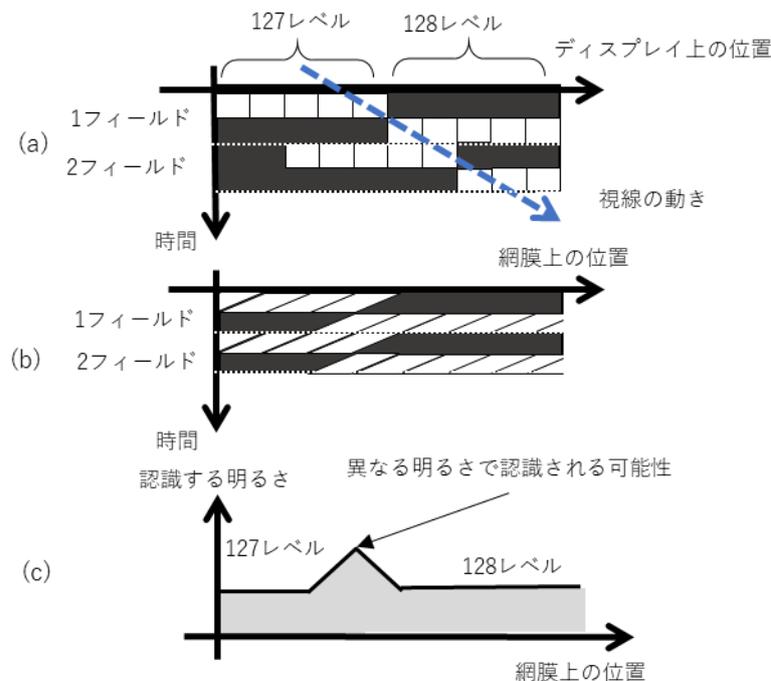


図 2.9 パルス幅変調による偽輪郭が認識される基本原理

## 2.5. 動画表示における視認画像のシミュレーション

前節では、動画質劣化の基本的原理について説明した。本節では、前節で説明した動画質劣化の基本的原理に基づく、動画表示の視認上の画像をシミュレーションにより計算する手法について述べる。この画像シミュレーション手法に基づいて、次章以降で検討する動画質の改善手法について、人の視覚システムで認識される画像を作成し評価した。図 2.10 (a) には、白と黒の境界が、水平方向に 1 フィールド間で 2 ピクセル移動している様子を示している。これと同時に、これに伴い視線も水平方向に 1 フィールド間で 2 ピクセル移動している。このとき、コンピュータ上でシミュレーションするにあたり、水平方向の 1 ピクセルを細分化してサブピクセルを構成し、それぞれに該当ピクセルの輝度レベルを割り振る。図の例では 1 ピクセルを 10 分割している。また、時間方向にも細分化し輝度レベルを割り振る。図の例では 1 フィールドを 10 分割している。この時、1 フィールド内で発光強度が変化する場合などは、それに応じて割り当てる輝度レベルを調整する。実際には、発光波形が複雑であるほど分割数を増やす必要があり、これまでに説明したパルス幅変調でのシミュレーションでは、100 分割以上が必要になるが、ここでは簡単のため 10 分割で図に示した。このように 1 ピクセルを、空間方向及び時間方向に細分化して基本的な表示パターンを構築する。

次に、図 2.10 (b) は、視線方向が垂直軸になるように座標系を変換したものであり、図 2.10 (a) のブロックを水平方向にずらしたものと同等である。網膜上に投影される光は、視線の動きで示した矢印上に積分したものであることから、この矢印が垂直になるようにサブピクセルを水平方向に移動させる。図の例では、サブピクセルも、2 サブピクセル分を左方向に移動させることになる。よって、網膜上に時間的に投影される光の強度パターンが作成される。

最後に、これを 1 ピクセル単位で平均化することで、図 2.10 (c) に示すシミュレーション画像を作成することができる。シミュレーション画像の解像度は必ずしも元の画像の解像度と一致させる必要はないが、ディスプレイをピクセル構造が見えない程度に精細度が高い状態で視聴していることを前提にすれば、同じ解像度で書き出すことで十分であると考えられる。次章以降の動画像のシミュレーションでは、本手法を基本にして応用することで動画質を評価した。

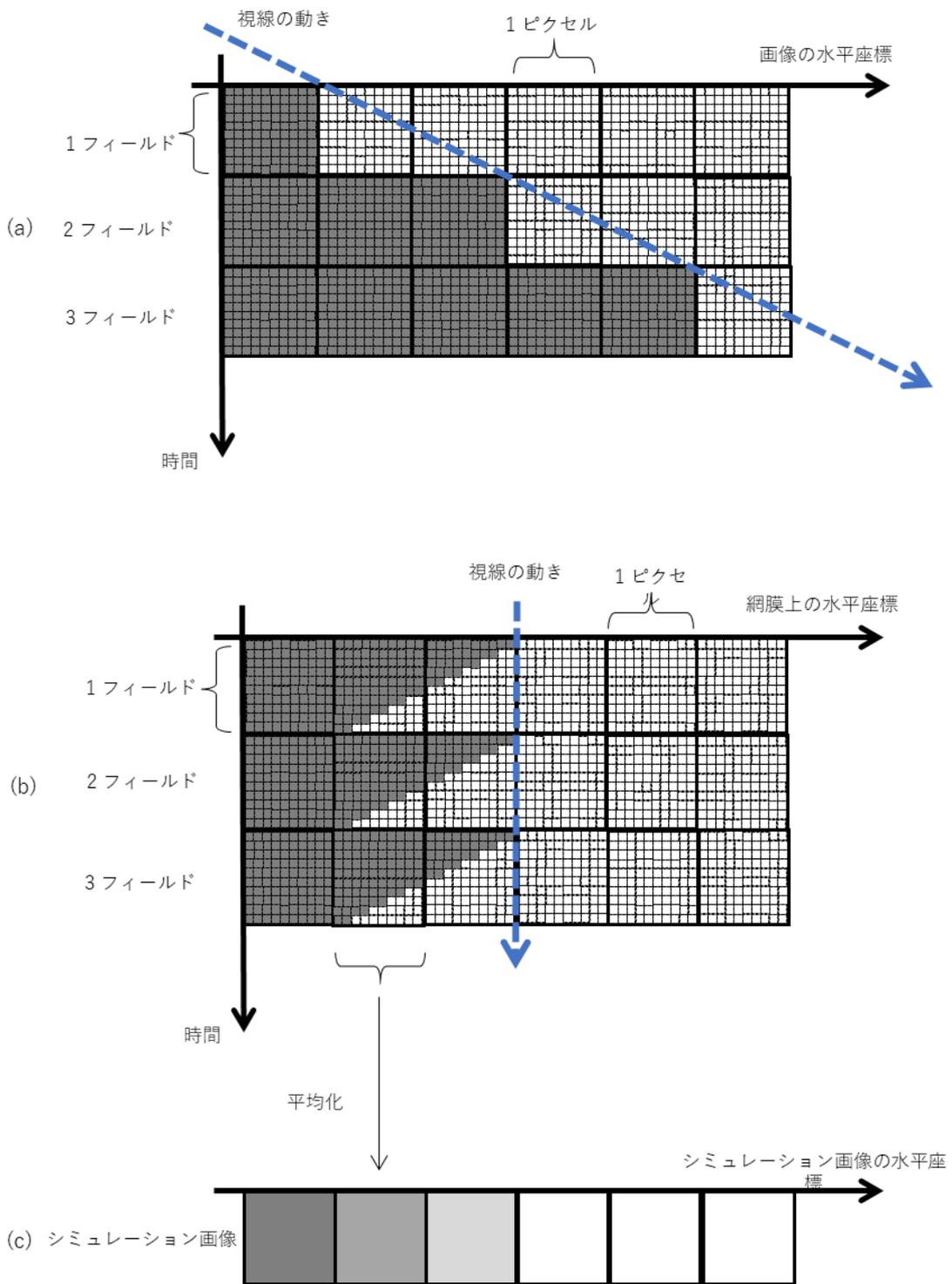


図 2.10 動画像の画像シミュレーション手法

## 2.6. 動画質の改善に向けた課題

前節までに、LCD や OLED ディスプレイにおける動画質劣化の原因である動きぼやけについて述べてきた。これを解決し動画質を向上させる方法として、発光時間の短縮や高フレームレート化があげられる。本節では、動きぼやけを解消するために目標となるフレームレートについて述べる。

1 フィールド期間発光が持続するホールド型ディスプレイでは、動きぼやけの発生原理から、発光素子の応答速度が発光期間に比べて十分に短く無視できるとすると、動きぼやけによるぼやけ幅は 1 フィールドあたりの表示物体の移動ピクセル数と同等になる。例えば、表示物体が 1 フィールドで 4 ピクセル移動する場合は、4 ピクセル分のぼやけ幅となり、1 フィールドで 8 ピクセル移動する場合は、8 ピクセル分のぼやけ幅となる。したがって、動きぼやけを解消するためには、理想的には 1 フィールドあたりの表示物体の移動量が 1 ピクセル以内となるように、高フレームレート化すれば良い。ただし、そのためには、非常に高いフレームレートが必要となる。動体視力の調査などでは、1 秒あたり 100 度の移動する物体を人の目は追従できるという報告[46]もあるが、ある程度正確に物体を観察しながら人が追従視できる速度は、せいぜい 1 秒あたり 30 度程度の移動速度までであるとされている[47]。30 度/秒は、2K 解像度のテレビ (1920×1080 画素) を適正な視距離である画面高の 3 倍の距離から観察した場合では、画面の端から端までは 1 秒で物体が移動する速度に相当する。2K テレビの水平方向の解像度は 1920 ピクセルであるから、1 秒間に 1920 ピクセルを移動することになるため、完全にぼやけの発生を抑えるためには、フレームレート 1920Hz が必要ということになる。

一方で、実際には、表示物体の移動速度が速くなると、静止画の解像度より低くても劣化が認識されにくい。したがって、実際のディスプレイ表示における目標となるフレームレートは、1 章で述べたように、240Hz から 480Hz 程度としている場合が多い。図 2.11 に動きぼやけによるぼやけ幅と主観画質の関係について、これまでの報告[2]をまとめた結果を示す。2 種類のテスト画像を用いて、それぞれの画像を、様々なフレームレートで水平方向にスクロールさせながら表示することで動きぼやけを生じさせ、動きぼやけによる画質劣化を主観評価した結果を示している。図の垂直軸は、15~17 名の評価者が 5 段階劣化尺度法[48] (表 2.1) により評価した結果の平均値であり、水平軸に画像のスクロールによる発生するぼやけ幅を示す。ぼやけ幅が大きくなるほど主観評価値は低下し、1 フィールドあたり

の移動量が 4 ピクセルあたりから、画質の低下が見られ、移動量が 8 ピクセルを超えると劣化許容限である 3.5 を下回っている。ぼやけ幅を 4 ピクセル以下に抑えるためには、1 フィールドあたりの移動量を 4 ピクセルに抑える必要があるため、 $1920/4=480\text{Hz}$  のフレームレートが必要となる。同様にぼやけ幅を 8 ピクセルとするには、フレームレート 240Hz となる。したがって、この結果から、動画質の許容限を得るためには、240Hz 以上のフレームレートが必要と考えられ、動画質劣化を検知限以下にするためには、最大でフレームレート 480Hz 程度が必要とされる。

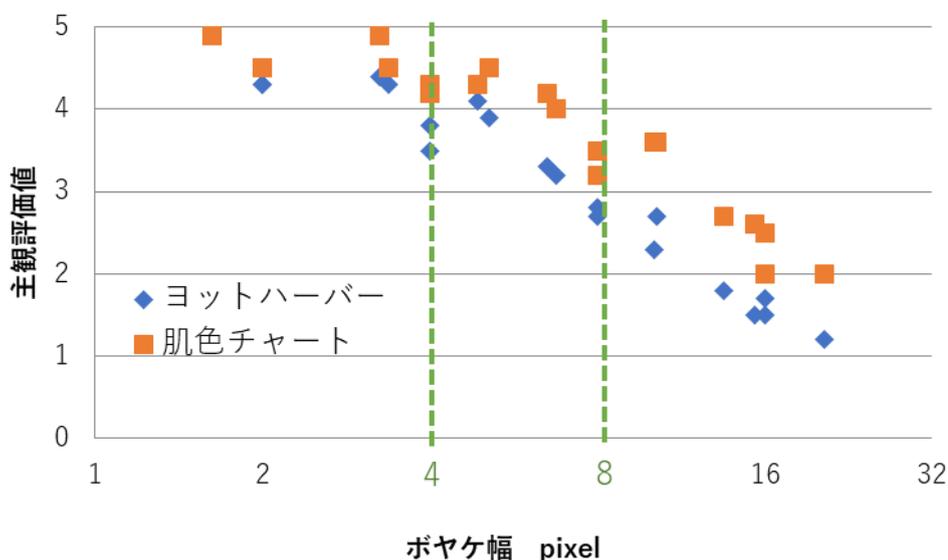


図 2.11 ぼやけ幅と主観評価値の関係

表 2.1 5 段階劣化尺度法の評価尺度

評点	
5	劣化がわからない
4	劣化がわかるが気にならない
3	劣化が気になるが邪魔にならない
2	劣化が邪魔になる
1	劣化が非常に邪魔になる

## 2.7. 結言

本章では、AM-OLED における、OLED デバイスの基本構造と、AM-OLED の等価回路について説明した。また、アナログ駆動、及び、デジタル駆動における主な階調表示方式について説明し、それぞれの階調表示方式における動画質劣化の基本原理について述べ、振幅変調による階調表示方式においては、デバイスの応答速度に関わらず原理的に動きぼやけ動きぼやけが視認されることを述べた。このため、発光時間の短縮や発光波形などの駆動方法や信号処理により動きぼやけ動きぼやけを改善する必要がある。また、デジタル駆動におけるパルス幅変調方式に関しては、偽輪郭による動画質劣化の仕組みについて説明し、動画質の向上のためには、高フレームレート化と新たな階調表示方式が求められることを述べた。

## 第3章 三角波形発光による動画質改善技術

### 3.1. 緒言

前章では、振幅変調方式におけるホールド型発光の表示特性により、動きぼやけによる動画質劣化の問題があることについて述べ、動画質を向上させるためには、より高いフレームレートやより短い発光時間による駆動方法が有効であることを述べた。しかし、フレームレートを高くするには、パネルの高速化やフレーム補間のための複雑な信号処理が必要になる。また、発光時間の短縮による輝度の減少を補うためには、より高い瞬間輝度が必要となる。そのため、動きぼやけによる動画質の劣化を抑制するために、三角波形発光 (TWE) を使用した駆動技術が提案されている [49]。TWE はインパルス発光とホールド発光の中間にあると考えられ、画像シミュレーションを用いて、動きぼやけの抑制に効果があることが示されている。そこで、フレームレートの高速化を行わなくても効果的に動きぼやけを抑制できる三角波形発光に着目し、その効果を詳細に解析するとともに、さらなる動画質向上のための画像処理方法について検討した。

これに加えて、映像をディスプレイに表示する前に動きぼやけを補償する画像処理を行うことによって、動きぼやけを減らす方法なども提案されている [50-53]。また、周波数領域分析に基づく動き補償逆フィルタリング (MCIF) などのデコンボリューション法が提案されている [54,55]。従来の補償フィルタは、フレーム内で一定の強度で発光するホールド発光型ディスプレイを使用しており、ホールド型ディスプレイで動きぼやけを補償するためには、理想的には無限の増幅を必要とする。ただし、実際のディスプレイでは、ディスプレイの輝度に制限があるため、無限に増幅することは不可能である。したがって、MCIF など従来法の有効性は、画像の低い空間周波数領域に限定されてしまう。一方、TWE では、ホールド発光とは異なる特性を持つため、TWE に最適化された補償フィルタを設計することで、より効果的に動きぼやけを抑制できると考えられる。したがって、本章では、空間周波数領域での TWE の特性を分析し、動きぼやけを抑制するために TWE 用に最適化された補償フィルタの作成方法について述べる。さらに、画像シミュレーションを用いて、TWE と補償フィルタの特性について詳しく説明するとともに、2次元画像への補償フィルタの応

用について検討し、その有効性を評価する。

### 3.2. 三角波形発光の空間周波数特性

本節では、前章で述べたホールド型ディスプレイにおける動きぼやけの基本原理に従って、シミュレーション画像を作成し、TWEの空間周波数特性を計算した。観測者の動く物体への追跡速度は目標速度の約0.9倍程度であるという報告[56]もあるが、これによるぼやけ量の違いは10%程度であり、相対的な比較では影響がないと考えられるため、シミュレーションでは単純化のために、観測者の追跡速度が目標速度に等しいとした。なお、人の視覚システムには動いている物体像を先鋭化する機能があることも報告されており[46]、シミュレートされた画像よりも実際の映像の方が先鋭化している可能性も考えられる。

図3.1に、TWEと従来のホールド型発光とを図示した。TWEでは、各フレームで輝度が徐々に増加し、三角波形に発光する。一方、ホールド型発光では、各フレームの間、輝度は一定に保たれている。

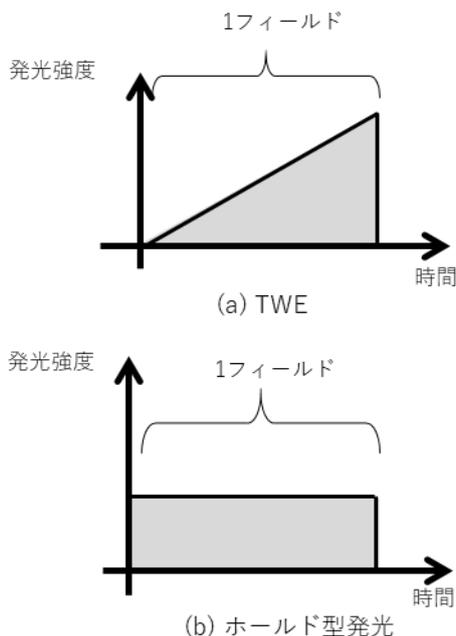


図 3.1 TWE とホールド型発光の比較

TWE とホールド型発光の特性を比較するために、各発光パターンにおける動画像の空間周波数応答 (MTF : Modulation Transfer Function) を、サインバースト信号を使用した動きぼやけシミュレーションにより計算した。サインバースト信号は図 3.2 に示すように、最

大輝度を  $L_{max}$ 、最小輝度を  $L_{min}$ とした正弦波の信号である。周波数 $f$ 、位相 $\varphi$ の入力サインバースト信号に対する空間周波数応答を  $MTF_{sim}$ として、以下の式で表す。

$$MTF_{sim}(f, \varphi) = \frac{L'_{max} - L'_{min}}{L_{max} - L_{min}}$$

ここで、 $L_{max}$ と  $L_{min}$ は入力サインバースト信号の最大レベルと最小レベルであり、 $L'_{max}$ と  $L'_{min}$ は動きぼやけをシミュレートした出力信号の最大レベルと最小レベルを表す。図 3.3は、0.3cpp (サイクル/ピクセル) の入力サインバースト信号から得られたホールド型発光と TWE のシミュレーション波形を示している。図内の“サンプリング信号”は、アナログのサインバースト信号から、画素において位相 0 でサンプリング (量子化) した信号を表す。

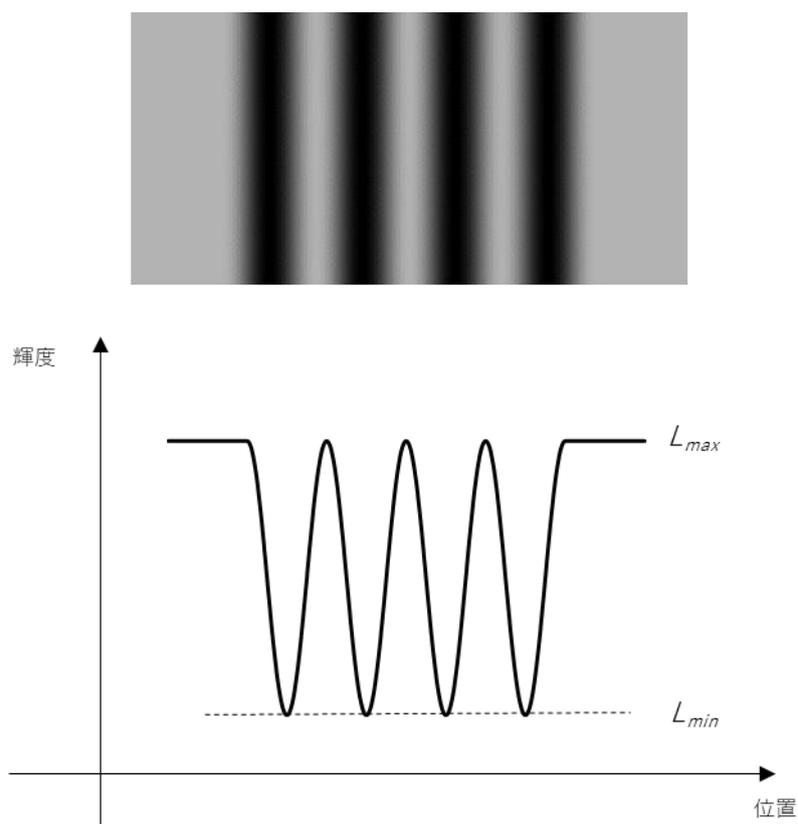


図 3.2 サインバースト信号の例

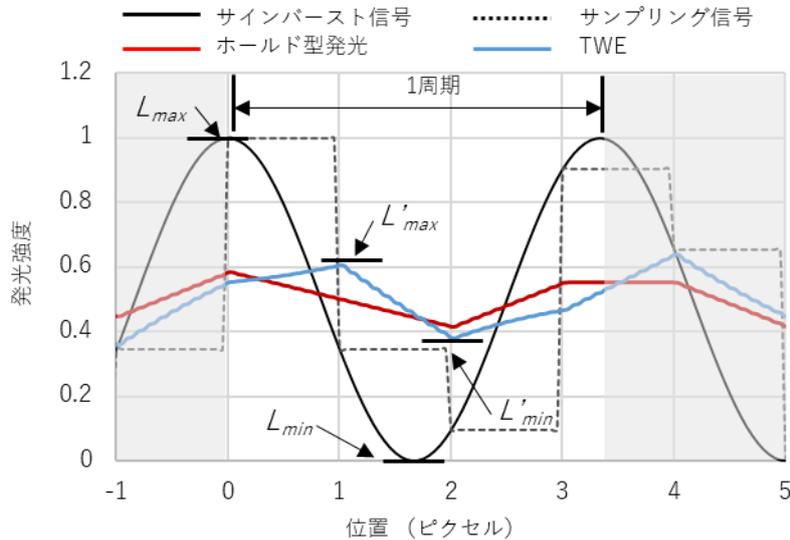


図 3.3 0.3cpp の入力信号における動画像の MTF の計算結果

シミュレーションでは、1つのピクセルを多数のサブピクセルに分割し、動きぼやけの基本原則からシミュレーション波形を計算し、1サイクルのシミュレーション波形から  $L'_{max}$  と  $L'_{min}$  を検出した。サインバースト信号のサンプリング位置により入力信号が変化するため、サインバースト信号の位相を変えながらシミュレーション波形を計算し、次式のように、それらの平均をとることで、以下のように空間周波数応答を計算した。

$$MTF_{sim}(f) = \frac{1}{n+1} \sum_{\varphi=0}^n MTF_{sim}(f, \varphi),$$

ここで、 $n$  はシミュレーションで計算した位相の数を表す。今回のシミュレーションでは、 $n=359$  として、360個の位相で計算した。図 3.4 は、動画の画面上の移動速度が 4ppf および 8ppf における MTF を計算した結果を示す。これらの図から、ホールド発光の MTF にヌルポイントがあることがわかる。一方で、TWE の MTF 特性は、ヌルポイントがなく、応答も高いという特徴が確認できる。したがって、TWE の使用により動画品質が向上することが期待できる。

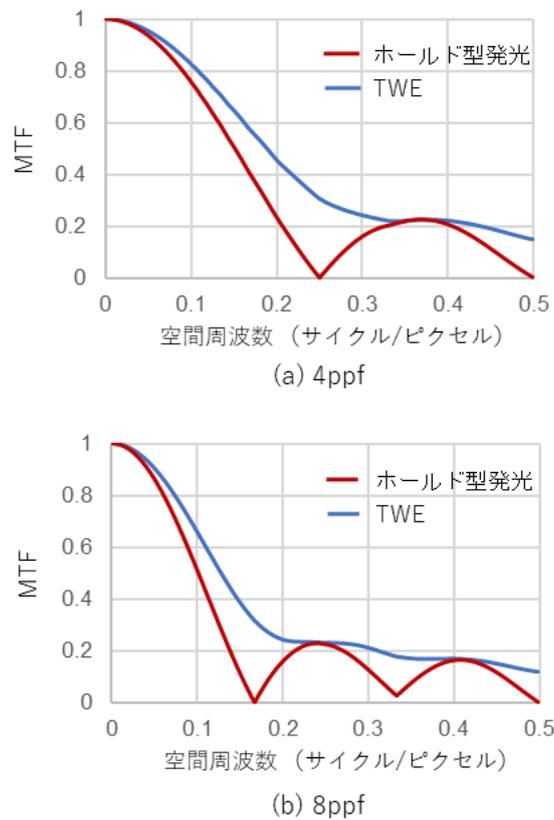


図 3.4 画面上の移動速度が 4ppf および 8ppf のときの MTF

### 3.3. 最適化補償フィルタの設計

ホールド型発光の空間周波数特性にはヌルポイントがあるため、低下した MTF を補償するためには無限の増幅が必要になる。そのため、従来法である MCIF などの補償フィルタを用いた信号処理の有効性は限定される。一方で、前節で述べたように、TWE には MTF 特性にヌルポイントがないため、TWE 用に最適化した補償フィルタを計算することが可能となり、より高い効果が期待できる。

TWE 用の補償フィルタを、離散フーリエ変換 (DFT) を用いて計算した。人の視覚系の動きぼやけは、追従視積分の結果であるため、一般に信号畳み込みモデルによって記述できることが知られている [8]。TWE ではフィールド時間内の光強度は増加していくため、人の視点がディスプレイ上の移動物体を追っているときは、ディスプレイ上の視点の位置によって光強度が変化するように見える。例えば、図 3.5 は、人間の目が 4ppf の移動速度で物体を追従視しているときに、画面の位置で 1 フィールド時間内に人の視覚システムが知覚する光強度を示している。

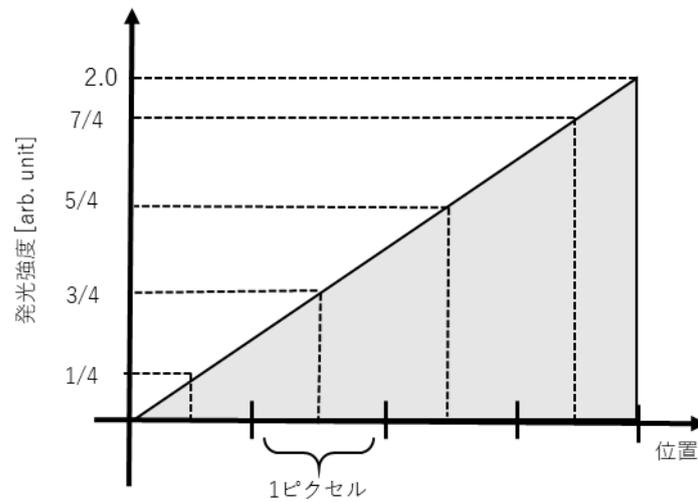


図 3.5 視線追従したときの 1 フィールド期間内の画面位置と発光強度の関係

したがって、4ppf で移動する画像の動きぼやけは、図 3.5 の三角波形発光の各点でサンプリングされた係数  $h_4$  の有限インパルス応答フィルタとして表すことができる。

$$h_4 = \left[ \frac{1}{16} \quad \frac{3}{16} \quad \frac{5}{16} \quad \frac{7}{16} \right]$$

この係数は、図 3.5 のサンプル値に各ピクセルの重みである 1/4 を掛けたものである。よって、4ppf の移動速度での空間周波数特性は、DFT を用いて以下のように計算することができる。

$$MTF_{DFT} = |DFT(h_4)|$$

図 3.6 は、4ppf と 8ppf の移動速度での  $MTF_{DFT}$  と  $MTF_{sim}$  を示している。  $MTF_{sim}$  は、前節の動きぼやけシミュレーションにより計算した結果である。  $MTF_{DFT}$  ではサンプリング点の数と位置（位相）が制限されているため、わずかな違いが発生しているが、特性はほぼ一致していることがわかる。これらの結果から、発光波形の MTF 特性は DFT を用いて表せることがわかる。

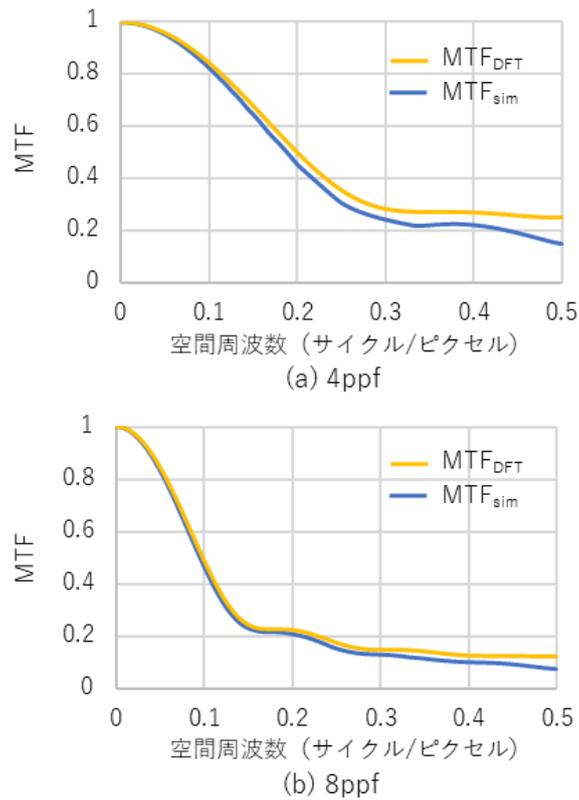


図 3.6 動きぼやけシミュレーションと DFT により計算した MTF 特性の比較

$k$ ppf の移動速度での係数は  $h_k$  として表すとすると、補償フィルタの特性をベクトル  $X$  とする場合、 $DFT(h_k)$  の各要素の逆数を計算することによって  $X_k$  を取得できる。すなわち、 $DFT(h_k)$  が次のように表される場合

$$DFT(h_k) = [a_1 + ib_1 \quad a_2 + ib_2 \quad \dots \quad a_n + ib_n]$$

$DFT(h_k)$  の逆特性を持つベクトル  $X_k$  は、次の式で表される。

$$X_k = \left[ \frac{1}{a_1 + ib_1} \quad \frac{1}{a_2 + ib_2} \quad \dots \quad \frac{1}{a_n + ib_n} \right]$$

したがって、 $k$ ppf の移動速度での補償フィルタ  $Enh_k$  は、次のように逆フーリエ変換 IDFT を使用して計算される。

$$Enh_k = IDFT(X_k)$$

図 3.7 は、オブジェクトが移動する速度ごとに、上記の式によって計算された TWE の最適化された補償フィルタを示している。移動速度の単位  $V$  は 1 フィールドあたりの移動ピクセル数 (ppf) であり、図 3.7 にプロットされた点は、各移動速度での補償フィルタ係数と位置を示している。補償フィルタ係数は、図の位置 0 付近に大きな振幅を持つ 2 つの点と、これらのポイントの左側に小さな振幅を持ついくつかのポイントがあり、その他はほぼゼロとなっている。移動速度が速いほど、位置 0 付近の振幅が大きくなり、図の左側にある小さい振幅の距離が長くなる。これらの特性は、移動速度が速いほど、より高い増幅とより多くのフィルタタップが必要であることを示している。たとえば、移動速度が 8ppf の強調フィルタでは、約 10 個のタップと 4 倍の振幅が必要となることを表している。

図 3.8 は、提案した動きぼやけ補償回路の基本構成を示している。最適化補償フィルタは、動きベクトルの速度と方向に依存する。したがって、移動するオブジェクトの速度と方向を入力画像から推定し、事前に移動速度ごとに計算された最適化補償フィルタを移動する物体の方向に従って回転する。最後に、求めた最適化補償フィルタにより入力画像を強調してから、ディスプレイに画像を表示する。その結果、人間の視覚系では強調された画像がぼやけ、網膜上では元の画像が再現されることとなる。

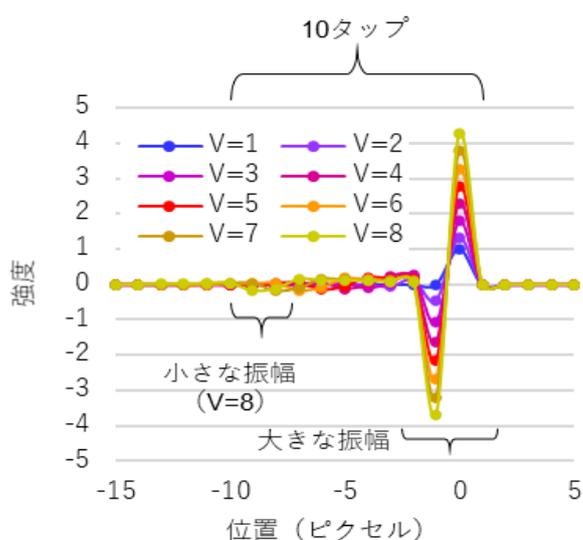


図 3.7 移動速度ごとの補償フィルタ係数

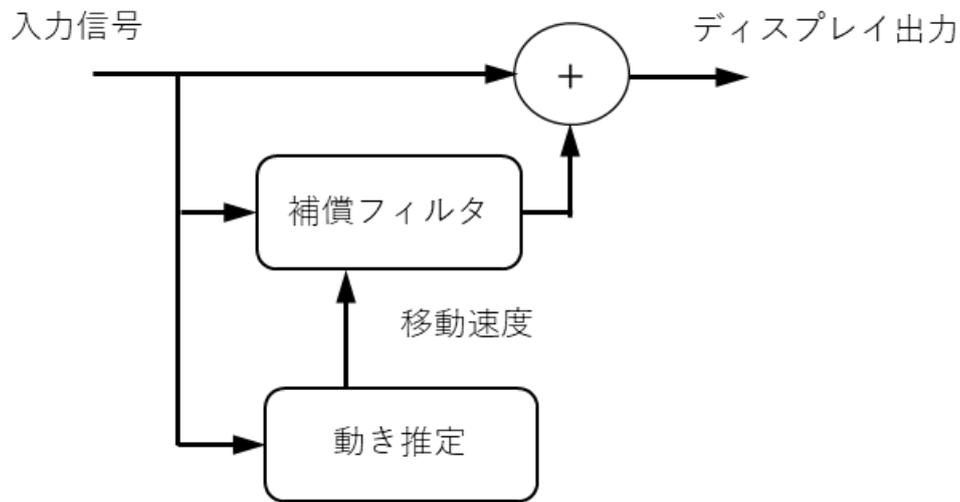
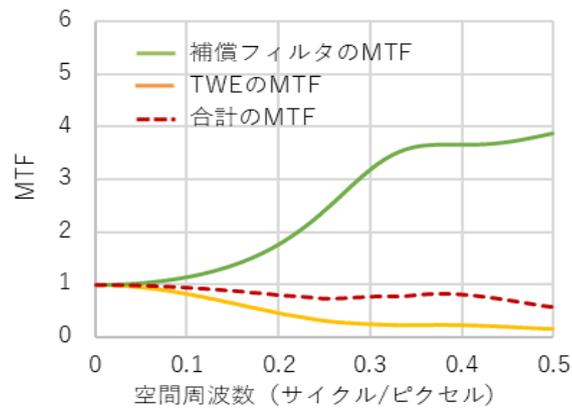


図 3.8 動きぼやけ補償回路の基本構成

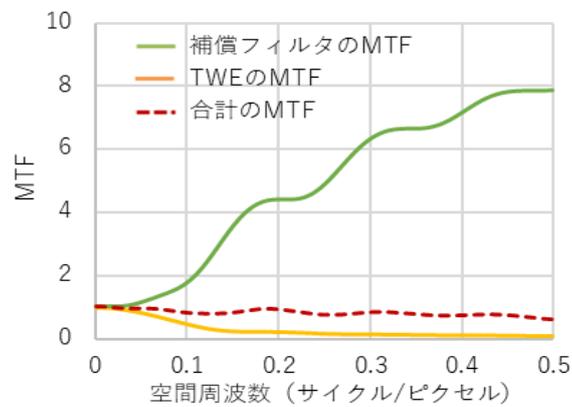
### 3.4. 補償フィルタ性能評価

移動速度が 4ppf および 8ppf の補償フィルタの MTF 特性を、図 3.9 に示す。これらの特性は、図 3.7 の IDFT から取得した補償フィルタのうち 15 タップを使用して計算した。緑色の線は、補償フィルタの MTF 特性を、黄色の線は TWE の MTF を示し、赤い破線は TWE と補償フィルタを使用した場合の合計の MTF、つまり各移動速度での人の視覚システムで認識されると予想される MTF を示している。これらの結果から、全体の MTF を 1 付近に保っていることがわかる。したがって、TWE と補償フィルタを用いることで、動きぼやけによる MTF の劣化を改善することが期待できる。

TWE 用補償フィルタの基本的な性能を、動きぼやけシミュレーションを用いて評価した。補償フィルタを通した映像信号には、実際のディスプレイでは再現できない負の値や高い輝度レベルが含まれる。そこで、図 3.10 に示す 2 つの実験を用いてその有効性を評価した。実験 A では、補償フィルタと動きぼやけシミュレーションを用いて、基本性能を評価した。また、実験 B では、実用性を評価するため、輝度レベルの範囲を 0 から 1 とするダイナミックレンジの制限を考慮した。実際には、負の値はゼロとし、1 より大きい値は 1 にクリップした。すなわち、以下のように計算式に示すようにダイナミックレンジを制限した。



(a) 4ppf



(b) 8ppf

図 3.9 移動速度は 4ppf と 8ppf における補償フィルタと TWE の MTF 特性

$$L_{out} = \begin{cases} 1 & (1 < L_{in}) \\ L_{in} & (0 \leq L_{in} \leq 1) \\ 0 & (L_{in} < 0) \end{cases}$$

実験では、図 3.11 に示すような、4 サイクルのサインバースト信号を使用した。ここで、“s”と“t”はそれぞれ最大輝度レベルと最小輝度レベルを示す。まず、サインバースト信号からピクセル毎にサンプリングしたデジタル信号を作成し、動きぼやけ補償回路に入力した。その補償された信号を水平方向にスクロールしたと仮定して、追従視した際に視認される輝度レベルを、動きぼやけをシミュレーションにより計算した。従来法としては、アンシャープマスクを用いた手法を比較として用いた。アンシャープマスクの係数を以下に示す。

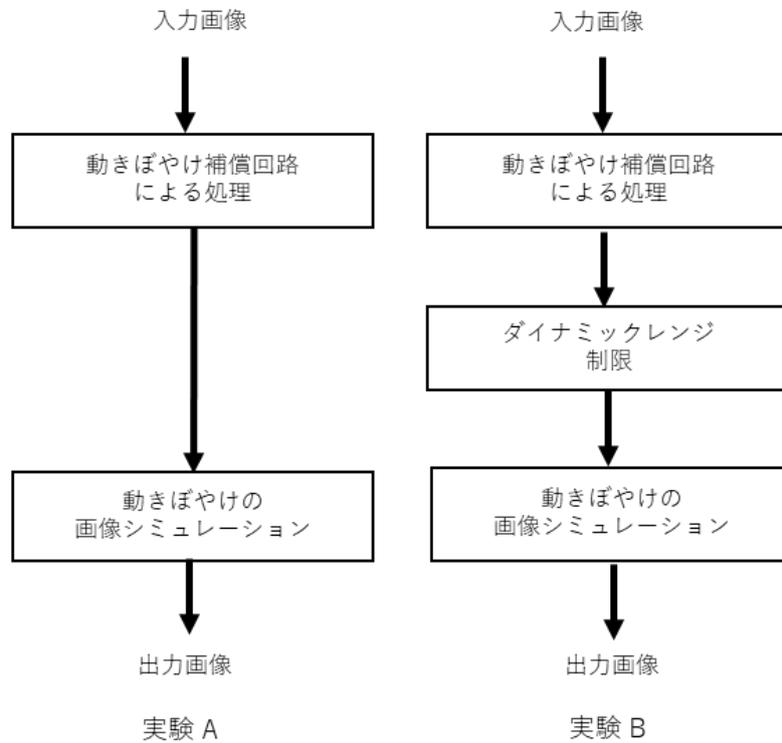


図 3.10 補償フィルタ評価のための画像処理の流れ

$$Enh_{unsharp, u} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{3} & \frac{2u}{3} & -\frac{1}{3} \end{bmatrix}$$

ここで、“ $u$ ”は動き量によって選択されるパラメータである。パラメータ“ $u$ ”は、図 3.12 に示すように、振幅が最適化補償フィルタの振幅と同様になるように選択した。

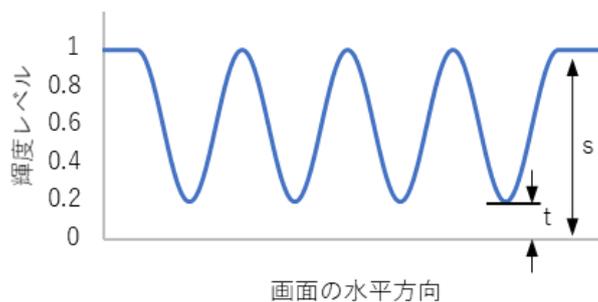


図 3.11 4 サイクルのサインバースト信号

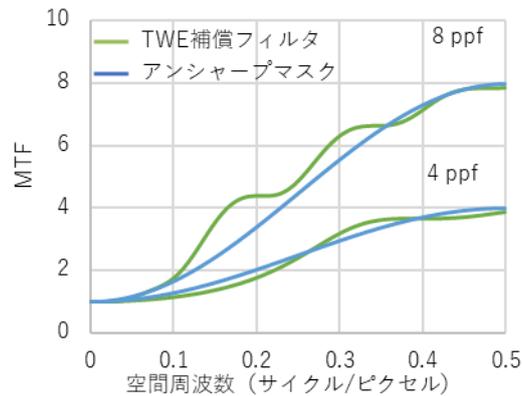
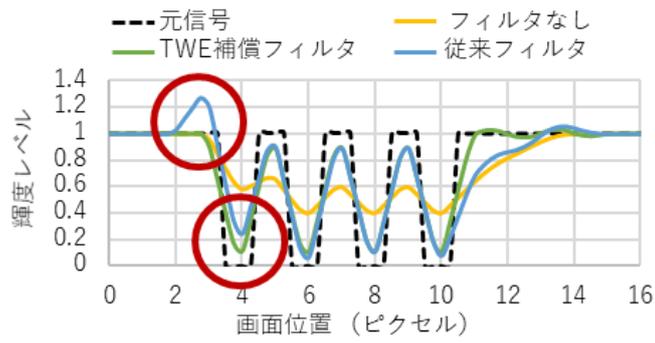


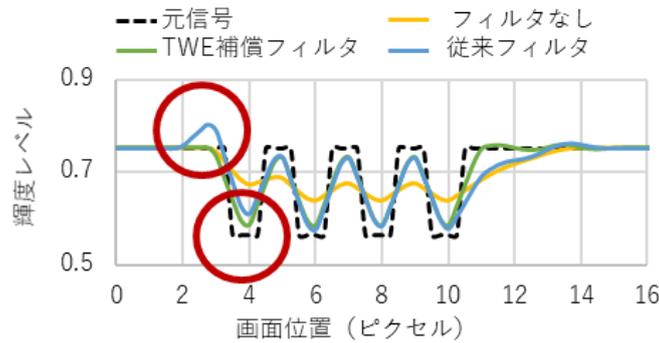
図 3.12 TWE 用補償フィルタとアンシャープマスクの MTF 特性

図 3.13 に、実験 A でのシミュレーションの結果を示す。図 3.13 (a)は、入力信号の振幅が 0~1 の高コントラスト信号の結果であり、図 3.13 (b)は、入力信号の振幅が 0.55~0.75 の低コントラスト信号の結果である。入力正弦波信号の空間周波数は、1 ピクセルあたりの周波数を 0.5cpp とし、移動速度は水平方向に 4ppf とした。黒い破線は、図 3.11 に示すサインバースト信号からサンプリングされた入力信号を示す。黄線は、“補償フィルタなし”の場合、緑線は“TWE 補償フィルタ”を適用した場合、青線は、アンシャープマスクによるエッジ強調した場合を“従来フィルタ”として示す。“補償フィルタなし”の信号では、コントラストの低下と信号歪みが観察されるのがわかる。従来法では、コントラストは十分に高いものの、信号の歪みが観察され、図 3.13 の赤い円で示す箇所に、オーバーシュートと振幅の低下が見られる。一方で、TWE 補償フィルタでは、歪みが小さく、コントラストもほぼ一定であることを示している。

図 3.14 は、実験 B でのシミュレーションの結果を示す。図 3.14 (a)に示すように、ダイナミックレンジが制限されているため、TWE 補償フィルタも従来フィルタ同様に高コントラスト信号に対して効果がないことがわかる。ただし、一般的な映像信号には、通常、このような高コントラストの信号は含まれることはほぼないと考えられる。一方で、低コントラスト信号の場合、図 3.14 (a)に示すように、TWE 補償フィルタは、図 3.13 (b)と同様に、歪も小さく、ほぼ元の波形のコントラストを維持できていることがわかる。したがって、提案した TWE 用に最適化された補償フィルタは、実際の使用における動きぼやけを抑制するのに十分に効果的であると考えられる。

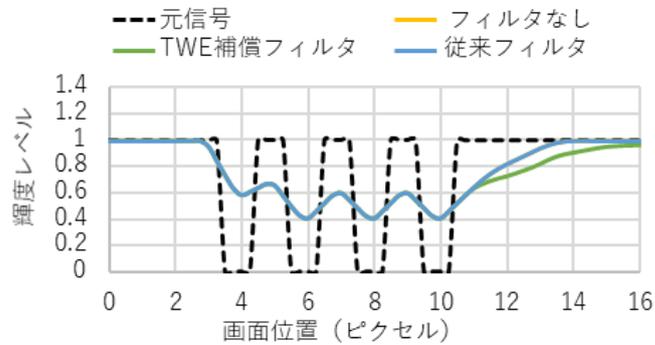


(a) 高コントラスト信号 ( $s = 1$ ,  $t = 0$ )

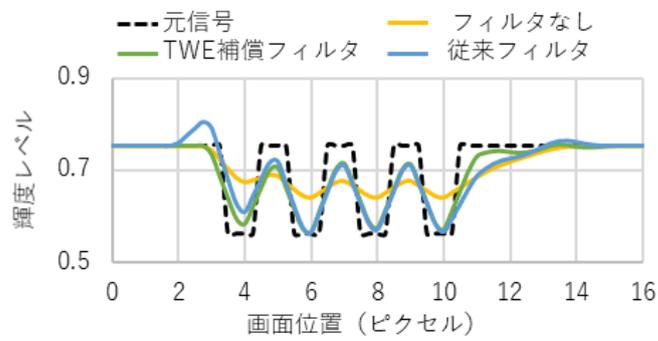


(b) 低コントラスト信号 ( $s = 0.75$ ,  $t = 0.55$ )

図 3.13 実験 A でのシミュレーション結果



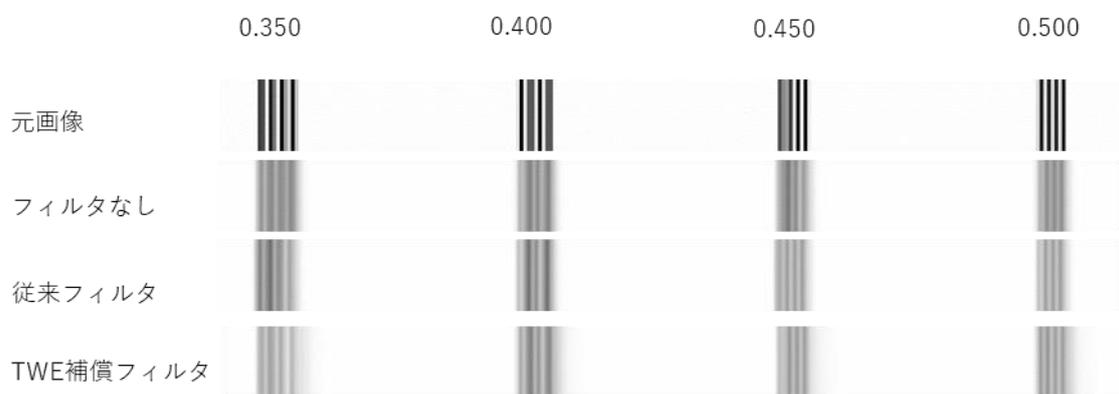
(a) 高コントラスト信号 ( $s = 1$ ,  $t = 0$ )



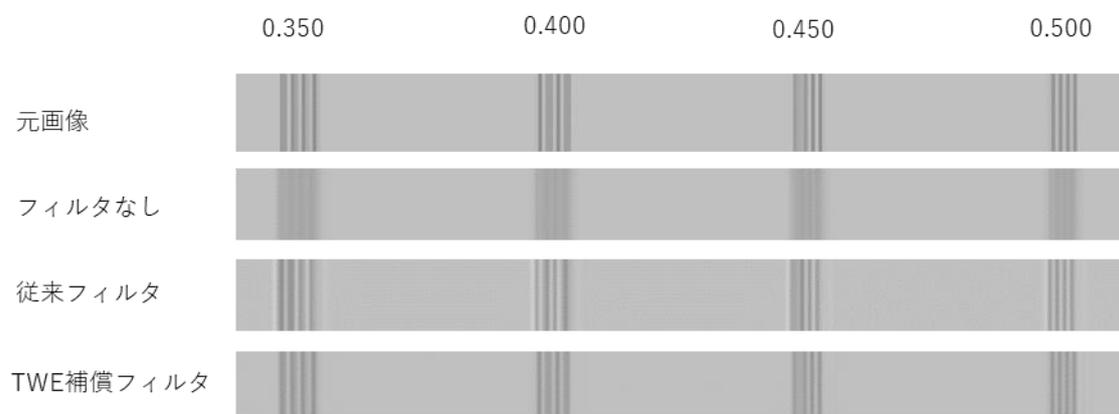
(b) 低コントラスト信号 ( $s = 0.75$ ,  $t = 0.55$ )

図 3.14 実験 B でのシミュレーション結果

図 3.15 は、実験 B において、それぞれ(a)高コントラスト信号と(b)低コントラスト信号において、入力正弦波信号の空間周波数を 0.350cpp、0.400cpp、0.450cpp、0.500cpp としたときの画像シミュレーションの結果を示している。高コントラスト信号においては信号波形での結果と同様に効果がほぼないことが画像からも確認できる。一方で低コントラスト信号での結果は、フィルタなしでは同様にぼやけているのがわかるが、TWE 補償フィルタが原画像に近く再現できていることがわかる。また、従来フィルタではコントラストはある程度補償できていることがわかるが、信号波形で見られたオーバーシュートなどの部分が偽信号となり、不自然な画像となっていることがわかる。次節以降で実際の自然画像を用いた効果を検証する。



(a) 高コントラスト信号 ( $s=1$ 、 $t=0$ )



(b) 低コントラスト信号 ( $s=0.75$ 、 $t=0.55$ )

図 3.15 実験 B でのシミュレーション結果

### 3.5. 画像シミュレーションによる評価

#### 3.5.1. 水平方向への移動における評価

前節では、正弦波信号を使用し、TWE に最適化された補償フィルタの基本的な性能について評価した。本節では、はじめに、テスト画像を用いて、提案手法をホールド型発光とアンシャープマスクを併用した従来法と比較した。次に、TWE に最適化された補償フィルタの有効性について評価し、最後に、任意の方向の視線移動に対して適用する方法について検討する。本節の動きぼやけシミュレーションでは、図 3.16 に評価に使用した“ヨットハーバー”のテスト画像を使用し、前節の実験 B の評価システムを用いて提案する補償フィルタの性能を評価した。



図 3.16 テスト画像「ヨットハーバー」

**エラー! 参照元が見つかりません。**に、補償フィルタなしの TWE、補償フィルタありの TWE、ホールド発光とアンシャープマスクを併用した従来法で、水平方向に 4ppf の移動速度で追従視したとしてシミュレーション画像を計算した結果を示す。**エラー! 参照元が見つかりません。** (d)に示す従来法では、文字に歪が生じていることがわかる。図 3.4 に示したように、ホールド型発光の空間周波数応答の特性にはヌルポイントがあるため、高周波数領域では画像が復元できず歪が生じてしまう。一方で、**エラー! 参照元が見つかりません。** (c)の提案手法のシミュレーション画像では、はっきりとして、歪みのない文字を表示できている。**エラー! 参照元が見つかりません。** (b) は、補償フィルタなしの TWE を用いたシミュレーション画像の結果を示しているが、文字が不鮮明であることが確認できる。したがって、

最適化された補償フィルタと TWE を用いることで、実際の画像でも動きぼやけによる劣化を抑制できる可能性があることがわかる。



(a) 元画像



(b) 補償フィルタなしTWE



(c) 補償フィルタありTWE  
(提案手法)



(d) 従来フィルタとホールド型発光

図 3.17 水平方向に 4ppf の移動速度で追従視したときのシミュレーション画像

図 3.18、及び図 3.19 図 3.19 は、TWE で表示する場合に、TWE 用補償フィルタと、アンシャープマスクによるエッジ強調フィルタを用いた場合において、それぞれ、水平方向に 4ppf 及び 8ppf で移動した場合の動きぼやけの画像シミュレーション結果を示している。補償フィルタなし（TWE のみ）の画像では、動きぼやけによって文字が不明瞭になっていることがわかる。また、“アンシャープマスク”を使用した画像では、文字の周囲に誤った輪郭や歪みがあるが、“TWE 用補償フィルタ”の画像では、文字がほとんど歪むことなく表示されていることを確認できる。この結果は、自然画像においても、TWE 用補償フィルタは、



(a) 補償フィルタなし



(b) TWE用補償フィルタ



(c) アンシャープマスク

図 3.18 TWE 表示時に水平方向に 4ppf の移動速度で追従視したときのシミュレーション画像

従来のアンシャープマスクを用いた補償方法よりも優れた動きぼやけ改善効果があることを示している。図 3.19 では、移動速度が速く補償フィルタはより高い増幅を必要とするため、ダイナミックレンジの制限により動きぼやけの抑制効果は低くなるが、“TWE 用補償フィルタ”の画像の文字は、アンシャープマスクを用いた画像よりもはっきりとした文字を見ることができる。したがって、TWE 補償フィルタは通常の画像のダイナミックレンジの制限下でも有効であることを示している。



(a) 補償フィルタなし



(b) TWE用補償フィルタ



(c) アンシャープマスク

図 3.19 TWE 表示時に水平方向に 8ppf の移動速度で追従視したときのシミュレーション画像

### 3.5.2. 二次元平面での評価

これまで、水平方向に追従視した場合の動きぼやけの抑制効果に関して評価してきたが、ここではより実用的に、任意の方向に追従視した場合の最適化補償フィルタの適用方法とその効果について説明する。任意の方向ごとに最適化された補償フィルタを計算することは非効率的なため、図 3.20 に示すように、物体の移動方向を入力画像から推定することで、追従視の方向を決定し、事前に移動速度ごとに計算された最適化補償フィルタを追従視の方向に回転する。最後に、求めた最適化補償フィルタにより入力画像を強調してから、動きぼやけのシミュレーション画像を計算した。ここでも実験 B の手順によってシミュレーション画像を作成した。

図 3.21 に、移動方向と速度が、それぞれ、水平方向に 4ppf、垂直方向に 6ppf の場合について計算した結果を示し、図 3.22 では、水平方向に 6ppf、垂直方向に 4ppf の場合について計算した結果を示した。TWE 用補償フィルタは、移動速度は $\sqrt{4^2 + 6^2} = \sqrt{52} \cong 7.211$ であるため、水平方向に 7ppf 移動した場合の補償フィルタ係数を用いて、移動方向に合わせて回転して計算した。どちらの図においても、“TWE 用補償フィルタ”の画像の文字は、補償フィルタなしの場合やアンシャープマスクよりも歪が少なく、鮮明に再現されていることが確認できる。これらの結果により、水平方向で計算した TWE 用補償フィルタを回転させることで、任意の方向の動きにおいても動きぼやけの抑制に有効であることを確認した。

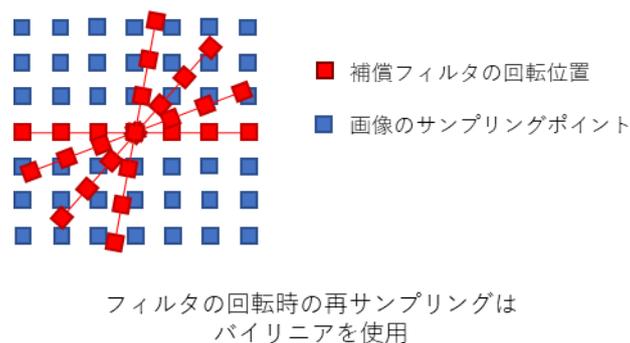


図 3.20 最適化補償フィルタの二次元平面への適用



(a) 補償フィルタなし



(b) TWE 補償フィルタ



(c) アンシャープマスク

図 3.21 TWE 表示時に水平方向に 4ppf、垂直方向に 6ppf の移動速度で追従視したときのシミュレーション画像



(a) 補償フィルタなし



(b) TWE補償フィルタ



(c) アンシャープマスク

図 3.22 TWE 表示時に水平方向に 6ppf、垂直方向に 4ppf の移動速度で追従視したときのシミュレーション画像

### 3.6. 結言

本章では、フレームレート的高速化を行わなくても動きぼやけの低減が可能な TWE に着目し、TWE による動画像の空間周波数特性を詳細に解析した。動きぼやけメカニズムに基づくシミュレーションにより、その空間周波数応答を計算し、動きぼやけを抑制するための TWE に最適化された補償フィルタの設計指針を示した。補償フィルタの性能を評価するために、サインバースト信号を使用した動きぼやけシミュレーションにより、動きぼやけと映像歪みを抑制する効果があることを示した。さらに、最適化補償フィルタの実用性を検証するために、テスト画像を用いた画像シミュレーションを行い、その効果を検証した。実際のダイナミックレンジの制限下では、効果の低下が見られたものの、従来法と比較して、動きぼやけと、映像歪みの抑制効果が優れていることを確認した。さらに、最適化された補償フィルタを回転させることにより、任意の方向でも動きぼやけを低減することが可能であることを示し、提案手法を用いて実際の画像により動きぼやけ抑制の有効性を実証した。

## 第4章 パルス密度変調による階調表示方式

### 4.1. 緒言

前章では、振幅変調方式において信号処理を用いて動画質を改善する手法について検討した。高フレームレート化しなくてもある程度の動き画質の改善が可能であるが、動きぼやけの改善は限定的であった。そのため、根本的な解決のためには、2章で述べたように 240Hz から 480Hz 程度に高フレームレート化することが望ましい。また、振幅変調方式では、駆動 TFT の変動により画質が劣化する問題があり、デジタル駆動による PWM 方式が採用されることも多いが、PWM 方式は、偽輪郭の問題があるとともに、高フレームレート化することが難しいという問題がある。そこで、高フレームレート化に適したデジタル駆動方式として、発光パルス密度で輝度を制御するパルス密度変調 (PDM: Pulse-Density Modulation) 方式[57,58]に着目した。ここで提案されている手法では、デルタシグマ回路を用いて信号をパルス密度に変調している。この方式は従来のフレームベースの駆動システムとは異なり、明確なフレーム期間を持たない独特の映像表示特性があり、単純な信号処理システムにより偽輪郭の発生を抑制するとともに、フレームレート的高速化も可能であり、動画質の向上が期待できる。しかしながら、従来のデルタシグマ回路を用いた PDM 方式では、遅延バッファによるフィードバックループによるデジタル化を実現しているが、動画像において人の視点が時間的に移動してしまうと、遅延バッファが正常に動作せず、ある画素のバッファが他の画素で使われたように見えてしまう。そのため、画像にノイズが乗る新たな動画質の劣化が発生してしまう可能性がある。そこで、新たに、ランダムディザマトリックスを用いた信号処理回路により PDM による階調表示方式を実現する方法を提案し、その表示画質や有効性に関して述べる。

### 4.2. デジタル駆動の特徴

AM-OLED ディスプレイにおける基本的な 2-TFT-1-capacitor の画素回路を図 4.1 に示す。OLED ディスプレイは、OLED 素子に流れる電流に応じて発光強度が変化することから、アナログ駆動では、駆動 TFT に流れる電流を制御することで発光強度を変調している。

しかしながら、駆動 TFT に電流や熱、光などのストレスがかかると駆動 TFT の閾値が変動してしまい、輝度に変化し、画質劣化が生じる。一方、デジタル駆動では、駆動 TFT をスイッチとしてのみ使用することで、変動の影響を抑制することができる。図 4.2 は、駆動 TFT の閾値が異なる場合におけるデータ電圧と OLED 素子に流れる電流の関係を示している。図に示すように同じデータ電圧でも異なる電流量となり、アナログ駆動ではデータ電圧によって電流量を制御することから、駆動 TFT の閾値特性が異なると輝度のばらつきが生じることがわかる。しかし、デジタル駆動では、駆動 TFT はスイッチとして動作し、 $V_{low}$  と  $V_{high}$  の 2 点でのみ動作することから、閾値変動の影響を抑制できる。そのため、デジタル駆動は、閾値の変動を補償するための特別な画素回路や信号処理などを必要としないため、より簡素な回路で実現できることから高速な駆動が可能であり、高フレームレート化に向いていると考えられる。

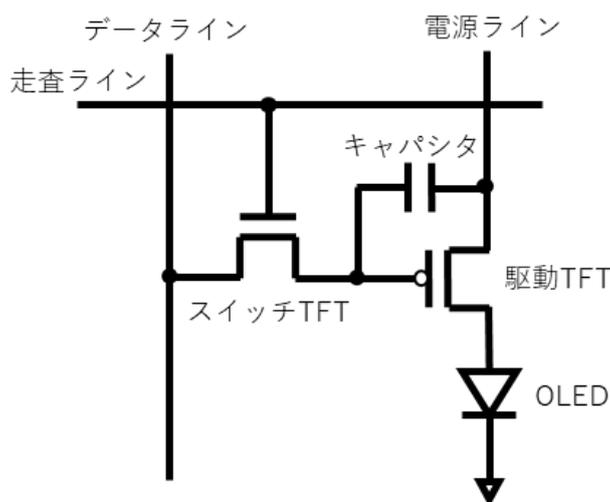


図 4.1 AM-OLED の画素回路

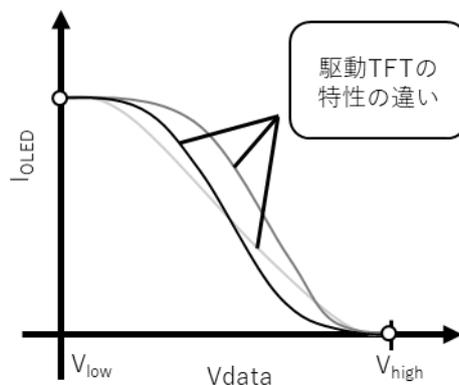


図 4.2 駆動 TFT 特性の違いによる電圧と電流の関係

従来のデジタル駆動方式のディスプレイでは、フレームベースのシステムとの親和性の高さから、2章で説明したように、階調表示方式に2のべき乗の発光重みをもつSFで構成されるPWM方式が一般的に広く用いられている。このPWM方式では、画素の明るさに応じて選択されたサブフィールドのみ発光することで、階調を表現する。一方で、PDM方式は、発光間隔を画素ごとに制御することで、階調を表現する。発光間隔を短くし発光密度を高くすると明るく表示され、発光間隔を長くし発光密度を低くすると暗く表示される。このように、PDM方式はこれまでのフィールド単位での制御とは異なる独特な特徴を持っている。

図4.3及び図4.4に、これらの階調表示方式の違いを簡潔に示す。図4.3では、最も単純なビット幅に応じたサブフィールドを持つ256階調のPWM方式の例を用いて、125から129まで信号レベルが変化する波形を示しており、PWM方式の発光波形と、1フィールド期間の発光の積分値を示している。人の視覚システムは一定期間の発光の積分により明るさを認識するため、あるタイミングでの明るさは発光波形を1フィールド期間の発光を積分した値とした。発光の積分値は、127と128の間で大きく下がっていることが確認され、誤った明るさで認識されることがわかる。このように、発光タイミングが信号レベルにより異なることにより、PWM方式では、偽輪郭による画質劣化が発生してしまう。図4.4にPDM方式の発光波形と1フィールド期間の発光の積分値を示している。パルス密度が一般的なフレームレート60Hzよりも十分に高い場合には、どのような位置で1フィールド期間の駆動波形を積分しても適切な明るさで認識されることが確認できる。このように、PDM方式では偽輪郭の発生を抑制することができるとともに、明確な1フィールド期間を設定する必要がないことが特徴となる。ただし、従来のデルタシグマ回路を用いたPDM方式[56,57]では、遅延バッファによるフィードバックループによるデジタル化を実現しているが、動画像において人の視点が時間的に移動してしまうと、遅延バッファが正常に動作せず、ある画素のバッファが他の画素で使われたように見えてしまう。そのため、画像にノイズが乗る新たな動画質の劣化が発生してしまう可能性がある。そこで、新たに、ランダムディザマトリックスを用いた信号処理回路によりPDMによる階調表示方式を実現する方法を提案する。

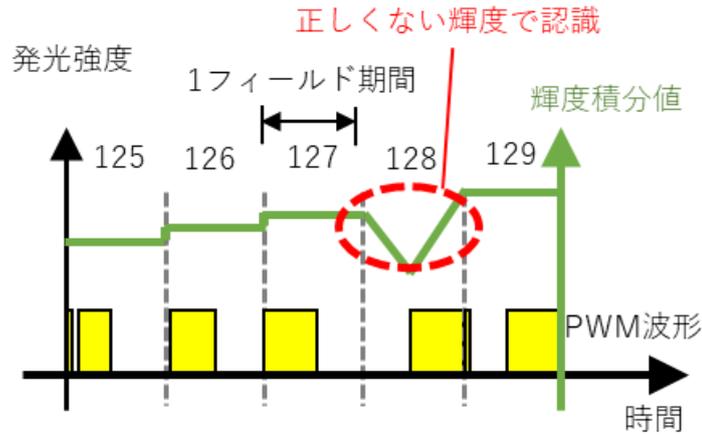


図 4.3 PWM 方式の特徴

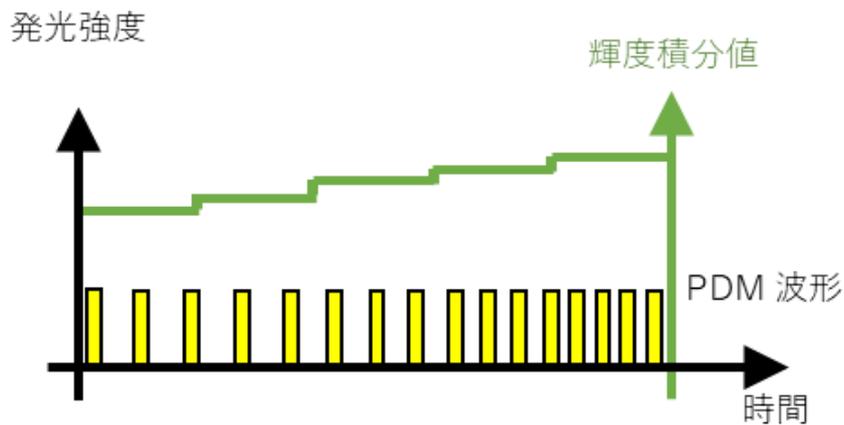


図 4.4 PDM 方式の特徴

#### 4.3. ランダムディザマトリックスを用いたパルス密度変調による階調表示方式

##### 4.3.1. 提案方式の特徴

新たな PDM による階調表示方式を実現するためのランダムディザマトリックスを用いた信号処理方法を図 4.5 に示す。入力された映像信号は、乱数発生器から出力された値を閾値として、バイナリー値に変換される。例えば、PDM 方式の駆動周波数（1 秒間の表示回数）を 960Hz とし、図 4.6 に示すように、映像がフレームレート 60Hz の 8bit で入力され、

ある画素の信号レベルが 128 であったとする。乱数発生器からは駆動周波数に合わせてランダムに 0~255 の間の数が出力され、量子化器において、ランダム値を閾値として入力信号と比較し、信号レベルが閾値より大きければ 1 を出力し、小さければ 0 を出力する。これにより、1 フィールドの間に 16 個のバイナリー信号が出力され、このビットストリームを用いて、有機 EL パネルの発光と非発光を制御する。人の視覚システムの応答速度は 60Hz 程度であるため、表示パネルの駆動周波数よりも十分に遅く、一定期間の発光の積分を明るさとして認識するため、パルス信号に LPF (low-pass filter) を掛けたのと同様の効果を得ることができる。これにより、発光密度を明るさに変換して認識することが可能となる。

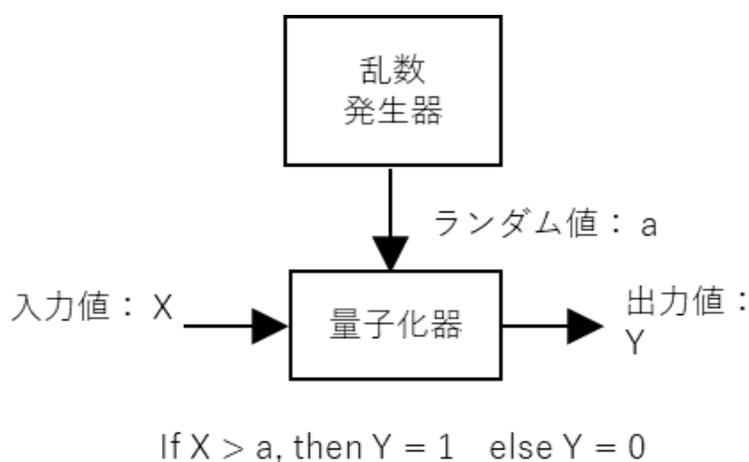


図 4.5 ランダムディザによる信号処理

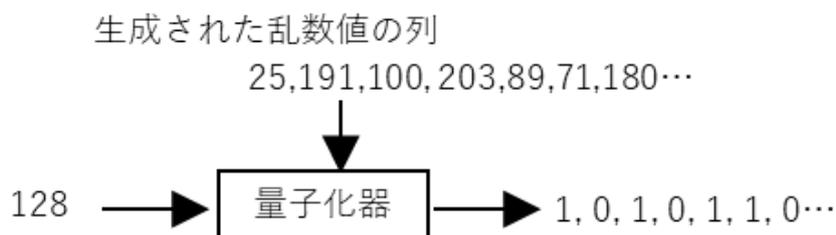


図 4.6 ランダムディザによる信号処理の一例

#### 4.3.2. ランダムディザにホワイトノイズマスクを用いたときの画質

はじめに、提案した信号処理回路を用いた PDM による階調表示方式に必要な駆動周波数を求めるため、ランダムディザにホワイトノイズマスクを用いた時の画質をシミュレーションにより調査した。人の視覚システムにおけるフリッカーの臨界融合周波数 (Critical Fusion Frequency) は 60Hz 程度とされるため、発光の積分期間を 1/60 秒とし、ある駆動周波数におけるシミュレーション画像は、1/60 秒間に表示される枚数分のバイナリー画像を繰り返し作成し、作成したバイナリー画像群を積算し平均化することで作成した。バイナリー画像は、生成したホワイトノイズマスクを閾値として作成した。ホワイトノイズマスクは、バイナリー画像を作成するたびに更新した。作成したシミュレーション画像の画質は原画像との PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) 及び、SSIM (Structural similarity) [59] を計算することにより評価した。PSNR は画質劣化の客観評価尺度として利用されており、2 つの画像の信号レベルの平均二乗誤差 (MSE : Mean Square Error) を信号の最大値との比として計算したものである。以下に、8bit 信号の場合の計算式を示す。

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i,j} (A(i,j) - B(i,j))^2$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{MSE}$$

$A(i,j)$ 、 $B(i,j)$  は比較する画像 A と画像 B の座標  $(i,j)$  の信号レベルを表し、 $n$  は画像の画素数である。また、SSIM は符号化劣化の評価によく用いられ、PSNR などの単純な信号ノイズ比による評価と異なり、空間方向における人の LPF 特性についてガウシアンフィルタを用いることで考慮しており、より人の視覚特性に近く、符号化パラメータの違いによる画質の劣化について、主観評価との相関が高いとされている。図 4.7 に評価画像を示し、図 4.8 に PSNR による評価結果を、図 4.9 に SSIM による評価結果を示した。図は横軸に駆動周波数、縦軸に PSNR 及び、SSIM の値とした。評価値は評価画像に依存していることがわかるが、いずれも駆動周波数を上げることで画質が向上していくことがわかる。SSIM では、0.98 以上で良好な画質とされており、ランダムディザにホワイトノイズマスクを用いた場合、良好な画質を得るためには 15,000Hz 以上の非常に高速な駆動周波数が必要になること

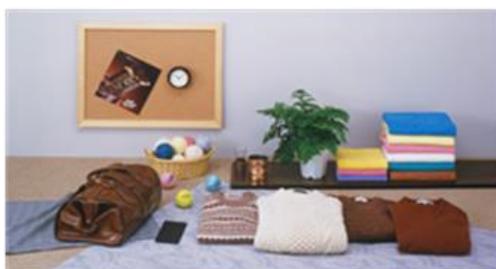
がわかる。図 4.10、及び、図 4.11、図 4.12 はシミュレーション画像の一部を切り出したものであり、それぞれ評価画像のエッフェル塔、ヨットハーバー、ルームの一部である。いずれも駆動周波数が高いほど視認されるノイズが減少し画質が向上していき、18,000Hz の駆動周波数においては、ノイズが抑制されていることがわかる。



エッフェル塔



ヨットハーバー



ルーム

図 4.7 評価に用いた画像

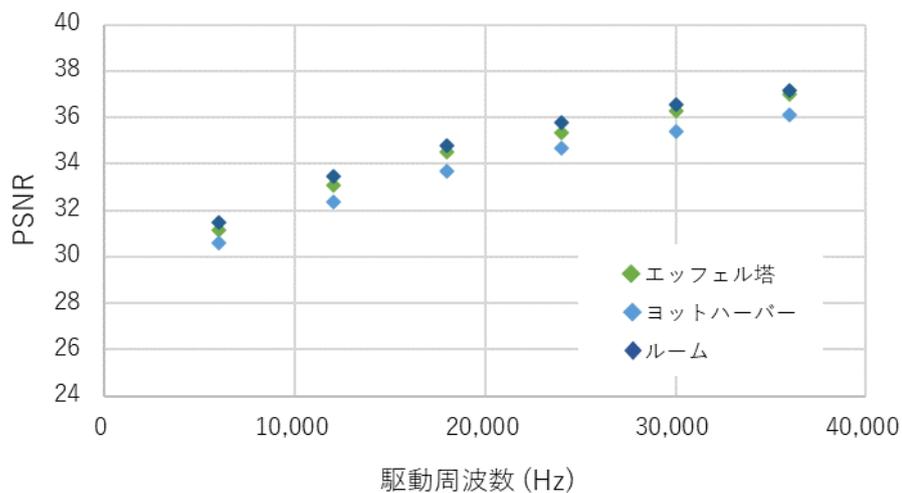


図 4.8 ランダムディザにホワイトノイズを用いた場合の駆動周波数と PSNR の関係

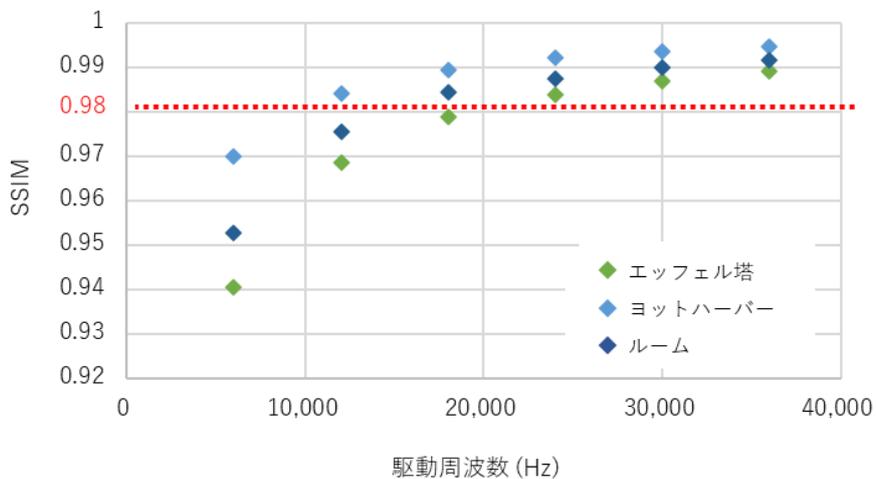
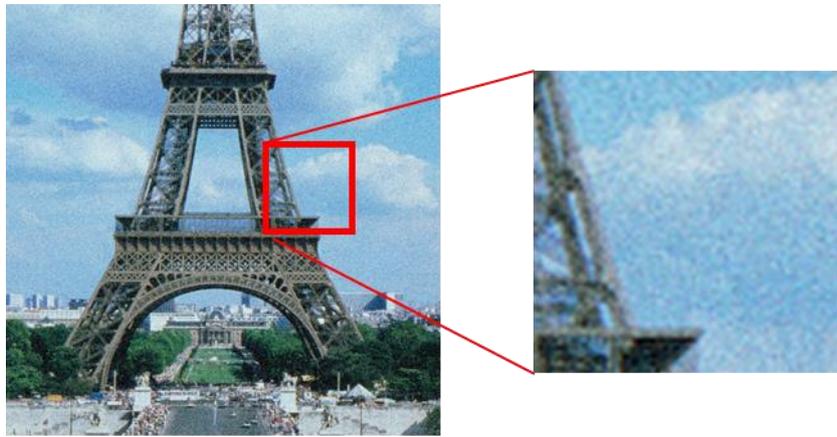
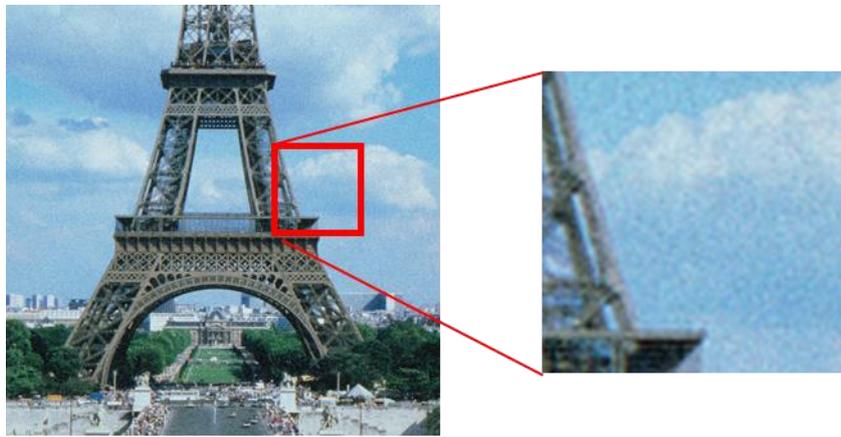


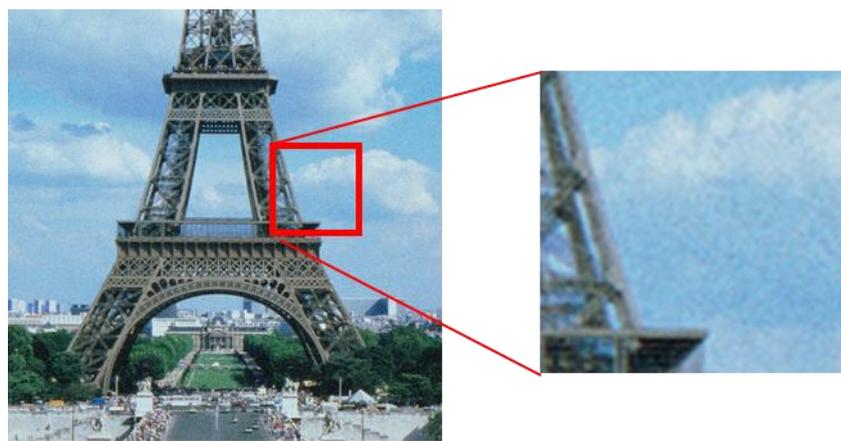
図 4.9 ランダムディザにホワイトノイズを用いた場合の駆動周波数と SSIM の関係



(a) 6,000 Hz  
SSIM: 0.9406

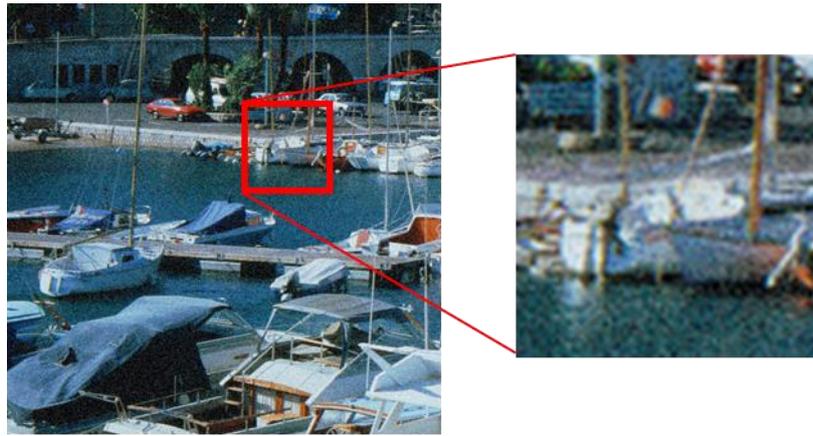


(b) 12,000 Hz  
SSIM: 0.9686

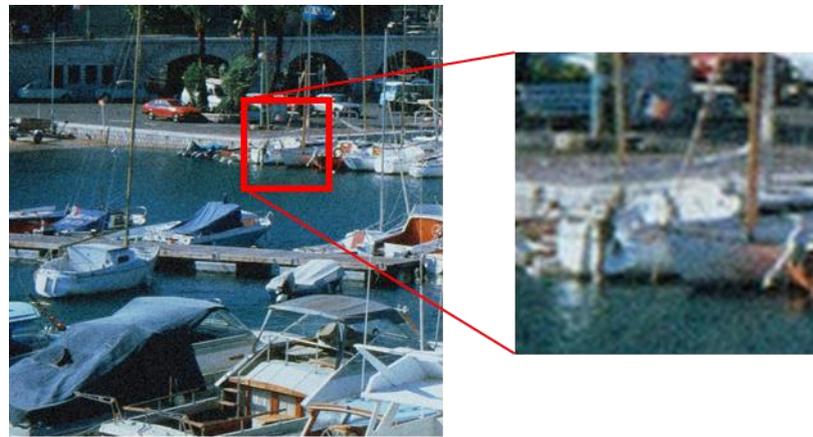


(c) 18,000 Hz  
SSIM: 0.9788

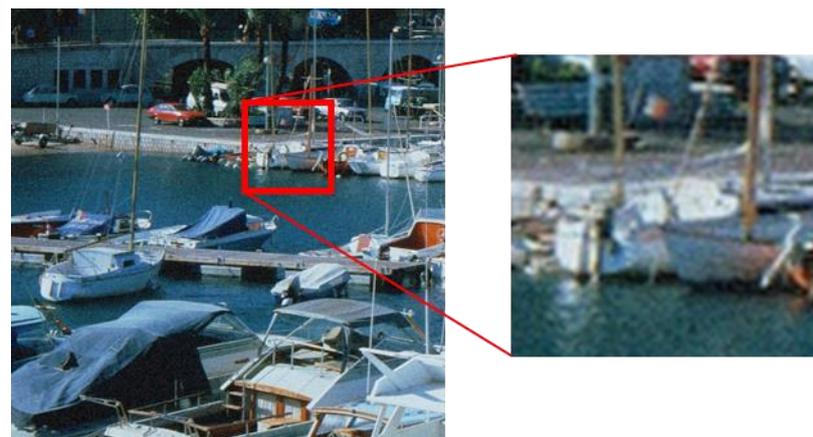
図 4.10 ランダムディザにホワイトノイズマスクを用いた場合のシミュレーション画像  
(エッフェル塔)



(a) 6,000 Hz  
SSIM: 0.9700

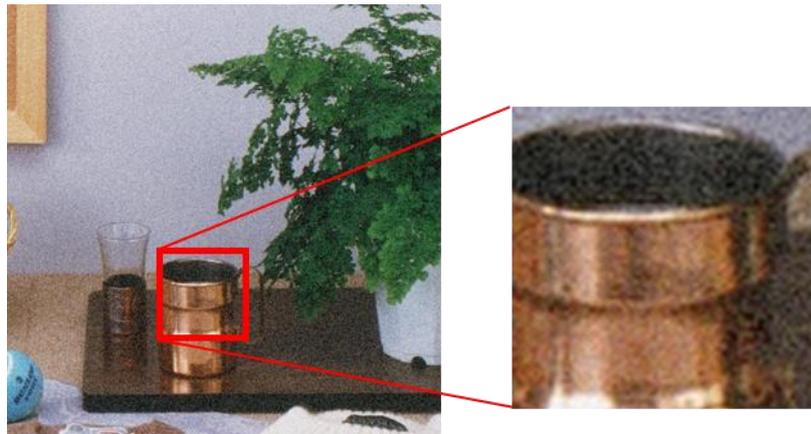


(b) 12,000 Hz  
SSIM: 0.9842

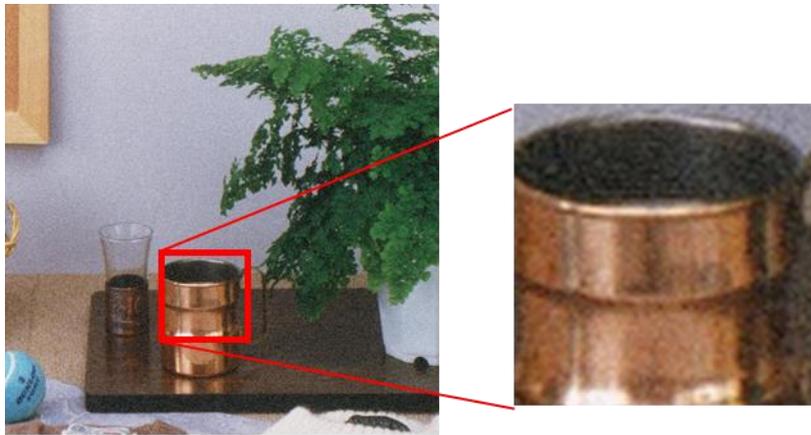


(c) 18,000 Hz  
SSIM: 0.9894

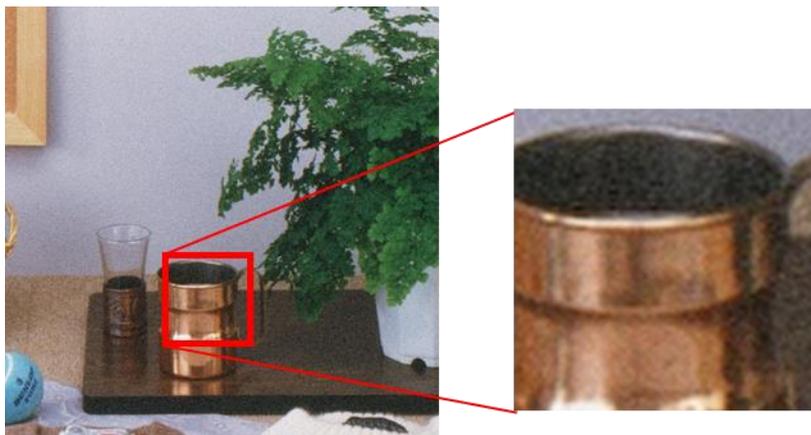
図 4.11 ランダムディザにホワイトノイズマスクを用いた場合のシミュレーション画像  
(ヨットハーバー)



(a) 6,000 Hz  
SSIM: 0.9526



(b) 12,000 Hz  
SSIM: 0.9754



(c) 18,000 Hz  
SSIM: 0.9843

図 4.12 ランダムディザにホワイトノイズマスクを用いた場合のシミュレーション画像  
(ルーム)

#### 4.4. 駆動周波数と画質に関する考察

表 4.1 に、駆動周波数と 1/60 秒あたりに表示されるバイナリ画像の枚数、また、2K パネル (1920×1080 画素) での走査時間の関係を示す。8bit の階調数である 255 と同様の 255 枚で駆動周波数が 15,300Hz となっており、これは丁度、SSIM の値が 0.98 を超える駆動周波数とほぼ一致している。1/60 秒あたりの枚数とは、すなわち発光パルスの回数と同様であることから、255 回の発光パルスで 8bit 相当という結果を表している。よって、SSIM の値が 0.98 程度で 8bit 相当の画質であると考えられる。ただし、駆動周波数 15,300Hz では、2K パネルを駆動する場合、走査時間が 65nsec となり、非常に高速な駆動が必要となる。4.4.3 節で詳細に説明するが、一般的なディスプレイで使用される TFT バックプレーンでは、実現可能な走査時間は 300nsec 程度であるため、次節以降では、空間変調や時間制御などを用いることで、駆動周波数 3,000Hz 程度で良好な画質を得られる手法について検討する。ここで、SSIM で 0.98 を得るための駆動周波数は以下の式で表すことを考える。

$$\text{駆動周波数(Hz)} = \frac{60 \times L \text{ (階調数)}}{S \text{ (空間変調)} \times T \text{ (時間制御)}}$$

ここで、 $L$  は階調数を、 $S$  は空間変調による階調数の削減効果、 $T$  は時間制御による階調数の削減効果を表す。人の視覚が明るさを認識するための積分効果が 60Hz 程度であるため、階調数に 60 を掛けた値が、必要となる駆動周波数となる。ランダムディザにホワイトノイズを使用した場合は、 $S=T=1$  となり、必要となる駆動周波数は、表 4.1 のように、15,300Hz となる。そこで、駆動周波数を 3,000Hz 程度まで削減するためには、 $S \times T=5$  となるような空間変調と時間制御の組み合わせが必要となる。

表 4.1 駆動周波数と 1/60 秒あたりの倍内一画像枚数、及び、走査時間の関係

駆動周波数 (Hz)	15,300	7,620	2,880
1/60秒あたりの枚数	255 (8bit相当)	127 (7bit相当)	48 (5.5bit相当)
走査時間(nsec) (1,080本の走査)	65	131	347

#### 4.5. 空間変調を利用した信号処理の検討

##### 4.5.1. 2×2 ディザとブルーノイズマスク

本節では、良好な画質を得るのに必要な駆動周波数を抑制するために、空間変調を用いる手法を検討した。人の視覚システムは空間方向にも LPF の特性があり、印刷物などではハーフトーンやベイヤー配列などを用いて階調を表現する手法が知られており、階調数が限られる場合にはディスプレイの信号処理などにも空間変調が応用されている。そこで、バイナリー画像を作成するための信号処理に 2x2 ディザやブルーノイズマスクを用いた場合の PDM による階調表示方式の画質を評価した。

図 4.13 では 2×2 ディザを用いた場合の手法に関して説明する。4つの画素を1つのユニットとし、画素ごとにランダム発生器より出力される閾値の範囲を制御し、各閾値により映像信号をバイナリー化する。例えば、入力される信号レベルを 0~255 とすると、A、B、C、D、それぞれのランダム値の範囲を、0~63、64~127、128~191、192~255 に振り分け、各画素で出力されるランダム値を閾値として映像信号をバイナリー化する。1つの画素が表現できる輝度レベルは限定されるが、ランダム値の範囲が狭くなることで、限定された範囲内の階調性が高まり、画質の向上が期待できる。

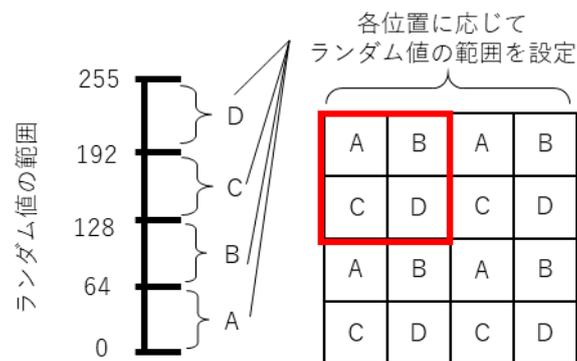


図 4.13 2x2 ディザによる信号処理法

次に、ランダムディザマトリックスにブルーノイズマスク [60] を用いる手法に関して説明する。通常のランダムディザマトリックスで使用されるホワイトノイズマスクの空間周波数特性が一様であるのに対して、ブルーノイズマスクは、高周波成分が高くなる特性を持っている (図 4.14)。ブルーノイズマスクのこの特性と人の視覚システムが持つ LPF 特性と

の相互作用により、ブルーノイズマスクはホワイトノイズに比較して、ノイズ感が減少したように感じる。これにより、空間方向へ信号レベルを拡散することと同等であり、ホワイトノイズマスクと 2x2 ディザを併用した場合と同様の効果が期待できる。図 4.15 にランダムディザにホワイトノイズマスクと、ブルーノイズマスクを使用しバイナリー化した場合の画像の例を示す。このように、ブルーノイズマスクを用いることで視認上画質が向上していることを確認できる。

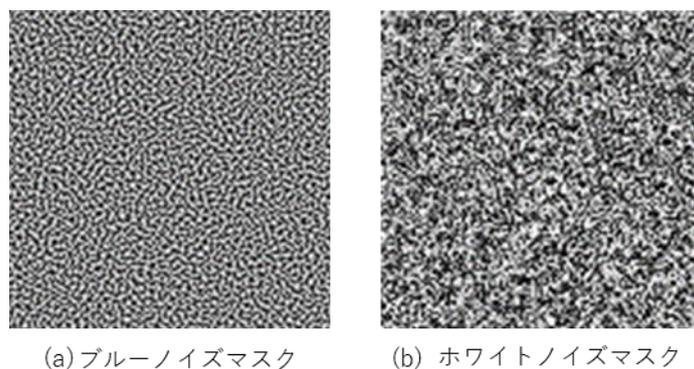


図 4.14 ブルーノイズマスクとホワイトノイズマスクの例

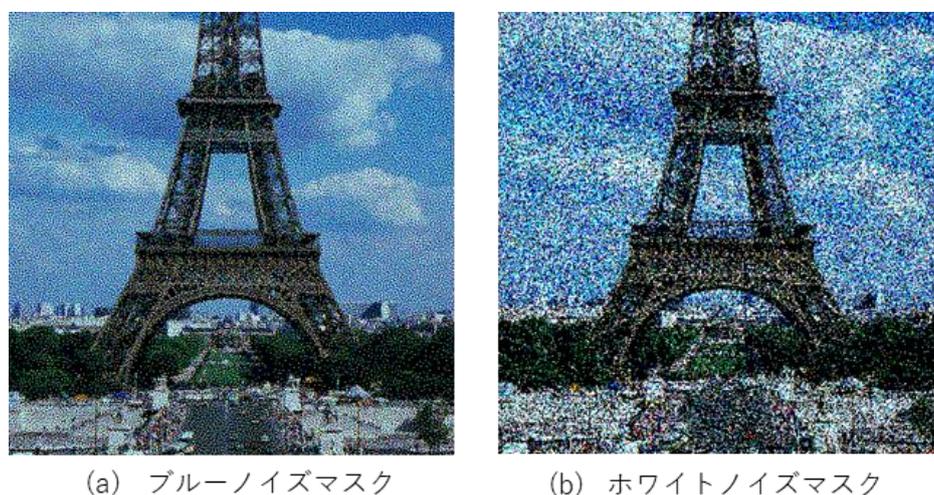


図 4.15 バイナリー画像の例

ただし、ブルーノイズマスクの生成は、ホワイトノイズマスクと比較して多くの計算時間を必要とする。ホワイトノイズマスクは、リアルタイムに疑似ランダムを発生させることで、リアルタイムに生成することも可能である。一方で、ブルーノイズマスクは、いくつかの生

成方法が提案されているが、リアルタイムに生成することが困難である。そこで、今回のシミュレーションでは、図 4.16 に示すように事前に生成した  $256 \times 256$  画素のブルーノイズマスクを、タイル状に並べることで、入力画像サイズより大きくなるように拡張した。そのため、ブルーノイズの生成時には、タイル境界が連続になるように配慮して生成した。また、バイナリー画像を作成するたびに、新たなブルーノイズマスクとするため、拡張したブルーノイズマスクを入力画像サイズに切り取る際には、切り取り位置をランダムに変更した。

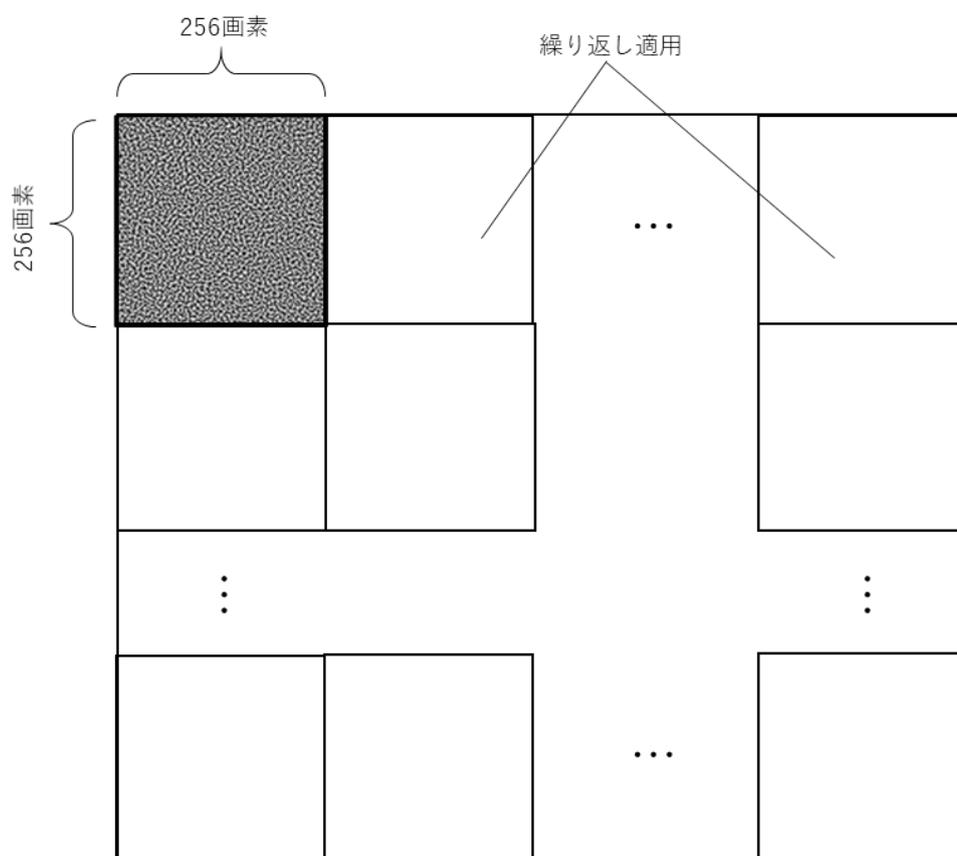


図 4.16 ブルーノイズマスクの拡張例

#### 4.5.2. シミュレーションによる画質評価

図 4.17 および、図 4.18 にシミュレーション画像を用いて PSNR および、SSIM により画質を評価した結果を示す。シミュレーション画像は前節に説明した手法で作成した。PSNR

での評価では、ホワイトノイズマスクのみを用いた場合と比較して、ホワイトノイズと2×2ディザを併用した場合には画質が向上しているが、ブルーノイズマスクのみの場合にはほとんど変わらない値となった。しかし、SSIMでの評価では、ホワイトノイズマスクと2×2ディザを併用した場合とブルーノイズマスクの場合の両方で画質の向上を確認できた。さらに、わずかではあるが、ホワイトノイズマスクと2×2ディザの場合よりもブルーノイズマスクの方が優れた評価結果となっている。したがって、ブルーノイズマスクを使用することで、空間変調と同等の効果により、SSIMの値が向上し画質が改善したことがわかる。また、SSIM値が0.98になる駆動周波数は、ホワイトノイズマスクでは、15,000Hz程度であったのが、2×2ディザやブルーノイズマスクでは、6,000Hz程度となり、1/3程度の駆動周波数で良い画質を得ることができた。

シミュレーション画像からも、ホワイトノイズマスクを用いた場合と比較して、ノイズ感が低減されていることを確認できる。図4.19に、駆動周波数7,680Hz、図4.20に駆動周波数3,840Hzでの2×2ディザとブルーノイズマスクを用いたときのシミュレーション画像の一部を切り出したものを示す。ブルーノイズマスクを用いると駆動周波数7,680Hzでは、SSIMの値が0.98程度となっており、良好な画質が得られていることがわかる。駆動周波数3,840Hzのシミュレーション画像ではSSIMが約0.96程度であるが、ホワイトノイズマスクと比較して、良好な画質を得られることが確認できる。また、2×2ディザに対してブルーノイズマスクを利用した手法の方が、ノイズ感が多いようにも見える。実際にPSNRでの評価では、2×2ディザが高い評価を得ているため、画素単位でのノイズ比に関しては2×2ディザの方が少ないと考えられる。一方で、SSIMは、空間方向における人のLPF特性についてガウシアンフィルタを用いることで考慮しており、拡大して表示した場合のノイズ感は、LPFによって除去されると考えられるため、SSIMの値では、ブルーノイズマスクも高い評価が得られていると考えられる。さらに、2×2ディザは、画素毎にランダム値を振り分けるため、解像感が落ちる可能性もあるために、SSIMの値がブルーノイズマスクよりも低くなっている可能性がある。ブルーノイズマスクも空間変調の効果はあるが、そのランダム性により、解像感が2x2ディザよりも優れていることが考えられる。

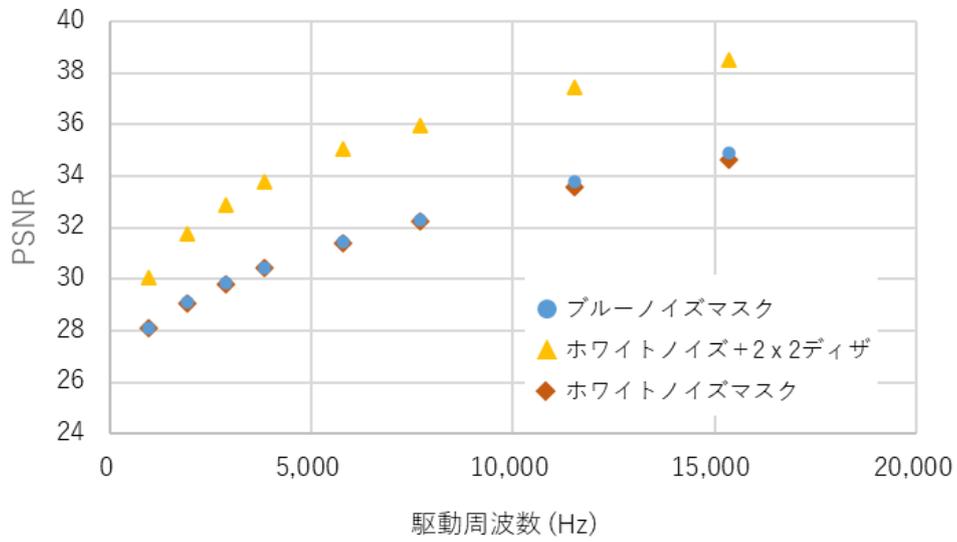


図 4.17 駆動周波数と画質 (PSNR) の関係

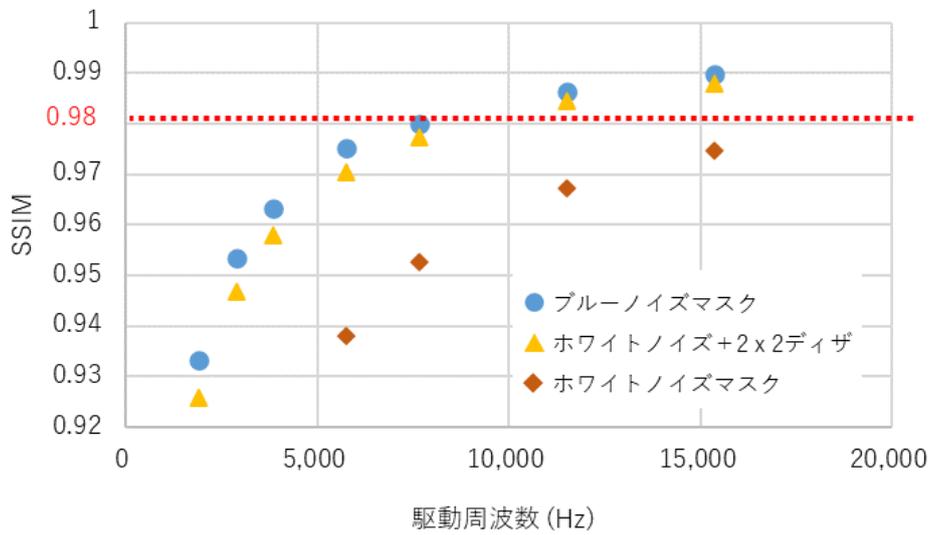
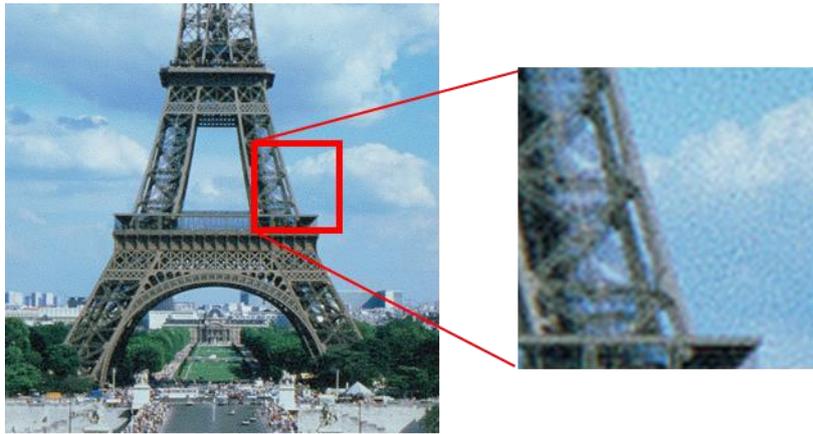
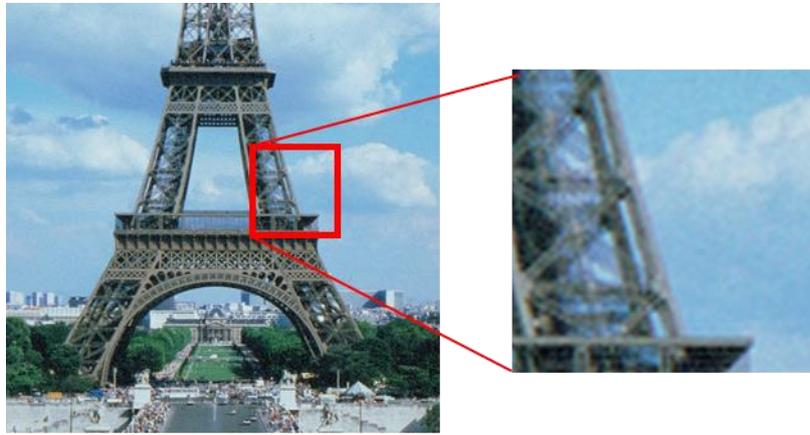


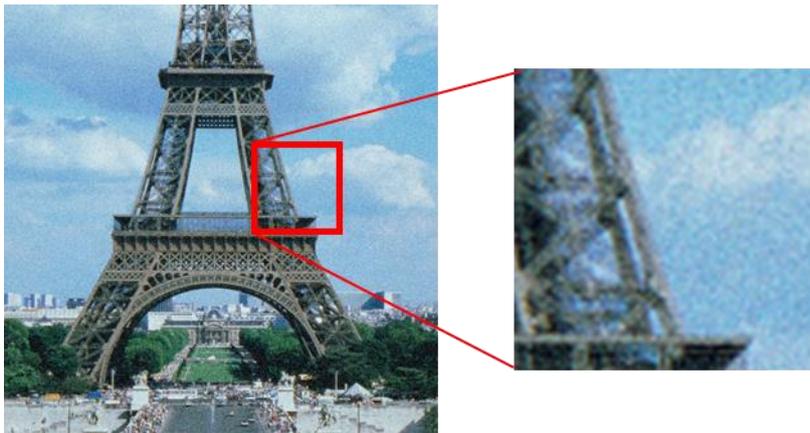
図 4.18 駆動周波数と画質 (SSIM) の関係



(a) ブルーノイズマスク  
SSIM: 0.9800

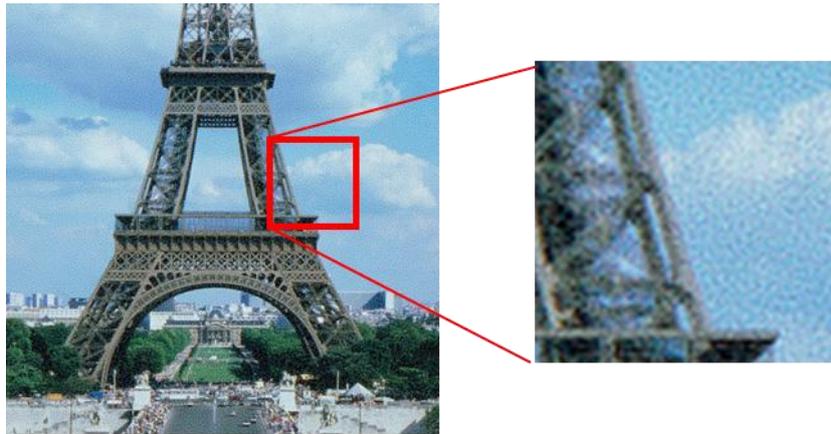


(b) 2x2ディザ  
SSIM: 0.9774

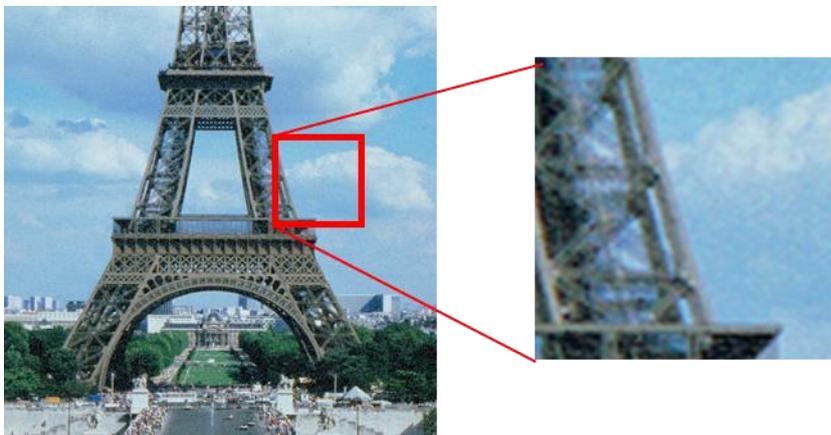


(c) ホワイトノイズマスク  
SSIM: 0.9526

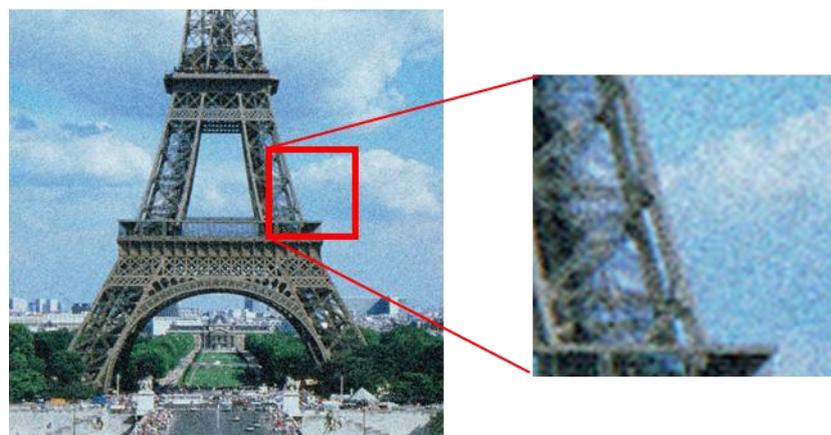
図 4.19 駆動周波数 7,680Hz でのシミュレーション画像の例



(a) ブルーノイズマスク  
SSIM: 0.9633



(b) 2x2ディザ  
SSIM: 0.9580



(c) ホワイトノイズマスク  
SSIM: 0.912

図 4.20 駆動周波数 3,840Hz でのシミュレーション画像の例

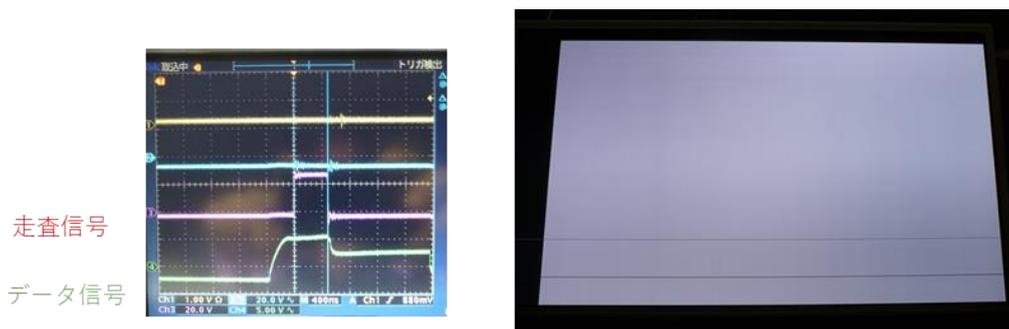
#### 4.5.3. 実機による検証

ランダムディザマトリックスを用いた PDM 方式を、25 インチ (1,920×1,080×RGB) の有機 EL パネルを用いて実証実験を行った。この有機 EL パネルは、2-TFT-1-capacitor のシンプルな画素構造を持つ。TFT などのバックプレーンは低温ポリシリコンが用いられている。実機での検証に先立ち、この有機 EL パネルで実現可能な駆動周波数を調べるために、書き込みが可能な走査時間を調査した。この調査では、走査時間のみ短くしていき、書き込みが正常に完了しているかどうかを目視で確認した。デジタル駆動による走査時間の検証であるため、1bit の信号値として駆動検証した。図 4.21 にその結果を示す。走査時間が 500nsec の場合では、ほぼ均一な表示が可能となっており、全く問題なく走査できている。走査時間が 350nsec の場合でも、ほぼ問題なく走査できている。映像表示が可能であった。走査時間が 250nsec まで短くなると、若干輝度の均一性が劣化し、走査できている画素と、不安定な画素が見られるようになった。したがって、走査線 1,080 本のハイビジョンパネルを駆動するとした場合、走査時間 250nsec では、駆動周波数は

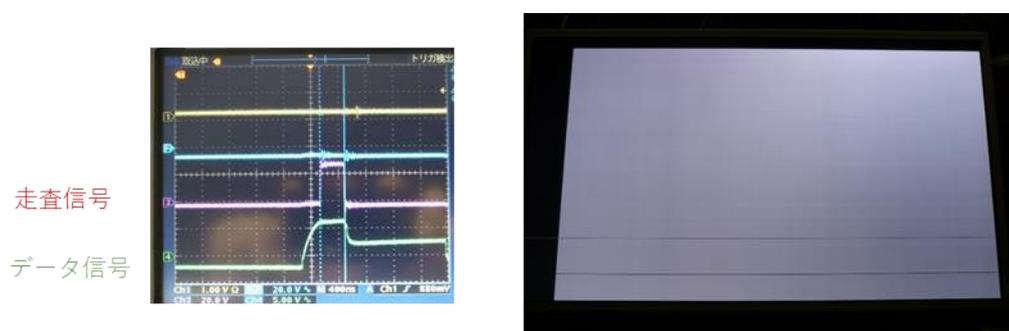
$$\frac{1}{250 \times 10^{-9}} \times \frac{1}{1080} \cong 3,700\text{Hz}$$

となり、350nsec の場合は同様に計算すると、3,000Hz 程度となるため、本有機 EL パネルを用いることで、駆動周波数が 3,000Hz 程度までは、走査が可能であると予想される。

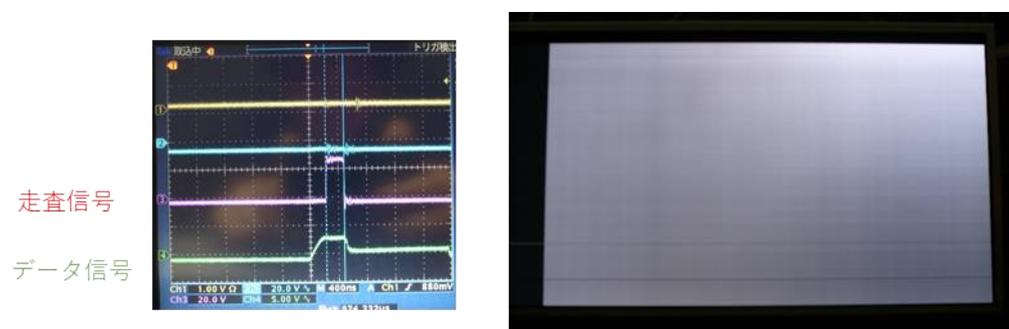
本装置のブロックダイアグラムを図 4.22 に示す。本装置では、事前にランダムディザにより 1 ビット化した画像を DRAM メモリに記録し、そのメモリから駆動周波数 960Hz で画像を読み出し、画像データをデータドライバに送るとともに、スキャン信号をスキャンドライバに送ることで、960Hz の 1bit デジタル駆動を可能とした。事前調査では、有機 EL パネルの性能では、3,000Hz 程度までのデジタル駆動が可能であると予想されたが、今回の信号処理ボードでは、DRAM からのデータ伝送帯域により、映像表示については、960Hz の駆動周波数が上限となった。



(a) 走査時間500nsecにおける駆動波形（左）と表示状態



(b) 走査時間350nsecにおける駆動波形（左）と表示状態



(c) 走査時間250nsecにおける駆動波形（左）と表示状態

図 4.21 走査時間と有機 EL パネルの表示状態

装置の外観写真を図 4.23 に示し、映像表示の状態を図 4.24 に示す。駆動周波数 960Hz で、走査線 1,080 本では走査時間は約  $1\mu\text{sec}$  となるが、映像表示が可能であることがわかる。ランダムディザにホワイトノイズマスクを用いた場合とブルーノイズマスクを用いた場合も比較し、ブルーノイズを用いた場合は、ノイズ感がかなり抑制できることも実際の映像表示により確認できた (図 4.25)。実際のパネルのノイズは、高輝度領域では、人の視覚

系の残像効果によって滑らかになり、知覚されるノイズは、1/60 秒間の画像の積分により作成されたシミュレーション画像のノイズよりも少ないように感じる。一方、低輝度領域で知覚されるノイズは、ノイズが動くことにより、シミュレーションされた画像よりも認識されやすくなった。したがって、実機によりさらに駆動周波数を上げて、画質を評価することが必要であると考えられる。

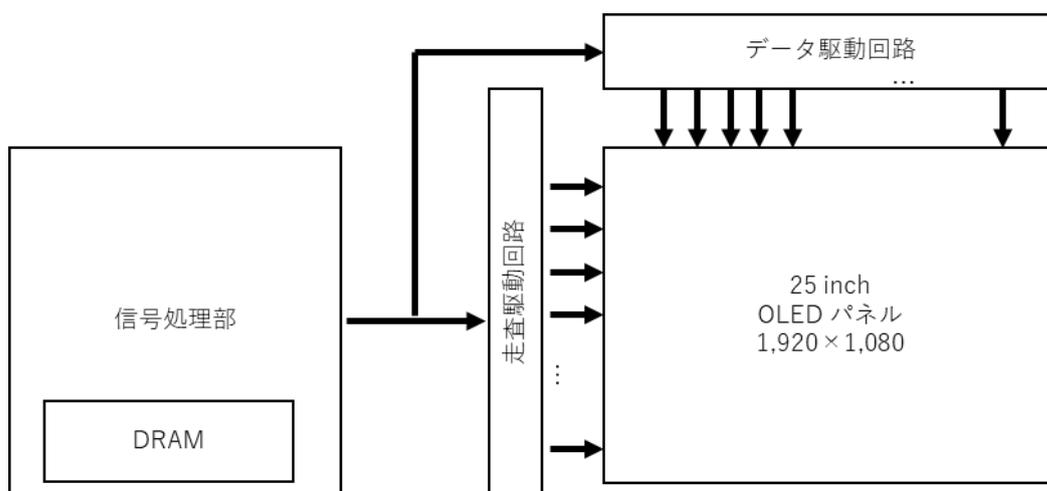


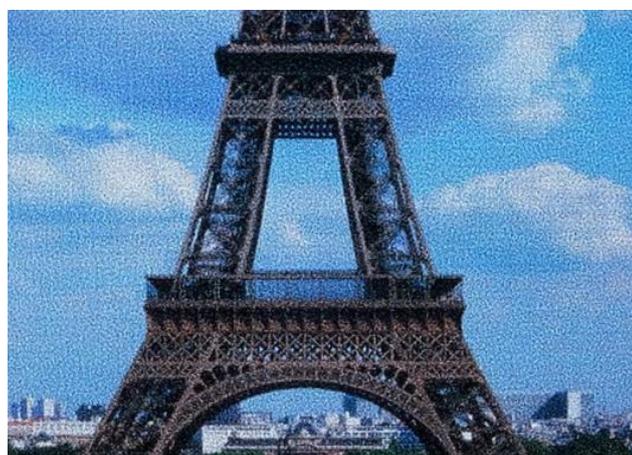
図 4.22 駆動装置のブロックダイアグラム



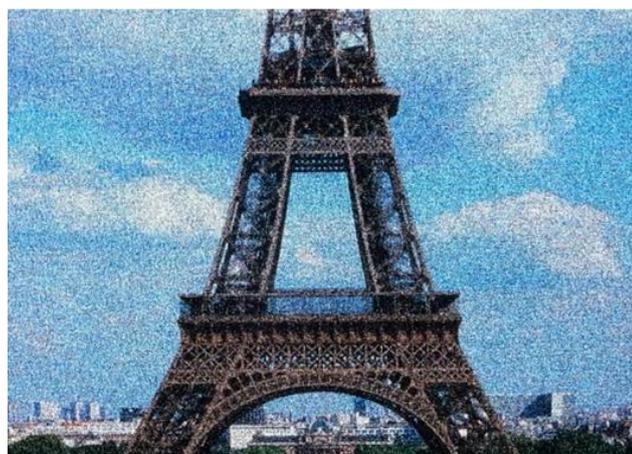
図 4.23 駆動装置の外観



図 4.24 表示例の写真



(a) ブルーノイズマスク使用時の表示画面の写真



(b) ホワイトノイズマスク使用時の表示画面の写真

図 4.25 実際の映像表示画面の写真（駆動周波数 960Hz）

#### 4.6. 時間方向閾値制御技術の導入

前節のパネル表示実験の結果から、実機では駆動周波数 3000Hz 程度まで駆動可能あることから、駆動周波数 3000Hz 程度で良好な画質を得るために、時間方向に閾値範囲を制御する手法を検討した。図 4.26 には、1つのフィールドを4つのサブフィールド(SF)で閾値範囲を分割する手法について示した。4つのSFを1つのユニットとし、SFごとにランダム発生器より出力される閾値の範囲を制御し、その閾値により映像信号をバイナリー化する。例えば、入力される信号レベルを0~255とすると、A、B、C、D、それぞれのランダム値の範囲を、0~63、64~127、128~191、192~255のようにサブフィールドごとに振り分け、それぞれのランダム値を用いてバイナリー化する。1つのSFで発生するランダム値の範囲を狭くすることで、ランダムにより発生する誤差も小さくなり、誤差による輝度のばらつきを抑えることが可能になると考えられる。

図 4.27 に提案する PDM 階調表示方式において4つのSFを1つのユニットとして構成した例を示し、図 4.28 に従来の PWM 階調表示方式のSF構成の例を示す。それぞれ駆動周波数が2,880Hzでフレームレート120Hzとした場合、24個のSFから構成される。この時、PDM方式では4つのSFで1ユニットとなり、1フィールドは、6ユニットから構成されることになる。従来のPWM方式では、発光するSFが一部に偏るため、偽輪郭やジャダーが発生する可能性があるが、PDM方式では、パルス密度変調になっているため、動画質の劣化は動きぼやけのみであると考えられる。また、従来方式では、240Hz表示に対応するためにフィールドの途中で分割することはできないため、高フレームレート化することが難しいが、PDM方式は、4つのSFで構成されるユニットを柔軟に分割することができるため、図の例では、1フィールドを3ユニットとすると240Hz表示となり、2ユニットとすると360Hz表示に対応することが可能になるという特徴がある。

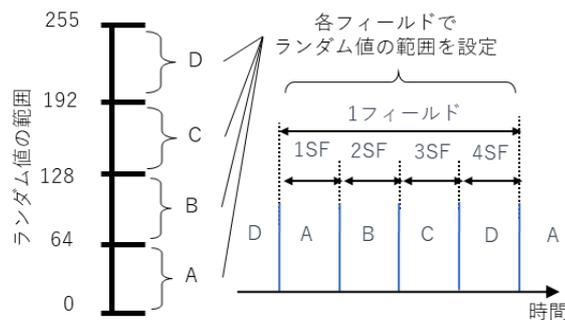


図 4.26 時間方向の閾値分割制御

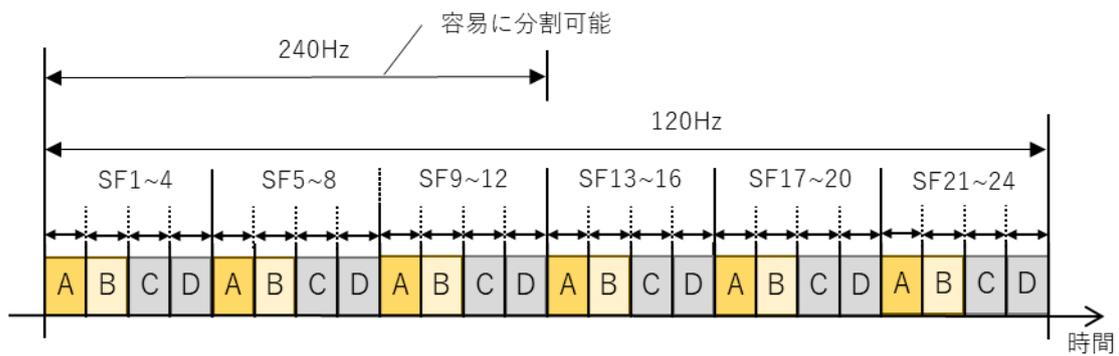


図 4.27 提案する PDM 階調表示方式

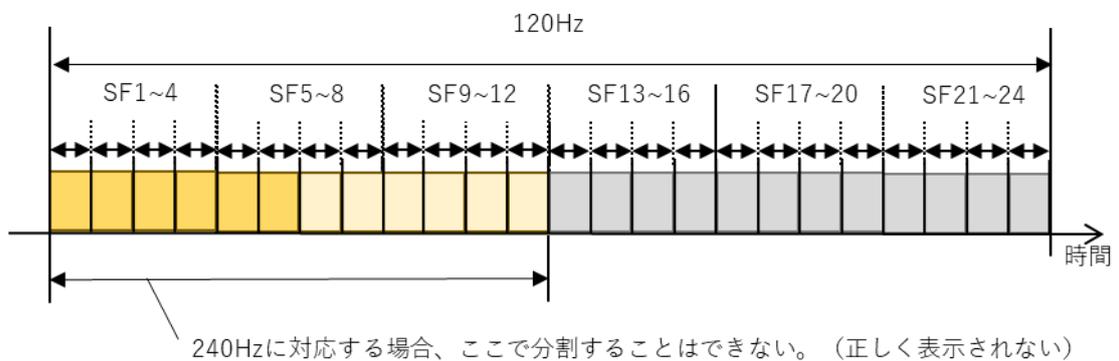


図 4.28 従来の PWM 階調表示方式

この時間方向閾値制御を用いた PDM 階調表示方式のシミュレーション画像を計算により作成し、PSNR と SSIM により評価した結果を、図 4.29 と図 4.30 に示す。ここでも、シミュレーション画像は、1/60 秒間に表示されるバイナリー画像を平滑化することで作成した。空間変調としてブルーノイズマスクを使用し、時間変調として 4SF、及び、8SF を単位ユニットとした場合に、シミュレーション画像を作成した。ブルーノイズマスクのみを用い

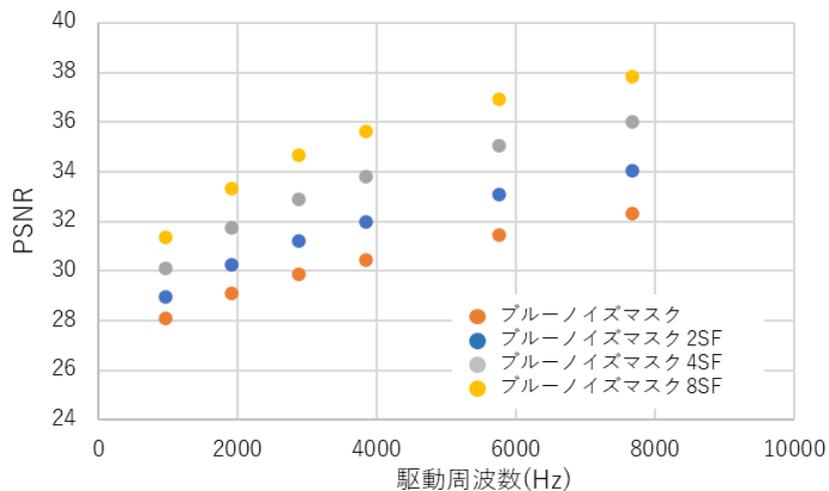


図 4.29 駆動周波数と画質 (PSNR) の関係

た場合に比較して、単位ユニットの SF 数を増やした場合に PSNR および、SSIM どちらにおいても画質が向上していることがわかる。SSIM 値が 0.98 になる駆動周波数は、4SF では 3,000Hz 程度、8SF では 2,000Hz 程度となり、駆動周波数を抑制しながら良好な画質が得られた。

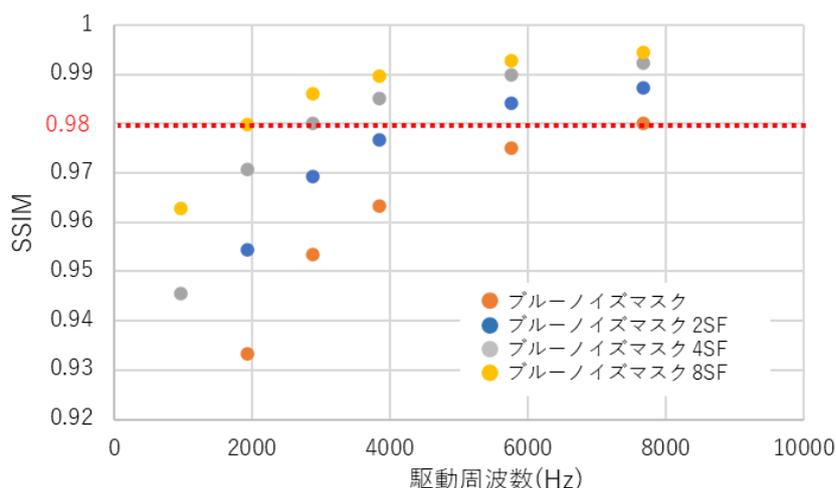
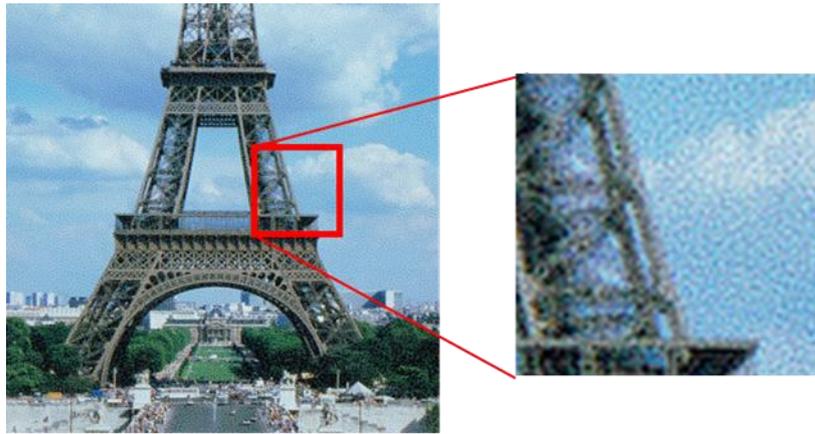
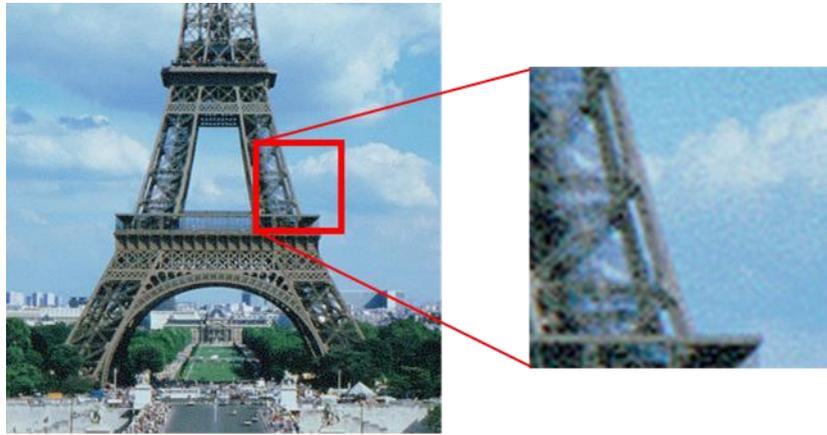


図 4.30 駆動周波数と画質 (SSIM) の関係

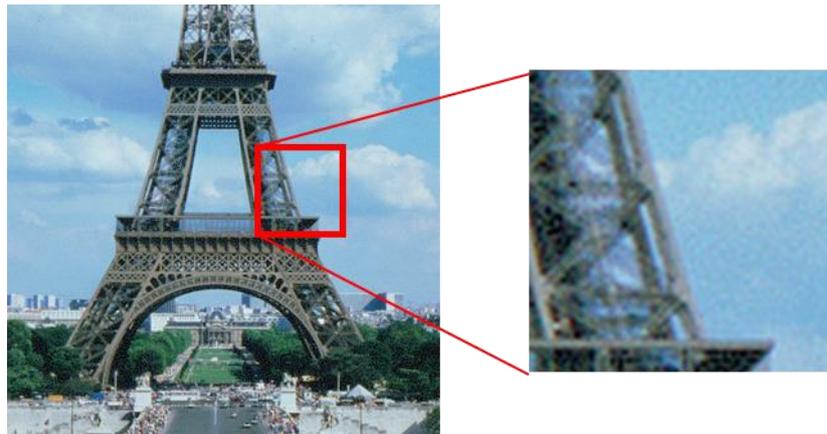
駆動周波数 2,880Hz、及び 1,920Hz の場合のシミュレーション画像を図 4.31、及び図 4.32 に示す。ブルーノイズマスクのみの場合に比較して画質が向上しており、駆動周波数 2,880Hz の場合は、4SF で SSIM 値が 0.98 の値が得られ、駆動周波数 1,920Hz では、8SF で 0.98 の値が得られた。駆動周波数 1920Hz の 4SF でも、SSIM 値は 0.97 程度ではあるが、シミュレーション画像からは良好な画質が得られていることがわかる。当初の目標である駆動周波数 3,000Hz 程度で良好な画質を得られることがわかり、さらに、駆動周波数 1,920Hz 程度でも 8SF を使用することで良好な画質を得られることがわかった。ただし、単位ユニットのサブフィールド数を増やすと表示可能なフレームレート数が低下する。駆動周波数が 2,880Hz の場合の最大フレームレートは 4SF では、720Hz、8SF では 360Hz となり、駆動周波数 1,920Hz の場合では、4SF で 480Hz、8SF では 240Hz となる。したがって、表示するフレームレートに応じて適切に、単位ユニットあたりの SF 数を選択する必要がある。また、動画により必要なフレームレート適応的に判定し SF 数を制御することで、最適な画質を得ることも可能になる。



(a) ブルーノイズマスク  
(SSIM : 0.9334)

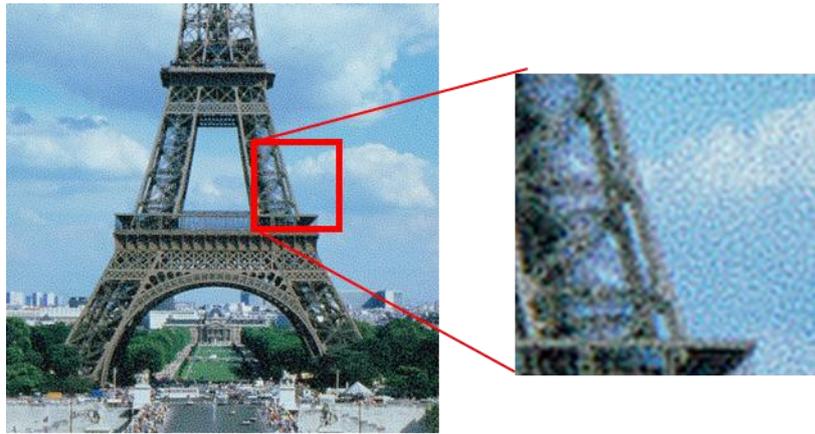


(b) ブルーノイズマスク4サブフィールド  
(SSIM : 0.9708)

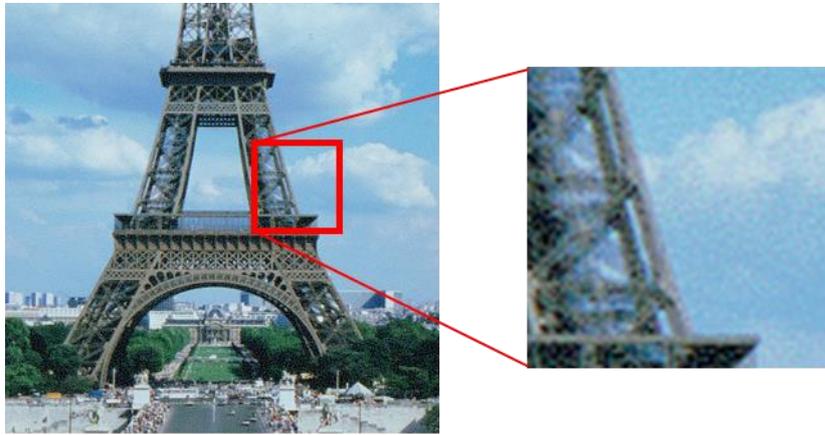


(c) ブルーノイズマスク8サブフィールド  
(SSIM : 0.9799)

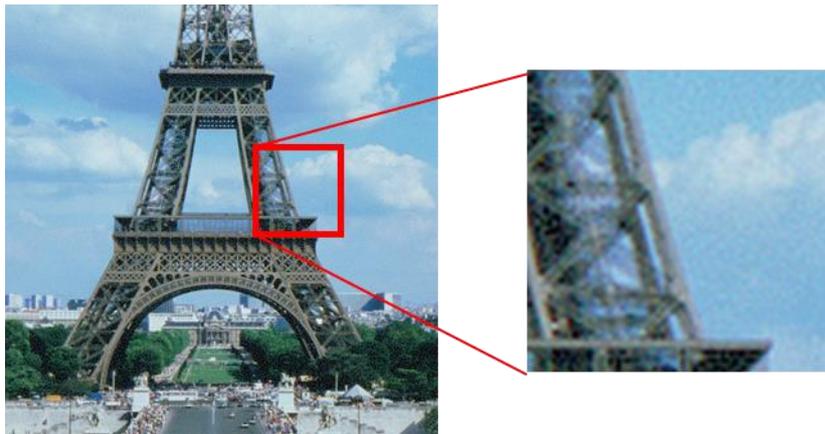
図 4.31 駆動周波数 2,880Hz でのシミュレーション画像



(a) ブルーノイズマスク  
(SSIM : 0.9334)



(b) ブルーノイズマスク 4サブフィールド  
(SSIM : 0.9708)



(c) ブルーノイズマスク 8サブフィールド  
(SSIM : 0.9799)

図 4.32 駆動周波数 1,920Hz でのシミュレーション画像

#### 4.7. 空間変調と時間制御の効果に関する考察

これまでの画質シミュレーションによる評価結果から、空間変調と時間制御を用いた場合の階調数削減効果について考察する。ランダムディザにブルーノイズを用いることで、SSIM で 0.98 を得るための駆動周波数は 15,300Hz 程度から 7,680Hz 程度まで約 1/2 となった。したがって、ランダムディザにホワイトノイズを使用した場合に比較して、同じ駆動周波数で階調数を 2 倍相当にする効果があると考えられ、以下の式の  $S=2$  とした場合に相当する。

$$\text{駆動周波数(Hz)} = \frac{60 \times L \text{ (階調数)}}{S \text{ (空間変調)} \times T \text{ (時間制御)}}$$

また、時間制御を導入した場合には、ブルーノイズマスクのみの場合に比較して、2SF では駆動周波数が約 1/2 になり、4SF では駆動周波数が約 2/5、8SF では駆動周波数が約 1/4 となったことから、2SF では  $T=2$ 、4SF では  $T=2.5$ 、8SF では  $T=4$  となる。したがって、ブルーノイズを用いて、4SF の時間制御を導入することで、 $S \times T=2 \times 2.5=5$  となり、必要となる駆動周波数を 3,000Hz 程度にすることができる。今回は、実験に使用したパネルの性能から駆動周波数 3,000Hz 程度を目標としたが、駆動するパネルの性能に当たって、目標となる駆動周波数は異なる。よって、パネルの性能に合わせて、 $S$  や  $T$  などのパラメータを設定することで、パネルに合わせた駆動パターン設計が可能となる。

#### 4.8. PDM 階調表示方式の動画質

##### 4.8.1. シミュレーションによる動画質の評価

新たに提案したブルーノイズマスクを用いた PDM による階調表示方式の動画質を調査した。動画質の画像シミュレーションでは、2章で述べたように、ディスプレイ上において水平にスクロールする画像を人が追従視したときに、人の網膜上に投影される像をシミュレーション画像として計算した。従来法であるデルタシグマ回路を用いた PDM による階調表示方式、及び 8bit の PWM による階調表示方式との比較をおこなった。デルタシグマ回路による信号処理システムを図 4.33 に示す。8bit の入力信号と、残差バッファからの信

号とが加算され、オーバーフローしたビット信号をパネルへ送ると共に、残差信号を残差バッファに保存することで、次のフィールドで利用される。また、PWM 方式では一般的な 8bit の重みを使用したサブフィールド駆動に関してシミュレーション画像を作成した。

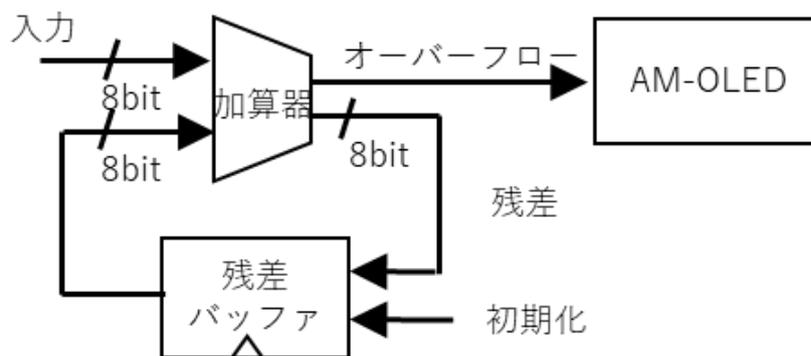
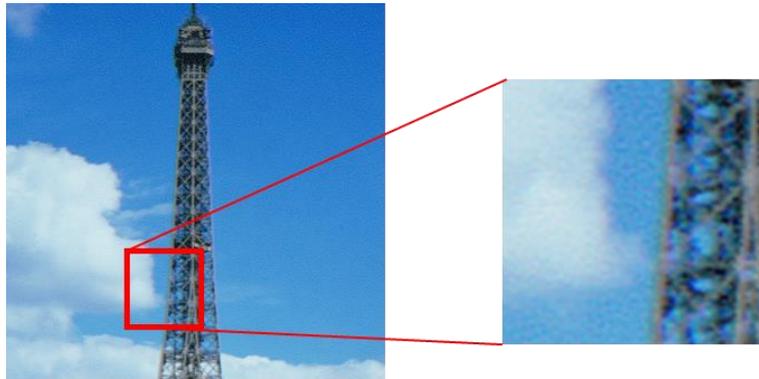


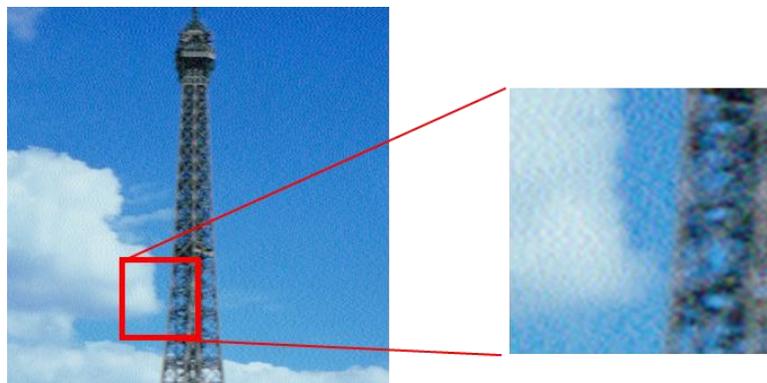
図 4.33 デルタシグマ回路による信号処理

図 4.34 に提案手法、及びデルタシグマ回路による PDM 方式での動画像シミュレーションの結果を示す。駆動周波数は 1,920Hz、入力フレームレートは 480Hz とし、移動速度が水平方向に 4ppf でスクロールするときのシミュレーション画像をそれぞれの場合に関して作成した。また、図 4.35 に PWM 方式でのシミュレーション結果の画像を示す。PWM 方式は、8bit の場合、最低 8SF 必要であるため、駆動周波数を 3,840Hz とした。なお、フレームあたり 4 ピクセル (ppf) の移動速度は、2K 解像度のディスプレイ (1920×1080 画素) の場合、物体が 1 秒で画面を横切る速度に相当し、画面高の 3 倍の距離から観察した場合には、30 度/秒の移動速度となる。

図 4.34 (a)に示すとおり、提案手法では、動画質の劣化が特に見られないことがわかる。一方で、デジタルシグマ回路を用いた場合は、ノイズ成分が多いことがわかる(図 4.34 (b))。また、図 4.35 に示すとおり、PWM 方式では、偽輪郭が発生していることがわかる。デルタシグマ回路を用いた場合、フィードバックループが画素単位であることから、表示物体が移動すると、人の視点移動により、ある画素のフィードバックが他の画素に使われるのと同様になる。デジタルシグマ回路では、過去の状態を記憶し、それをフィードバックして映像表示を行っているため、ある画素の表示が他の画素の表示状態に影響を受けてしまい、追従視が起きた場合には、動画質が劣化してしまう問題があることがわかる。

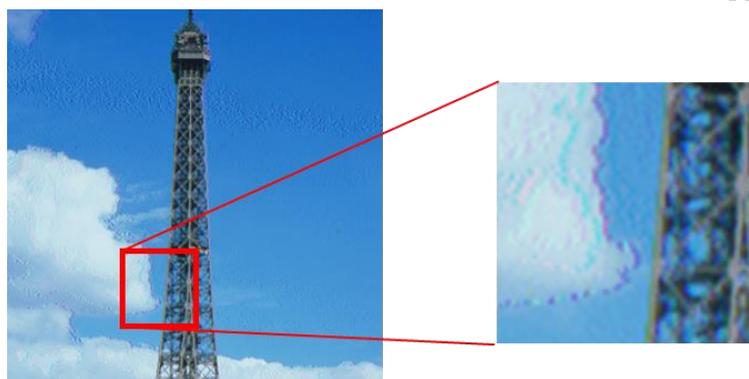


(a) ブルーノイズマスク 4SF  
 $1,920\text{Hz}=480\text{Hz}\times 4\text{SF}$



(b) デルタシグマ  
 $1,920\text{Hz}=480\text{Hz}\times 4\text{SF}$

図 4.34 PDM による動画像のシミュレーション結果  
 (駆動周波数 1,920Hz、フレームレート 480Hz、移動速度 4ppf)

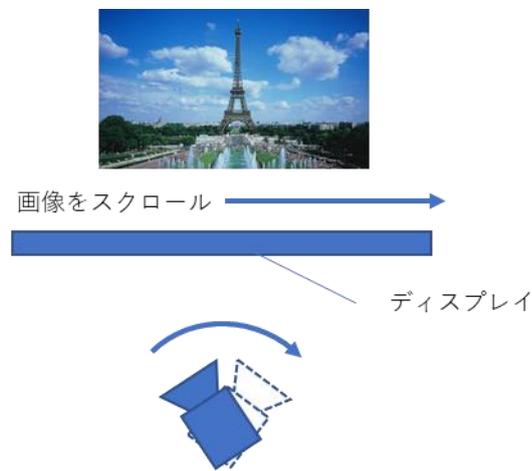


PWM 8SF  
 $3,840\text{Hz}=480\text{Hz}\times 8\text{SF}$

図 4.35 PWM による動画像のシミュレーション画像  
 (駆動周波数 3,840Hz、フレームレート 480Hz、移動速度 4ppf)

#### 4.8.2. 実機による動画質の検証

本節では、提案するランダムディザを用いた PDM 階調表示方式の動画質を、試作した実機を用いて評価した。実機では、駆動周波数を 960Hz とし、ランダムディザにはブルーノイズマスクを使用した。入力フレームレートを 480Hz とし、水平に 4ppf のスクロール速度、すなわち、30 度/秒の移動速度として画面上に表示させた。この時の動きぼやけを評価するため、図 4.36 に示すようにディスプレイにスクロール画像を表示し、そのスクロール速度に合わせてビデオカメラを回転させることで、人が追従視するのと同じ状態と、ディスプレイを撮影した。ビデオカメラの撮像フレームレートは 60Hz とした。この時、撮影した映像から抜き出した画像を図 4.37(a) に示す。比較として、フレームレート 60Hz で表示して撮影した画像を図 4.37(b) に示す。フレームレート 60Hz 表示では画像がぼやけているのが確認できるが、フレームレート 480Hz 表示では、動きぼやけが大きく低減されていることがわかり、さらに、提案するランダムディザを用いた PDM 階調表示方式において、特に動画質に問題がないことも確認できた。



スクロール速度に合わせてビデオカメラを回転させながら撮影

図 4.36 動画質評価に用いた表示・撮像システムの概要



(a) フレームレート480Hz表示の撮影画像



(b) フレームレート60Hz表示の撮影画像

図 4.37 動画質評価実験で撮影した映像

#### 4.9. 結言

本章では、デジタル駆動方式の高フレームレート表示を目指して、ランダムディザを用いた PDM による階調表示方式を提案し、シミュレーションにより駆動周波数と画質の関係を求めた。ランダムディザにホワイトノイズマスクを使用する場合は約 15,000Hz の駆動周波数が必要であったが、ランダムディザにブルーノイズマスクを用いた信号処理法を導入し 6,000Hz 程度まで抑制できることを示した。さらに、ブルーノイズマスクを用いた時間方向制御として、サブフィールドの閾値分割制御を導入することにより、2,880Hz の周波数で良好の画質が得られる指針が得られた。また、実際の OLED パネルを使用して提案した PDM による階調表示方式を実証し、PDM による階調表示方式が AM-OLED ディスプレイに適用可能であることを示した。さらに、フレームレート 480Hz 表示時の動画質を実機で評価し、提案する PDM 階調表示方式により、動きぼやけが改善され、良好な動画像を得られることを示した。

## 第5章 結論

ディスプレイはブラウン管から薄型ディスプレイへ進化し、さらに、フレキシブルディスプレイへと進化してきた。大画面化、高精細化が実現され、社会の幅広い分野で利用されており、デジタル社会において必要不可欠な存在となったが、動きぼやけによる動画質の劣化などの問題がある。したがって、更なる臨場感を得るためには、高フレームレート化により動きぼやけを低減し、動画質を向上させることが課題である。本論文では、AM-OLED ディスプレイの動画質向上に関する高フレームレート化に向けた課題を取り上げ、その改善方法を検討したものであり、次のようにまとめられる。

第2章では、アクティブマトリクスディスプレイの基本的な駆動手法について述べた後、ホールド型発光表示とパルス幅変調方式における動画質劣化メカニズムについては、人の視覚システムとディスプレイの表示タイミングの不一致から起こることを示し、動画質を改善するためには高フレームレート化が必要であることを示した。動きぼやけと主観評価動画質実験の結果などから、動きぼやけによる動画質を改善するためにはフレームレート240Hz から480Hzが必要であることを示した。

第3章では、従来の振幅変調方式に適用可能で、動きぼやけを低減することで高フレームレート化と同様の効果が得られるTWE方式と、信号処理を用いた手法について検討した。そこで、TWEの動画質について、動き速度と空間周波数特性の関係を解析し、その結果から、TWEに最適化された動きぼやけ改善のための補償フィルタを開発した。この三角波形発光に最適化した補償フィルタによる動きぼやけの抑制効果を、画像シミュレーションを用いて評価し、画像シミュレーションでは、高コントラスト表示においては、輝度レンジの制限から効果が不十分であったが、中～低コントラスト表示においては、動画質の改善効果が高いことを示した。また、一般的な画像への適用においても、動きぼやけの抑制効果があることを示した。三角波形発光に既存のエッジ強調フィルタで動きぼやけを補償すると、歪が発生してしまうが、提案した三角波形発光に適した補償フィルタを用いることで、発生する動きぼやけを低減し、歪を抑制できることを示した。

第4章では、複雑な信号処理を必要とせず高フレームレート化に適したデジタル駆動方式の開発を目指して、ランダムディザを用いたパルス密度変調による階調表示方式を提案

した。ランダムディザにブルーノイズマスクを用いた信号処理法を導入することで、空間解像度を落としても、高フレームレート化し動きぼやけを抑制することで高画質化が期待できる。一般的に良好な画質とされる SSIM で 0.98 以上となる駆動周波数が、ホワイトノイズマスクでは 15,000Hz 以上必要であったが、ブルーノイズマスクを導入することで、6,000Hz 程度で良好な画質を表示できることを示した。さらに、ブルーノイズマスクと時間方向のフィールドの閾値分割制御を導入することにより、4 フィールド分割の場合は 2,880Hz 程度、8 フィールド分割の場合は 1,920Hz 程度で良好な画質が得られた。時間方向に分割する場合、分割数が多くなるとフレームレートが低下してしまうが、2,880Hz の駆動周波数で 4 フィールドの場合では、720Hz のフレームレートで表示することが可能であり、1,920Hz の駆動周波数で 8 フィールドの場合では、240Hz のフレームレートで表示することが可能であるため、動画質の改善に向けて有効である。また、実際の OLED パネルを使用して提案された PDM による階調表示方式を実証し、PDM 駆動技術が AM-OLED ディスプレイに適用可能であり、フレームレート 480Hz 表示での駆動実験を行い、提案した階調表示方式が良好な動画質を表示できることを示した。

デジタル駆動方式は安定した高速駆動が可能で、簡単な画素回路および信号処理により実現でき、様々なディスプレイデバイスにとって効果的であると考えられる。従来の PWM 方式では、階調表示の際に発光の偏りがあり、画質低下の原因となっていたが、提案する PDM 方式では、発光の偏りがほとんど無く動画質に優れるとともに、発光間隔により明るさを制御していることから、どの期間で区切ったとしても、ほぼ同じ階調となることから、様々なフレームレートに柔軟に対応できるという特徴がある。したがって、入力される映像に応じてフレームレートを制御することで、最適な画質を提供することも容易になると考えられる。また、提案する階調表示方式は、OLED ディスプレイの他にも、近年、急速に開発が進んでいるマイクロ LED ディスプレイへの高画質化にも期待できる。LED ディスプレイは、OLED ディスプレイと同様に電流駆動型のデバイスであり、そのパネル構成はほとんど同様である。ただし、LED ディスプレイは、LED を流れる電流密度により発光波長が変動してしまい、振幅変調方式では電流量により明るさを制御することから、明るさにより波長が変化してしまうという問題がある。したがって、電流密度が一定のデジタル駆動による階調表示方式が適用されることが多い。将来的には、マイクロ LED ディスプレイの家庭用テレビへの導入などが期待されており、マイクロ LED ディスプレイの高画質化には、提

案したランダムディザを用いた PDM 方式の応用が期待できる。

今後の課題としては、提案した階調表示方式を実際のディスプレイへ適用し、実際のデバイス条件の下で最適な駆動パラメータを探索することが重要である。ディスプレイは、解像度や画面サイズなど多くのバリエーションがあり、それぞれに最適な階調表示方式や駆動パラメータは異なってくる。多様な表示デバイスへの適用において、基本的な考え方は本論文で検討した内容により実現可能であると考えており、多様な表示デバイスで提案手法を検討し、応用展開を実現していきたい。

## 謝辞

本論文の作成にあたっては、電気通信大学大学院・情報理工学研究科・基盤理工学専攻・志賀智一教授に熱心なご指導いただきました。ここに心から深く感謝いたします。また、論文の充実化のために有益なご指導を頂きました基盤理工学専攻・岡田佳子教授、西岡一教授、山口浩一教授、総合情報学専攻・高橋裕樹准教授に感謝いたします。さらに、志賀研究室の皆様とは、有意義な議論をさせていただき、本研究を進める上での大きな励みになりました。感謝いたします。

本論文は、筆者が、日本放送協会放送技術研究所、および電気通信大学情報理工学研究科に在籍中に行った研究をまとめたものです。学位取得のため、職に身をおきながら、大学院に在学することを認めていただいた日本放送協会放送技術研究所の黒田徹元放送技術研究所長、林直人元新機能デバイス研究部長に深く感謝いたします。

研究の遂行にあたっては、日本放送協会放送技術研究所の新機能デバイス研究部の皆様には有益なご意見、ご指導を賜りましたこと感謝いたします。特に上司として有益な助言を頂きました山本敏裕元上級研究員、高野善道元上級研究員、藤崎好英上級研究員、中嶋宜樹上級研究員に、御礼申し上げます。

## 本論文に関する発表論文

### 学会誌論文

1. T. Usui, Y. Fujisaki, T. Shiga, "Motion blur reduction with triangular waveform emission and optimized enhance filter," Journal of the Society for Information Display, vol.27, no.9, pp.559-569, 2019 (DOI: 10.1002/jsid.776).
2. T. Usui, Y. Nakajima, T. Shiga, "A Digital Driving Method using Pulse-density Modulation with a Random Dither Matrix for Higher Motion Image Quality," Journal of the Society for Information Display, Vol.30, no.3, pp.198-208, 2022 (DOI:10.1002/jsid.1087).

### 国際会議

1. T. Usui, Y. Fujisaki, T. Shiga, "Study on Motion Blur of Triangular Waveform Emission with Optimized Enhancer," SID Symposium Digest 49, pp.1414-1417, 2018 (DOI:10.1002/sdtp.12456).

## 参考文献

1. 下平, 平野, 福家, “ホールド型画像表示における動きぼやけ妨害”, 電子情報通信学会論文誌, vol.J68-B, no.12, 1397-1404 (1985).
2. 石黒, 栗田, “8 倍速 CRT によるホールド発光型ディスプレイの動画質に関する検討”, 電子情報通信学会技術報告, EID96-4, 19-26 (1996).
3. T. Kurita, A. Saito and I. Yuyama., “Consideration on perceived MTF of hold type display for moving images,” Proc. IDW’98, 823-826 (1998).
4. T. Kurita, “Moving picture quality improvement for hold-type AM-LCDs,” SID Symposium Digest 32, 986-989 (2001).
5. Y. Kuroki and T. Nishi, “Improvement of motion image quality by high frame rate,” SID Symposium Digest 37, 14-17 (2006).
6. T. Kurita, “A consideration on motion image-quality improvement of LCD-TVs,” SID Symposium Digest 40, 854-857 (2009).
7. T. Kurita, “A guideline for motion image-quality improvement of LCDTVs,” Proc. IMID’09, 1164-1167 (2009).
8. T. Kurita, “A consideration on motion-image-quality improvement of LCDs and video systems,” Journal of the SID, vol.8, no.12, 1044-1050 (2010).
9. I. D. Paker, Y. Cao and C. Y. Yang. “Lifetime and degradation effects in polymer light-emitting diodes,” Journal of Applied Physics, vol. 85, no. 4, 2441-2447(1999).
10. C. Féry, B. Racine, D. Vaufrey, H. Doyeux, and S. Cinà, “Physical mechanism responsible for the stretched exponential decay behavior of aging organic light-emitting diodes,” Applied Physics Letters, vol. 87, no. 21, 213502(2005).
11. T. Usui, H. Sato, Y. Takano, T. Yamamoto and K. Ishii, “A study of Adaptive Temporal Aperture Control for OLED Displays with Motion Vector,” SID Symposium Digest 46, 863-868 (2015).
12. T. Usui, Y. Takano, and T. Yamamoto, “A study on a driving method of OLED displays for a better motion image quality with adaptive temporal aperture control,” Journal of the SID, Vol.25 No.8, 472-479(2016).
13. M. J. Powell, C. van Berkel, and J. R. Hughes, “M. J. Powell, et. al., “Time and temperature dependence of instability mechanisms in amorphous silicon thin-film transistors,” Applied Physics Letters, vol. 54, no. 14, 1323-1325, Apr. 1989.
14. Y. Matsueda, D.-Y. Shin, H.-K. Chung. “AMOLED Technologies for Uniform Image and Sufficient Lifetime of Image Sticking,” SID Symposium Digest 39, 9-12 (2008).
15. Y. W. Kim, S. R. Lee, O. K. Kwon, K. N. Kim, Y. S. Park, S. A. Yang, D. Y. Shin, B. H. Kim, and H. K. Chung, “A new pixel structure for AMOLED panel with 6-bit gray scale,” Proc. IDRC 2002, 613-616.
16. N. Komiya, C. Oh, K. Eom, Y. Kim, S. Park, and S. Kim, “A 2.0-in. AMOLED panel with voltage programming circuit and point scanning data driver circuits,” Proc. IDW’04, 283-286.
17. H. J. In, P. S. Kwag, J. S. Kang, O. K. Kwon, and H. K. Chung, “Voltage-programming method with transimpedance-feedback technique for threshold voltage and mobility compensations in large-area high-resolution AMOLED displays,” Journal of the SID, vol.

- 14, no.8, 665-671 (2006).
18. S. W.-B. Tam, Y. Matsueda, H. Maeda, M. Kimura, T. Shimoda, and P. Migliorato, "Improved polysilicon TFT drivers for light emitting polymer displays," *Proc. IDW'00*, 243-246(2000).
  19. T. Sasaoka, M. Sekiya, A. Yumoto, J. Yamada, T. Hirano, Y. Iwase, T. Yamada, T. Ishibashi, T. Mori, M. Asano, S. Tamura, and T. Urabe, "A 13.0-inch am-oled display with top emitting structure and adaptive current mode programmed pixel circuit (TAC)," *SID Symposium Digest 32*, 384-387(2001).
  20. Y. W. Kim, O. K. Kwon, K. N. Kim, D. Y. Shin, B. H. Kim, and H. K. Chung: "A new current programmable pixel structure for large-size and high-resolution AMOLEDs", *Proc. IDW'02*, 367-370, (2002)
  21. M. Ohta, H. Tsutsu, H. Takahara, I. Kobayashi, T. Uemura, Y. Takubo, "A Novel Current Programmed Pixel for Activematrix OLED Displays," *SID Symposium Digest 35*, 108–111(2003).
  22. D. Y. Shin, Y. Matsueda, and H. K. Chung, "New current demultiplexer TFT circuits for AMOLED," *IEICE Trans. Electron devices*, vol. E88-C, no. 11, pp. 2051-2056 (2005).
  23. S.W.B. Tam, M. Kimura, R. Friend, T. Shimoda, P. Migliorato, "A Self-Biased TFT-OLED Pixel Driver Circuit," *Proc. IDW'02*, 243–246(2002).
  24. H. Akimoto, H. Kageyama, Y. Shimizu, H. Awakura, S. Nishitani and T. Sato: "An innovative pixel-driving scheme for 64-level gray-scale full-color active matrix OLED Display," *SID Symposium Digest 33*, 972-975(2002).
  25. M. Kimura, D. Suzuki, M. Koike, S. Sawamura, and M. Kato, "Pulsewidth modulation with current uniformization for AM-OLEDs," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 57, no. 10, 2624–2630, Oct. 2010.
  26. M. Kimura, D. Suzuki, S. Sawamura, M. Kato, and D. Nishinohara, "Gamma Correction of Pulse Width Modulation with Current Uniformization for AM-OLEDs," *IEEE Journal of Display Technology*, vol. 8 no.5 May 2012.
  27. M. Kimura, D. Nishinohara, T. Nishiyori, D. Suzuki, S. Sawamura, M. Kato, "Pulse-width modulation with current uniformization for AM-OLED micro-displays on Si LSI chips," *Journal of the SID*, vol. 7, no.7, 402-408 (2019).
  28. M. Mizukami, K. Inukai, H. Yamagata, T. Konuma, T. Nishi, J. Koyama, S. Yamazaki, and T. Tsutsui, "6-bit digital VGA OLED," *SID Symposium Digest 31*, 912–915(2000).
  29. K. Inukai, H. Kimura, M. Mizukami, J. Maruyama, S. Murakami, J. Koyama, T. Konuma, S. Yamazaki, "4.0 - in. TFT - OLED Displays and a Novel Digital Driving Method," *SID Symposium Digest 31*, 924-927(2000)
  30. T. Yamaguchi, K. Toda, S. Mikoshiba, T. Nagakubo, and T. Akiyama, "Improvement in PDP picture quality by three-dimensional scattering of dynamic false contour," *SID Symposium Digest 27*, 291–294(1996).
  31. T. Shigeta, N. Saegusa, H. Honda, T. Nagakubo, and T. Akiyama, "Improvement of moving-video image quality on pdps by reducing the dynamic false contour," *SID Symposium Digest 29*, Anaheim, CA, 287–290(1998).
  32. Y. P. Eo, S. J. Ahn, and S. U. Lee, "Histogram-based subfield LUT selection for reducing dynamic false contour in PDPs," *SID Symposium Digest 36*, 606–609(2005).
  33. J. S. Lee, B. S. Kang, and Y. H. Kim, "Image-dependent code optimization to improve motion picture quality of plasma displays," *IEICE Trans. Electronics*, vol. E89-C, no. 10, 1400–1405, Oct. 2006.

34. J. W. Lee, B. R. Lim, R.-H. Park, J. S. Kim, and W. Ahn, "Two-stage false contour detection algorithm using re-quantization and directional contrast features and its application to adaptive false contour reduction," in IEEE International Conference on Consumer Electronics, 2006, Las Vegas, NV, 377-378.
35. K. Kajiyama, Y. Suzuki, T. Hirano, Y. Yanagawa, K. Fukaya, N. Okura, A. Shimoura, "Device Structure and Manufacturing Process for Highly Flexible Micro-LED Display," Proc. IDW'18, AMD2-2, 239-232(2018).
36. M. Tamaki, T. Suzuki, K. Aoki\*, R. Yokoyama, H. Ito, S. Nakamitsu, K. Imaizumi, K. Yamanoguchi, M. Nishide, F. Rahadian, S. Matsuda, E. Lang, L. Hoeppe, "A 3.9-inch LTPS TFT Full Color MicroLED Display with Novel Driving and Reflector Cavity Process," SID Symposium Digest 51, 111-114(2020).
37. N. Sugiura, C.-T. Chuang, C.-T. Hsieh, C.-T. Wu, C.-Y. Tsai, C.-H. Lin, C.-C. Liu, C.-Y. Liu, C.-N. Yeh, C.-Y. Liu, Y.-C. Lin, "12.1-inch 169-ppi Full-Color Micro-LED Display Using LTPS-TFT Backplane," SID Symposium Digest 50, 450-453(2019).
38. Z. Gong, S. Jin, Y. Chen, J. McKendry, D. Massoubre, I. M. Watson, et al., "Size-dependent light output, spectral shift, and self-heating of 400 nm InGaN light-emitting diodes," Journal of Applied Physics, vol.107, no.1, 013103, (2010).
39. C.-C. Lin, Y.-H. Fang, M.-J. Kao, P.-K. Huang, F.-P. Chang, L.-C. Yang, C.-I. Wu, "Ultra-Fine Pitch Thin-Film Micro LED Display for Indoor Applications," SID Symposium Digest 49, 782-785(2018).
40. C. Adachi, M. A. Baldo, S. R. Forrest and M. E. Thompson, "High-efficiency Organic Electrophosphorescent Devices with Tris (2-phenylpyridine) Iridium Doped into Electrontransporting Materials," Applied Physics Letters, vol.77, p.904(2000).
41. C. Adachi, Raymond, C. Kwong, P. Djurovich, V. Adamovich, M. A. Baldo, M. E. Thompson and S. R. Forrest, "Endothermic Energy Transfer: A Mechanism for Generating Very Efficient High-energy Phosphorescent Emission in Organic Materials," Applied Physics Letters, vol.79, 2082-2084(2001).
42. Y. H. Jang, D. H. Kim, W. Choi, M. Kang, K. Chun, J. Jeon, Y. Ko, U. Choi, S. M. Lee, J. U. Bae, K. Park, S. Y. Yoon, and I. B. Kang, "Internal Compensation Type OLED Display Using High Mobility Oxide TFT", SID Symposium Digest 49, 76-79 (2017).
43. S. Takasugi, H. Shin, M. Chang, S. Ko, H. Park, J. Lee, H. Kim, and C. Oh, "Advanced compensation technologies for large-sized UHD OLED TVs", Journal of the SID, vol.24, no.7, 410-418 (2016).
44. H. Lam, Y. Wang, H. Jiao, and S. Zhang, "A Compact Pixel Circuit for Externally Compensated AMOLED Displays", Journal of the Electron Devices, vol.6, 936-941 (2018).
45. K. Toyotaka, K. Takahashi, R. Yamamoto, S. Kawashima, D. Nakamura, N. Sugisawa, M. Dobashi, C. Misawa, M. Nakada, and S. Yamazaki, "OLED Display Device Mounted with a Novel External Compensating Circuit", SID Symposium Digest 49, 44-47 (2017).
46. C. H. Meyer, A. G. Lasker, D. A. Robinson, "The upper limit of human smooth pursuit velocity," Vision Research, vol. 25, no. 4, 561-563 (1985).
47. Y. Kuroki, T. Nishi, S. Kobayashi, H. Oyaizu, S. Yoshimura, "A psychophysical study of improvements in motion-image quality by using high frame rates," Journal of the SID, vol.15, no.1, 61-68(2007).
48. 齊藤, 志賀, "ディスプレイの各種振幅・パルス幅変調階調表示方式と動画ぼやけ", 電子情報通信学会技術報告, EID2014-048, 53-56 (2015).

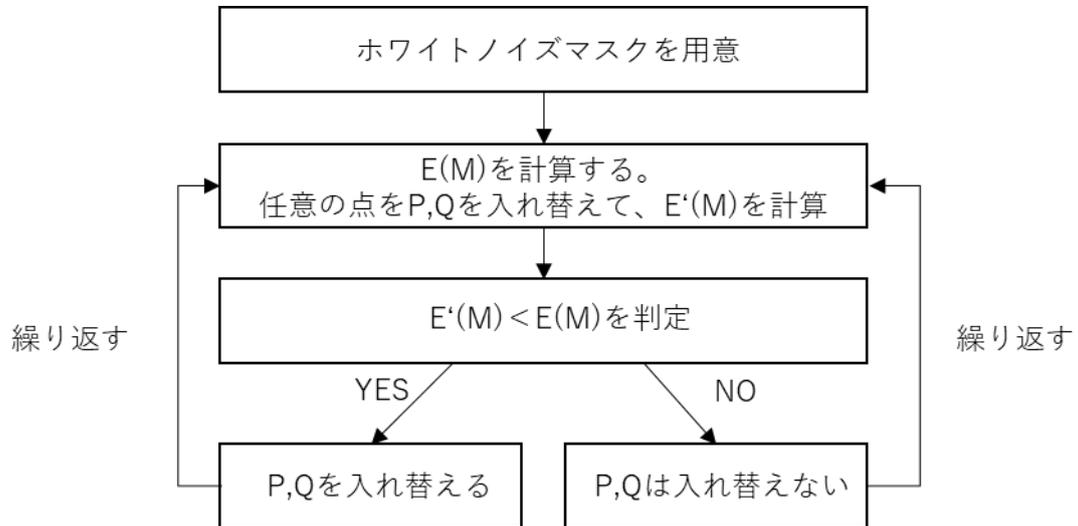
49. ITU-R Recommendation BT.500 <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.500>
50. S. Bitzakidis, "Moving-image enhancement on AMLCDs," *Journal of the SID*, vol.3 no.4, 249–255 (1995).
51. G. de Haan, "An overview of flaws in emerging television displays and remedial processing," *IEEE Trans. Consumer Electronics*, vol.47, no3, 326-334, 2001.
52. S.-T. Cho, E. G. Chen, K.-F. Li, K.-C. Chan, T.-H. Hsieh, C. Yang and J.-P. Pang "Hold-type Display Motion Blur Reduction with Spatial Compensation," *SID Symposium Digest 40*, 1267-1270 (2009)
53. T. Kurita, "Motion-adaptive edge compensation to decrease motion blur of hold-type display," *SID Symposium Digest 36*, 1586–1589(2005).
54. M. A. Klompenhouwer, and L.J. Velthoven, "Motion blur reduction for liquid crystal displays: Motion compensated inverse filtering," *proc. SPIE, VCIP 2004*, 690–699(2004).
55. M. A. Klompenhouwer, and L. J. Velthoven, "LCD Motion Blur Reduction with Motion Compensated Inverse Filtering," *SID Symposium Digest 35*, 1340-1343 (2004).
56. P. J. Bex, G. K. Edgar and A. T. Smith, "Sharpening of Drifting, Blurred Images," *Vision Research*, vol.35, no.18, 2539-2546 (1995).
57. J. H. Jang, M. Kwon, E. Tjandranegara, K. Lee, and B. Jung, "A digital driving technique for an 8 b QVGA AMOLED display using modulation," *IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2009, 270–271.
58. J. H. Jang, M. Kwon, E. Tjandranegara, K. Lee, and B. Jun. "A PDM-Based Digital Driving Technique Using Delta-Sigma ( $\Delta \Sigma$ ) Modulation for QVGA Full-Color AMOLED Display Application," *IEEE Journal of Display Technology*, vol.6, no.7, 269-278, July 2010.
59. Z. Wang, A.C. Bovik, H. R. Sheikh, and E.P. Simoncelli, "Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity," *IEEE Trans. Image Processing*, vol.13, no.4, 600-612, Apr. 2004.
60. Georgiev, M. Fajardo, "Blue-noise dithered sampling," *ACM SIGGRAPH 2016 Talks*, July 2016, no.35 Pages 1 <https://doi.org/10.1145/2897839.2927430>.

## 付録

本論文におけるブルーノイズマスクの作成方法

$$E(M) = \sum_{p \neq q} E(p, q) = \sum_{p \neq q} \exp\left(-\frac{\|p_i - q_i\|^2}{\sigma_i^2} - \frac{\|p_s - q_s\|^{d/2}}{\sigma_s^2}\right)$$

$p_i, q_i$ は  $p, q$ の座標、 $p_s, q_s$ は  $p, q$ の値、 $\sigma_i, \sigma_s, d$ は任意パラメータ。  
今回は、 $\sigma_i=2.1, \sigma_s=1, d=1$ 、とした。



$E(M)$ の値が小さくなるまで、任意の点  $P, Q$  を入れ替えていく