

視覚マスクング効果を考慮した電子ディスプレイの
アドレス駆動電力削減に関する研究

関 昌彦

電気通信大学大学院情報理工学研究科
博士（工学）の学位申請論文

2016年12月

視覚マスキング効果を考慮した電子ディスプレイの アドレス駆動電力削減に関する研究

博士論文審査委員

主査 志賀智一 准教授

委員 上野芳康 教授

委員 西岡 一 教授

委員 岡田佳子 准教授

委員 高橋裕樹 准教授

著作権所有者

関 昌彦

2016 年

Study on Address Power Reduction Methods for Electronic Displays in Consideration of Visual Masking Effect

Masahiko Seki

Abstract

This paper describes research on the image processing and the subjective assessment for the address power reduction method of electronic displays using a visual masking effect.

In chapter 1, the objectives of research and background are described.

In chapter 2, the overview of the visual masking effect is described. Conditions for obtaining the visual masking effect between an error of pixel value and a background image are considered.

In chapter 3, the conduction of a quantitative assessment method for the visual masking effect is described. The method is consisted of two parts, the simulation of visual masking and the extraction of the masking image region. The simulation makes clear the relationship between magnitude of error of pixel value and conditions of image features for which the generated error is hard to recognize due to the visual masking effect. The image region with high effectiveness of the visual masking effect is extracted using the obtained

conditions. In the extraction, a newly proposed index called the luminance-based segment is used, which evaluates local spatial frequency and local contrast of an input image.

In chapter 4, the proposed method in chapter 3 is verified by means of experiments in noisy image restoration. The image is divided into several regions based on the weight of the visual masking effect which is extracted by the proposed method. The quality of the output image is maintained due to controlling degree of smoothing for each region.

In chapter 5, the address power reduction method for plasma display panels using address data smoothing based on the visual masking effect is described. The proposed method reduces the address power while maintaining the image quality by choosing the smoothing area of address data based on the visual masking effect. It is estimated that the reduction rate of the address power loss is about 50%. The result of subjective assessment for the images based on smoothed address data indicates that the image quality is maintained.

In chapter 6, the address power reduction method for MEMS shutter displays using address data smoothing based on the visual masking effect is described. The image quality is maintained by choosing the smoothing area based on the visual masking effect. It is estimated that the reduction rate of the address power loss is about 25%.

Chapter 7 concludes with a summary of the main results, including the

significance of this research and an indication of the direction of future work.

視覚マスクング効果を考慮した電子ディスプレイの アドレス駆動電力削減に関する研究

関 昌 彦

概 要

電子ディスプレイの消費電力削減は昔からの大きな研究テーマであるが、昨今の画素数の増加はアドレス駆動回路の電力の増加を促し、これを削減することが重要な課題となっている。本論文は、映像信号に視覚マスクングを主体とした視覚特性を利用した画像処理を施すことにより、画質を保持しながらアドレス駆動電力の削減を可能とする表示方式の構築と、その有効性を確認するために実施した主観評価実験についてまとめたものである。視覚マスクング効果の定量的評価手法、プラズマディスプレイおよび MEMS シャッター方式ディスプレイのアドレス駆動電力の削減を目指した表示方式の構築について以下の 7 章にまとめた。

第 1 章では、電子ディスプレイの消費電力の削減が求められている研究の背景と目的などを述べた。

第 2 章では、視覚マスクングの概要と先行研究において明らかにされている視覚マスクングの特徴を述べた。本論文で提案する手法では、アドレスデータを平滑化することで信号の遷移回数を減らし消費電力を低減する。この際に画素値の誤差（以降平滑化誤差と称する）が生じる。この平滑化誤差と背景画像との間に働く視覚マスクングについて考察した。平滑化誤差はランダムノイズに似た空間周波数特性を有する。平滑化誤差と背景画像との間で視覚マスクングが生じる要因について考察し、その中から本論文では空間周波数特性、コントラスト、平均輝度の 3 つの特徴量に着目することにした。

第 3 章では、平滑化誤差と背景画像間の視覚マスクング効果を定量的に判定する手法を提案した。まず、コントラストと平均輝度をブロック状に段階的に変化させた画像を背景画像とし、それに平滑化誤差を想定した信号（白色ガウスノイズあるいはインパルスノイズ）を加え、その信号が視覚マスクングにより視認されなくなる平均画素値とコントラストの条件を求めた。なお 2 つの刺激の空間周波数特性が一致する時に最も視覚マスクングが強くなるという知見

に基づいて、コントラストと平均輝度を変化させた画像と加える信号の空間周波数特性は一致させている。次に自然画像において、求めた条件に該当する領域を抽出する手法を述べた。この領域のみでアドレスデータの平滑化処理を行うことにより画質の低下を防ぐことが可能となる。領域抽出のために、類似輝度セグメントと呼称する指標を導入した。これは、画像を局所的に類似した濃度を有するセグメントに分割し、セグメントの大きさを3つの特徴量を間接的に取得できる指標で、3つの特徴量を直接演算で取得するよりも容易に求めることができる。

第4章では、ノイズを含んだ画像からノイズを除去して画像を復元するという画像処理において、第3章で提案した視覚マスクング領域抽出手法を応用しその効果の検証を行った。視覚マスクングの強さに従って画像をいくつかの領域に分け、領域ごとにノイズフィルタの強度を調整する。視覚マスクング効果によりノイズが視認されないと判定された領域では、スムージングを行わないことで、細かいテクスチャなどの高周波情報を保存できることを示した。これによりノイズが効果的に除去され、提案手法が有効であることを確認した。

第5章では、視覚マスクングにより平滑化誤差が視認されない領域の抽出手法をプラズマディスプレイに適用した表示方法を提案した。アドレスデータの平滑化を行う際に平滑化誤差が生じ画質劣化の原因となるが、抽出された領域のみでアドレスデータを平滑化することで、平滑化後の画質を維持しつつアドレス駆動回路の容量性負荷で生じる電力損失を削減する。241枚の評価画像に提案手法を適用し、電力損失と比例関係にあるアドレスデータの遷移回数がおおよそ50%削減できることを確認した。この結果から、アドレス駆動回路での電力損失を半減できる見込みを得た。また、主観評価実験により、平滑化後の画質は平均オピニオン評点が4以上と高い評価であることを確認した。

第6章では、提案方式をMEMSシャッター方式ディスプレイへ応用し、アドレス駆動回路の電力を削減する表示方法を提案した。平滑化誤差が視認されない領域のみでサブフィールド間のアドレスデータを平滑化することで、1フィールド期間のシャッターの開閉回数を減らし、シャッターを制御している静電容量型アクチュエータの駆動電力を削減する。241枚の評価画像に提案手法を適用して、アドレスデータの平滑化後のシャッターの開閉回数の削減率がおおよそ25%になること、および平滑化後の画像で画質が維持されていることを確認し

た.

第7章では纏めとして、本研究の成果、残された課題、および将来への展望について記した。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	3
1.3	本論文の構成	6
1.4	第1章の参考文献	8
第2章	背景技術 – 視覚マスキング	10
2.1	はじめに	10
2.2	視覚マスキングの概要	10
2.3	関連研究	12
2.3.1	視覚のコントラスト感度特性	12
2.3.2	多重チャンネルモデル	13
2.4	視覚マスキングに影響を与える因子	14
2.4.1	パワースペクトル	14
2.4.2	平均輝度 (平均画素値)	14
2.4.3	空間周波数の方向と色相	14
2.5	この章のまとめ	16
2.6	第2章の参考文献	17
第3章	視覚マスキング効果の定量的評価手法	20
3.1	はじめに	20
3.2	先行研究	22
3.3	視覚マスキングのシミュレーション	23
3.3.1	シミュレーションに用いる影響因子	23
3.3.2	視覚マスキング評価画像	26

3.3.3	自然画像における平均画素値の演算	27
3.3.4	平滑化誤差の視認性判定	31
3.3.5	シミュレーション例	34
3.4	類似輝度セグメントの導入	34
3.4.1	類似輝度セグメント化処理	37
3.4.2	最大内接円半径の演算処理	38
3.4.3	類似輝度セグメントを用いたコントラストの検出	38
3.4.4	類似輝度セグメントを用いた空間周波数特性の検出	39
3.5	類似輝度セグメントを用いた視覚マスクング効果の 定量的評価	41
3.5.1	評価手法の概要	41
3.5.2	平均画素値-しきい値テーブルの取得	44
3.5.3	自然画像における平滑化誤差が視認されない領域の抽出	46
3.6	この章のまとめ	47
3.7	第 3 章の参考文献	48
第 4 章	ノイズ劣化画像の復元	49
4.1	はじめに	49
4.2	先行研究	49
4.3	画像復元手法の概要	50
4.4	視覚マスクング効果の強度の算出	51
4.4.1	視覚マスクング効果の数値化	51
4.4.2	視覚マスクング効果の強度の算出手法	51
4.5	画像復元手法	53
4.5.1	視覚マスクング効果の強度に基づく領域分割	53
4.5.2	画像の復元処理	55
4.5.3	ノイズの推定	55
4.6	実験	56

4.7	この章のまとめ	64
4.8	第4章の参考文献	65
第5章	PDPのアドレス駆動電力削減	67
5.1	はじめに	67
5.2	先行研究	67
5.3	アドレス駆動電力と駆動方法	68
5.3.1	PDPの構造とアドレス駆動回路の消費電力	68
5.3.2	中間調表示方式	73
5.4	アドレスデータの平滑化による電力削減	74
5.5	視覚マスキングを用いたアドレスデータ平滑化領域の選択	78
5.5.1	視覚マスキングシミュレーションの実施	80
5.5.2	平滑化領域の決定	82
5.6	アドレスデータの実際の平滑化手法	82
5.7	カラー画像に対する提案手法のフレームワーク	84
5.8	評価画像	85
5.9	実験	88
5.9.1	視覚マスキングシミュレーションによる 平均画素値－しきい値テーブルの取得	88
5.9.2	平滑化領域選択の例	88
5.9.3	アドレス電力損失削減率の推定	90
5.9.4	主観評価実験	95
5.10	従来研究との比較	99
5.11	この章のまとめ	102
5.12	第5章の参考文献	104
第6章	MEMSシャッター方式ディスプレイのアドレス駆動電力削減	107
6.1	はじめに	107

6.2	MEMS シャッター方式ディスプレイのアドレス駆動電力. . . . .	.109
6.3	アドレスデータの平滑化 . . . . .	.111
6.4	視覚マスキング効果を用いたアドレスデータ 平滑化領域の選択. . . . .	.111
6.4.1	視覚マスキングシミュレーションの実施 . . . . .	.112
6.4.2	平滑化領域の決定. . . . .	.114
6.5	アドレスデータの実際の平滑化手法 . . . . .	.115
6.6	アドレスデータ平滑化の実験 . . . . .	.118
6.6.1	領域分割の例 . . . . .	.119
6.6.2	シャッター駆動電力削減率の推定 . . . . .	.121
6.6.3	SSIM による平滑化画像の画質評価. . . . .	.122
6.7	この章のまとめ . . . . .	.124
6.8	第 6 章の参考文献. . . . .	.125
第 7 章	結言	127
7.1	各章のまとめ . . . . .	.127
7.2	今後の展望 . . . . .	.129
 付録		
A.	バイラテラルフィルタの計算	131
B.	ノンローカルミンフィルタの計算	132
C.	SSIM と PSNR の計算	134

謝辞

関連論文の印刷公表の方法及び時期

目次

1.1	電子ディスプレイの総画素数の推移	2
1.2	PDP の消費電力内訳	2
1.3	入力画像のビットプレーン分解	5
1.4	インパルスノイズを付加した画像における視覚マスキング効果	5
1.5	本論文の構成	7
2.1	正弦波縞を用いた視覚マスキング効果	11
2.2	コントラスト感度特性	12
2.3	視覚特性の多重チャネルモデル	13
2.4	多重チャネルモデルによる視覚マスキングの説明	15
3.1	視覚マスキング効果の定量的評価手法の処理手順	21
3.2	視覚モデルのブロック図	22
3.3	コントラストとパワースペクトルの関係	25
3.4	画像特徴量と視覚マスキングの関係	26
3.5	視覚マスキング評価画像と画像データ例	28
3.6	視覚マスキング評価画像とノイズのパワースペクトル	29
3.7	局所平均画素値の計算	30
3.8	主観評価により平滑化誤差が視認されないと判定された SSIM 値	32
3.9	平滑化誤差を付加した視覚マスキング評価画像の SSIM 値と 平滑化誤差が視認されない領域	33
3.10	SSIM の値が 0.96 以上の領域	33
3.11	視覚マスキングのシミュレーション例	35
3.12	しきい値による類似輝度セグメント分割例	36
3.13	類似輝度セグメントの最大内接円	36

3.14	類似輝度セグメント化処理の手順	37
3.15	類似輝度セグメント内の最大内接円処理	38
3.16	空間周波数特性と類似輝度セグメントの大きさの関係.	40
3.17	類似輝度セグメントの半径と出現頻度	41
3.18	類似輝度セグメントを用いた視覚マスキングの 定量的評価手順	43
3.19	平均画素値が 50 のデータに対するしきい値の決定方法 (平滑化誤差標準偏差：4.5)	44
3.20	自然画像を用いた平滑化誤差が視認されない領域の抽出例	46
4.1	3 種類の標準偏差を基に算出した平均画素値－しきい値 テーブルによるノイズが視認されない領域の抽出 (ノイズの標準偏差：4.5, 2.25, 1.125)	52
4.2	視覚マスキング効果の強度に基づく領域分割の処理手順	54
4.3	視覚マスキング効果の強度に基づく領域分割 (ノイズの標準偏差：A>B>C>D)	55
4.4	平坦領域の画素値ヒストグラム	59
4.5	類似輝度セグメント分割画像とノイズが視認されない領域	59
4.6	視覚マスキング効果の強度による領域分割画像	59
4.7	提案手法および従来手法による画像 IEC の復元画像	60
4.8	復元画像の拡大図	61
4.9	視覚マスキング効果の強度による領域分割画像	61
4.10	提案手法および従来手法による画像 Lenna の復元画像	62
4.11	復元画像の拡大図	63
5.1	PDP の構造	71
5.2	アドレス電極間およびアドレス-維持電極間の寄生容量	72
5.3	電力損失が最大となる点灯パターン	72

5.4	アドレスデータ平滑化の例	73
5.5	サブフィールドを用いた中間調表示方式 (ADS 法)	74
5.6	各ビットのサブフィールド画像と表示画像	76
5.7	アドレスデータ平滑化画像と生じる平滑化誤差	76
5.8	反転画像の空間周波数特性	76
5.9	カラー画像におけるアドレスデータ平滑化の例	77
5.10	第 5 サブフィールドのデータ平滑化により生じる平滑化誤差	77
5.11	視覚マスキングを用いたサブフィールドにおける 平滑化領域選択手順	79
5.12	モルフォロジ平滑化における処理方式	83
5.13	2 種類のアドレスデータ平滑化例	84
5.14	カラー画像に対する平滑化領域抽出の処理手順	85
5.15	IEC 評価画像例	86
5.16	IEC 62087 標準動画の APL ヒストグラム	87
5.17	IEC 評価画像の APL	87
5.18	各サブフィールドにおける平滑化誤差が視認されないと 評価された領域 (白色)	89
5.19	アドレスデータ平滑化後のアドレスデータの遷移回数の 削減率と隣接アドレスデータ間の状態遷移回数の削減率	92
5.20	アドレスデータ遷移回数の削減率が高い画像例と低い画像例	93
5.21	平滑化前後のアドレスデータの遷移回数	94
5.22	アドレスデータ遷移回数の削減率と APL の関係	94
5.23	主観評価に用いた IEC 評価画像	96
5.24	3 種類の平滑化によるアドレスデータ遷移回数の削減率	97
5.25	各サブフィールドにおけるアドレスデータの平滑化領域例	97
5.26	主観評価結果	98
5.27	提案手法と従来手法の比較に用いた評価画像	100
5.28	提案手法および従来手法による平滑化画像	101

5.29	平滑化画像の PSNR . . . . .	.101
5.30	平滑化画像の SSIM . . . . .	.102
6.1	MEMS シャッター方式ディスプレイの構造 . . . . .	.108
6.2	MEMS シャッター方式ディスプレイの発光原理 . . . . .	.108
6.3	静電容量型アクチュエータによるシャッターの移動 . . . . .	.110
6.4	カラー画像の中間調表示方式. . . . .	.110
6.5	平滑化するサブフィールド数に対応した平滑化領域選択の手順 . . .113	
6.6	第 1 から第 3 サブフィールドのアドレスデータを平滑した場合の 画像信号の (a) 入出力特性と (b) 誤差 . . . . .	.114
6.7	平滑化を行うサブフィールド数を基にした領域分割 . . . . .	.115
6.8	視覚的に大きな輝度差を緩和させるための入出力特性. . . . .	.116
6.9	輝度差を緩和させる手法による平滑化の効果 . . . . .	.118
6.10	平滑化サブフィールド数を基にした領域分割例 . . . . .	.120
6.11	アドレスデータ平滑化後のシャッター開閉回数の削減率 . . . . .	.121
6.12	SSIM による平滑化画像の画質評価. . . . .	.122
6.13	原画像と平滑画像 . . . . .	.123
B.1	注目画素に対する探索範囲とバッチ範囲の位置関係 . . . . .	.133

表目次

3.1	主観評価実験の諸元	32
3.2	3種類の平滑化誤差の標準偏差を基に導出した 平均画素値-しきい値テーブル	45
4.1	PSNRによる復元画像の評価	63
4.2	SSIMによる復元画像の評価	63
5.1	50インチPDPの諸元	71
5.2	3種類の平滑化誤差の標準偏差を基に導出した 平均画素値-しきい値テーブル	81
5.3	平滑化領域の決定に用いた平滑化誤差の大きさ	97
5.4	5段階劣化尺度	98
5.5	主観評価実験の諸元	98
6.1	サブフィールド間のアドレスデータ平滑化例 . . . . .	.111
6.2	第4サブフィールドのデータに揃える平滑化 . . . . .	.116
6.3	輝度差を緩和させる手法による平滑化 . . . . .	.117
6.4	アドレスデータ平滑化実験で用いた3つの平滑化 . . . . .	.119

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

電子ディスプレイは情報技術 (IT : Information Technology) の進化により、ますます必要不可欠なマンマシンインターフェースとして使用範囲が広がっている。図 1.1 の電子ディスプレイの総画素数の推移に見るように、民生用テレビでは、4K・8K (スーパーハイビジョン) 放送の実現に向けた動き[1]を受けて年々画素数が増加している。また、スマートフォンにおいてもインターネット閲覧、ビデオ観賞などの利用形態の多様化が進み、急速にディスプレイの多画素化が進んでいる。このように電子ディスプレイの画素数が増加すると、1 フレーム時間内に多くのデータを書き込む必要が生じ、アドレス動作が高速になる。これに加えて動画像の画質改善を目的にフレーム周波数も増加の傾向にある[2],[3]。これらの要件は、電子ディスプレイのアドレス駆動回路での消費電力の増加に繋がる。特に、ビットプレーン表示方式を用いて中間調を表示しているプラズマディスプレイパネル (PDP : Plasma Display Panel) や MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) シャッター方式ディスプレイなどの電子ディスプレイでは、より高速のアドレス動作が必要となり、アドレス駆動回路での電力消費が大きくなり、ディスプレイ全体の消費電力に対するその割合が増大する課題を有する。PDP は 1993 年に 21 インチカラー PDP が製品化されて以来、大画面化と高精細化が進み 100 インチ級 PDP が製品化され、試作レベルでは 4K や 8K の PDP が開発されるなど、高画質、高臨場感ディスプレイに向けた開発を着実に進めてきた[4]-[7]。しかしながら、走査線の本数およびフレーム周波数が増えるとデータを書き込む速度が早くなり、アドレス駆動回路の消費電力が増大するという課題をかかえている。図 1.2 はハイビジョン PDP とスーパーハイビジョン PDP のアドレス駆動回路における消費電力のディスプレイ全体の消費電力に対する割合を示した図である。スーパーハイビジョンでは水平走査線の本数が 4 倍、フレーム周波数が 2 倍になることから、アドレス駆動回路にお

ける消費電力がハイビジョンのおよそ 8 倍に増大する。他の回路における消費電力や放電で消費される電力も増えるが、それらを勘案してもアドレス駆動回路における消費電力の割合が 5 倍と大きく増大することが予測され、アドレス回路の消費電力を削減する技術開発が求められている。

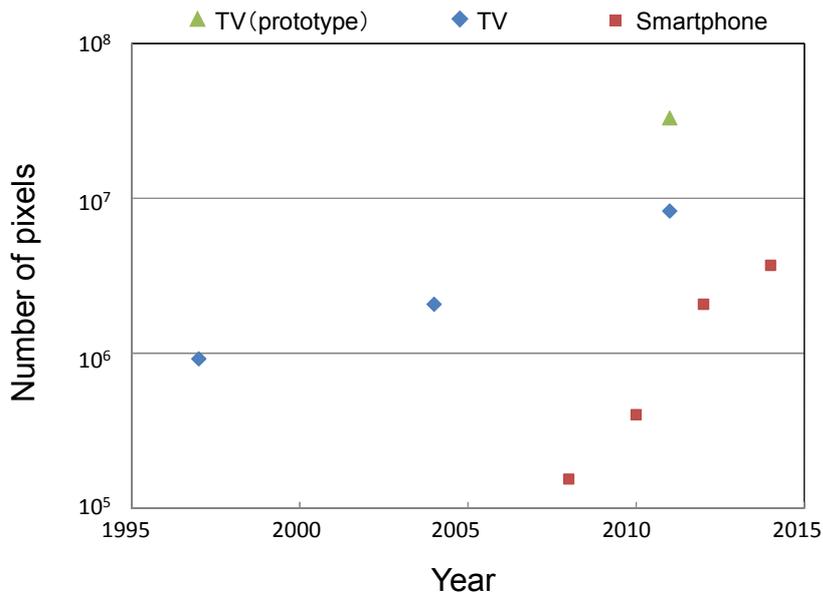


図 1.1 電子ディスプレイの総画素数の推移

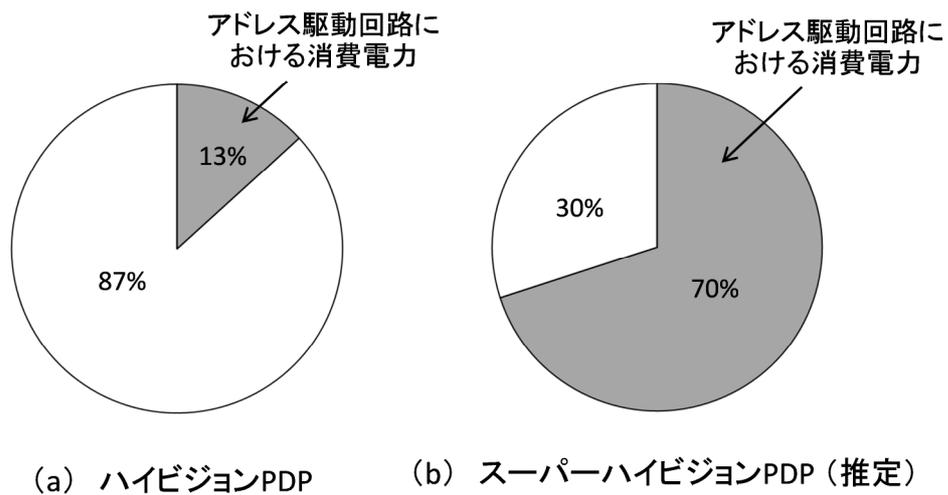


図 1.2 PDP の消費電力内訳

一方、電子ディスプレイの消費電力削減に対する要求は、地球温暖化や資源枯渇化問題を受け以前から大きい。米国のカリフォルニア州では、一定以下の消費電力をクリアしていない電子ディスプレイは販売できない条例が定められている[8]。日本においても、国際的な省エネルギーの取り組みであるエネルギースタープログラム[9]が施行されており、今後ますます省エネルギーの要請が強まると予想される。スマートフォンなどの携帯端末においては電池の消耗を極限まで削減することが求められ、省電力化が進むと予想される[10]。

1.2 研究の目的

本研究の目的は、視覚特性を利用して、表示画質を保持しながらビットプレーン表示方式の電子ディスプレイのアドレス動作に関わる電力を削減する画像処理技術を開発することである。図 1.3 に示すように、1 画素 8 ビットのモノクローム画像は 8 枚のビットプレーンに分解される。各ビットプレーンの画素は 2 値で表現される。ここで 8 枚のビットプレーンを最下位 (LSB) から最上位 (MSB) まで順に第 n ビットプレーン ($n=1\sim 8$) と呼ぶ。ビットプレーン表示方式の電子ディスプレイでは、これらのビットプレーンの 2 値画像がアドレスデータとなる。視覚特性を利用することにより、アドレスデータの冗長な情報成分を除去することで電力削減を行う。

電子ディスプレイの表示品質については、電子ディスプレイの応用分野により、その求められる性質は異なってくる。医用画像では、画像処理を行った結果、原画像の特徴が損ねられた場合、その医用画像を用いた診断に悪影響を与える場合があるが、放送画像では原画像と必ずしも一致せずとも、人間が知覚できない、もしくはほとんど知覚できない画像成分は冗長な情報として扱っても良いと考えられる。このような観点から、本研究では、主に放送画像を対象として研究を進め、画質を評価する場合は、画像を表示する電子ディスプレイの画素構造が検知できない距離から見た場合を議論する。

本研究では、画像データをビットプレーン分解した 2 値のアドレスデータを対象とするため、画像データのデータ圧縮を目的に開発された高効率符号化技

術を利用することができず、ビットプレーン表示方式の特徴を利用した新たなデータ圧縮技術を開発する必要がある。ビットプレーン表示方式の電子ディスプレイのアドレスデータは図 1.3 で示したように 2 値画像を構成するデータとなるので、冗長な情報成分を除去することは 2 値の原画像に対して平滑化などの画像処理を行うことと等価となる。冗長成分であっても原画像に画像処理を行うと必ず画素値の誤差が生じ表示画質を少なからず劣化させる。5 章で詳述するが、本研究で行う画像処理では画像と無相関なランダムノイズ的な画素値誤差が発生する。本論文ではこの誤差を平滑化誤差と呼称する。本研究では、ビットプレーンデータを平滑化すると平滑化誤差が発生することに着目し、この生じた平滑化誤差と背景画像間の視覚マスキング効果を用いることで、画質劣化を目立たなくする技術を開発する。定性的には、背景画像が、コントラストが高く、入り組んだ複雑な画像であればこの効果が強く生じると言われている [11]-[14]。図 1.4 は、インパルスノイズを一様に付加した画像である。拡大鏡のカバー部分など、明るさが平坦な部分ではノイズが強く視認されるのに対して、中央の部品のような入り組んだ画像部分ではノイズがほとんど視認されない。ノイズの種類によってもマスキング効果は異なってくる。従って、画像処理によって生じる平滑化誤差を特定し、その平滑化誤差に対して、どのような条件で視覚マスキングが生じ、その強さはどうなるか定量的に評価できるようにする必要がある。

本論文では、平滑化誤差と背景画像間の視覚マスキング効果を定量的に評価する手法を提案する。この手法によれば、2 値画像を構成するアドレスデータから冗長なアドレスデータを除去する処理で平滑化誤差が発生しても、視覚マスキング効果により平滑化誤差が視覚的に視認されない条件を定量的に把握することができる。その結果、生じた平滑化誤差の画質への影響が最小限になる画像領域を特定し、特定された部分のみでアドレスデータの処理を行うことで、電子ディスプレイの画質を保ったまま最大限の電力削減を行うことが可能となる。本論文では PDP と MEMS シャッター方式ディスプレイに対して提案手法を適用し、コンピュータシミュレーションにより削減できるアドレス駆動電力を

推定する。なお、本研究で用いる画像は、8ビット、256階調のグレースケール画像とRGB各色8ビットのカラー画像とする。平滑化誤差はその空間周波数特性がランダムノイズと近似しているため、インパルスノイズと白色ガウスノイズの2種類のランダムノイズで近似させる。

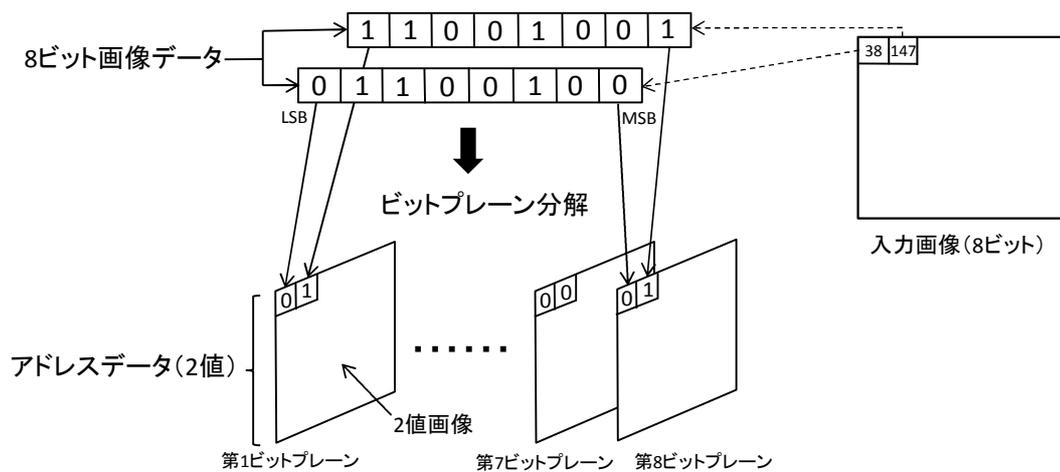
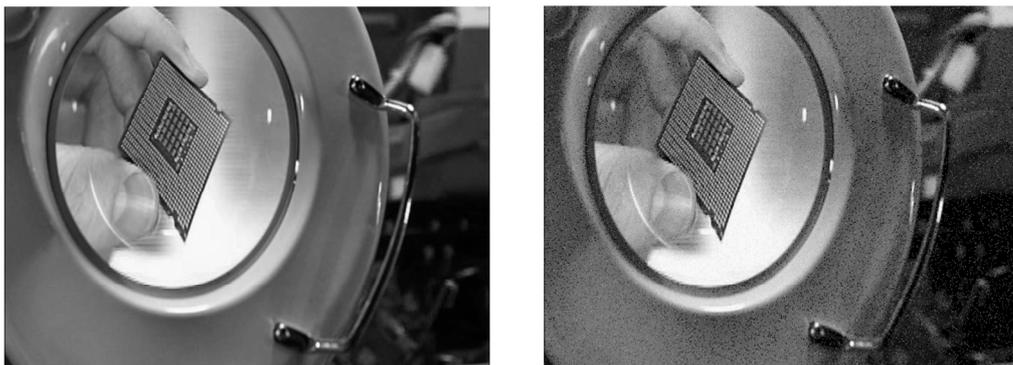


図 1.3 入力画像のビットプレーン分解



原画

インパルスノイズ付加

図 1.4 インパルスノイズを付加した画像における視覚マスキング効果

1.3 本論文の構成

本研究は、画質を維持しながら電子ディスプレイのアドレス駆動回路における消費電力を削減することを目的とした、視覚マスキングを応用した画像処理に関する論文で、7章より構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的を述べる。

第2章では、視覚マスキングの概要と先行研究において明らかにされている視覚マスキングの特徴について述べる。本研究が対象とする平滑化誤差と背景画像間の視覚マスキングにおいて、視覚マスキング効果を得るための背景画像の条件について考察する。

第3章では、視覚マスキング効果を電子ディスプレイの電力削減に応用する上で必要となる、視覚マスキング効果の定量的評価手法を提案する。演算では取り扱いが難しい局所領域の空間周波数特性に対して、類似輝度セグメントと呼称する新規な指標を評価手法に取り込むことで対応している。

第4章では、第3章で提案した視覚マスキング効果の定量的評価手法の有効性を確認するために行ったノイズ劣化画像の復元について述べる。細かいテクスチャなどの高周波成分を保持しながら効果的にノイズを除去できることを示し、提案した画像復元手法と視覚マスキングの定量的評価手法の有効性を確認している。

第5章では、第3章で提案した視覚マスキング効果の定量的評価手法を、ビットプレーン表示方式の電子ディスプレイのひとつであるPDPに応用した結果を述べる。サブフィールド内のアドレスデータを平滑化して、電極間の寄生容量に起因する電力損失を削減する手法について述べる。平滑化で生じる画質劣化を抑制するために視覚マスキングを利用している。241枚の評価画像を用いて、削減できるアドレス駆動電力を推定した。平滑化後の画質については主観評価実験で画質が保持されていることを確認している。

第6章では、ビットプレーン表示方式を使用する第2の例としてMEMSシャッター方式ディスプレイへの応用について述べる。MEMSシャッター方式ディ

スプレイは各画素に形成されたシャッターの開閉で発光の制御を行っている。サブフィールド間のアドレスデータを平滑化することで、シャッターの開閉回数を減らしてアドレス駆動電力を削減している。PDPと同様に、視覚マスクングが有効な領域のみで平滑化を行うことで画質の保持を達成している。

第7章では、本研究の結論を述べる。

以上述べた本論文の構成を図1.5に示す。

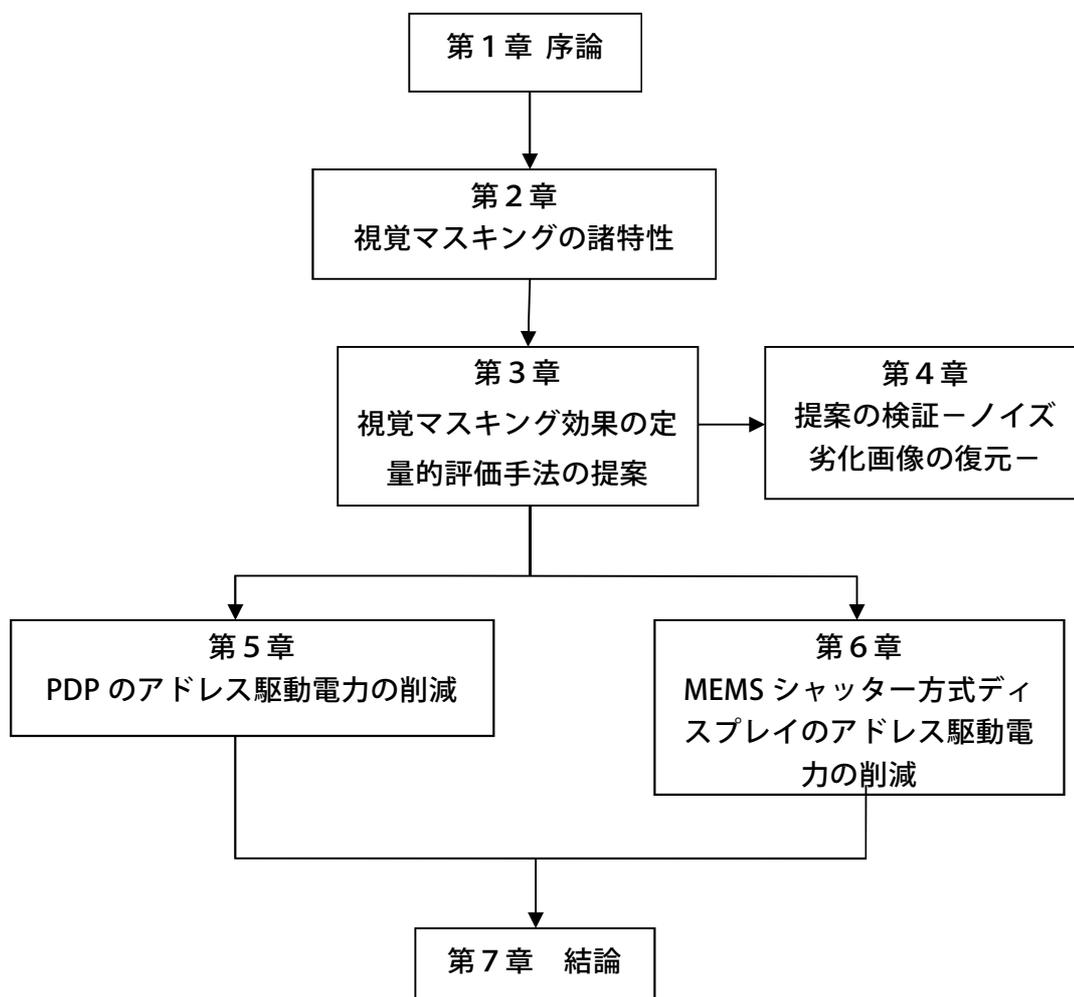


図 1.5 本論文の構成

1.4 第1章の参考文献

- [1] 総務省, "4K・8K ロードマップに関するフォローアップ会合 第二次中間報告", http://www.soumu.go.jp/main_content/000370906.pdf, Jul. 2015.
- [2] 江本正喜:「高フレームレート映像システムの動画質改善効果」, 映情学誌, vol.65, no.10, pp.1355-1358, 2011.
- [3] 吉田育弘, 藤根俊之, 山本健一郎, 古川浩之, 上野雅史, 菊地雄二, 小橋川誠司, 山田晃之, 竹田信弘, 杉野道幸:「大型 LCD-TV 用倍速フレームレート変換技術とその画質改善効果の検証」, 映情学誌, vol.62, no.5, pp.778-787, 2008.
- [4] 井上博史:「プラズマディスプレイパネル」, FUJITU, vol.50, no.4, pp.271-276, Jul. 1999.
- [5] 大竹桂一, 川原功, 村井隆一:「103 型フル HD プラズマディスプレイの開発」, 2006 年映情学年次大, 3-1, 2006.
- [6] NHK R&D Open House 2010, "58 インチ画素ピッチ 0.33mm 超高精細プラズマディスプレイ", <https://www.nhk.or.jp/str1/open2010/tenji/23.html>.
- [7] K. Ishii, T. Usui, Y. Murakami, Y. Motoyama, M. Seki, Y. Noguchi, T. Furutani, T. Nakakita and T. Yamashita, "Developments of a 145-inch diagonal super Hi-Vision plasma display panel", Society for Information Display International Symposium 2012 Digest of Technical Papers, pp.71-74, Jun. 2012.
- [8] California Energy Commission, "Appliance Efficiency Regulations", <http://www.energy.ca.gov/appliances>.
- [9] 国際エネルギースタープログラム, <http://www.energystar.jp/index.html>.
- [10] J. Bergquist and C. Wennstam, "Field sequential-color display with adaptive gamut", Society for Information Display International Symposium 2006 Digest of Technical Papers, pp.1594-1597, Jun. 2006.
- [11] T. Hamada, S. Miyaji and S. Matsumoto, "Picture quality assessment

- system by three-layered bottom-up noise weighting considering human visual perception", SMPTE Journal, vol.108, no.1, pp. 20-26, Jan. 1999.
- [12] S. Winkler and S. Susstrunk, "Visibility of noise in natural images", Proceedings of SPIE, Human Vision and Electronic Imaging, vol.5292, pp. 121-129, Jun. 2004.
- [13] 浜田高宏, 松本修一:「画像の局所的変化度による雑音マスキング効果を考慮した直交変換係数の最適量子化法」, 信学論, vol.J75-B- I , no.12, pp.791-801, Dec. 1992.
- [14] 浜田浩行, 斎藤恭一, 難波誠一:「標準 TV 動画像品質の客観的評価尺度の検討」, テレビジョン学技報, vol.18, no.6, pp.39-45, 1994.

第2章 背景技術 — 視覚マスキング —

2.1 はじめに

画像処理システムを構築するにあたって人間の視覚特性を考慮することは重要である。これまでも視覚特性はさまざまな場面で利用されてきた[1]-[4]。例えば、明るさの変化に対して色彩の変化が感知しにくいという視覚特性を利用した画像信号の帯域圧縮や、人の視覚系に方向選択性が存在し斜め方向の感度が低い[5],[6]ことを利用した、周波数的に水平、垂直方向がより有利となるような画素配列の選択などが挙げられる。視覚マスキングについても、デジタル画像の著作権保護を目的に、画素値の変化の大きい高周波成分に情報を埋め込むことで、埋め込みによる画像の劣化を視覚的に緩和させる電子透かしなどが提案されている[7]-[10]。

本章では、本研究の中心課題となる視覚マスキングについて、これまでの研究で得られている知見と、これを応用する上で必要となる視覚マスキングに影響を与える因子の特定について考察する。

2.2 視覚マスキングの概要

視覚マスキングは、2つの視覚刺激が空間的に近接して提示されるときに2つの刺激間の知覚的妨害が生じる現象で、弱い視覚刺激（テスト刺激）に対する知覚を隣接する強い刺激（マスク刺激）が妨害する現象である。視覚マスキングに関する視覚情報処理過程はこれまでに明確にされていないが、大脳における処理過程の比較的初期の段階で生じている可能性が報告されている[11]。

これまでの研究で、2つの視覚刺激の空間周波数特性が近接しているときに視覚マスキング効果が強く生じること、視覚マスキング効果を得るには一定以上のコントラストが必要なことが示されている[12],[13]。図 2.1 は、正弦波縞を用いた視覚マスキングの例を示したものである。図 2.1 の中央の正弦波縞（テ

スト刺激)は、(a) (b) とも同じコントラスト，空間周波数特性を有する。図 2.1(b)は周囲にテスト刺激と同じ空間周波数特性を有し，より大きなコントラストをもつ正弦波縞（マスク刺激）を付加している。本来は同一のコントラストであるテスト刺激が，図 2.1(a)に比べて図 2.1(b)のコントラストが，視覚マスクングにより減少しているように見える視覚的な効果を生じる[14],[15]。

本研究では平滑化誤差と背景画像間の視覚マスクングを対象とするので，平滑化誤差がテスト刺激となり背景画像がマスク刺激となる。

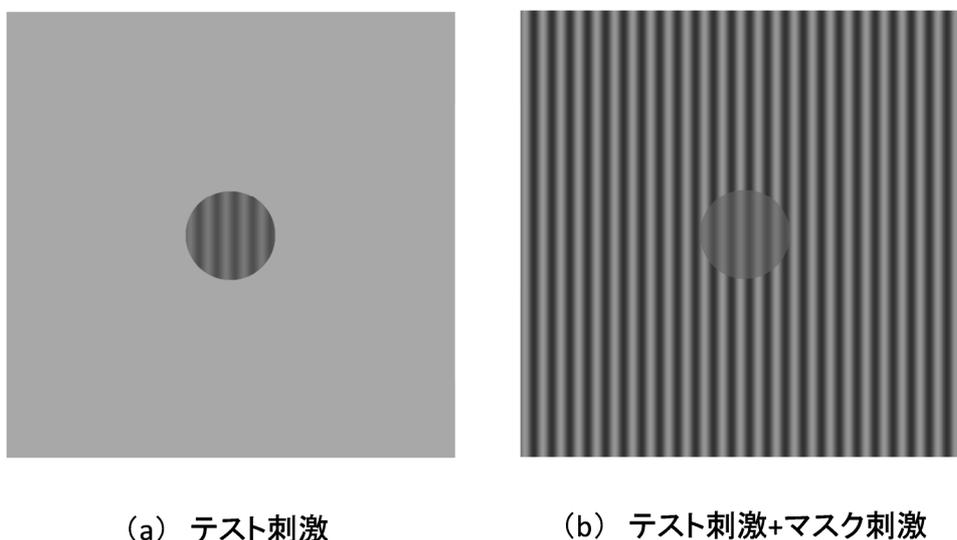


図 2.1 正弦波縞を用いた視覚マスクング効果

2.3 関連研究

2.3.1 視覚のコントラスト感度特性

人間の視覚特性には、空間周波数によって知覚できる輝度の変化量が異なるというコントラスト感度特性がある[16],[17]。これは、正弦波縞のコントラストを変化させて、縞が知覚される限界のコントラスト閾値を空間周波数ごとに測定し逆数をとったものである。コントラスト感度特性は、一般に図 2.2 のようなかたちを取る。図 2.2 の横軸は空間周波数、縦軸はコントラスト感度である。平均輝度が明所視レベルの場合、2~6 cycles/deg でコントラスト感度は最大となり、空間周波数がそれよりも低くなっても、高くなっても感度は低下する。視力 1.0 の人は、空間周波数で 30 cycles/deg まで細部を識別できる。空間周波数が高い細かい模様などは人間の目の特性として元々視認されにくいという性質があり、視覚マスキングに影響を与えている。

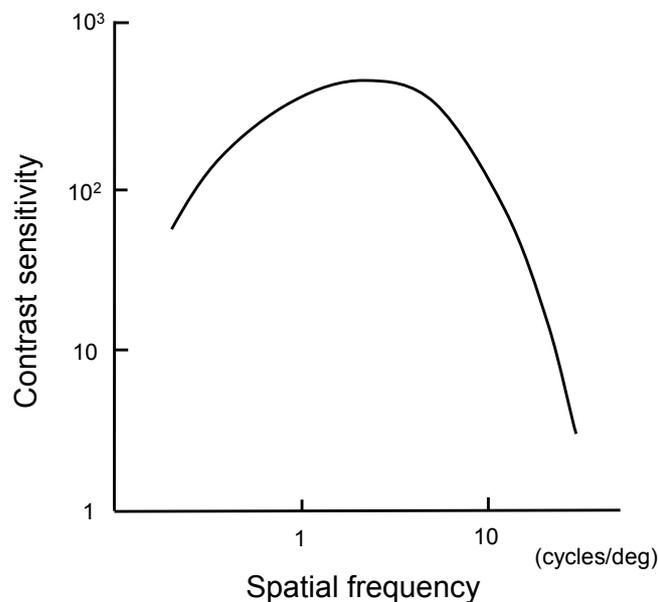


図2.2 コントラスト感度特性

2.3.2 多重チャンネルモデル

図 2.3 に示すように，人間の視覚系は，狭い範囲の空間周波成分のみを通す帯域通過型フィルタに相当するものが複数並列して存在し，入力刺激に対して並列的な処理を行い，各フィルタの出力によって最終的な知覚量が決定されるというモデルが多くの研究者によって提案されている[18]-[20]。これを多重チャンネルモデルという。視覚系のコントラスト感度特性はこれらの包絡線で与えられる。多重チャンネルモデルにおける視覚マスキングは，テスト刺激により特定の空間周波数チャンネルがすでに興奮しているところに，同じ空間周波数チャンネルの応答を必要とするような，テスト刺激よりコントラストが大きなマスク刺激が提示されたためにマスキングが生じると考えられている。

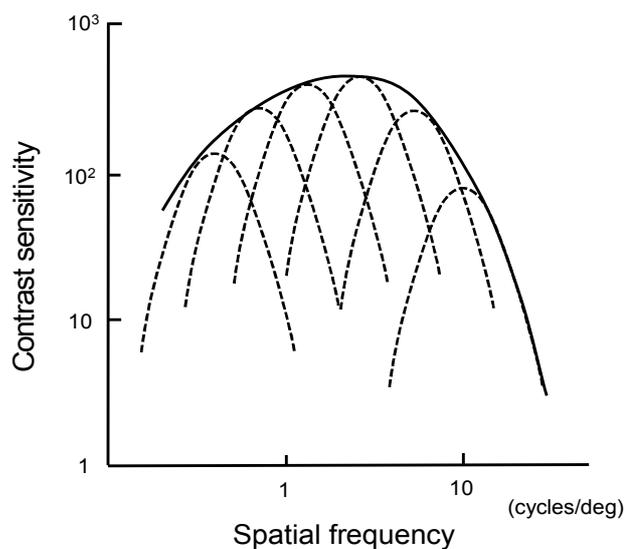


図 2.3 視覚特性の多重チャンネルモデル

2.4 視覚マスキングに影響を与える因子

2.4.1 パワースペクトル

画像のパワースペクトルは視覚マスキングと大きくかかわる特徴量である。視覚マスキングは、テスト刺激とマスク刺激のパワースペクトルの大小関係で決まり[21],[22]、その効果はテスト刺激のパワーを一定とすれば、マスク刺激のパワースペクトル強度に比例するとされている。これは前節で説明した多重チャンネルモデルで説明できる。図 2.4(a)はテスト刺激とマスク刺激のパワースペクトルを模式的に示した図である。図 2.4(a)の着色した空間周波数範囲でマスク刺激のパワースペクトル強度が勝っている例を示したものである。この場合、テスト刺激のみ提示された時のコントラスト感度特性(図 2.4(b))が、マスク刺激が加わることにより、図 2.4(c)に示すように着色した空間周波数範囲のチャンネルがマスク刺激のために抑制され、くぼんだ特性となり、結果的に視覚マスキングが生じると説明できる。

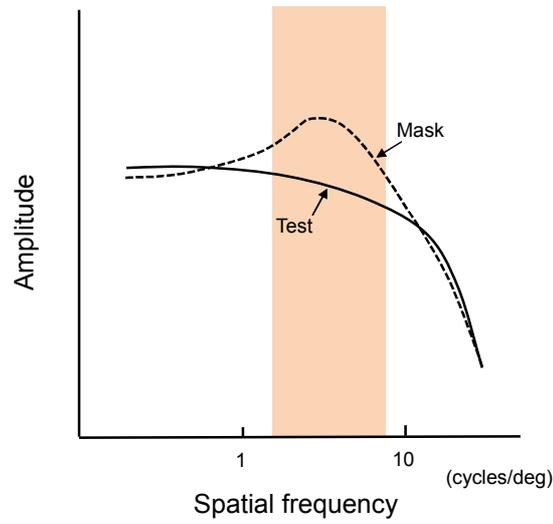
次章で詳細を説明するが、特定の空間周波数のみを対象とする条件下では、パワースペクトルの代わりに平均輝度とコントラストを影響因子とすることができるので、実際の計算ではこれを用いた。

2.4.2 平均輝度(平均画素値)

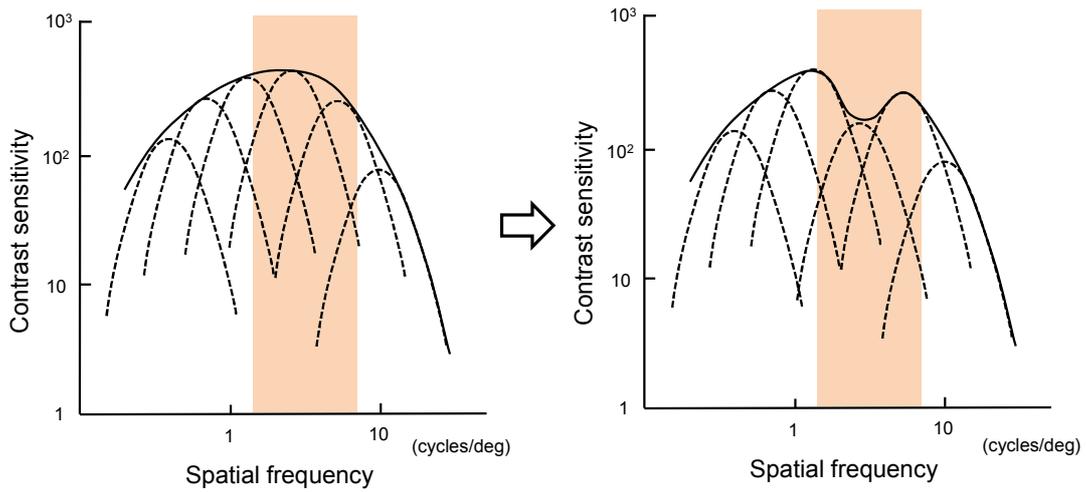
画像の平均輝度が高くなると明るさの変化に対する弁別感度が減少して平滑化誤差が視認されにくくなる(ウェーバーの法則)。このように平均輝度は平滑化誤差の視認性に影響を与え、結果的に視覚マスキング効果に影響を与える。

2.4.3 空間周波数の方向と色相

視覚マスキングはテスト刺激とマスク刺激の空間周波数の方向や色相が一致すると大きくなる性質がある[23]-[27]。本論文で対象とする平滑化誤差は、白色ガウスノイズやインパルスノイズなどと同様に、方向については無相関な平滑化誤差が主であるため、空間周波数の空間的な方向の一致度は検討対象にし



(a) テスト刺激とマスク刺激のパワースペクトル



(b) コントラスト感度特性 (Test)

(c) コントラスト感度特性 (Test+Mask)

図 2.4 多重チャンネルモデルによる視覚マスクングの説明

ない。また、人間の視覚は輝度変化に敏感であるが色変化には鈍感であるという心理学的な特徴をもっている。この性質は、本研究が対象とする高い空間周波数ではより顕著となるため[28]、本論文では輝度のみを検討対象とする。

2.5 この章のまとめ

本研究の目的である電子ディスプレイのアドレス駆動回路の電力削減手法を開発にするにあたり重要な研究テーマである視覚マスキングについて、その諸特性と先行研究による知見について概論した。本研究で対象とする視覚マスキングは、電力削減のための画像処理過程で生じる平滑化誤差と背景画像間に生じるマスキングである。視覚マスキングを電子ディスプレイの電力削減に応用するためには、視覚マスキングに対する定量的な評価を確立することが必須となる。本章では、そのための基礎となる視覚マスキングに影響するパラメータについて考察した。対象とする空間周波数における平滑化誤差と背景画像のパワースペクトルの比率と背景画像の平均輝度が視覚マスキングに影響する因子となる。パワースペクトルについては、空間周波数が定まっている場合には、背景画像の平均輝度とコントラストで代用できることを次章で述べる。

2.6 第2章の参考文献

- [1] 石黒陽平：「バンドパスノイズによる空間マスキングにシミの形態的特徴が与える影響」, *Vision*, vol.25, no.1, p.60, 2013.
- [2] 坂東幸浩, 高村誠之, 上倉一人, 八島由幸：「主観画質を考慮した H.265/AVC におけるモード選択方法の検討」, *情処学研報*, vol.AVM-54, no.7, pp.35-39, 2006.
- [3] 水野守倫, 樋口和則, 杉山和彦, 中野倫明, 山本 新：「視覚特性に基づくディスプレイ表示法の開発」, *豊田中央研究所 R&D レビュー*, vol.33, no.3, 1998.
- [4] S. Ochi, S. Yamanaka, Y. Kanoh and T. Nishimura, "A device structure and spatial spectrum for checker-pattern CCD color camera", *Special Joint Issue of IEEE Trans. Electron Devices*, vol.ED-25, No.2, pp.261-266, Feb. 1978.
- [5] 石原徹弥, 大石慶太郎, 津村徳道, 三宅洋一：「視覚系空間周波数応答の方向依存性(1)-MTF の測定-」, *日本写真学会誌*, vol.65, no.2, pp.121-127, 2002.
- [6] 石原徹弥, 大石慶太郎, 津村徳道, 三宅洋一：「視覚系空間周波数応答の方向依存性(2)-MTF の数式モデル化-」, *日本写真学会誌*, vol.65, no.2, pp.128-133, 2002.
- [7] M. Barni, F. Bartolini and I. A. Pica, "Improved wavelet-based watermarking through pixel-wise masking", *IEEE Trans. Image Process.*, vol.10, no.5, pp.783-791, May 2001.
- [8] 大江孝輔, 棟安実治：「雑音マスキング効果を利用した電子透かし手法」, *信学論*, vol.J88-A, no.10, pp.1137-1145, Oct. 2005.
- [9] 伊藤慎也, 坪川 宏：「マスキング効果を利用した JPEG 圧縮に耐性がある電子透かし」, *信学論*, vol.J85-D-II, no.11, pp.1664-1671, Nov. 2002.
- [10] 高橋 学, 栄藤 稔, 野口栄治：「ひずみに対するマスキング効果を利用し

- た電子透かし画像の高品位化」, 信学技法, vol.99, no.680, pp.23-29, 2000.
- [11] 前田青広, 福永雅喜, 中越明日香, 山本洋紀, 松野 響, 田中忠蔵, 恵飛須俊彦, 梅田雅宏, 江島義道:「メタコントラスト事態におけるヒト視覚野の活動—fMRI—」, 信学技法, vol.103, no.81, pp.35-40, 2003.
- [12] C. F. Stromeyer and B. Julesz, "Spatial-frequency masking in vision: Critical bands and spread of masking", *Journal of the Optical Society of America*, vol.62, no.10, pp.1221-1232, 1972.
- [13] S. Daly, "The visible differences predictor: an algorithm for the assessment of image fidelity", *Digital Image and Human Vision*, pp.179-206, MIT Press, 1993.
- [14] J. Xing, "An image processing model of contrast perception and discrimination of the human visual system", *Society for Information Display International Symposium 2002 Digest of Technical Papers*, pp.248-251, May 2002.
- [15] J. Xing and D. J. Heeger, "Measurement and modeling of center-surround suppression and enhancement", *Vision Research*, vol.41, no.5, pp.571-583, 2001.
- [16] R. L. De Valois, H. Morgan, D. M. Snodderly, "Psychophysical studies of monkey vision-III. Spatial luminance contrast sensitivity tests of macaque and human observers", *Vision Research*, vol.14, no.1, pp.75-81, 1974.
- [17] J. G. Robson, "Spatial and temporal contrast sensitivity functions of the visual system", *Journal of the Optical Society of America*, vol.56, no.8, pp.1141-1142, 1966.
- [18] F. W. Campbell and J. G. Robson, "Application of Fourier analysis to the visibility of gratings", *Journal of Physiology*, vol.197, no.3, pp.551-566, 1968.
- [19] C. Blakemore and F. W. Campbell, "On the existence of neurons in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of

- retinal images", *Journal of Physiology*, vol.203, no.1, pp.237-260, 1969.
- [20] H. R. Wilson, D. K. McFarlane, and G. C. Phillips, "Spatial frequency tuning of orientation selective units estimated by oblique masking", *Vision Research*, vol.23, no.9, pp.873-882, 1983.
- [21] A. Fujibayashi and C. S. Boon, "A masking model for motion sharpening phenomenon in video sequences", *IEICE Trans. Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol.E91. A, no.6, pp.1408-1415, Jun. 2008.
- [22] 藤林 暁：「高品質な映像サービス実現に向けた視覚特性モデル」, *NTT DoCoMo テクニカルジャーナル*, vol.16, no.1, pp.48-55, 2008.
- [23] J. W. Woods and S. D. O'Neil, "Subband coding of images", *IEEE Trans. Acoust., Speech & Signal Process.*, vol.34, no.5, pp.1278-1288, Oct. 1986.
- [24] B. A. Wandell, "Foundation of vision", *Sinauer Associates, Inc.*, 1995.
- [25] G. E. Legge and J. M. Foley, "Contrast masking in human vision", *Journal of the Optical Society of America*, vol.70, no.12, pp.1458-1471, Dec. 1980.
- [26] F. W. Campbell and J. J. Kulilowski, "Orientational selectivity of the human visual system", *Journal of Physiology*, vol.187, no.2, pp.437-445, 1966.
- [27] 山城博幸, 前田青広, 高田まり, 山本洋紀, 江島義道：「等輝度色刺激を用いた視覚マスキング効果の解析」, *信学技法*, vol.105, no.100, pp.1-6, 2005.
- [28] 坂田晴夫, 磯野春雄：「視覚における色度の空間周波数特性」, *テレビ誌*, vol.31, no.1, pp.29-35, 1977.

第3章 視覚マスキング効果の定量的評価手法

3.1 はじめに

第2章で特定した視覚マスキングに影響を与える因子がどのような値であれば、視覚マスキング効果が十分に生じて平滑化誤差が視認されなくなるかのデータを予めデータベースとして保有しておけば、任意の画像に対しても画像のそれぞれの因子を計算することで、平滑化誤差に対する視覚マスキング効果を定量的に評価することが可能となる。ここで考察する平滑化誤差の視認性とは、画像を表示するディスプレイの画素構造が検知できない距離から見た場合の視認性とする。この考えに則って、視覚マスキング効果の定量的評価手法を考案し提案した。図3.1は提案手法の基本的処理手順を図示したものである。まず、影響因子が既知の画像に、大きさなどの特性が既知の平滑化誤差を付加して平滑化誤差の視認性を判定することにより、視覚マスキングのシミュレーションを行う。本シミュレーションでは、平滑化誤差の空間周波数特性がランダムノイズと近似していることから、インパルスノイズと白色ガウスノイズを平滑化誤差として扱う。影響因子のパラメータを変えて同様な手順を繰り返すことで、平滑化誤差が視認されなくなる影響因子の条件を求める。この条件を用いて、自然画像から視覚マスキング効果により、シミュレーションで用いた大きさの平滑化誤差が視認されなくなる領域を抽出する。

本章では、提案手法の中核となる視覚マスキングシミュレーションと、局所領域の空間周波数特性やコントラストを検出するために導入した類似輝度セグメントを用いた、視覚マスキング効果により平滑化誤差が視認されなくなる領域の抽出を中心に提案手法について述べる。

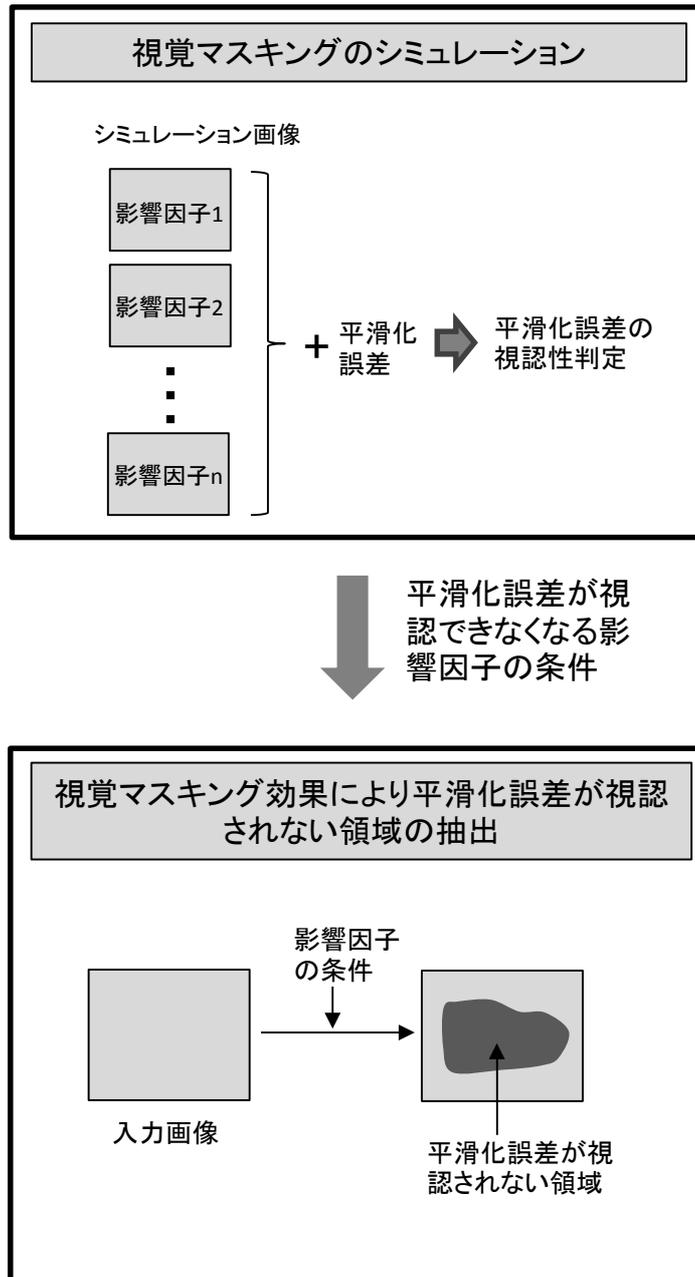


図 3.1 視覚マスクング効果の定量的評価手法の処理手順

3.2 先行研究

視覚マスクング効果の定量的評価手法に関する先行研究では、人間の視覚モデルを構築し、その中に視覚マスクング特性を取入れるボトムアップ的な手法と、画像の特徴量を検出して視覚マスクング効果の指標とするトップダウン的な手法が試みられている[1],[2]。前者の手法では、人間の視覚野を図 3.2 で示すようにモデル化し、モデル中の機能のひとつとして視覚マスクング効果を取り入れている。空間周波数とその方向が一致する時に視覚マスクング効果が発生するという前提に立ち、帯域分割した出力ごとに視覚マスクング関数を組み合わせている。視覚マスクング関数は、マスク刺激がある場合のテスト刺激を検出する閾値と、一様な背景でのテスト刺激の検出閾値の比で定義し、コントラストの関数として表している。コントラストが低い場合は視覚マスクングが起これないが、コントラストが一定値以上になるとコントラストと線形の関係になるとしている[3]。後者の手法は、画像の複雑度を検出することで視覚マスクング効果を定量的に評価している。画像をブロックに分割し、ブロックごとに離散コサイン変換、またはアダマール変換などの周波数変換を施し、交流成分の電力を算出し、これを視覚マスクング効果の指標としている[4],[5]。両手法とも周波数変換を伴っているため、変換精度が評価結果に影響すると考えられる。本研究では、フーリエ変換などの周波数変換処理を伴わない手法により視覚マスクング効果の定量化を行っている。

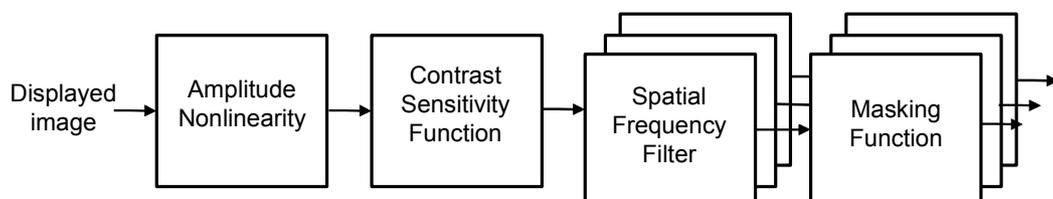


図 3.2 視覚モデルのブロック図

3.3 視覚マスキングのシミュレーション

3.3.1 シミュレーションに用いる影響因子

第2章で考察した視覚マスキングに影響を与える画像の因子について、視覚マスキング効果の定量的評価手法を構築するにあたって再度考察する。第2章では影響因子をパワースペクトルの比率と平均輝度としたが、実際の計算では以下の3つの画像特徴量を視覚マスキングに影響を与える因子とする。

- ・空間周波数特性
- ・コントラスト
- ・平均輝度（平均画素値）

先行研究から、テスト刺激とマスク刺激の空間周波数特性が一致するとき最大の視覚マスキング効果が得られることがわかっている。そのため、本研究では平滑化誤差の空間周波数特性とほぼ同じ空間周波数特性をもつ画像のみを視覚マスキング効果を評価する対象とする。空間周波数特性が平滑化誤差とほぼ同じという条件下では、平均輝度とコントラストがわかればパワースペクトルの比率を計算しなくとも視覚マスキングを評価することが可能となる。図3.3は平均画素値が同一で、コントラストの大きさを変えた画像の水平方向のパワースペクトルである。コントラストの大きさとワースペクトルの値の大小関係は1：1の関係となることがわかる。

視覚マスキングに対する影響因子（空間周波数特性、コントラスト）は以下の特徴を有する。

1) 空間周波数特性に関する特徴

平滑化誤差の空間周波数特性と近い空間周波数特性をもつ画像で視覚マスキング効果が強くなる。本論文で対象とする平滑化誤差の空間周波数特性は高周波成分を含む白色ガウスノイズとインパルスノイズと近似しているので、原画

像の空間周波数が高いほど平滑化誤差が視認されにくくなる。

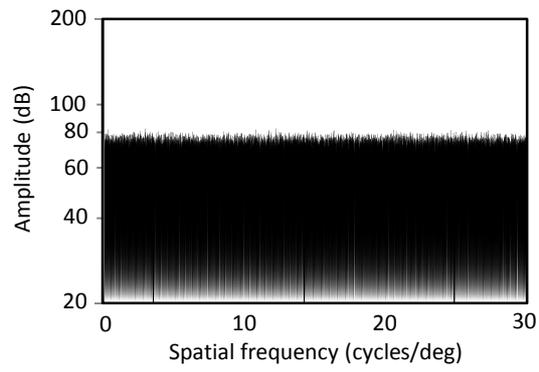
2) コントラストに関する特徴

コントラストが大きい領域では視覚マスクング効果が増大し、平滑化誤差の視認性が下がる。本論文で用いるコントラストは次式で定義されるマイケルソンコントラスト (m) とする。

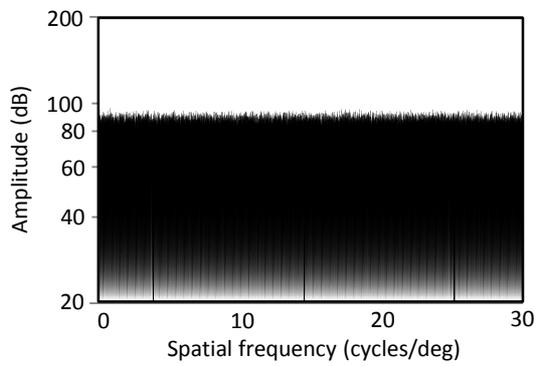
$$m = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad (3.1)$$

ここで、 L_{max} , L_{min} はそれぞれ対象領域の最大輝度, 最小輝度である。

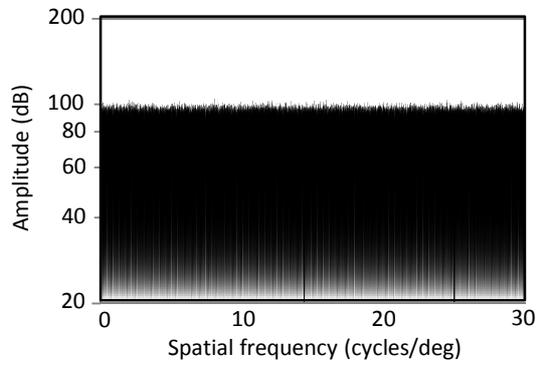
3つの影響因子と視覚マスクングの関係をまとめると図 3.4 のようになる。



(a) コントラスト: 0.1



(b) コントラスト: 0.5



(c) コントラスト: 1.0

図 3.3 コントラストとパワースペクトルの関係

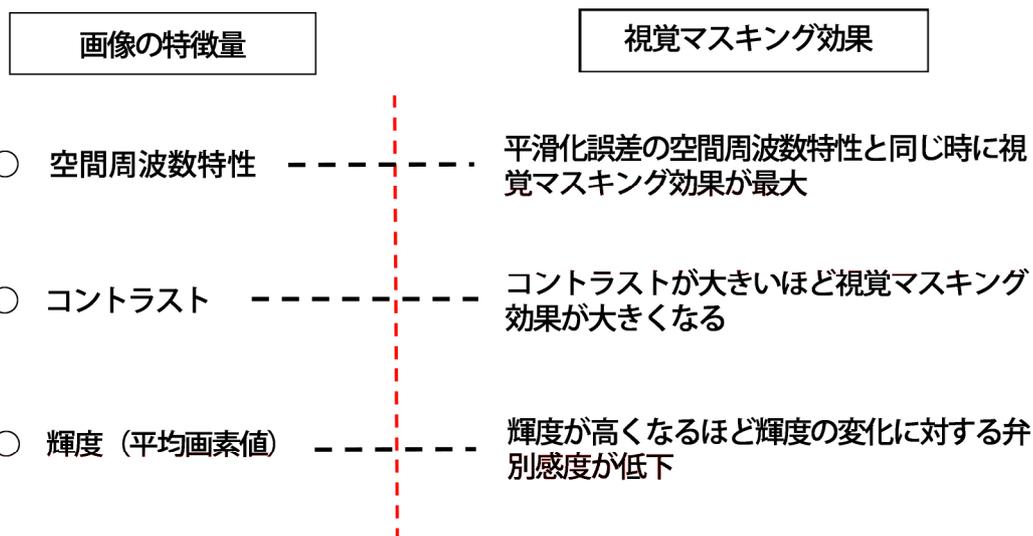


図 3.4 画像特徴量と視覚マスクングの関係

3.3.2 視覚マスクング評価画像

図 3.1 の処理フローのように多くのシミュレーション画像を使うことなく、1枚の画像で影響因子と平滑化誤差の視認性の関係がわかるような画像を作成し、名称を視覚マスクング評価画像とした。図 3.5(a)に視覚マスクング評価画像を示す。前節で説明したように空間周波数特性は固定となり、白色ガウスノイズあるいはインパルスノイズの空間周波数特性と近似した特性となるように、空間的大きさが1画素の信号（画素値： $\pm d$ ）を各ブロックの平均画素値にランダムに加算して作成した。 d の値は平均画素値とコントラストにより定まる値である。視覚マスクング評価画像は垂直方向の100画素ごとに平均画素値を変え、水平方向の100画素ごとにコントラストを変えたブロックから構成されている。平均画素値の代表値を10, 20, 30...250, コントラストの代表値を0.1, 0.2...1.0としている。ただし、平均画素値とコントラストの組み合わせによっては画素値が255を超えるブロックが生じるので、平均画素値は図 3.5(a)で示すように230までとなる。図 3.5(b)および図 3.5(c)は視覚マスクング評価画像の平均画素値が20と100の場合の20行分のデータをプロットした図である。図の左

から右に向かってコントラストが大きくなり、画素値の振幅が大きくなるデータになっている。

この画像に平滑化誤差と同等の周波数特性を有するインパルスノイズや白色ガウスノイズなどのランダムノイズを加えて、ノイズが視認されなくなる平均画素値とコントラストを求めておけば、どのような画像が入力されても、画像の局所的な空間周波数特性と平均画素値およびコントラストを測定すれば、その画像のどの領域が平滑化誤差を隠すことができるかがわかり、視覚マスキング効果を定量的に評価することが可能となる。コントラストと平均画素値は実際の計算では最も近い代表値を使用する。

図 3.6 に白色ガウスノイズと視覚マスキング評価画像の水平方向のパワースペクトルを示す。視力 1.0 の人が視認できる最大周波数である 30cycles/deg まで一様な特性になっており、両者共ほぼ同じ特性を示している。

3.3.3 自然画像における平均画素値の演算

対象とする局所領域の平均画素値を算出する。平滑化誤差が視認されない領域を高精度に抽出するためには、局所領域の大きさをできるだけ小さくする必要がある。しかし、領域が小さすぎると平均画素値に誤差が生じる可能性がある。図 3.7(a)は左右の平均画素値がそれぞれ 15 と 130 である画像の水平 1 行分の画像データをプロットした図である。3×3 画素の移動平均フィルタで平均を求めた場合、図 3.7(b)に示すように急峻な変化に追従しているが平均画素値に誤差が生じている。領域を 21×21 画素に広げると平均画素値は真値に近づくが中央の傾きが鈍化している（図 3.7(c)）。本研究では、分散が 2 のガウシアンフィルタ（カーネルサイズ：13×13）を用いている。図 3.7(d)に示すように急峻な変化に追従しつつ、平均画素値の誤差が小さくなっている。

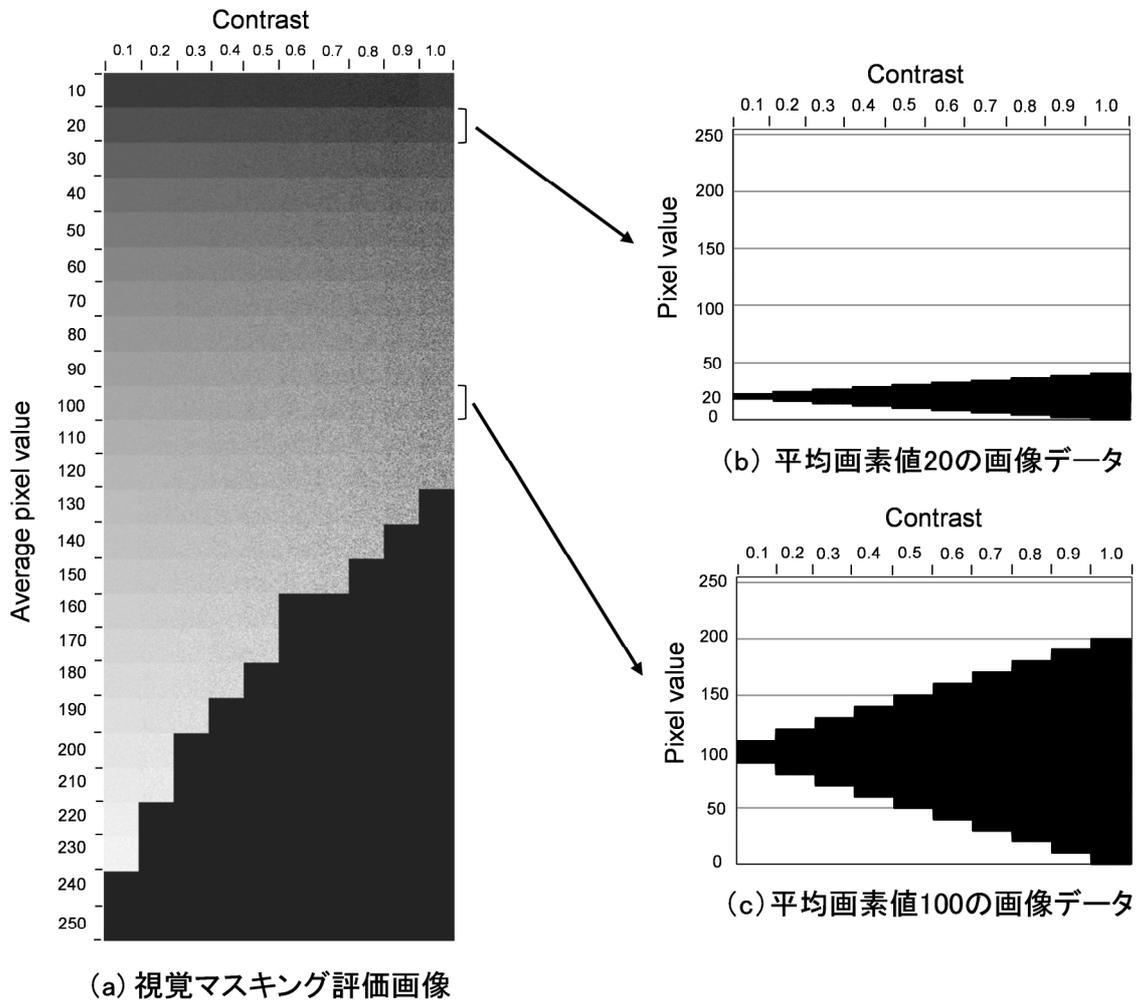
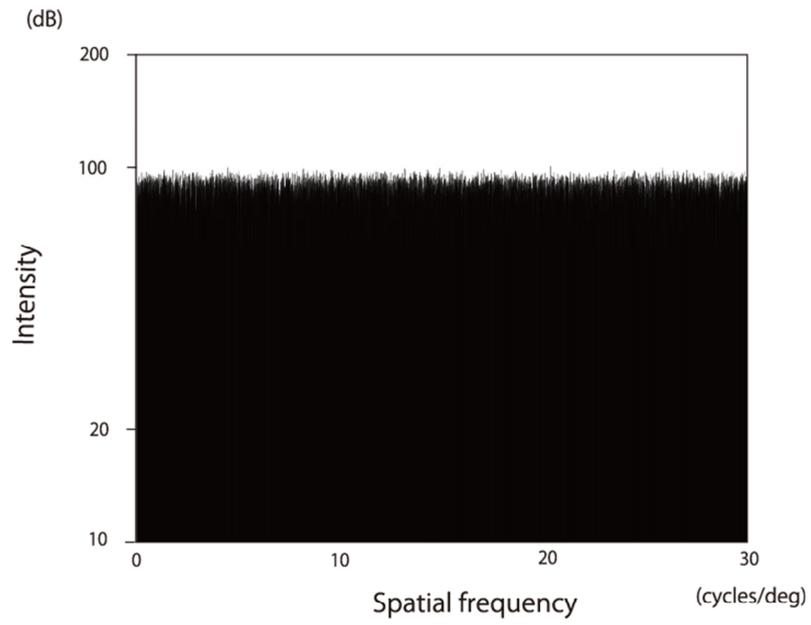
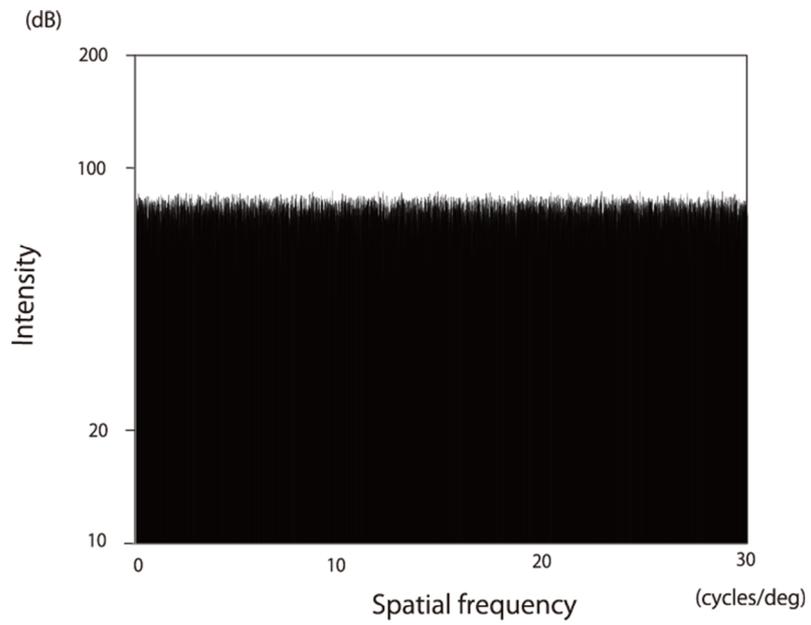


図 3.5 視覚マスクング評価画像と画像データ例

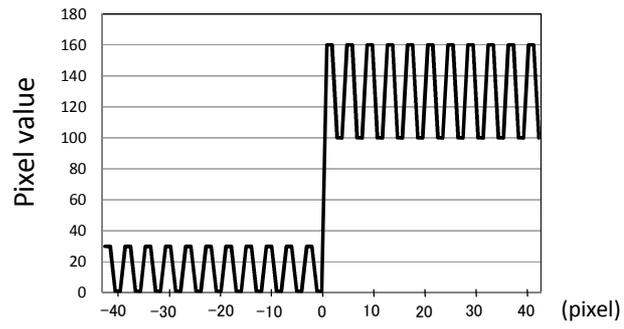


(a) 視覚マスクング評価画像のパワースペクトル

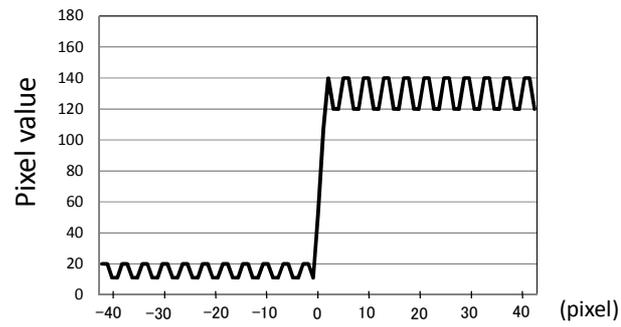


(b) 白色ガウスノイズのパワースペクトル

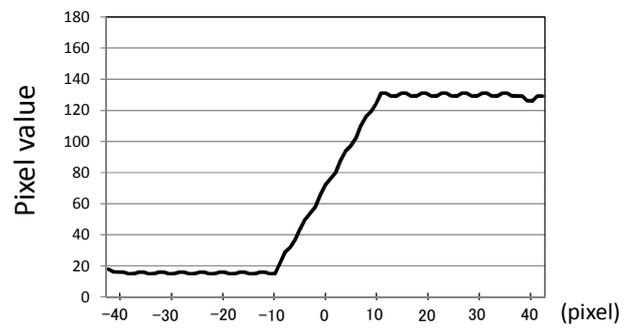
図 3.6 視覚マスクング評価画像とノイズのパワースペクトル



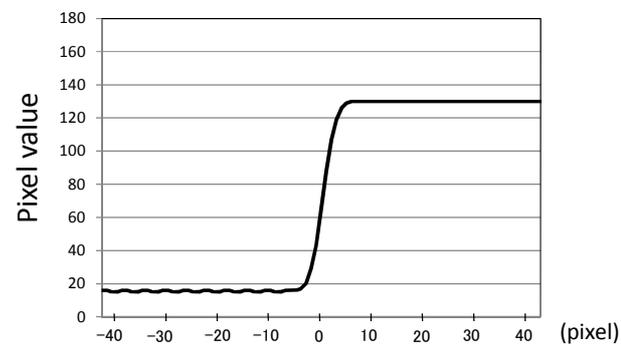
(a) 原データ



(b) 移動平均フィルタ(3x3)



(c) 移動平均フィルタ(21x21)



(d) ガウシアンフィルタ(分散:2)

図 3.7 局所平均画素値の計算

3.3.4 平滑化誤差の視認性判定

視覚マスキング評価画像に付加した平滑化誤差が視認されるかどうかを判定するために、目視実験による主観評価と画像の劣化の程度を知るために用いられる客観的画質評価指標 SSIM (Structure Similarity) [6],[7] を用いた(付録 C)。視覚マスキング評価画像に平滑化誤差を付加し、目視により平滑化誤差が視認されないブロックを抽出する。抽出されたブロックの SSIM を計算し、SSIM の値がいくつ以上であれば平滑化誤差が視認されないかを求める。実際の目視による主観評価実験では、視覚マスキング評価画像を直接使わず、視覚マスキング評価画像の各ブロックと同等な特徴を有する原画を作成し、これに平滑化誤差を付加して実験に使用した。視覚マスキング評価画像の各ブロックを作成した手法で、平均画素値とコントラストを変えた 500×500 画素の原画像を作成する。原画像と原画像に平滑化誤差を付加した画像を交互に評定者に提示し、平滑化誤差が視認されるかどうかを評定者に判定させる。原画像と平滑化誤差を付加した画像間の SSIM を予め計算しておく。表 3.1 に主観評価実験の諸元を示す。実験では平滑化誤差として標準偏差 2.25 の白色ガウスノイズを使用し、評定者は HDTV モニターの画面高の 3 倍の距離から見て判定する。図 3.8 は平均画素値ごとにコントラストを変化させ、平滑化誤差が視認されなくなる境界の SSIM を求め、その値のヒストグラムをプロットした図である。ヒストグラムは SSIM が 0.96 の時に最大となり、0.96 以上であればほぼ平滑化誤差が視認されなくなることがわかった。この結果から、SSIM の値が 0.96 以上のブロックを平滑化誤差が視認されない領域とした。

平滑化誤差として使用した標準偏差が 4.5, 1.125 の白色ガウスノイズおよび、大きさが ± 16 , ± 8 , ± 4 , ± 2 のインパルスノイズについても目視による主観評価実験を行い同様な結果が得られた。評定者は 1 名とし、24 インチ液晶モニター ($1,920 \times 1,200$ 画素) に原画像と原画像に平滑化誤差を付加した画像を交互に切り替えて表示し、視力 1.0 の人が 1 画素を識別できなくなる、1 画素が視角 1 分になる距離 (87 cm) から評価した。目視実験により平滑化誤差が視認されないと判断された領域の SSIM の値は、各平滑化誤差ともほぼ 0.96 以

上であった。図 3.9 は標準偏差が 2.25 の白色ガウスノイズを平滑化誤差として視覚マスキング評価画像に付加した時の平滑化誤差の視認性を示した図で、視覚マスキング評価画像の各ブロックの SSIM を計算した結果(図 3.9(a))と、SSIM が 0.96 以上となり平滑化誤差が視認されないと判定された領域を赤枠で囲んだ図(図 3.9(b))である。図 3.10 は、付加する平滑化誤差の標準偏差が 4.5, 2.25, 1.125, 0.5625 の白色ガウスノイズの場合の SSIM の値が 0.96 以上のブロックを着色して表示した図である。平滑化誤差の標準偏差が小さくなると平滑化誤差が視認されないブロックの数が増え、その領域は広くなり、平滑化誤差が大きい場合の領域を包含する形になる。

表 3.1 主観評価実験の諸元

評定者	非専門家 7名
モニター	23インチHDTV (液晶モニターにドットバイドットで表示)
平滑化誤差	白色ガウスノイズ (標準偏差：2.25)
視距離	3H (H：画面高)

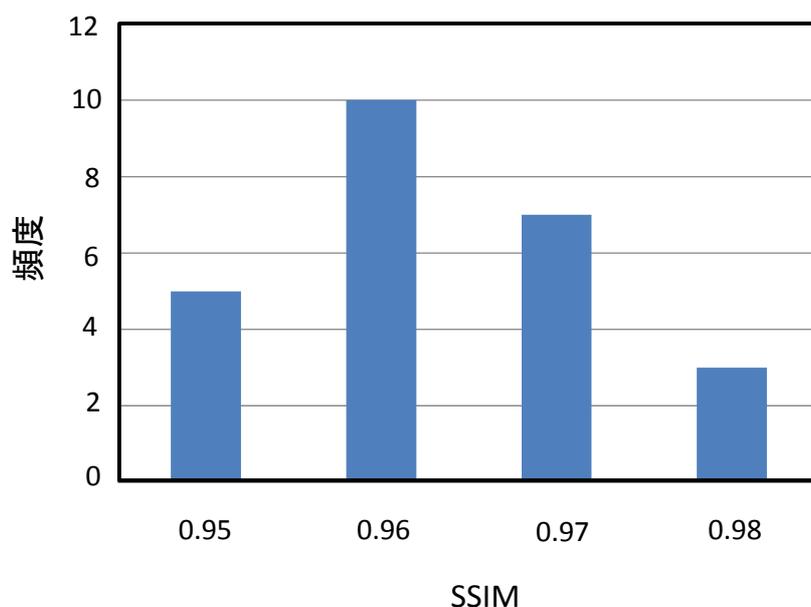
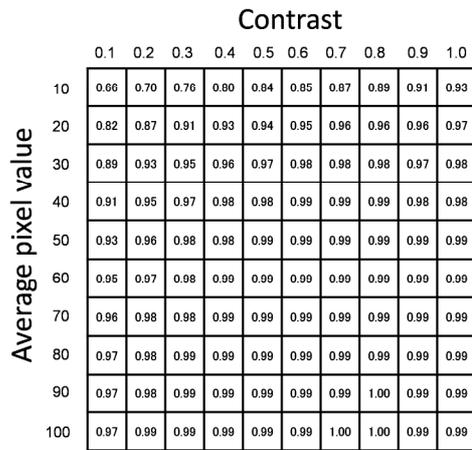
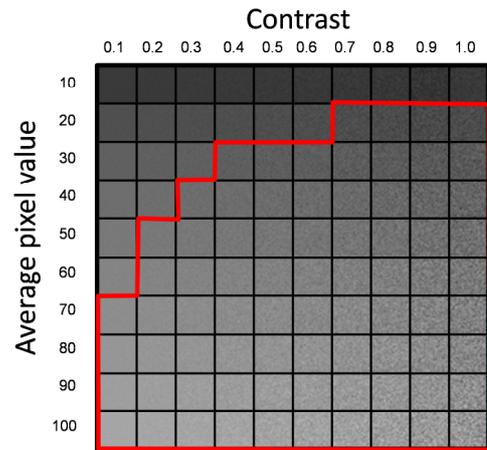


図 3.8 主観評価により平滑化誤差が視認されなくなると判定された SSIM 値

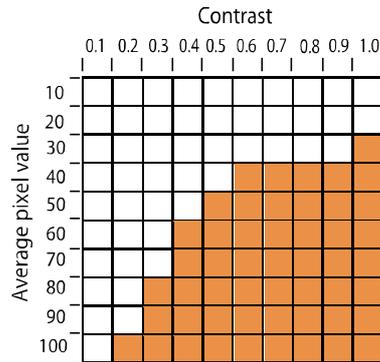


(a) SSIM値

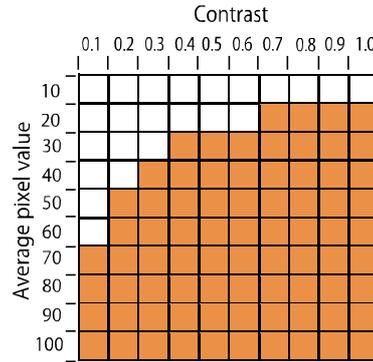


(b) 平滑化誤差が視認されない領域
 $\sigma=2.25$

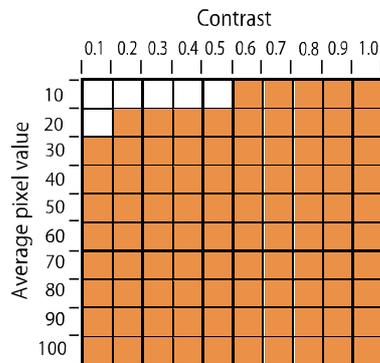
図3.9 平滑化誤差を付加した視覚マスクング評価画像の SSIM 値と平滑化誤差が視認されない領域



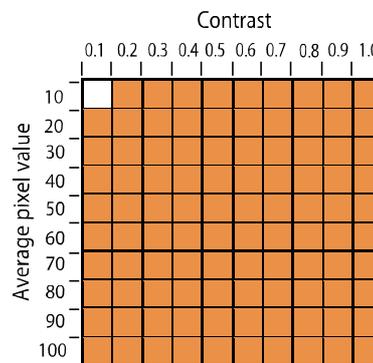
(a) 平滑化誤差の標準偏差：4.5



(b) 平滑化誤差の標準偏差：2.25



(c) 平滑化誤差の標準偏差：1.125



(d) 平滑化誤差の標準偏差：0.5625

図 3.10 SSIM の値が 0.96 以上の領域

3.3.5 シミュレーション例

CCD (Charge Coupled Device) カメラで生じるような標準偏差が 4.5 の白色ガウスノイズ[8] を平滑化誤差とした場合の視覚マスクングのシミュレーション例を示す。まず、図 3.11 に示すマスクング評価画像とこの画像に前記の平滑化誤差を付加した画像間の SSIM 値を計算する。各ブロックの SSIM 値を調べることで平滑化誤差が視認されない領域がわかる。例えば、平均画素値が 60、コントラストが 0.6 のブロックでは SSIM 値が 0.96 以上となるので平滑化誤差が視認されないと判断する。シミュレーションから得られる、平滑化誤差が視認されないと判定された平均画素値およびコントラストの組み合わせと、前提条件とした空間周波数特性の条件を満足する領域を自然画像において探索することで、平滑化誤差が混入してもマスクング効果により平滑化誤差が視認されなくなる領域を特定することが可能となる。空間周波数特性に関する条件は、平滑化誤差の空間周波数特性と同様に最高周波数まで均一な特性を有していることである。

3.4 類似輝度セグメントの導入

視覚マスクング評価画像を用いた平滑化誤差の視認性のシミュレーションから、視覚マスクング効果により平滑化誤差が視認されない領域を識別するために必要な 3 つの影響因子の条件を求められることがわかった。しかしながら、一般にコントラストを算出する最適な局所範囲の選定方法や局所空間周波数特性の取得方法などに課題があり、実際に局所コントラストと局所空間周波数特性を計算で求めることは難しい。局所的なコントラストと空間周波数特性を簡易に検出するために類似輝度セグメントと呼称する指標を導入する。空間的に近接し、かつ画素値が近い画素をまとめてひとつの領域とし、これを類似輝度セグメントと定義する。3.4.1 節で自然画像を類似輝度セグメントに変換する具体的な処理手順を示すが、ここでは、しきい値を用いたセグメント変換をわかりやすく説明するために、水平方向の画素を抽出した 1 次元の画像信号を用い

て画像を類似輝度セグメントに変換する手順を図 3.12 を用いて示す。まず 3.3.3 節で示した方法で局所領域の平均画素値を求め、平均画素値に応じて設定した画素値のしきい値を用いて類似輝度セグメントを得る。しきい値の求め方は 3.5.2 節で詳細に説明する。図 3.12 では 2 種類のしきい値を用いた時の類似輝度セグメント変換の例を示す。画像信号がしきい値の境界を示す点線より小さくなる、あるいは大きくなり、隣接画素との画素値の差分がしきい値を超えたところを類似輝度セグメントの境界とする。各 1 次元画像信号の下に変換された類似輝度セグメントを示す。類似輝度セグメントの大きさは、図 3.13 に示すように類似輝度セグメントに内な接する最大の内接円の大きさと定義する。実際の処理では 2 次元の画像に対して、ここで説明した処理手順を拡張して適用するが次節で詳細を説明する。

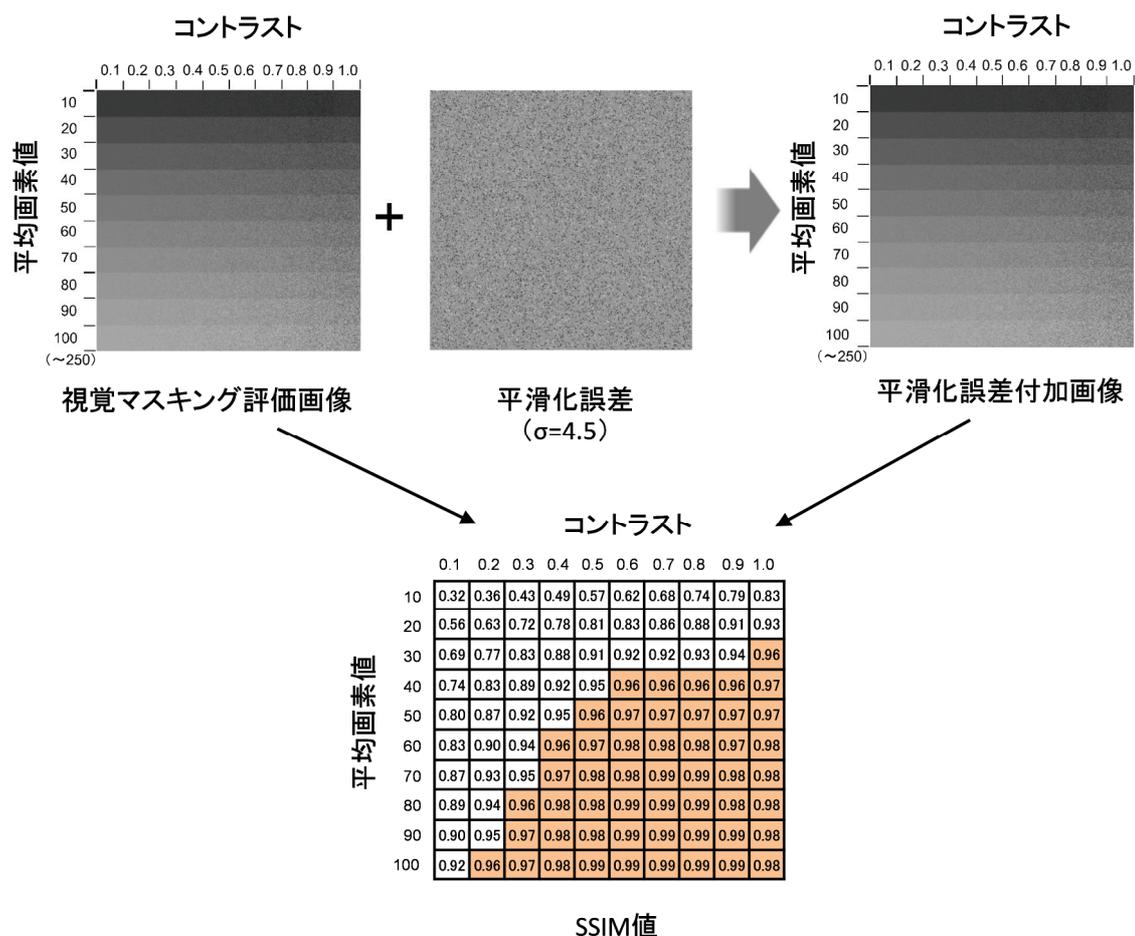
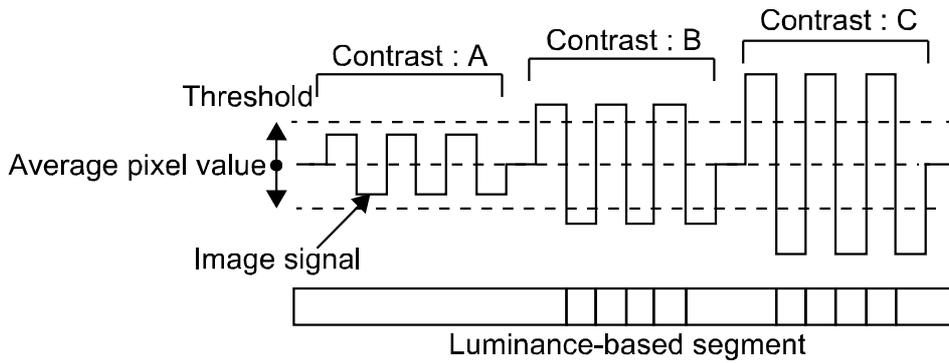
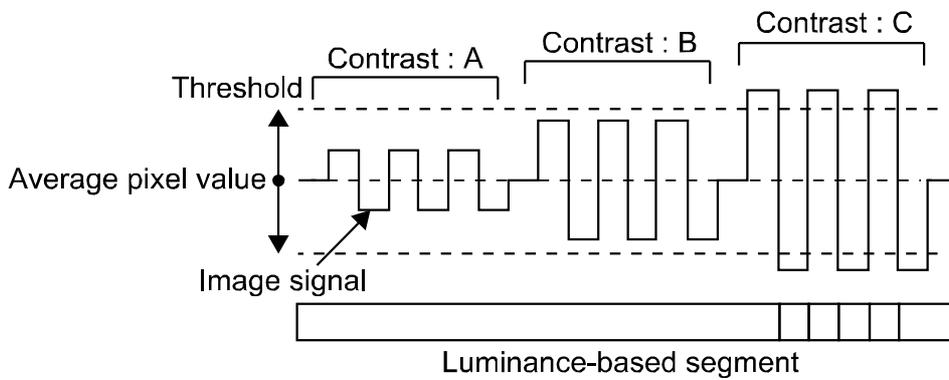


図3.11 視覚マスキングのシミュレーション例



(a) 類似輝度セグメント変換 (しきい値 : 小)



(b) 類似輝度セグメント変換 (しきい値 : 大)

図 3.12 しきい値による類似輝度セグメント分割例

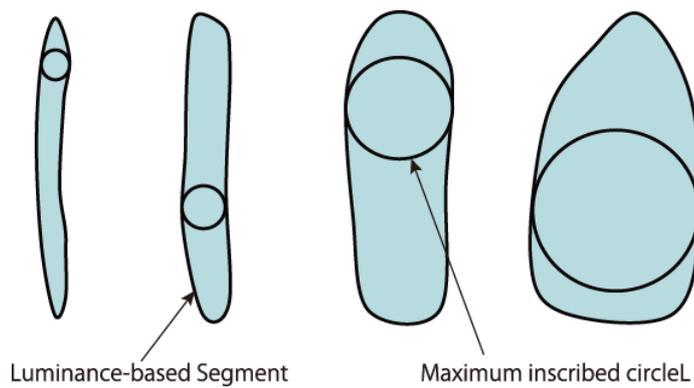


図 3.13 類似輝度セグメントの最大内接円

3.4.1 類似輝度セグメント化処理

入力画像を類似輝度セグメントに変換する処理の詳細を説明する。入力画像はモノクローム画像、画素値を 0~255 とする。セグメント化の前処理として、入力画像の全画素に対して分散が 2 のガウシアンフィルタ（カーネルサイズ：13×13）を用いて局所領域の平均画素値を求める。3.5.2 節で詳細を説明するが、セグメント化を行う上で必要となるしきい値を平均画素値から導出する。図 3.14 に類似輝度セグメント化の処理手順を示す。図 3.14(a)に示す注目画素 $P(x,y)$ にインデックス番号を付与する。注目画素 $P(x,y)$ と右隣画素、左下画素、下画素、右下画素のそれぞれの画素値との差分がしきい値以下になる画素に注目画素と同じインデックス番号を付与する。注目画素を右方向に移動させ同じ処理を繰り返す。新しい注目画素にインデックス番号が付与されていない場合、番号を 1 つ増加させた新しいインデックス番号を付与する。ここでの演算はまだインデックス番号が付与されていない隣接画素のみとする。走査方向により生じる偏りを緩和するために、この処理を 4 行分の画素に対して行い、次に図 3.14(b)に示すように注目画素を右から左方向に移動させながら 4 行分の画素に対してインデックス番号の付与を行う。これらの 8 行分の処理を繰り返し、入力画像のすべての画素にインデックス番号が付与されたら、同じインデックス番号を有する画素をまとめてセグメント化し、これを類似輝度セグメントとする。片側方向の処理が 4 行以下であれば走査方向による影響をほとんど緩和できることを確認している。

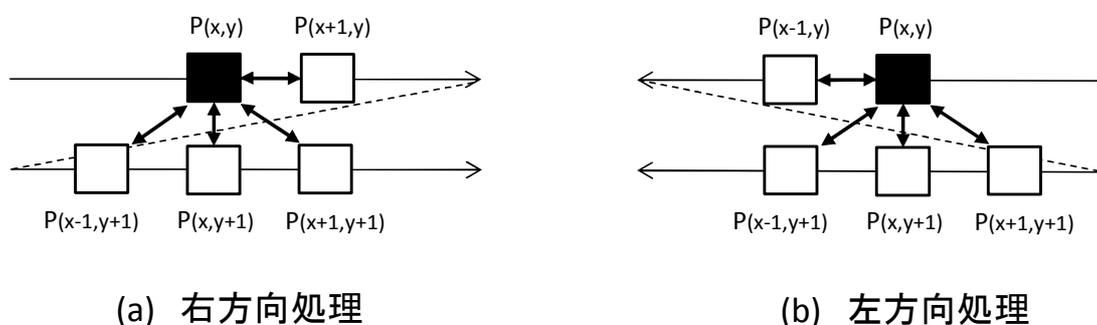


図 3.14 類似輝度セグメント化処理の手順

3.4.2 最大内接円半径の演算処理

図 3.15 に示す類似輝度セグメントの最大内接円を求める手順を説明する。類似輝度セグメント内のすべて画素をそれぞれ注目画素とし、注目画素を中心とする円の大きさを隣のセグメントに接するまで大きくしていき、その注目画素に対する最大の円を求める。各注目画素で求まる円の中で大きさが最大となる円を最大内接円とする。図 3.15 の例では、注目画素 P_n を中心とする円が最大となり、最大内接円の半径が 5.5 画素となる。このように注目画素を中心とする円を求めるため最大内接円の直径の画素数が奇数となり、半径は整数にならない。

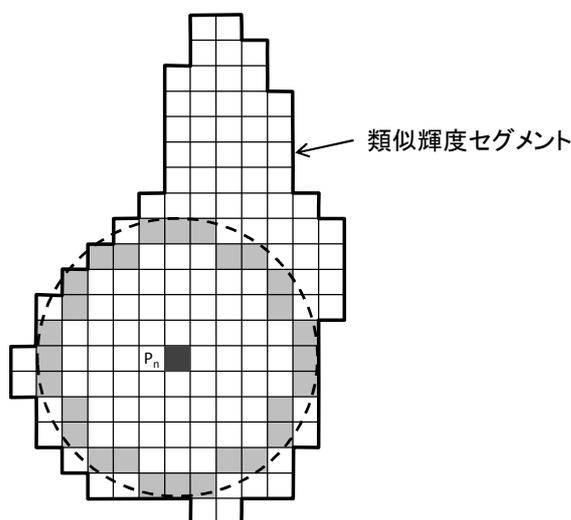


図 3.15 類似輝度セグメント内の最大内接円処理

3.4.3 類似輝度セグメントを用いたコントラストの検出

類似輝度セグメントへの変換で使用するしきい値を変化させ、類似輝度セグメントの大きさを調べることで、平均画素値が等しい画像のコントラストを検出することができる。図 3.12 を用いて説明する。図 3.12 の画像信号は、A, B, C の3種類のコントラストを有するが、図 3.12(a) のように小さいしきい値では B, C のコントラストを有する画像が細かいセグメントに分かれ、コントラストの大小関係が $A < B, C$ であることがわかる。図 3.12(b) のようにしきい値を大き

くすると C のみが細かいセグメントになり、コントラストの大小関係が $A, B < C$ であることがわかる。以上の 2 つのしきい値を用いることで、コントラストの大小関係が $A < B < C$ であることを検出することが可能となる。

3.4.4 類似輝度セグメントを用いた空間周波数特性の検出

類似輝度セグメントは、空間周波数が高い画像で細かいセグメントに分かれるという性質をもつ。このため、類似輝度セグメントの大きさを計算し比較することで画像の空間周波数を検出することが可能となる。図 3.16 は空間周波数の特性が違う原画像と原画像を同じ値のしきい値で類似輝度セグメントに変換した画像、およびパワースペクトルを示す。類似輝度セグメントの図ではセグメントごとにランダムな色を割り当てて表示している。パワースペクトルの図からわかるように、原画像の B 図は A 図と比較して、空間周波数特性が平坦な高い空間周波数特性を有する画像である。この空間周波数特性から、B 図の類似輝度セグメントの大きさが A 図と比較して小さくなっている。

本研究では、対象とする画像の空間周波数特性が平滑化誤差の空間周波数特性と同等か判定することが必要となる。十分小さなしきい値で視覚マスク評価画像を類似輝度セグメントに変換すると、ほとんどのセグメントの大きさは半径が 3 画素以下となった。図 3.17 は、平均画素値が 10~100 の視覚マスク評価画像を類似輝度セグメントに変換した時の、類似輝度セグメントの半径の大きさとその頻度の関係を示した図で、半径が 3 画素を超える類似輝度セグメントの割合は 0.001%であった。この結果に従い、自然画像を類似輝度セグメントに変換して、セグメントの半径が 3 画素以下であれば平滑化誤差と同等の空間周波数特性であり、高い周波数成分を有していると判定することとした。

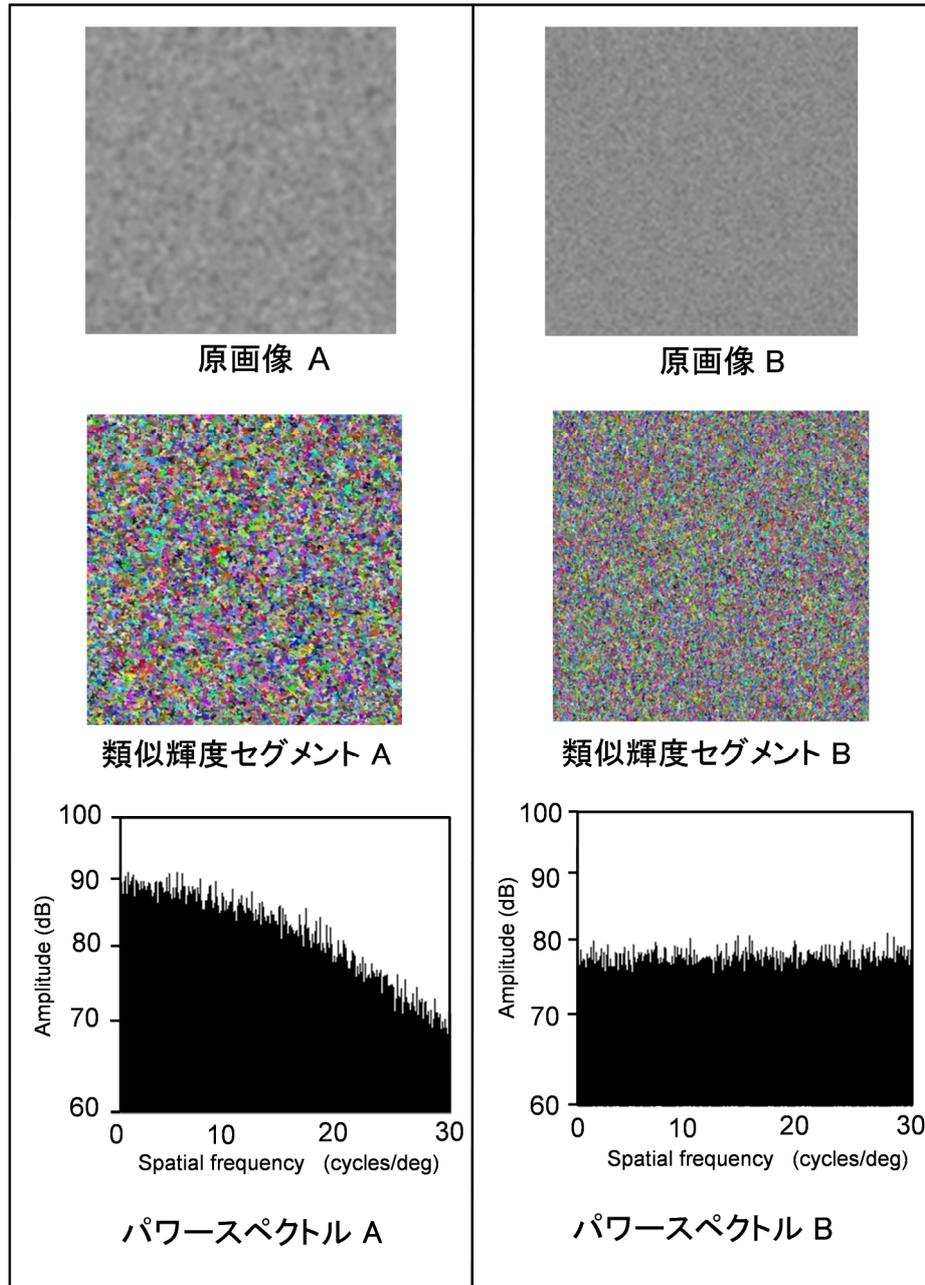


図 3.16 空間周波数特性と類似輝度セグメントの大きさの関係

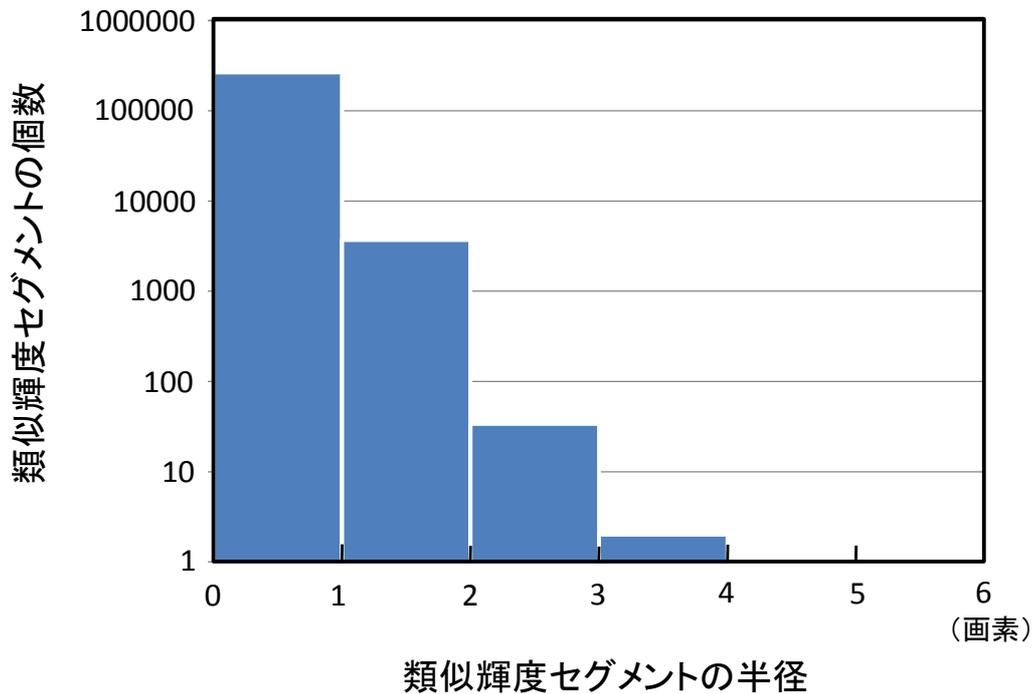


図 3.17 類似輝度セグメントの半径と出現頻度

3.5 類似輝度セグメントを用いた視覚マスクング効果の定量的評価

3.5.1 評価手法の概要

類似輝度セグメントを用いた視覚マスクング効果の定量的評価手法を提案する。類似輝度セグメントを用いることで、視覚マスクング効果の定量的評価手法の構築で必要となる局所領域のコントラストと空間周波数特性の検出を効果的に行うことが可能となる。図 3.18 は、類似輝度セグメントを用いた視覚マスクング効果の定量的評価を実施する手順を示した図である。まず、平滑化誤差の特性、大きさを特定し、特定した平滑化誤差を視覚マスクング評価画像に付加して SSIM の値を計算する。ここでは、標準偏差 σ の白色ガウスノイズとする。図 3.18 上部の視覚マスクングのシミュレーション枠中の右図に示す、SSIM の値が 0.96 以上となる太い枠で囲まれたブロックの平均画素値とコントラストを

有し、かつ空間周波数特性が平滑化誤差と同等な画像では平滑化誤差が視認されないと判定される。判定された領域を類似輝度セグメントで識別することができれば、コントラストと空間周波数特性を演算で求めることなく、平滑化誤差が視認されない領域の抽出が可能になる。類似輝度セグメントによる識別を行うために、視覚マスク評価画像を類似輝度セグメントに変換する。変換する際に用いるしきい値を、視覚マスク評価画像の太い枠内の画像のみが半径 3 画素以下の小さいセグメントになり、他の領域は 3 画素より大きなセグメントになるように選択する。この時の平均画素値としきい値のデータセットを平均画素値－しきい値テーブルと定義する。

次に、自然画像から平滑化誤差として選択した標準偏差 σ の白色ガウスノイズが視覚マスクにより視認されない領域を抽出する。自然画像の局所的な平均画素値を算出し、上記で求めた平均画素値－しきい値テーブル中の平均画素値に対応するしきい値を用いて自然画像を類似輝度セグメントに変換する。平滑化誤差が視認されない条件を満足する領域のみが細かいセグメントに分かれ、平滑化誤差が視認されない領域を抽出することが可能となる。次節でこのテーブルの取得方法を詳細に説明する。

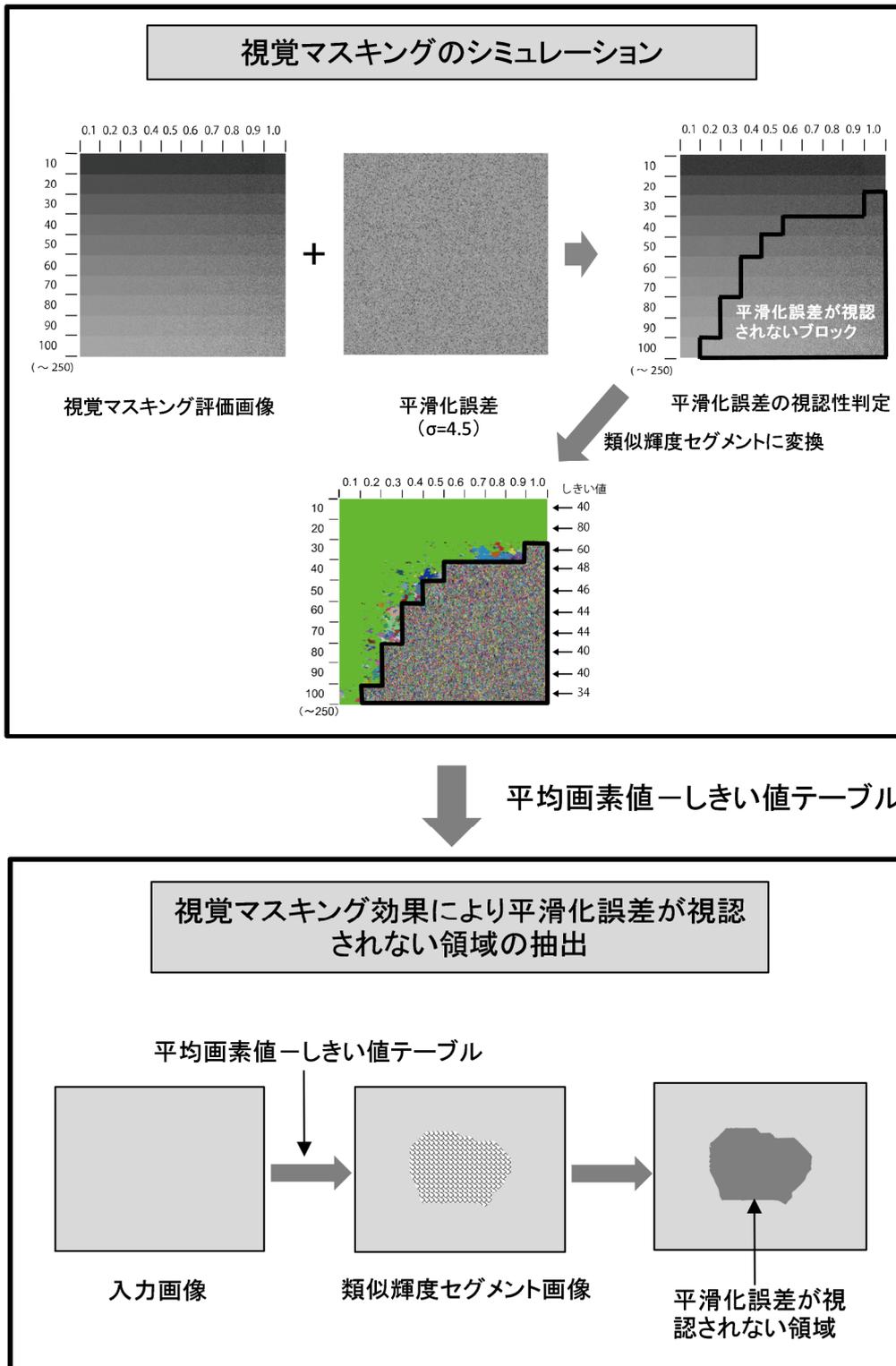


図 3.18 類似輝度セグメントを用いた視覚マスクングの定量的評価手順

3.5.2 平均画素値－しきい値テーブルの取得

図3.11に示すSSIM 値の画像において、平均画素値を定めると平滑化誤差が視認されないコントラストの範囲が定まる。例えば、平滑化誤差として選択した標準偏差が4.5、平均画素値が50 の場合、コントラスト範囲は0.5～1.0 になり、平均画素値が80 の場合は0.3～1.0 となる。それらの範囲で、類似輝度セグメントの半径が3 画素以下となるようにしきい値を設定する。図3.19はマスキング評価画像の平均画素値が50 の領域の水平方向の1 ラインのデータを模式的に示した図である。これから、図3.19の下部に示す類似輝度セグメントのように、コントラストが0.5～1.0 の領域を細かいセグメントに分割するには、しきい値を46 にすればよいことがわかる。各平均画素値に対して同様に選択したしきい値を、標準偏差 σ のノイズに対する平均画素値－しきい値テーブルと呼ぶ。表3.2 に平滑化誤差の標準偏差 σ が4.5, 2.25, 1.125 の場合を想定して算出した平均画素値－しきい値テーブルの例を示す。

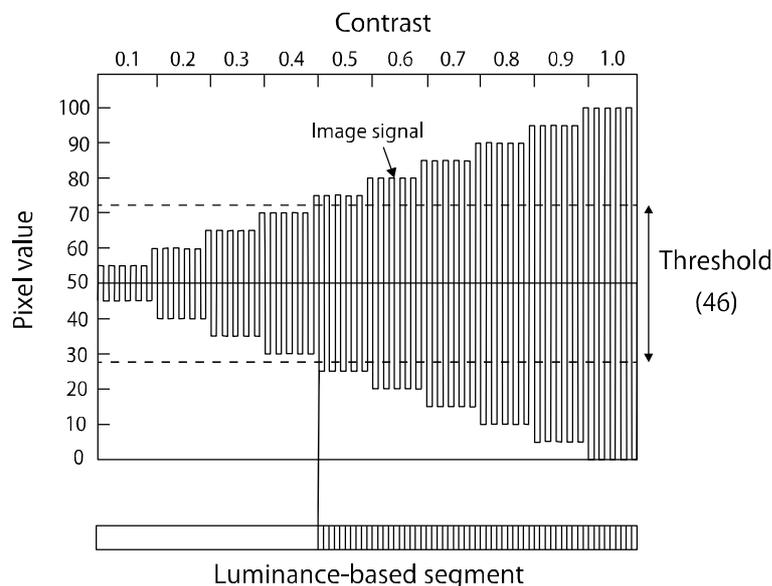


図3.19 平均画素値が50のデータに対するしきい値の決定方法（平滑化誤差の標準偏差：4.5）

表3.2 3種類の平滑化誤差の標準偏差を基に導出した平均画素値－しきい値

テーブル

平均画素値	しきい値		
	$\sigma : 4.5$	$\sigma : 2.25$	$\sigma : 1.125$
10	40	40	12
20	80	26	6
30	60	20	4
40	48	18	6
50	46	16	8
60	44	14	10
70	44	12	12
80	40	14	14
90	40	16	16
100	34	18	18
110	34	20	18
120	34	20	18
130	34	20	18
140	34	20	18
150	34	20	18
160	34	20	18
170	30	20	18
180	30	20	18
190	30	20	18
200	30	20	18
210	30	20	18
220	30	20	18
230	30	20	18

3.5.3 自然画像における平滑化誤差が視認されない領域の抽出

図3.18の下側の図を用いて、自然画像における、平滑化誤差として選択した大きさが±8のインパルスノイズの視認性を判定する手順を説明する。図3.18では標準偏差が4.5のノイズを用いているが、ここでは5章および6章で扱うインパルスノイズを用いる。まず、分散が2のガウシアンフィルタ（カーネルサイズ：13×13）を用いて各画素の平均画素値を求める。図3.20(b)は原画像から平均画素値を求めた図である。次に大きさが±8のインパルスノイズに対する平均画素値－しきい値テーブルから、求めた平均画素値に対応するしきい値を用いて、3.4.1節で説明した方法で自然画像を類似輝度セグメントに変換する（図3.20(c)）。類似輝度セグメントの図では各セグメントにランダムな色を割り当てている。次に3.4.2節で説明した方法で各類似輝度セグメントの大きさを計算する。

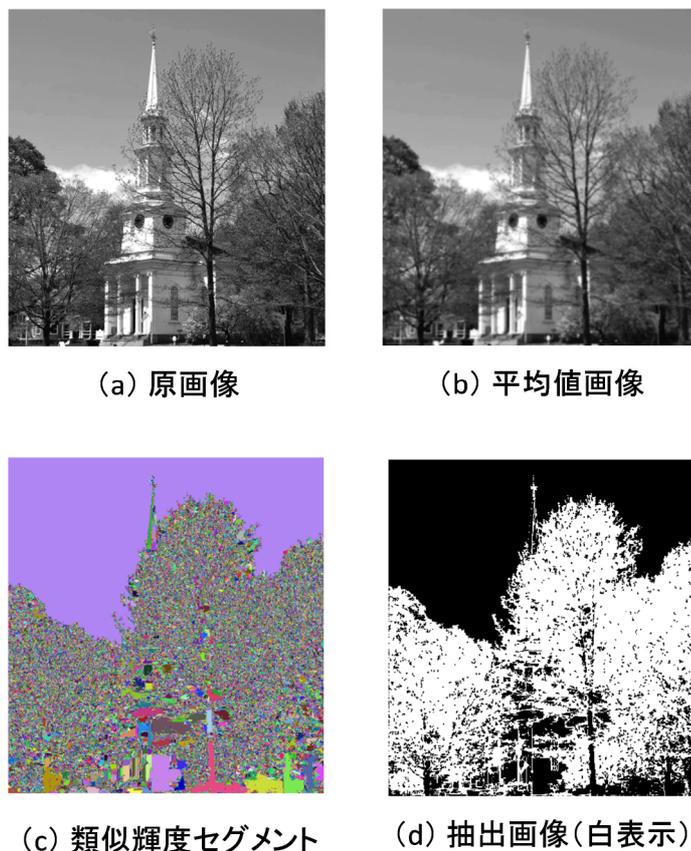


図3.20 自然画像を用いた平滑化誤差が視認されない領域の抽出例

類似輝度セグメントの半径が3画素以下の領域を抽出した画像が図3.20(d)である。ここで抽出した領域は、平滑化誤差として選択した大きさが±8のインパルスノイズが視認されない3条件（平均画素値、コントラスト、空間周波数特性）を満足すると判定された領域である。

3.6 この章のまとめ

視覚マスキング現象を電子ディスプレイの電力削減を目的とした画像処理に取り入れるために、視覚マスキングの効果を定量的に評価する手法を提案した。本研究では、画像処理の過程で生じる平滑化誤差と背景画像間の視覚マスキングを利用するために、視覚マスキング効果と平滑化誤差の視認性の関係を定量的に評価する手法を開発した。まず、視覚マスキングのシミュレーション用に開発した評価画像を用いて、視覚マスキングで平滑化誤差が視覚的に視認されなくなる空間周波数特性やコントラストなどの画像特徴量の条件を求める。求めた条件を自然画像に適用して平滑化誤差が視認されない領域を抽出するという手法である。この領域のみで電力削減のための画像処理を行うことにより画質の低下を防ぐことが目的である。実際の評価処理では、局所領域の空間周波数特性などの画像特徴量の演算が難しいために、類似輝度セグメントと呼称する独自の指標を定義し、入力画像を類似輝度セグメントに分割する手法を取り入れることで局所領域の画像特徴量を検出することが可能になった。

3.7 第3章の参考文献

- [1] 内藤彰子, 阿部時也, 羽石秀昭:「視覚特性を考慮したカラー静止画像の評価尺度」, 映情学技法, vol. 32, no. 34, pp.61-64, Jul. 2008.
- [2] 山本敏嗣:「視覚のマスク効果を考慮したカラー静止画像の画質劣化定量評価」, 日本画像学会, Imaging Conference JAPAN 2010, B-13, pp.183-186, 2011.
- [3] S. Daly, "The visible differences predictor: an algorithm for the assessment of image fidelity", Digital Image and Human Vision, pp.179-206, MIT Press, 1993.
- [4] 松本修一, 川田亮一:「客観評価法の種類と特徴」, 映情学誌, vol.53, no.9, pp.1199-1205, 1999.
- [5] 宮地悟史, 浜田高宏, 松本修一:「人間の視覚特性を考慮した画像品質評価システムの開発」, 信学論, vol.J81-D-II, no.6, pp.1084-1094, Jun. 1998.
- [6] 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, pp.600-612, Apr. 2004.
- [7] Z. Wang and A. C. Bovik, "A universal image quality index", IEEE Signal Processing Letters, vol.9, no.3, pp.81-84, Mar. 2002.
- [8] 上村健二, 伊東ひとみ, 津村徳道, 中口俊哉, 三宅洋一:「単一画像からのノイズ推定手法の評価と改善」, 映情学誌, vol.63, no.1, pp.101-104, Jan. 2009.

第 4 章 ノイズ劣化画像の復元

4.1 はじめに

本章では、視覚マスキング効果の定量的評価に関する提案手法を検証するために行った、視覚マスキングを利用したノイズ劣化画像の画像復元実験について述べる。

ノイズの除去では、画像に対してスムージング処理を行うことが一般的であるが、エッジや細かい模様などの高周波情報が失われて、解像度が低下した画像になることが課題である。そこで、視覚マスキングを利用することにより画像の高周波成分を保持しながらノイズを抑制することができる画像の復元手法を提案する。提案手法では、ノイズに対する視覚マスキング効果の強度を算出し、強度に従って画像を領域分割する。視覚マスキング効果が強くノイズが視覚的に視認できない領域では、ノイズを含んだ入力画像をそのまま出力し、他の領域では、重みに従ってフィルタのスムージングの強さを調整することにより高画質な画像復元を行う。ノイズを付加した自然画像を用いた画像復元実験によりこの復元手法が有効であることおよび、視覚マスキング効果の強度を算出する際に用いた視覚マスキング効果の定量的評価手法の有効性を確認する。

なお、本章で使用する画像は 8 ビット、256 階調グレースケール画像である。ノイズは白色ガウスノイズで、原画像に対して 2.2 の逆ガンマ補正を行ったりニア画像にノイズを付加し、再度 0.45 のガンマ補正を行っている。

4.2 先行研究

画像からノイズを除去する先行研究では、ウィーナフィルタやカルマンフィルタを用いた研究が行われている[1],[2]。これらのフィルタは基本的にローパスフィルタとなり画像の細部の情報が失われてしまう。このため、エッジのぼけを防止しながらノイズの低減を行うために、bilateral フィルタや non-local

means フィルタなどの非線形フィルタの研究, 画像内を平坦部とエッジ部に分割してパラメータを変えたスムージングを行う研究, 非等方拡散法を用いたフィルタの研究などが行われている[3]-[7]。しかしながら, 比較的大きなコントラストを持つエッジ部の保存には適しているが, 細かなテクスチャが失われることは避けられない。また, 画像内をノイズに対する感度が高い平坦領域とそれ以外の領域に分けて適応的にフィルタリングを行う研究がある[8]。ただし, 平坦領域以外の領域においてもある程度のフィルタリングが必要になり細かい情報は失われてしまう。そこで, ノイズと原画像との間に生じる視覚マスキング効果を利用することにより, 画像の細部の情報を保持しながらノイズを抑制することができる復元手法を提案する。

4.3 画像復元手法の概要

従来手法では平坦領域とそれ以外, あるいはエッジ領域とそれ以外に分割して処理を行うのに対して, 提案手法では, 視覚マスキング効果の強度を基に, 画像を平坦度が異なる任意の数の領域に分割して処理する。また, 従来手法では最終的に全画面でフィルタ処理を行っているが, 提案手法では, 視覚マスキング効果が強くノイズがほとんど視認されない領域ではフィルタ処理を行わず, その他の領域では, 視覚マスキング効果の強度に応じてフィルタのスムージングの強さを調整することで画像全体において高画質な復元画像を得る。視覚マスキング効果の強度に基づく領域分割では, 画像特徴量を簡便に検出できる指標を導入して処理の簡略化を図る。

4.4 視覚マスキング効果の強度の算出

4.4.1 視覚マスキング効果の数値化

視覚マスキング効果の強度に基づく処理を行うには、視覚マスキング効果の強度を数値化する必要がある。視覚マスキング効果の強度が強い画像では大きなノイズが混入してもノイズが視認されないが、強度が弱い画像では小さなノイズしか隠すことができない。ノイズの視認性と視覚マスキング効果の強度は密接に関連している。提案手法では、視覚マスキング効果の強度を隠蔽可能なノイズの大きさにて判定する。例えば、ノイズが白色ガウスノイズの場合、ある画像が標準偏差 4.5 のノイズを隠すことができれば、この画像の視覚マスキング効果は、標準偏差が 4.5 の白色ガウスノイズを隠すことができる強度であるとする。より視覚マスキング効果の強度が大きな画像であれば、隠すことができるノイズの標準偏差の値がより大きくなる。

4.4.2 視覚マスキング効果の強度の算出手法

図 4.1(b), (c), (d) は、標準偏差が 1.125, 2.25, 4.5 のノイズに対する平均画素値-しきい値テーブルを用いて図 4.1 (a)の原画像を類似輝度セグメントに変換して、それぞれのノイズが視認されない領域を求めた図である。白く表示されたノイズが視認されない領域をそれぞれ領域 l, 領域 m, 領域 h とする。図 3.10 に示すように、ノイズの標準偏差が小さくなるとノイズが視認されないブロックの数が増え、その領域は広くなり、ノイズが大きい場合の領域を抱合する形になる。この関係から、図 4.1 の領域も包含関係になり、領域 l ⊃ 領域 m ⊃ 領域 h の関係となる。図 4.1(e) はこれらの領域の差分をとった図で、差分領域をそれぞれ領域 L, M, H とする。領域 L は、標準偏差が 1.125 のノイズは隠せるが 2.25 のノイズは視認されてしまう領域である。また、領域 M は標準偏差が 2.25 のノイズは隠せるが、4.5 のノイズは視認されてしまう領域となる。したがってそれぞれの領域での視覚マスキング効果の強さは $H > M > L$ となる。このようにノイズの大きさの異なる平均画素値-しきい値テーブルを用いること

で、視覚マスクング効果の強度を求めることが可能になる。

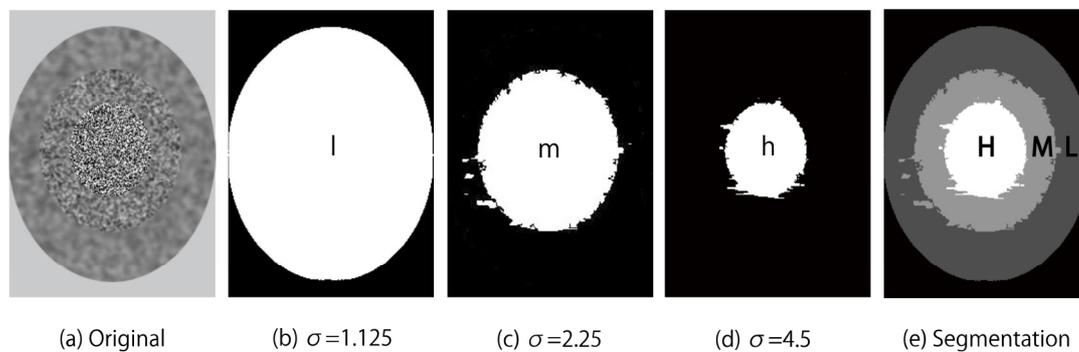


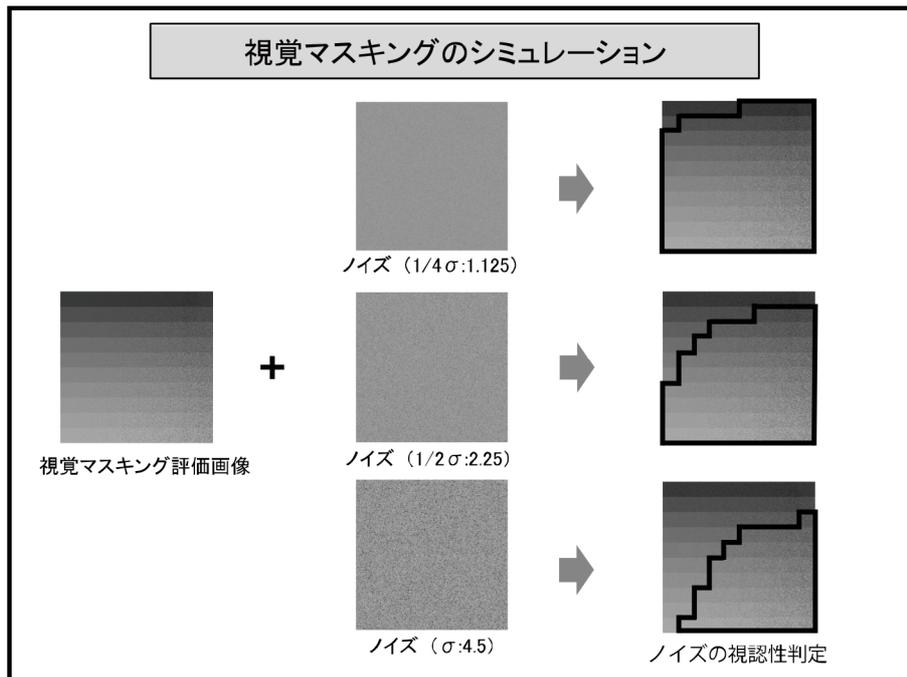
図 4.1 3種類の標準偏差を基に算出した平均画素値－しきい値テーブルによるノイズが視認されない領域の抽出（ノイズの標準偏差：4.5, 2.25, 1.125）

4.5 画像復元手法

ノイズを含んだ画像を復元するために、視覚マスクング効果の強度を基に画像を複数領域に分割し、各領域が有する視覚特性に最適な復元処理を行う。

4.5.1 視覚マスクング効果の強度に基づく領域分割

前節で領域分割の考え方を説明したが、ここで改めて視覚マスクング効果の強度に基づく領域分割の処理フローを図 4.2 に示す。まず、入力画像に含まれるノイズを推定してノイズの大きさを求める。ここでは白色ガウスノイズが含まれると想定してノイズの標準偏差 σ を求める。次に、求めた標準偏差 σ 、その $1/2, 1/4 \dots$ の標準偏差のノイズを視覚マスクング評価画像に付加して視覚マスクングのシミュレーションを行う。シミュレーションから、それぞれのノイズに対応した平均画素値-しきい値テーブルが得られる。得られたテーブルを用いて、入力画像を類似輝度セグメントに変換し、セグメントの最大内接円の半径が 3 画素以下の部分を検出して、それぞれのノイズが視認されなくなる画像特徴量を有する領域を抽出する。マスクング評価画像の平均画素値は 10, 20, 30 と間隔を 10 としている。この値を代表値として、自然画像を類似輝度セグメントに変換する場合は、局所的な平均画素値に最も近い代表値を用いる。抽出された領域の視覚マスクングの強度は $a > b > c$ となる。視覚マスクングの強度に基づいて入力画像を領域分割した模式図を図 4.3 に示す。A の領域は推定されたノイズの標準偏差 σ を用い、B~D の領域はそれぞれ、 $1/2\sigma$ 、 $1/4\sigma$ 、 $1/8\sigma$ の標準偏差を用いている。



↓

$1/4\sigma$: 平均画素値 - しきい値テーブル 1
 $1/2\sigma$: 平均画素値 - しきい値テーブル 2
 σ : 平均画素値 - しきい値テーブル 3

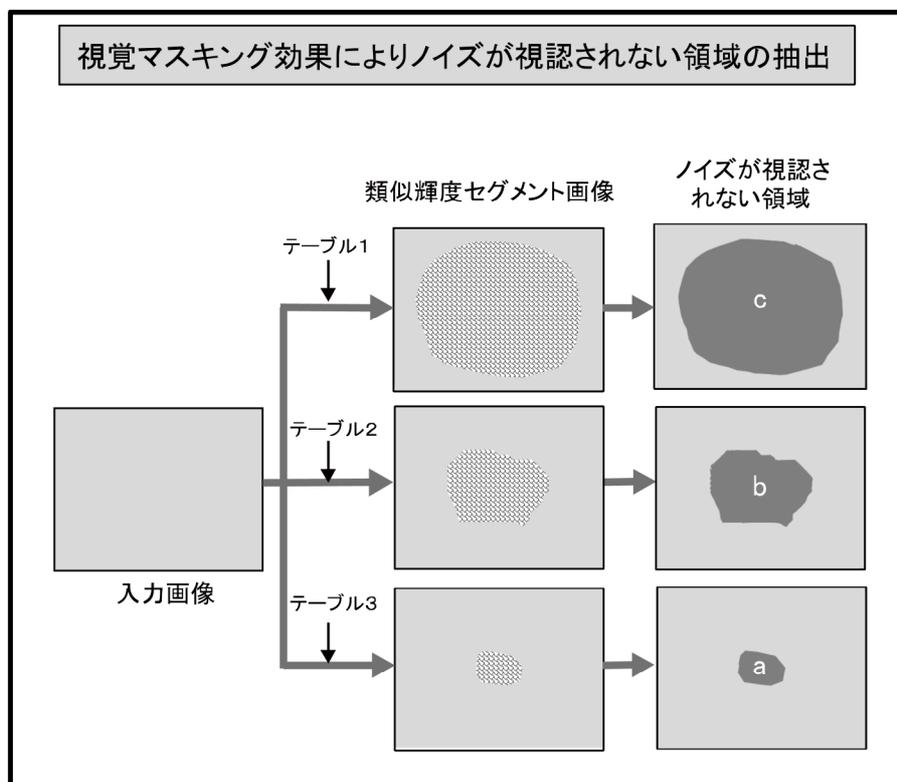


図 4.2 視覚マスクング効果の強度に基づく領域分割の処理手順

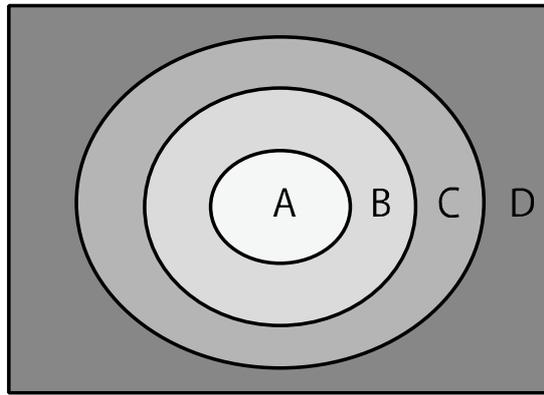


図 4.3 視覚マスクング効果の強度に基づく領域分割（ノイズの標準偏差： $A > B > C > D$ ）

4.5.2 画像の復元処理

視覚マスクング効果の強度に基づいて領域分割した模式的な画像例（図 4.3）を用いて復元処理を説明する。図 4.3 の領域 A は画像に含まれるノイズが視認されない領域なので、ノイズを含んだ入力画像をそのまま出力する。B～D の領域では既存のフィルタを用いてノイズを抑制する。視覚マスクング効果の強度は $B > C > D$ の関係にあるので、フィルタのスムージングの強さに関するパラメータを調整して、B ではエッジ部分など細かい情報が残るようにスムージングの強さを小さくし、D の領域は平坦な領域なので強いスムージングを行っても画質にはあまり影響しないのでスムージングの強さを大きくする。以上の処理を行うことで、複雑な領域では細部の情報がそのまま保持され、平坦な部分ではノイズが十分に低減された高画質な画像復元が可能となる。

4.5.3 ノイズの推定

類似輝度セグメントを用いた手法は、設定したノイズに対応した平均画素値－しきい値テーブルを用いるので、自然画像に適用するには、予め画像に含まれるノイズを推定する必要がある。ノイズの種類によっては予めノイズの統計

的性質が得られている場合がある。また事前にノイズに関する情報がない場合は、既存のノイズ推定手法[9],[10]、もしくは、小さいしきい値を用いた類似輝度セグメント手法で求めた、平坦な領域における画素値のヒストグラムからノイズの標準偏差を推定することも可能である。

4.6 実験

提案手法の有効性を確認するために、IEC 62087 標準動画像のキャプチャ画像 (640 × 480 画素, 256 階調, グレースケール画像) と標準画像 Lenna (512 × 512 画素, 256 階調, グレースケール画像) に白色ガウスノイズ (平均 0, 標準偏差 4.5) を付加して、画像の復元実験を行った。それぞれの画像を画像 IEC, 画像 Lenna とする。IEC 62087 標準動画像は、IEC (International Electrotechnical Commission) がテレビ消費電力測定規格を発行するにあたって、消費電力測定用に作成した標準動画像である[11]。復元実験では、前節で説明した視覚マスキング効果の強度を基に領域分割を行い、ノイズが視認されないと判断された領域では入力画像をそのまま出力し、その他の領域では bilateral フィルタ (付録 A) と non-local means フィルタ (付録 B) のパラメータを調整してノイズの除去を行った。

以下に復元実験の詳細を説明する。ノイズを付加した画像 IEC からノイズの推定を行った。領域分割が可能な最低のしきい値で画像を類似輝度セグメントに分割して平坦領域を求めた。図 4.4 は選択した平坦領域内の画素値をプロットしたヒストグラムである。図中に示した標準偏差が 4.5 の正規分布曲線とほぼ一致しており、付加した白色ガウスノイズを推定可能であることを示している。

画像 IEC を視覚マスキング効果の強度に基づいて領域分割を行った。図 4.5 (b) は、推定したノイズ (標準偏差 4.5) に対応した平均画素値—しきい値テーブルを用いて類似輝度セグメントに分割した画像である。図 4.5 (c) の白色領域は、類似輝度セグメントの最大内接円の半径が 3 画素以下となっており、ノイ

ズが視認されないと判定された領域である。図 4.6 は、推定したノイズの標準偏差および $1/2$, $1/4$, $1/8$ の 4 種類のノイズに対応した平均画素値-しきい値テーブルを用いて A~E の 5 つに領域分割した画像である。領域 E は標準偏差が $1/8$ のノイズを用いて抽出した領域以外の部分になり、最も平坦と判定された領域である。視覚マスキング効果の強度は $A>B>C>D>E$ の関係にある。シャツやモニター裏の白色部分で領域 E に判定されている部分は高輝度の平坦部である。A の領域では入力画像をそのまま出力し、B~E の各領域では bilateral フィルタもしくは non-local means フィルタのパラメータを調整してノイズ除去を行った。

図 4.7 はそれぞれ、(a) ノイズを含まない原画像、(b) ノイズを含んだ入力画像、(c) bilateral フィルタでノイズを除去した従来手法による復元画像、(d) non-local means フィルタでノイズを除去した従来手法による復元画像、(e) 提案手法による復元画像である。bilateral フィルタによる画像復元では、PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) の値が最大となるように実験的に求めたパラメータ σ_d と σ_r を用いた。用いたパラメータ値は画像 IEC では $\sigma_d=0.9$, $\sigma_r=30$, 画像 Lenna では $\sigma_d = 1.0$, $\sigma_r = 45$ である。non-local means フィルタによる画像復元では、探索範囲を 21×21 画素、パッチ範囲を 3×3 画素とし、用いたパラメータ値を画像 IEC では $\sigma_h = 16$, $\sigma_a = 1$, 画像 Lenna では $\sigma_h = 14$, $\sigma_a = 1$ とした。図 4.8 はそれぞれの画像の拡大図である。提案手法による復元画像である図 4.8(j) では、フィルタ処理を行っていないシャツの部分で細かい模様が保持されているのに対して、フィルタ処理を行っている図 4.8(e) の壁や図 4.8(j) の首筋のノイズが十分に抑制されていることがわかる。従来手法の bilateral フィルタでは、図 4.8(c) に示すようにノイズの抑制が不十分である。また、図 4.8(h) では、シャツの模様がスムージングされて不鮮明になっている。従来手法の non-local means フィルタでは、図 4.8(d), 4.8(i) が示すようにノイズの抑制とエッジの保存とも良好であるが、図 4.8(i) のフィルタ処理を行っているシャツの模様が幾分不鮮明になっている。

画像 Lenna の画像に対しても同様な処理で復元を行った。図 4.9 は領域分割

の図である。図 4.10, 図 4.11 は復元画像とその拡大図である。提案手法では図 4.11(e) の帽子の細かいひだが保持されていると同時に, 図 4.11(j) の壁のノイズが抑制されている。これに対して, 図 4.11(c), 図 4.11(h) の bilateral フィルタでは, 帽子のひだがスムージングされて不鮮明になっている。また, 図 4.11(d)の non-local means フィルタでは, 帽子のひだが一部スムージングされている。得られた復元画像に対して PSNR と SSIM を用いてノイズ除去の定量的評価を行った (付録 C)。表 4.1 に提案手法および従来手法で復元した画像の PSNR 値を示す。提案手法は従来手法の bilateral フィルタと比較して, 画像 IEC で 2.7 dB, 画像 Lenna で 2.2 dB, non-local means フィルタと比較して, 画像 IEC で 0.2dB, 画像 Lenna で 0.1dB の改善がある。表 4.2 に提案手法および従来手法で復元した画像の SSIM 値を示す。提案手法は従来手法の bilateral フィルタと比較して, 画像 IEC で 0.050, 画像 Lenna で 0.017, non-local means フィルタと比較して, 画像 IEC で 0.003, 画像 Lenna で 0.001 の改善がある。

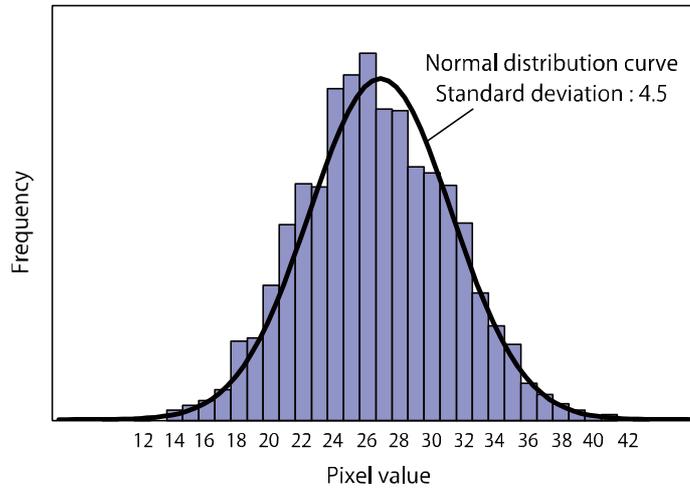


図 4.4 平坦領域の画素値ヒストグラム

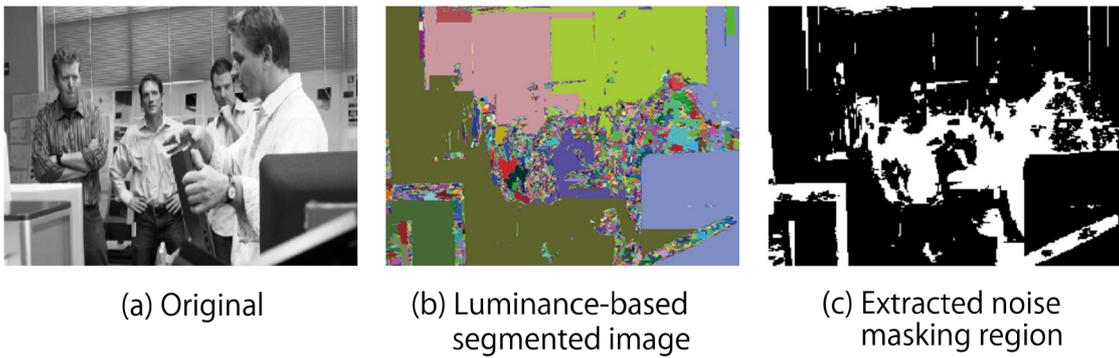


図 4.5 類似輝度セグメント分割画像とノイズが視認されない領域



図 4.6 視覚マスキング効果の強度による領域分割画像



(a) Original image



(b) Noise added image



(c) Reconstructed image using bilateral method



(d) Reconstructed image using non-local means method



(e) Reconstructed image using proposed method

図 4.7 提案手法および従来手法による画像 IEC の復元画像

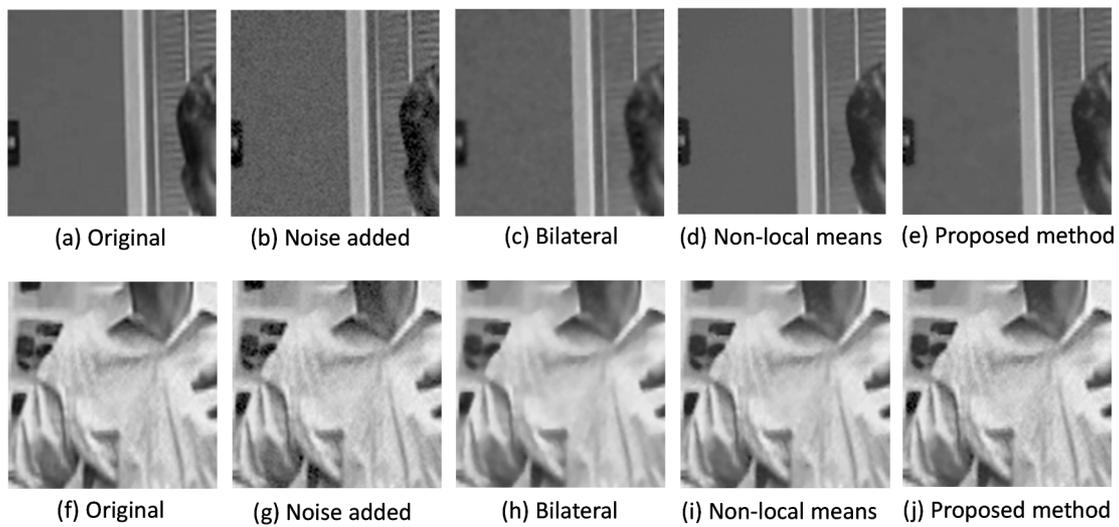


図 4.8 復元画像の拡大図

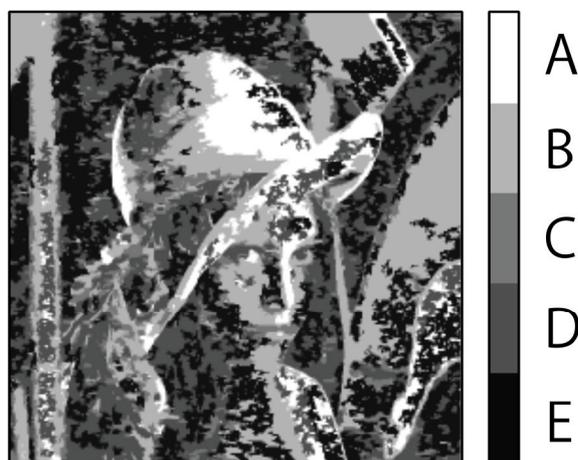


図 4.9 視覚マスク効果の強度による領域分割画像



(a) Original image



(b) Noise added image



(c) Reconstructed image using bilateral method



(d) Reconstructed image using non-local means method



(e) Reconstructed image using proposed method

図 4.10 提案手法および従来手法による画像 Lenna の復元画像

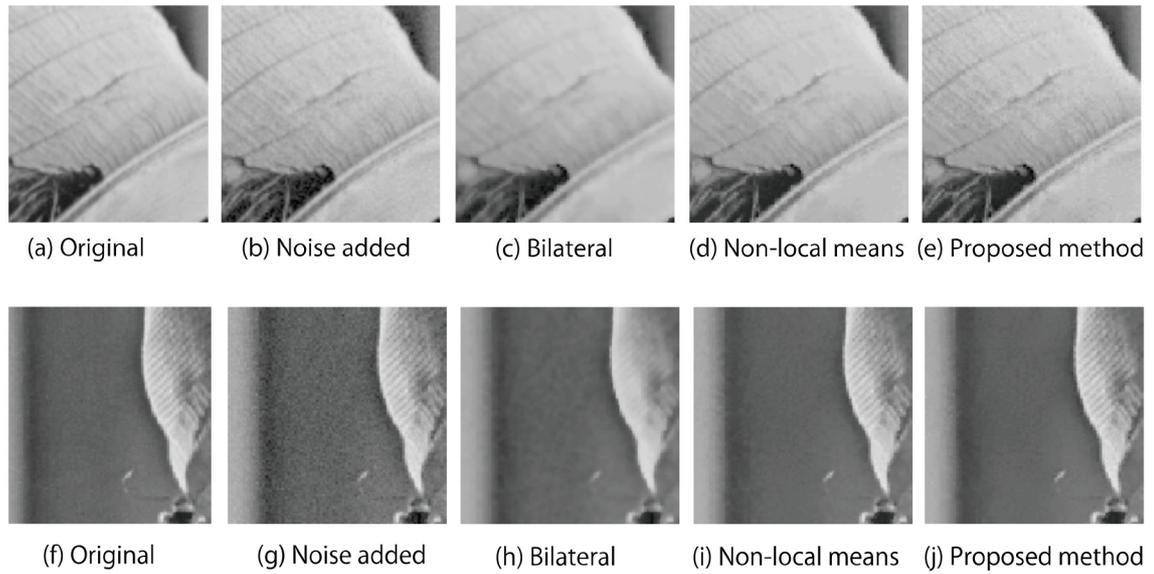


図 4.11 復元画像の拡大図

表 4.1 PSNR による復元画像の評価

	入力画像	Bilateral	Non-local means	提案方式
図 IEC	28.1 dB	30.4 dB	32.9 dB	33.1 dB
図 Lenna	29.4 dB	33.5 dB	35.6 dB	35.7 dB

表 4.2 SSIM による復元画像の評価

	入力画像	Bilateral	Non-local means	提案方式
図 IEC	0.796	0.867	0.914	0.917
図 Lenna	0.796	0.888	0.904	0.905

4.7 この章のまとめ

ノイズを含んだ画像の復元において、フィルタ処理を行うと高周波成分がスムージングされて細部の情報が失われてしまうという課題に対して、視覚特性に基づく視覚マスクング効果を用いることで高周波成分を保持しながら、ノイズを抑制することができる画像の復元手法を提案した。画像の特徴量を簡易に検出するために導入した指標である類似輝度セグメントを用いて算出した、視覚マスクング効果の強度に基づく重みに従って入力画像を領域に分割し、視覚マスクング効果によりノイズが視覚的に視認できない領域はフィルタ処理を行わないというところが大きな特徴となっている。自然画像を用いた実験で、高周波成分を保持しながらノイズを抑制できることを示し、提案した画像復元手法と視覚マスクング効果の定量的評価手法の有効性を確認した。提案手法で効果を得るには、画像に含まれるノイズが視覚的にマスクング可能な大きさであるという制約がある。今回の実験では標準偏差が 4.5 (256 階調) の白色ガウスノイズを用いたが、マスクング評価画像に付加するノイズの標準偏差を 8 程度まで大きくしてもノイズをマスクする領域が存在することを確認しているので対応が可能と推測できるが、今後確認していく必要がある。

提案手法で用いた、視覚特性に基づくマスクング効果の強度の評価手法は、視覚特性を応用する他の分野でも利用可能と考える。

4.8 第4章の参考文献

- [1] A. K. Jain, "Fundamentals of Digital Image Processing". Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1988.
- [2] S. Citrin and M. R. Azimi-Sadjadi, "A full-plane block Kalman filter for image restoration", IEEE Trans. Image Processing, vol.1, no.4, pp.488-494, Oct. 1992.
- [3] C. Tomasi and R. Manduchi, "Bilateral Filtering for Gray and Color Images", Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision, pp.839-846, 1998.
- [4] A. Buades, B. Coll and J. Morel, "A non-local algorithm for image denoising", Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.60-65, Jan. 2005.
- [5] 松村 淳, 長谷山美紀, 北島秀夫:「効果的な雑音除去のための適応的な画像のモデル化によるカルマンフィルタ」, 信学論, vol.J86-D-II, no.2 pp.212-222, Feb. 2003.
- [6] P. Perona and J. Malik, "Scale-Space and Edge De-tECTION Using Anisotropic Diffusion", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.12, no.7, pp.629-639, 1990.
- [7] 辻 裕之, 徳増眞司, 高橋裕樹, 中嶋正之:「非等方拡散法に基づく空間平滑化フィルタの構築に関する基礎検討」, 信学論, vol.J88-D-II, no.6, pp.1024-1034, Jun. 2005.
- [8] 和崎浩幸, 羽石秀昭:「ノイズ知覚感度を用いた適応的バイラテラルフィルタによるガウス性ノイズの除去」, 日本写真学会誌, vol.73, no.2, pp.113-122, Mar. 2010.
- [9] C. Liu, R. Szeliski, S. B. Kang, C. L. Zitnick and W. T. Freeman, "Automatic estimation and removal of noise from single image", IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell., vol.30, no.2, pp.299-314, Feb. 2008.
- [10] 原 崇之, 関 海克:「局所ノイズ-テクスチャ分離推定と平均色制約に基づく

くカラーCCD 撮影画像のノイズ低減」, 信学技報, vol.109, no.292, pp.39-44, Nov. 2009.

- [11] "Methods of measurement for the power consumption of audio, video and related Equipment", International Electrotechnical Commission, IEC 62087, 2008.

第 5 章 PDP のアドレス駆動電力削減

5.1 はじめに

第 5 章, 第 6 章では, 視覚マスキングを利用して電子ディスプレイの電力を削減する手法を提案しその効果を確認する。PDP の開発では大型, 高精細, 高フレームレート化の検討が進んでいる。4K, 8K の PDP が試作され[1]-[3], 120Hz 駆動の駆動方式が提案されている [4]。高フレームレート化については, UHDTV(Ultra High-Definition Television)に対する 120 Hz の規格が整いつつある [5]。これらの要求条件は, PDP における寄生容量の増加とアドレスデータの高速度化を促し, アドレス駆動回路での消費電力を増大させ, PDP 全体の消費電力の中で大きな割合を占めることになる。また, アドレス駆動 IC のコストを高める要因になるとともに, IC の許容損失を超えて PDP を駆動できなくなる可能性も生じ, アドレス駆動電力の削減は重要な研究項目となっている。

5.2 先行研究

アドレス駆動電力削減のこれまでの取り組みとしては, LC 共振を利用した電力回収回路をアドレス駆動回路に付加する方法がある [6],[7]。この方法では, 走査線数が増える, あるいはフレームレートが上昇すると, LC 共振回路の Q 値が下がり, 回収効率が悪くなるという課題がある。また, 隣接したアドレス電極へ印加するアドレスパルスの立上りと立下りのタイミングをずらすことで回路消費電力を抑制する手法が提案されている [8],[9]。しかし, この方式では走査線数が増えたり, フレームレートが高くなってアドレス時間が短くなるとアドレスパルス幅が小さくなり, 確実なアドレス動作が制限されてしまうという課題がある。また, 画像の平均輝度に応じて, アドレスデータの一部をカットすることで, 寄生容量に起因するアドレス回路の電力損失を低減する提案がされているが, アドレスデータをカットすることで輝度変化がゆるやかな領域で顕著

な画質劣化が生じてしまう課題がある[10]。

そこで、視覚マスキング効果を利用することにより画質の劣化を最小限に抑えながら、アドレス駆動電力を大幅に削減できる手法を提案する。本手法はアドレスデータを平滑化することで電力を削減する方式である。視覚マスキング効果により、平滑化に伴い生じる画素値の誤差（以降平滑化誤差と称する）が背景の画像でマスキングされ、誤差として視認されにくい領域を抽出し、この領域でのみアドレスデータの平滑化を行う。このような処理を行うことで、平滑化誤差が発生しても、視覚的に画質を維持しながらアドレス駆動電力を減らすことが可能となる。発生する具体的な平滑化誤差については 5.4 節で詳述する。平滑化誤差が視認されにくい領域の抽出では、視覚マスキング効果と密接に関係する画像特徴量である、画像の空間周波数特性、コントラストを簡便に検出できる類似輝度セグメントを用いた手法を適用して、精度の高い抽出を行う。主観評価実験により、提案手法でアドレスデータを平滑化した画像の画質が保たれていることを確認する。

5.3 アドレス駆動電力と駆動方法

5.3.1 PDP の構造とアドレス駆動回路の消費電力

図 5.1 に PDP の構造を示す。発光の最小単位を表示セルと呼称する。表示セルはカラーパネルのサブピクセルに相当する。電極は、アドレス電極とこれと直交する維持電極とで構成されている。データの書き込みは、アドレスパルス addresses 電極に印加して、アドレス電極と維持電極間にアドレス放電を起こさせ、表示セル内に壁電荷を形成させることで行う。壁電荷が形成された表示セルのみが、後から印加される維持パルスで持続放電を起こし表示のための発光を行う。表示発光は ON か OFF の 2 通りとなるので、中間調を表示するためにビットプレーン表示方式を用いる。

PDP の負荷は容量性となり、アドレスパルスが ON, OFF するときに負荷容量を充放電し、電気回路で電力が消費される。図 5.2 に示すように、アドレス

電極に関連する寄生容量には、アドレス電極間の寄生容量(C_{aa})とアドレス電極と維持電極間の寄生容量 (C_{ab}) がある。アドレス駆動回路での消費電力は、ほとんどがこの寄生容量による電力損失で費やされる。アドレス駆動回路での電力損失はアドレスパルスの印加パターンで大きく変わり、図 5.3 のような格子状に ON 状態になるパターンが最大となる。1 秒間に、隣接表示セル間のアドレスデータのパターンが変化する回数を隣接アドレス電極間の状態遷移周波数(f_A)とし、また 1 秒間にアドレスデータが遷移する回数をアドレスデータの遷移周波数 (f_B) とすると、アドレス駆動回路での電力損失 P は(5.1)式で表される。

$$P \propto (f_A C_{aa} + f_B C_{ab}) V_a^2 \quad (5.1)$$

ここで、 V_a はアドレス駆動電圧である。

表 5.1 の諸元を有する 50 インチ PDP を例にアドレス駆動回路での電力損失について考察する。点灯パターンが図 5.3 の格子状の場合におけるアドレス駆動回路での電力損失 $P_{lattice}$ は次式となる[11]。

$$P_{lattice} = N_{ad} (2C_{aa} + C_{ab}) V_a^2 f_{av} \quad (5.2)$$

ここで N_{ad} はアドレス電極の総本数、 f_{av} はアドレスデータの平均遷移周波数である。図 5.3 の点灯パターンにおける f_{av} は次式で表される。

$$f_{av} = \frac{(N_s/2) \times N_{SF}}{T_{frame}} \quad (5.3)$$

ここで N_s は走査線数、 T_{frame} は 1TV フィールドを示し 16.67ms である。 N_{SF} は次節で説明するサブフィールドの数である。この式から表 5.1 の 50 インチ PDP のアドレス駆動回路での電力損失 $P_{lattice}$ はおよそ 400W となる。通常、図 5.3 のような点灯パターンになることはないが、アドレス駆動回路での電力損失が

表示画像によって大きくなるのがわかる。自然画像では、50 インチ PDP の全体の消費電力を 500W とすると[12]、アドレス駆動回路での電力損失はその13%程度の 65W 前後となる[10],[13]-[15]。

アドレスデータの ON, OFF の遷移回数が多くなると、実効的駆動周波数が高くなり、寄生容量に起因するアドレス駆動回路での無効電力が増加する。フルスペックのスーパーハイビジョン[5]では、ハイビジョンと比較して走査線本数が4倍、フレームレートが2倍になり、実行的駆動周波数が8倍に増加してしまう。この場合、PDP の消費電力が問題となるばかりでなく、アドレス駆動回路のドライバICの許容損失を超えてしまい、ICが破壊されることも考えられる。アドレス電極がパネル中央で分離しているデュアルスキャン方式の85インチスーパーハイビジョンPDPのアドレス駆動回路の消費電力について、85インチハイビジョンPDP[16]を基に考察する。パネル容量がハイビジョンPDPの3.5倍になると想定すると、アドレス駆動回路の消費電力が4kWを超え、アドレスドライバICの1出力当たりの電力が46mW程度になることが予測され、一般的なアドレスドライバICの許容損失である30mW[17]を超えてしまう。許容損失以内に抑えるには60%程度に削減する必要がある。この電力を削減するには、アドレスデータを平滑化してアドレスデータの遷移回数と隣接アドレスデータ間の状態遷移の回数を減らすことが有効である。図5.4はアドレスデータの平滑化を行った例を示した図である。n番目のビットプレーンの着色した部分のデータをゼロに平滑化している。一般に低いビットになるほど遷移回数が増えるという特性を有するので[10]、低いビットのアドレスデータの遷移回数およびアドレスデータの隣接アドレス間の状態の遷移回数を減らすことが、アドレス駆動電力を削減する上で重要となる。

表 5.1 50 インチ PDP の諸元

画面サイズ	50 インチ
画素数	
縦	768
横	1366×3
電極間容量	
C_{aa}	41 pF
C_{ab}	53 pF
アドレス駆動電圧	60 V
サブフィールド数	8

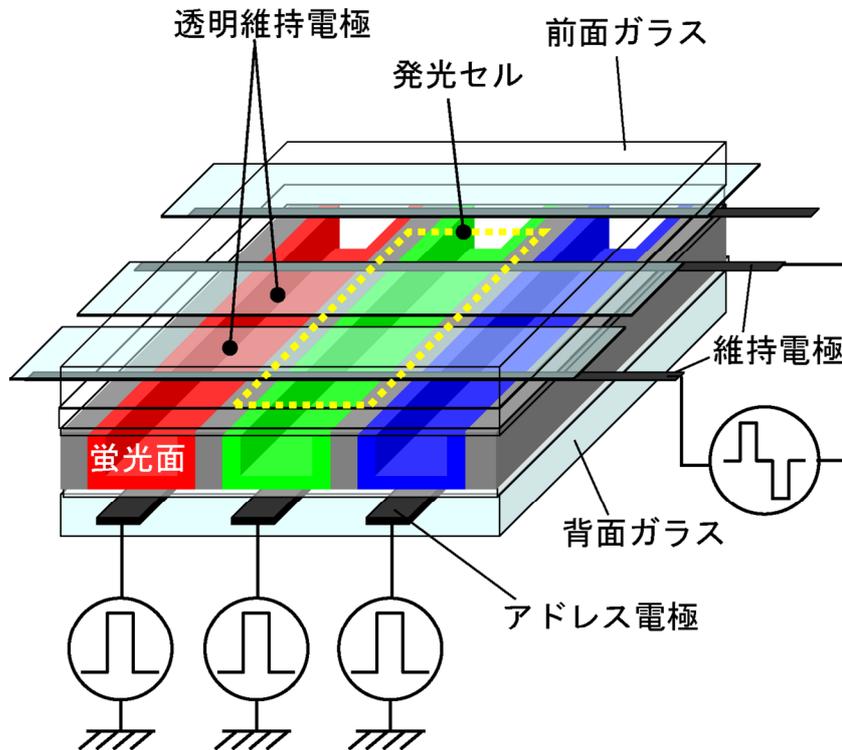


図 5.1 PDP の構造

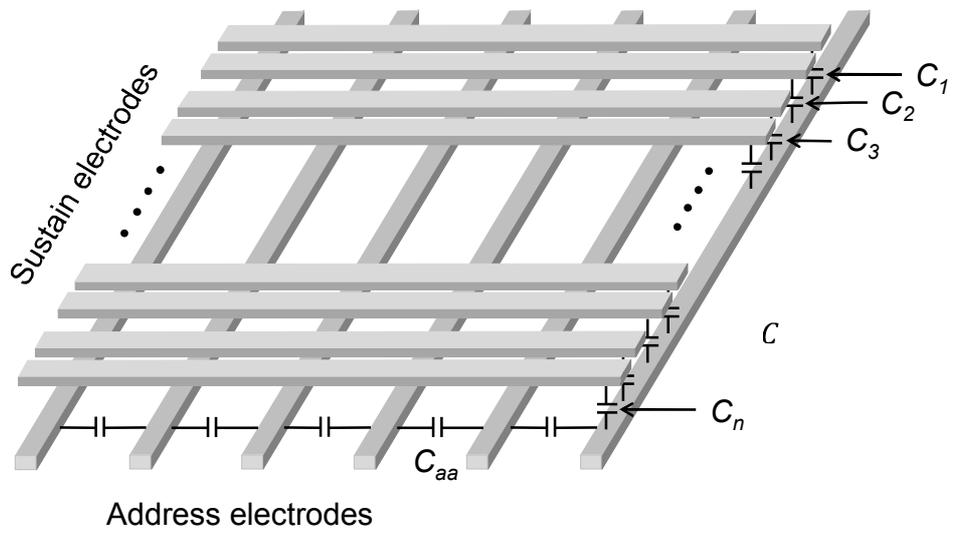


図 5.2 アドレス電極間およびアドレス-維持電極間の寄生容量

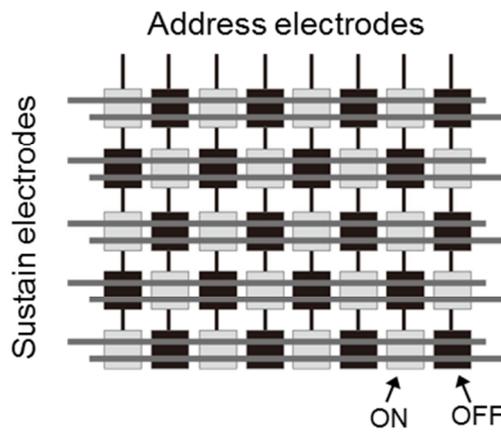


図 5.3 電力損失が最大となる点灯パターン

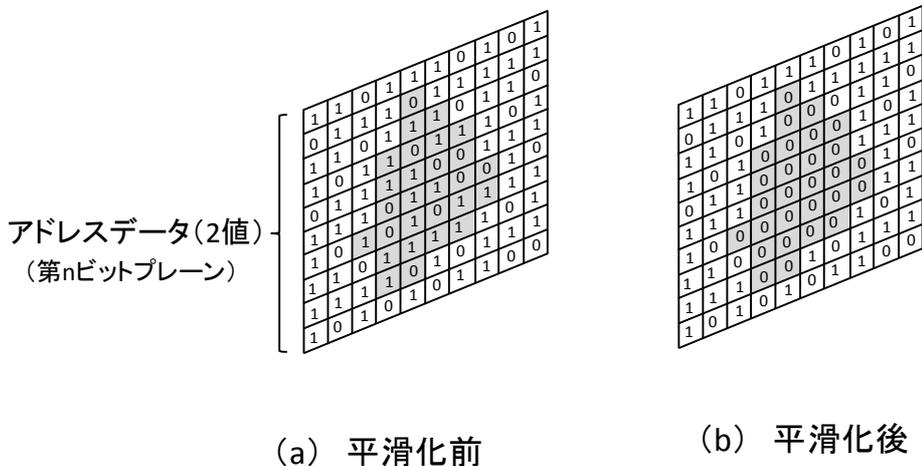


図 5.4 アドレスデータ平滑化の例

5.3.2 中間調表示方式

PDP は中間調を表現するためにアドレス・表示期間分離型サブフィールド法 (Address Display Period Separated Sub-field Method, ADS 法) と呼称するビットプレーン方式が主に使われている[18]。本論文では以下に説明する最も基本的な ADS 法を対象とする。1 フィールドを複数のサブフィールド(SF:Sub-field)に分割し、各サブフィールドでビットのべき乗の重みをもった回数で発光させ、すべてのサブフィールドの発光を目の時間的積分効果で合成することで中間調を得ている。各サブフィールドは、図 5.5 に示すように、1 ラインごとに発光画素を選択するアドレス期間と、2 のべき乗の重みで発光を行う表示期間に分かれている。本論文では入力画像を RGB 各 8 ビットのカラー画像とし、8 つのサブフィールドに分割して PDP を駆動するものとする。最低ビットの発光時間を t とすると、各サブフィールドの発光時間は $t, 2t, 4t, 8t, 16t, 32t, 64t, 128t$ となる。最低ビットのサブフィールドを第 1 サブフィールド、最高ビットのサブフィールドを第 8 サブフィールドとする。

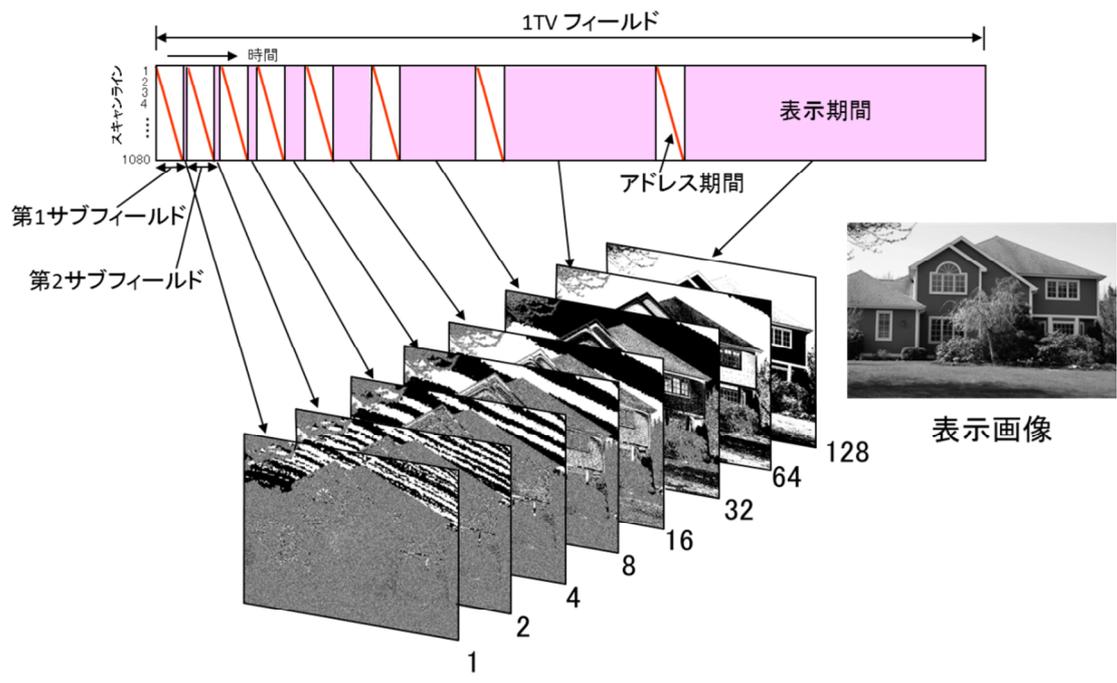


図 5.5 サブフィールドを用いた中間調表示方式 (ADS 法)

5.4 アドレスデータの平滑化による電力削減

アドレス駆動回路の電力削減を行うには、アドレスデータを平滑化してアドレスデータの遷移回数を削減する方法が効果的である。図 5.6 は、第 1 サブフィールドから第 8 サブフィールドで表示される 2 値画像が足し合わされて中間調画像が形成される様子を示した図である。図では同一の輝度で表示しているが実際の輝度は高位ビットから下がるにつれて 1/2 ずつ小さくなっている。PDP のアドレスデータは各サブフィールドの 2 値画像を表示するデータであり、アドレスデータを平滑化ということは 2 値画像を平滑化することとなる。図 5.6 からわかるように、PDP の入力信号をビットプレーン分解すると、低位ビットの 2 値画像でノイズのような細かく変動する領域が広く存在するという特徴がある。例えば、図 5.7(a)のように第 1 サブフィールドの細かく変動する領域を平滑化（ここではアドレスデータをすべて 1 にする）した場合、最終的に図 5.7(b)で示す反転させたデータが表示画像の平滑化誤差となる。図 5.8 はこの反

転したデータのパワースペクトルを計算し、水平方向のパワースペクトルを表示したものである。ランダムノイズの 1 種のインパルスノイズの特徴である、すべての周波数でほぼ一定の強度を有する空間周波数特性と似た特性となっている。

これまではモノクローム画像を扱ってきたが、カラー画像における平滑化で生じる平滑化誤差について考察する。図 5.9 は第 1 サブフィールドのアドレスデータを平滑化した例である。この例では、列方向の 1 画素ごとに ON, OFF を繰り返すデータとしている。平滑化により変更されたデータは、出力画像で平滑化誤差となってあらわれ画質劣化が生じる。図 5.10 に第 5 サブフィールドのデータを平滑化した場合に生じる平滑化誤差の例を示す。輝度の変化が小さい領域では偽輪郭状のノイズ (平滑画像 B) となり、輝度変化が大きい領域ではインパルス状のノイズ (平滑画像 A) となる。本論文の提案手法では、空間周波数が高い領域に対して平滑化を行うので、平滑化誤差としてインパルス状ノイズを考察の対象とする。どのサブフィールドのどの領域で平滑化を行うか最適な条件を見つけることが、画質を保ちながら最大限の電力削減率を得るために重要となる。

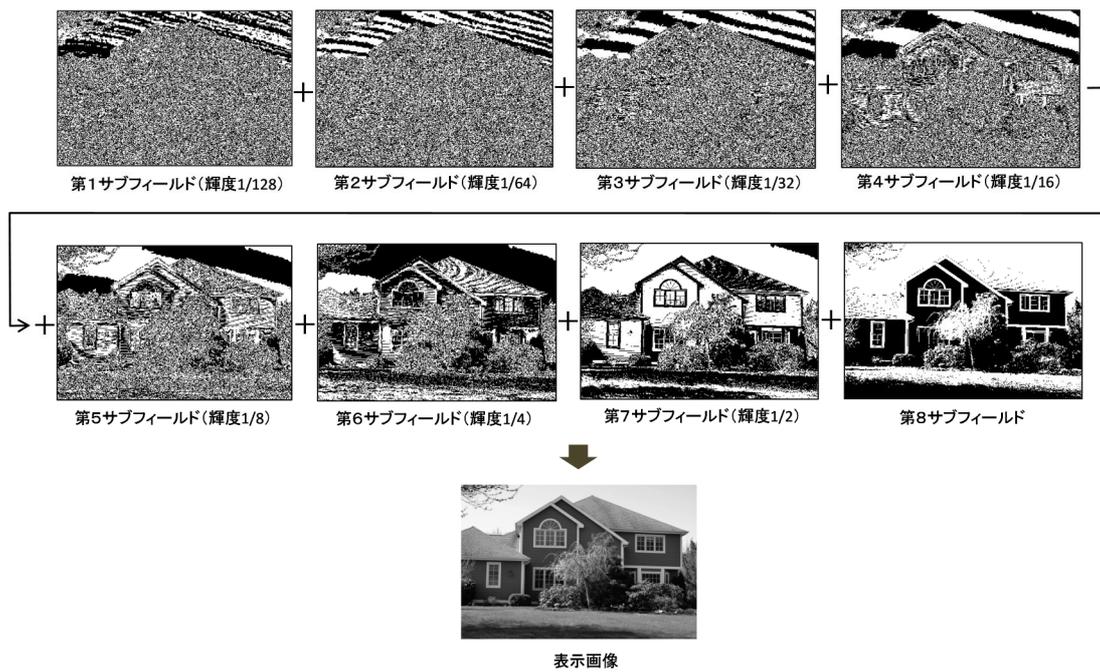


図 5.6 各ビットのサブフィールド画像と表示画像

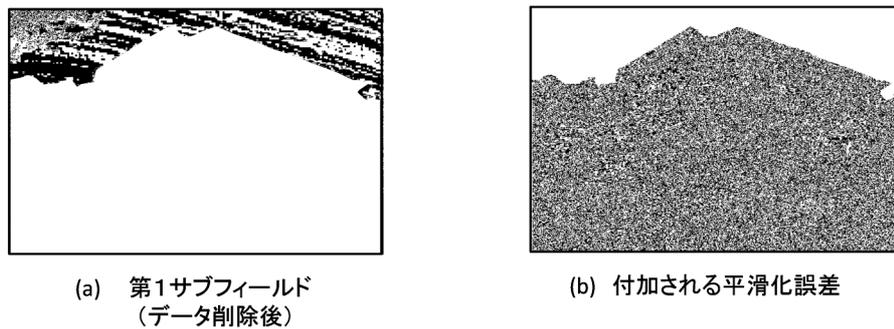


図5.7 アドレスデータ平滑化画像と生じる平滑化誤差

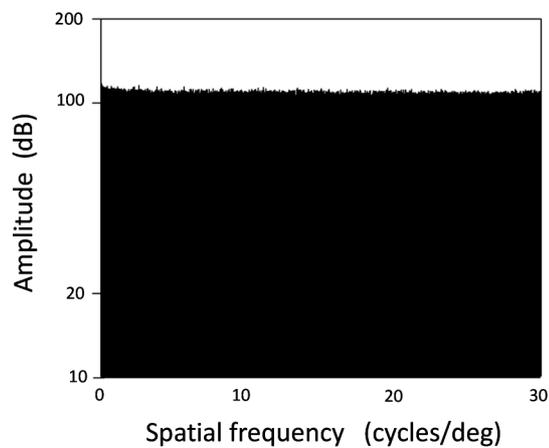


図 5.8 反転画像の空間周波数特性

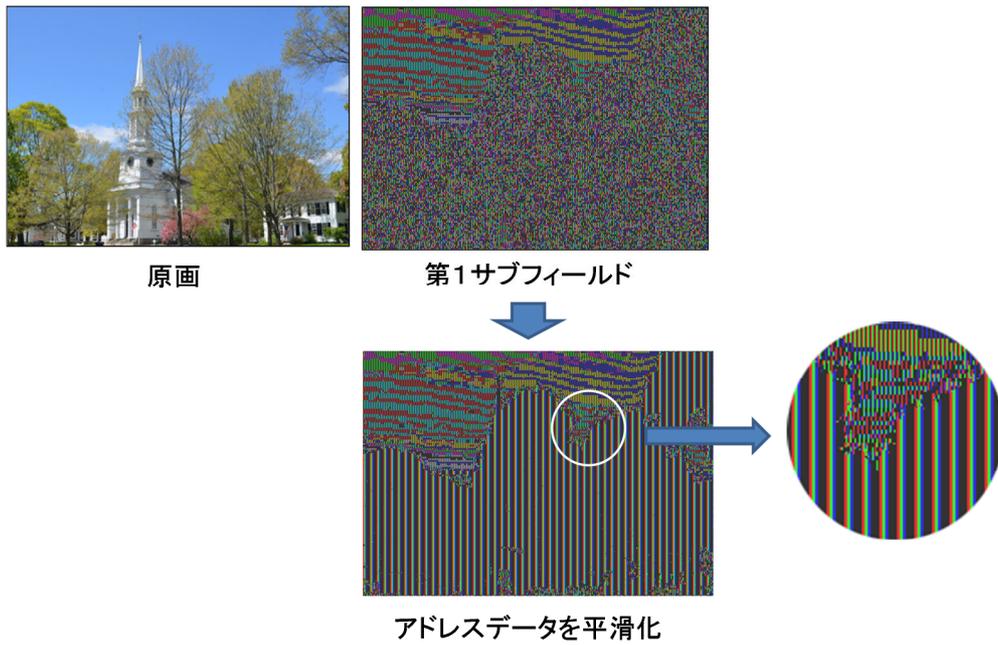


図 5.9 カラー画像におけるアドレスデータ平滑化の例

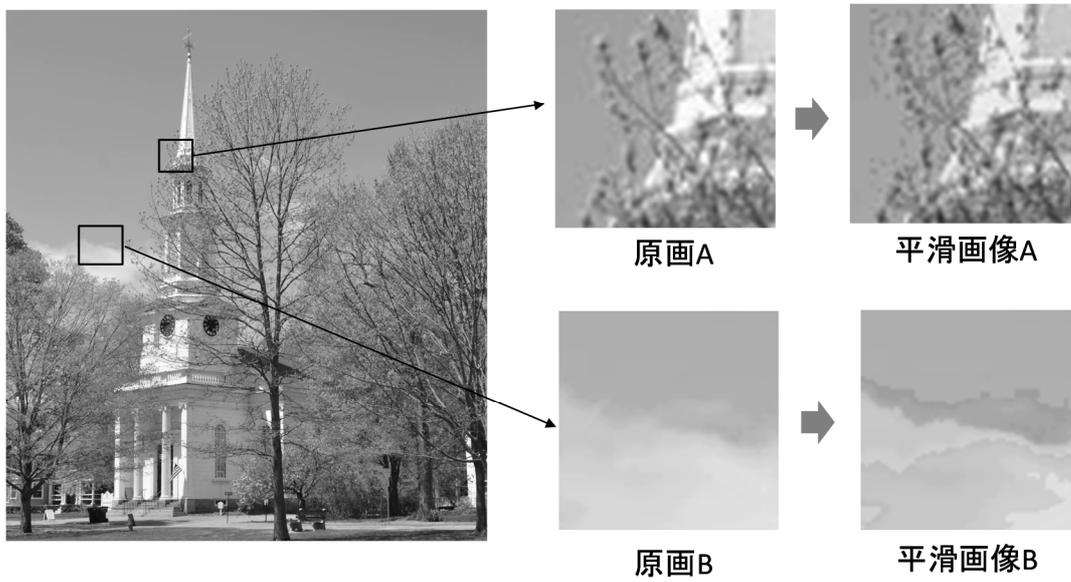


図 5.10 第5サブフィールドのデータ平滑化により生じる平滑化誤差

5.5 視覚マスキングを用いたアドレスデータ平滑化領域の選択

平滑化誤差に対して視覚マスキング効果を有する領域のみで平滑化を行うことにより、平滑化誤差を視認されにくくすることが可能である。第 3 章で述べた視覚マスキング効果の定量的評価手法を用いて平滑化領域を選択する。図 5.11 は平滑化領域選択の手順を示した図である。図 5.11 では、第 3 サブフィールド～第 5 サブフィールドのアドレスデータを平滑化する例を示した。

各サブフィールドにおけるアドレスデータの平滑化で生じる平滑化誤差を特定し、この平滑化誤差を基に視覚マスキングのシミュレーションを行う。シミュレーションで得られた平均画素値－しきい値テーブルを用いて、入力画像を類似輝度セグメントに変換し、セグメントの大きさの半径が 3 画素以下の領域を平滑化誤差が視認されない領域として選択する。平滑化領域を選択する詳細手順を次節以降で説明する。

5.5.1 視覚マスキングシミュレーションの実施

(1) 平滑化誤差の特定

平滑化誤差の大きさはアドレスデータを平滑化するサブフィールドで定まり、第 1 サブフィールドから ± 1 , ± 2 , ± 4 , ± 8 , ± 16 , ± 32 , ± 64 , ± 128 の画素値となる。

(2) シミュレーションによる平均画素値－しきい値テーブルの取得

各サブフィールドで特定される平滑化誤差を視覚マスキング評価画像に付加し、それらの平滑化誤差が視認されない 3 つの因子条件を求め、この条件を基に平均画素値－しきい値テーブルを得る。平均画素値－しきい値テーブルはサブフィールドごとに得られる。表 5.2 に、第 3～第 5 サブフィールドのデータ例を示す。生じる平滑化誤差が特定されているので、シミュレーションによる平均画素値－しきい値テーブルの取得は一度行なっておけば良い。

表 5.2 3種類の平滑化誤差を基に導出した平均画素値—しきい値テーブル

平均画素値	しきい値		
	第3サブフィールド 誤差：±4	第4サブフィールド 誤差：±8	第5サブフィールド 誤差：±16
10	14	40	40
20	12	32	50
30	6	24	52
40	6	22	60
50	4	18	54
60	4	20	50
70	4	20	52
80	4	14	52
90	4	12	48
100	4	10	48
110	4	10	42
120	6	12	40
130	6	12	40
140	6	12	40
150	8	14	38
160	8	14	38
170	8	16	36
180	10	16	32
190	10	18	32
200	10	20	30
210	10	20	30
220	10	20	30
230	10	20	30

5.5.2 平滑化領域の決定

シミュレーションで得られた平均画素値－しきい値テーブルを用いて、自然画像を類似輝度セグメントに変換し、セグメントの最大内接円の大きさを調べて、半径が 3 画素以下の領域を平滑化領域とする。視覚マスキング評価画像の平均画素値は 10, 20, 30 と間隔を 10 としているため、この値を代表値として、自然画像を類似輝度セグメントに変換する場合は、局所的な平均画素値に最も近い代表値を用いる。以下、各サブフィールドに対して同様な処理を行い、各サブフィールドでの平滑化領域を決定する。高ビットになるほど、演算に用いる平滑化誤差の大きさが大きくなり、視覚マスキングで隠せる領域が小さくなり平滑化領域が縮小する。

5.6 アドレスデータの実際の平滑化手法

画質を維持しながら大きな電力削減効果を得るために 2 つの平滑化手法を用いた。ひとつは、アドレスデータの平滑化を行うと決定した領域で、すべてのアドレスデータを ON または OFF にする一括平滑化である。電力削減効果が最も大きくなるが、平滑化誤差の発生も顕著になりがちである。したがって、この手法を適用できるケースは限られてくる。この手法において、すべて ON にする処理では画像の輝度が高くなり、すべて OFF では輝度が低くなる。そこで、縦のデータラインの 1 列ごとに、すべて ON とすべて OFF の処理を交互に行い輝度変化を最小限とした。もうひとつの方法がモルフォロジフィルタリングを用いる方法である[19],[20]。図 5.12 に示すオープニング処理とクロージング処理を組み合わせた手法である。オープニング処理では収縮の次に膨張を行うことにより、孤立した ON データが OFF になって平滑化され、クロージング処理では逆の処理で孤立した OFF データが ON になって平滑化される。この手法は、一括平滑化に比べてアドレス駆動電力の削減効果は小さいが、平滑化誤差の発生が少ないのでより広く適用することができる。モルフォロジ平滑化においても、輝度変化をなるべく小さくするためにオープニング処理とクロージング処

理を1列ごとに交互に行った。低いビットのサブフィールドでは一括平滑化の手法を用い、高いビットのサブフィールドではモルフォロジ平滑化を用いる。このように、2つの平滑法をサブフィールドで使い分けることで、大きな電力削減と画質の保持を両立させることが可能になる。図 5.13 に、一括平滑化とモルフォロジ平滑化の違いを示すために、同一画像の第 3 サブフィールドのアドレスデータに対して両平滑化を行った例を示す。

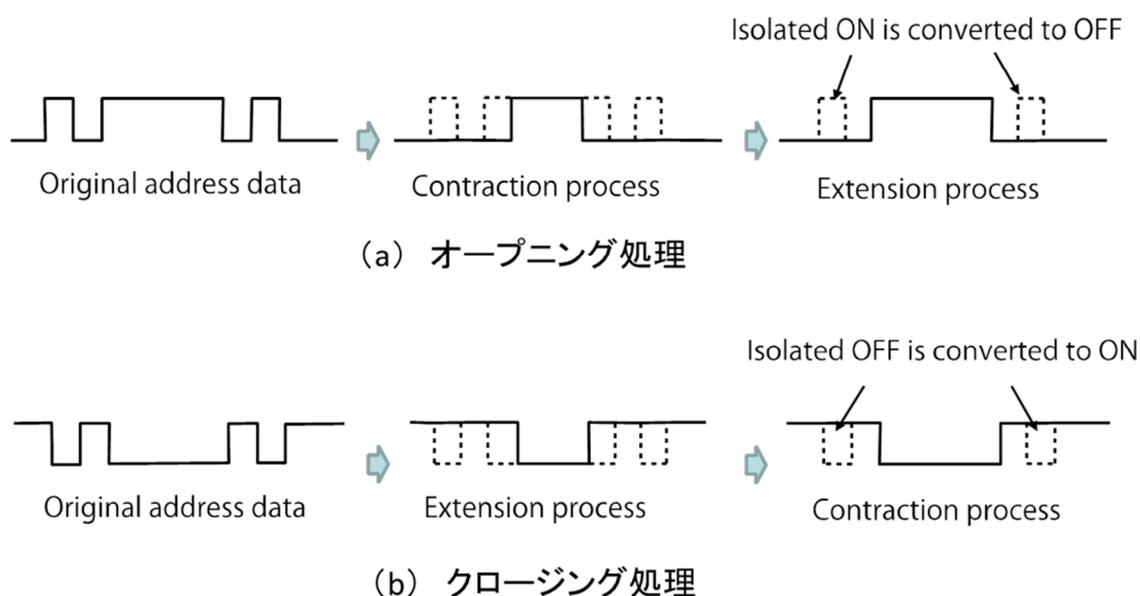
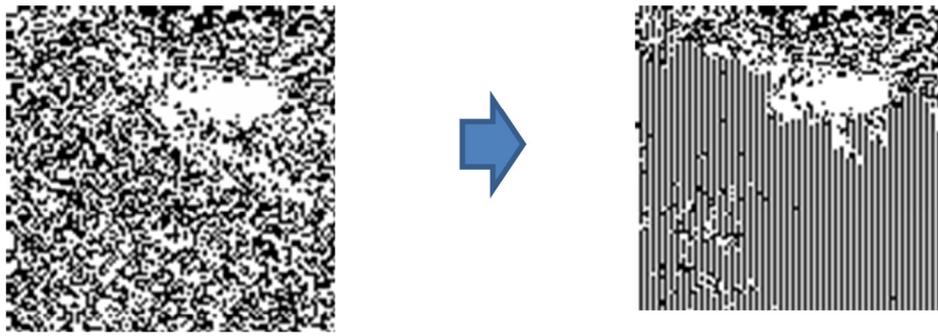


図 5.12 モルフォロジ平滑化における処理方式



(a) 一括平滑化



(b) モルフォロジ平滑化

図 5.13 2 種類のアドレスデータ平滑化例

5.7 カラー画像に対する提案手法のフレームワーク

図 5.14 にカラー画像に対する平滑化領域を抽出するフレームワークを示す。まず、入力カラー画像をグレースケール画像に変換後、シミュレーションで得られた平均画素値-しきい値テーブルを用いて類似輝度セグメントに変換する。類似輝度セグメントの最大内接円の半径が 3 画素以下となる領域を平滑化領域とする。求められた平滑化領域は RGB 3 色共通の領域とし、アドレスデータを一括平滑化もしくはモルフォロジ平滑化を行い、PDP に出力する。これらの処

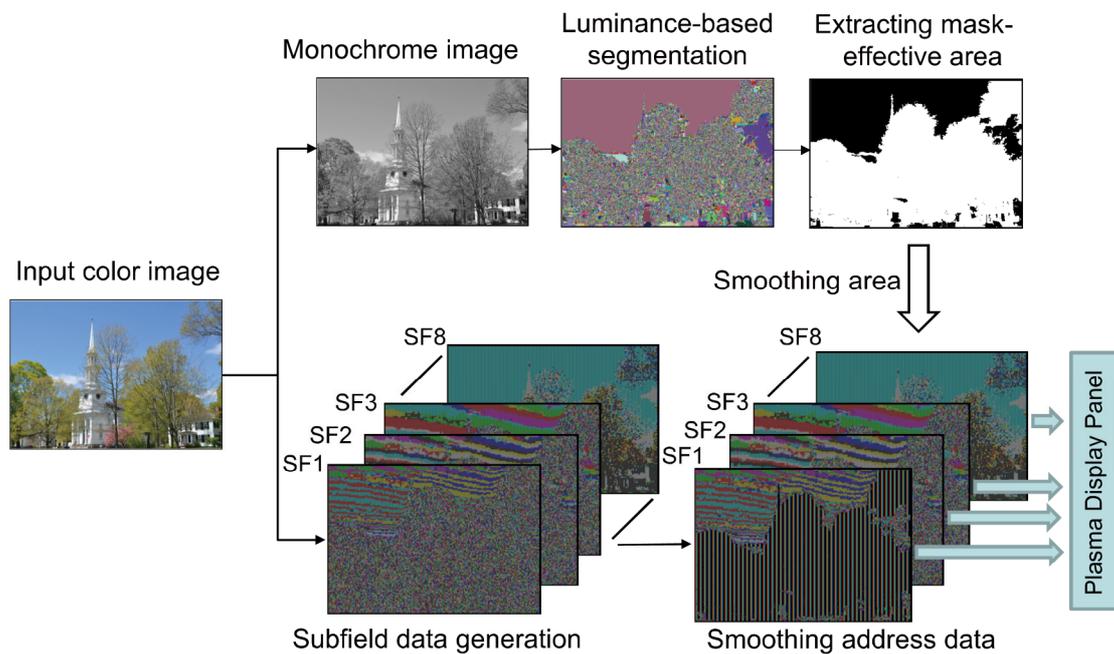


図 5.14 カラー画像に対する平滑化領域抽出の処理手順

理をサブフィールドごとに行う。サブフィールドで定まる平滑化誤差に対応する平均画素値－しきい値テーブルを用いて類似輝度セグメント変換を行う。

5.8 評価画像

第 5 章および第 6 章の実験で用いる評価画像として、IEC 62087 標準動画像からキャプチャした 241 枚の静止画像 (カラー, 640×480 画素) を準備した。図 5.15 にその一部を示す。以降, 本論文ではこの画像を IEC 評価画像と表記する。IEC 62087 標準動画像は, IEC (International Electrotechnical Commission) がテレビ消費電力測定規格を発行するにあたって, 消費電力測定用に作成した標準動画像である[21]。200 時間以上のゴールデンアワーの放送を 5 カ国から集め, その内容の平均画像レベル (APL: Average picture level) を測定し, 図 5.16 に示すような目標とする APL のヒストグラム (Master) を決め, このヒストグラムに合うように 10 分間の標準動画像 (Test video) を編集したものであ

る。なお、APL の測定ではプレガンマ付きの画像を用いている。図 5.17 に 241 枚の IEC 評価画像の APL を示す。



図 5.15 IEC 評価画像例

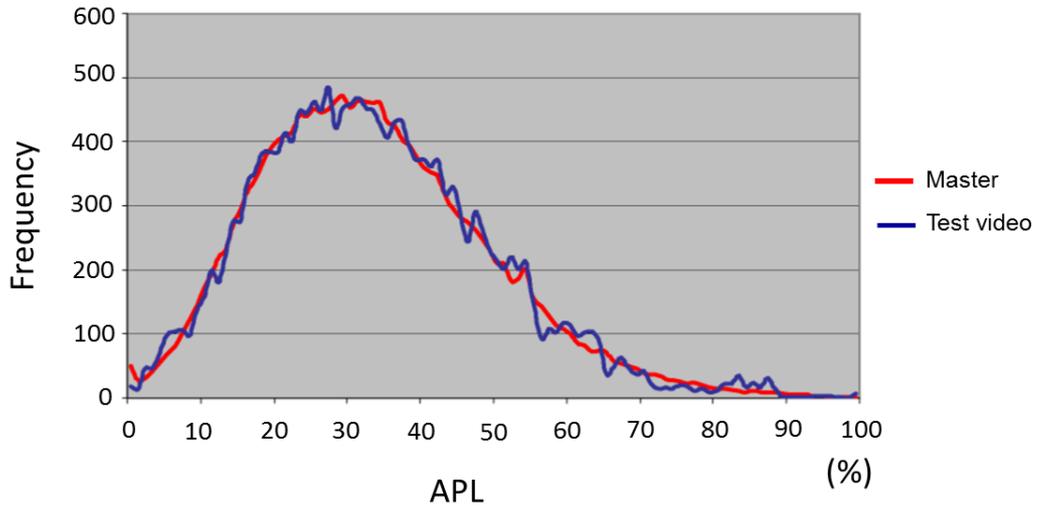


図 5.16 IEC 62087 標準動画の APL ヒストグラム

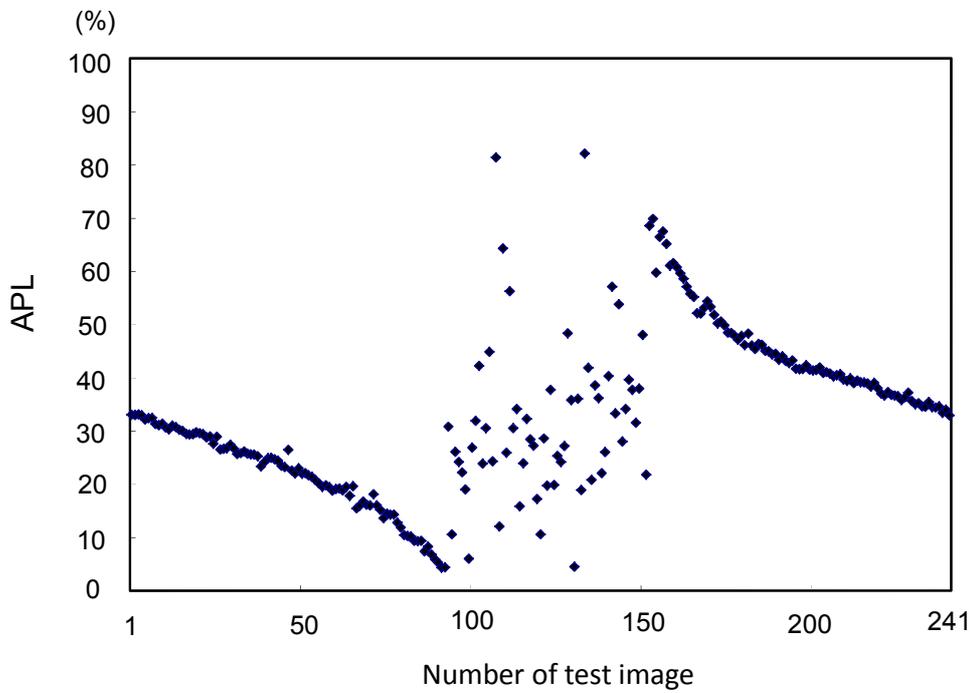


図 5.17 IEC 評価画像の APL

5.9 実験

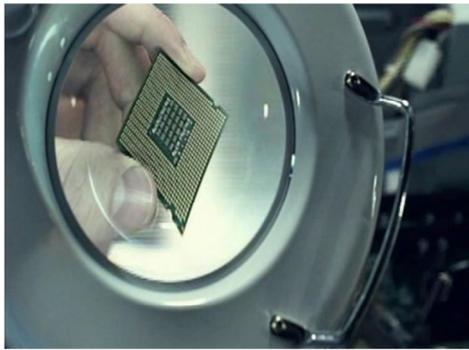
自然画像に提案手法を適応した場合のアドレス駆動回路の消費電力削減率を見積もった。また、アドレスデータ平滑化後の画質を確認するための主観評価実験を行った。IEC 評価画像から無作為に選んだ 10 枚のカラー画像 (640×480 画素) による画質に関する事前検討の結果から、第 1～第 3 サブフィールドで一括平滑化を行い、第 4, 第 5 サブフィールドでモルフォロジ平滑化を行うこととした。また、第 6 サブフィールド以上の上位ビットではほとんどの画像で平滑化の領域がなくなることから、第 6～第 8 サブフィールドでは平滑化を行わないこととした。

5.9.1 視覚マスキングシミュレーションによる平均画素値－しきい値テーブルの取得

第 1～第 5 サブフィールドで平滑化を行うので、 ± 1 , ± 2 , ± 4 , ± 8 , ± 16 の平滑化誤差に対する視覚マスキングシミュレーションを行い平均画素値－しきい値テーブルを取得する。ここで得られたテーブルを用いて後述する平滑化領域の選択を行う。

5.9.2 平滑化領域選択の例

IEC 評価画像に対して、平均画素値－しきい値テーブルを用いて平滑化領域を抽出した例を示す。図 5.18 は、第 1 サブフィールドから第 5 サブフィールドまでのアドレスデータを類似輝度セグメントに変換し、平滑化誤差が視認されないと判定された領域を示した図である。高ビットになるほど、選択領域が狭くなり、第 5 サブフィールドでは視覚マスキング効果が高いと考えられる中央の部品の領域のみが平滑化領域となった。



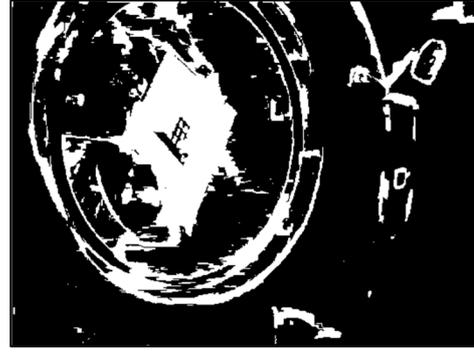
Original



SF1



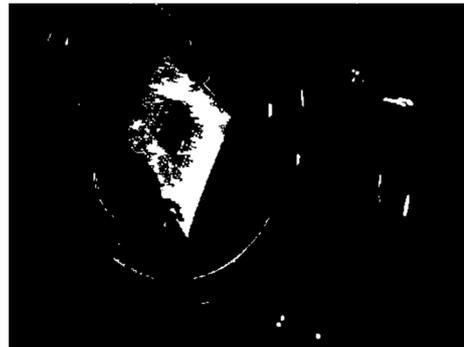
SF2



SF3



SF4



SF5

図 5.18 各サブフィールドにおける平滑化誤差が視認されないと判定された領域（白色）

5.9.3 アドレス電力損失削減率の推定

241 枚の IEC 評価画像に提案手法を適用して、アドレス回路における消費電力の削減率を推定した。アドレス回路における電力損失はアドレスデータの遷移回数および、隣接アドレスデータ間の状態遷移回数に比例する。アドレス電極と維持電極間の寄生容量 (C_{ab}) に起因する電力損失の削減率と、アドレス電極間の寄生容量 (C_{aa}) に起因する電力損失の削減率を推定するために、それぞれ、アドレスデータ平滑化後のアドレスデータの遷移回数の削減率 R_{ab} と隣接アドレスデータ間の状態遷移回数の削減率 R_{aa} を求めた。それぞれの削減率は次式のように表される。

$$R_{ab} = \frac{NT_{original} - NT_{smooth}}{NT_{original}} \quad (5.1)$$

ここで、 $NT_{original}$ は原画像のアドレスデータの遷移回数、 NT_{smooth} は平滑化後のアドレスデータの遷移回数である。

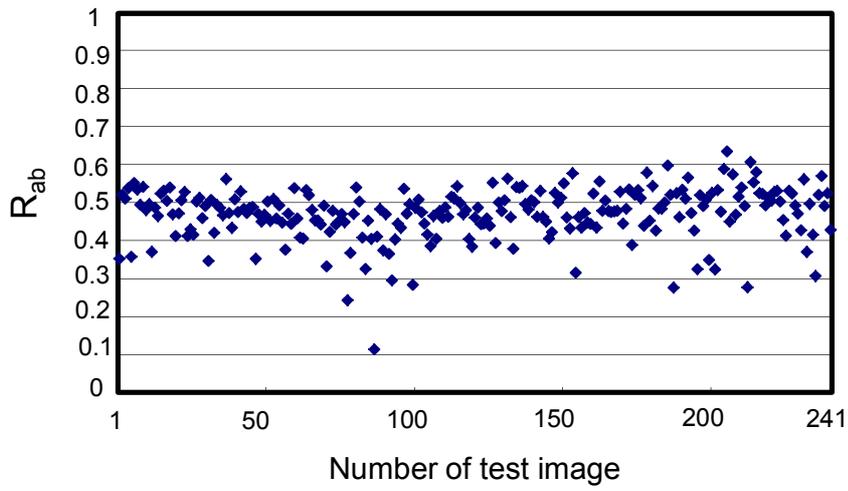
$$R_{aa} = \frac{ND_{original} - ND_{smooth}}{ND_{original}} \quad (5.2)$$

ここで、 $ND_{original}$ は原画像の隣接アドレスデータの状態遷移回数、 ND_{smooth} は平滑化後の隣接アドレスデータの状態遷移回数である。

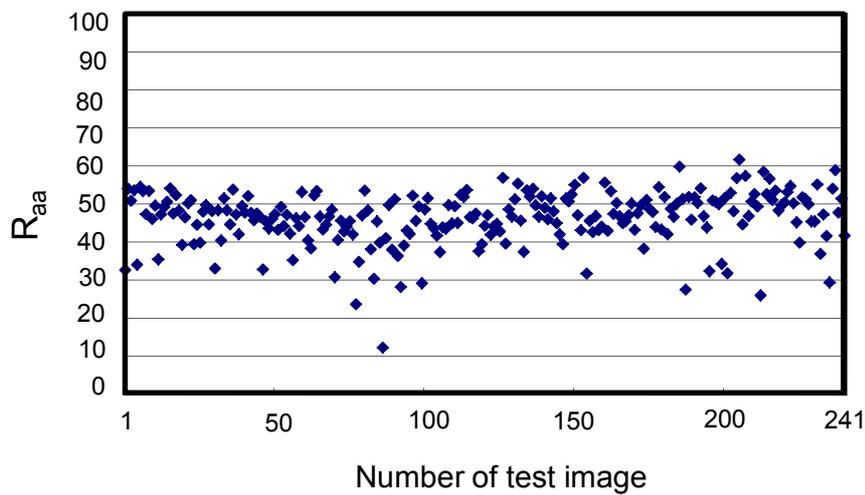
図 5.19 に 2 つの削減率の計算結果を示す。図から、およそ 50% のアドレス電力損失を削減できると推測される。図 5.20 は、アドレス電力損失削減率の推定値が高い場合と低い場合の画像例である。図 5.20(a) の削減率が高い画像は、草原や草地など画面全体が複雑なパターンとなっており、視覚マスキング効果が期待できる画像であった。これに対して、図 5.20(b) の低い画像は画面全体が空で、その中の一部分に構造物があるような全体に一様な画像であった。このような画像は平滑化前においても遷移回数が少ない画像であり、アドレス電力損失が元々低い画像であると言える。図 5.21 は、アドレスデータの平滑化前後の 1 フィールド期間のアドレスデータの総遷移回数をプロットした図である。

アドレスデータを平滑化することで、総遷移回数が平準化されていることがわかる。この結果は、ピーク電力の抑制に繋がり、アドレス駆動 IC への負担を軽減する効果が期待できる。図 5.22 は、今回用いた IEC 評価画像のアドレスデータの遷移回数削減率と APL の相関図である。はっきりした相関はないが、APL が低い画像ではアドレスデータの遷移回数の削減率が低くなる傾向があることがわかる。輝度が低い画像ではウェーバーの法則により視覚マスクング効果が低くなることが理由と考えられる。

ここで得られた 50%のアドレス回路における電力損失の削減率を、5.3 節で考察に用いた 50 インチ PDP に適用してみるとおよそ 33W の削減が期待できる。提案手法の信号処理に要する電力は、PDP の画像表示用 LSI の電力が 1W 程度であることを考慮すると、削減できる電力損失と比較して無視できるレベルであることがわかる[22]。また、85 インチスーパーハイビジョン PDP に適用した場合、アドレスドライバ IC の 1 出力当りの電力が許容損失である 30mW 以下に抑えられることが期待できる。



(a) アドレスデータの遷移回数削減率



(b) 隣接アドレスデータ間の状態遷移回数削減率

図 5.19 アドレスデータ平滑化後のアドレスデータの遷移回数の削減率と隣接アドレスデータ間の状態遷移回数の削減率



No.206



No.214

(a) アドレスデータ遷移回数の削減率が 60%以上の画像例



No.188



No.213

(b) アドレスデータ遷移回数の削減率が 30%以下の画像例

図 5.20 アドレスデータ遷移回数の削減率が高い画像例と低い画像例

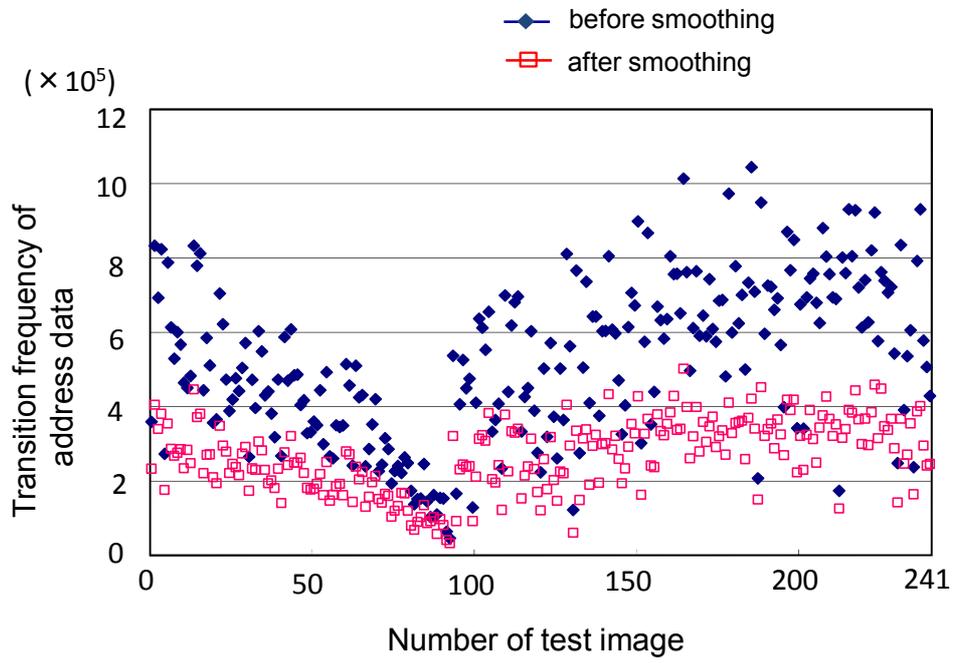


図 5.21 平滑化前後のアドレスデータの遷移回数

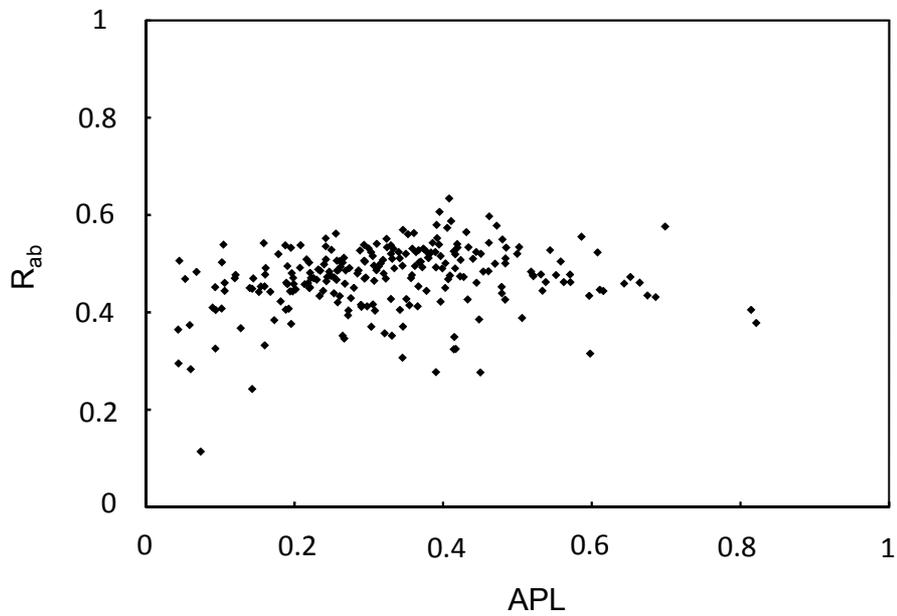


図 5.22 アドレスデータ遷移回数の削減率と APL の関係

5.9.4 主観評価実験

アドレスデータを平滑化した画像の画質を確認するために IEC 評価画像を用いて主観評価実験を行った。図 5.23 に用いた 6 枚の IEC 評価画像を示す。本実験の主たる目標は、提案手法でアドレスデータを平滑化した画像の画質を確認することであるが、これに加えて、平滑化領域の大きさを決定するパラメータである、視覚マスキングシミュレーションで平滑化誤差を想定した信号であるインパルスノイズの大きさを変えた場合の画質の確認を行った。表 5.3 に本実験で用いたサブフィールド毎のシミュレーション用平滑化誤差の大きさの組み合わせを示す。平滑化 A が提案手法による平滑化で、各サブフィールドを平滑化する際に生じる大きさの平滑化誤差をシミュレーション用平滑化誤差として用いている。平滑化 B と平滑化 C では、サブフィールドで生じる平滑化誤差より小さい値のシミュレーション用平滑化誤差を用いている。5.5 節で示したように、シミュレーション用平滑化誤差の大きさを平滑化領域が定まり、シミュレーション用平滑化誤差の値が小さいほど平滑化領域の面積が大きくなるという性質がある。このため、平滑化領域の大きさは、平滑化 A < 平滑化 B < 平滑化 C となる。アドレスデータの遷移回数の削減率は、平滑化 A < 平滑化 B < 平滑化 C となり、平滑化 C で電力削減率の見込みが最も大きくなる。図 5.24 に、6 枚の画像に対して 3 種類の平滑化を行った時のアドレスデータ遷移回数削減率を示した。サブフィールドで生じる平滑化誤差より小さい値のシミュレーション用平滑化誤差を用いて平滑化を行うと、平滑化により生じる平滑化誤差が視認されてしまう領域が発生する。図 5.25 に示す、各サブフィールドにおける平滑化 A と平滑化 C の平滑化領域例を用いてこの現象を説明する。図 5.25 で示すように平滑化 A における平滑化領域は上位のサブフィールドになるほど小さくなる。これは、視覚マスキングにより平滑化誤差が視認されなくなる領域が上位サブフィールドになるほど小さくなるためである。平滑化 C では、図 5.25 に示すように、平滑化領域が視覚マスキングで平滑化誤差が視認されなくなる領域よりも大きくなり、差分の領域で平滑化により生じる平滑化誤差が視認される。本実験では、このように平滑化誤差が視認される平滑化を行った場合に平滑化後の

画質どの程度になるかを主観評価で確認した。

主観評価実験では、アドレスデータの平滑化を行ったテスト画像が原画像と比べてどの程度劣化しているかを評定者に判断させる二重刺激劣化尺度法[23]を用いて行った。原画像を10秒間提示し、3秒間のグレー画像を挟んだ後、アドレスデータの平滑化を行ったテスト画像を10秒間提示した。表5.4に示す5段階劣化尺度により評価した。表5.5に本主観評価実験の諸元を示す。図5.26に主観評価実験の結果を示す。平滑化Aでは、50%の画像で、平均オピニオン評点(MOS, Mean Opinion Score)が検知限である4.5以上で、残りの画像もMOSが4以上と高い値を示し、入力画像の画質が維持されていることがわかった。平滑化Bでは、ほとんどのテスト画像が許容限(MOS=3.5)以上であったが、平滑化Cでは許容限以下のテスト画像が多くなった。主観評価実験の結果から、平滑化で生じる平滑化誤差を基に平滑化領域を決定する提案手法では、アドレスデータを平滑化しても画質が維持されていることがわかった。また、平滑化Bは、ほとんどのテスト画像が許容限(MOS=3.5)以上であったことから、原画像との一致度がそれほど要求されない分野において応用が可能な平滑化手法と考えられる。



図 5.23 主観評価に用いた IEC 評価画像

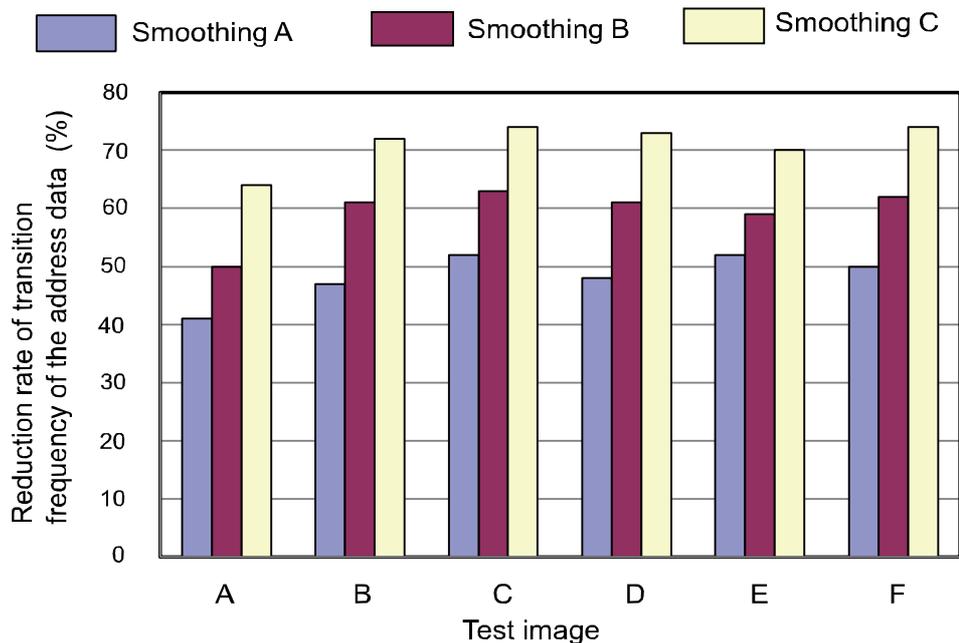


図 5.24 3種類の平滑化によるアドレスデータ遷移回数の削減率

表 5.3 平滑化領域の決定に用いた平滑化誤差の大きさ

	SF1	SF2	SF3	SF4	SF5	SF6	SF7	SF8
平滑化 A	±1	±2	±4	±8	±16	—	—	—
平滑化 B	±1	±2	±2	±2	±16	—	—	—
平滑化 C	±1	±1	±1	±2	±2	—	—	—

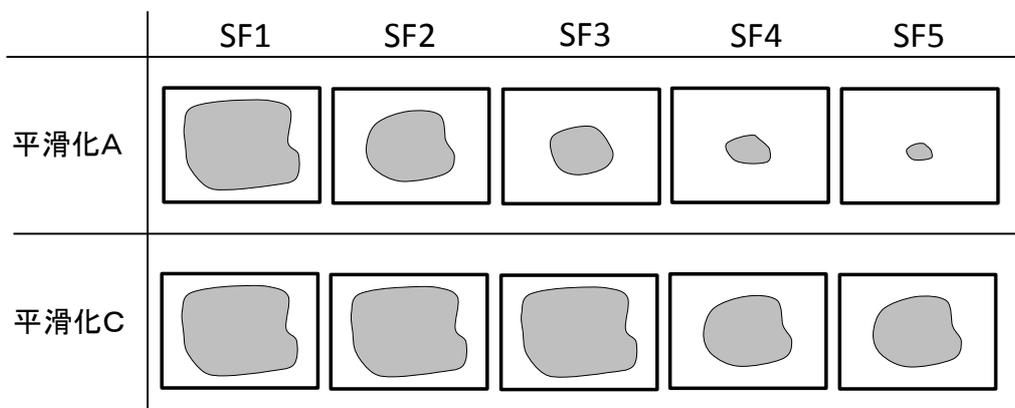


図 5.25 各サブフィールドにおけるアドレスデータの平滑化領域例

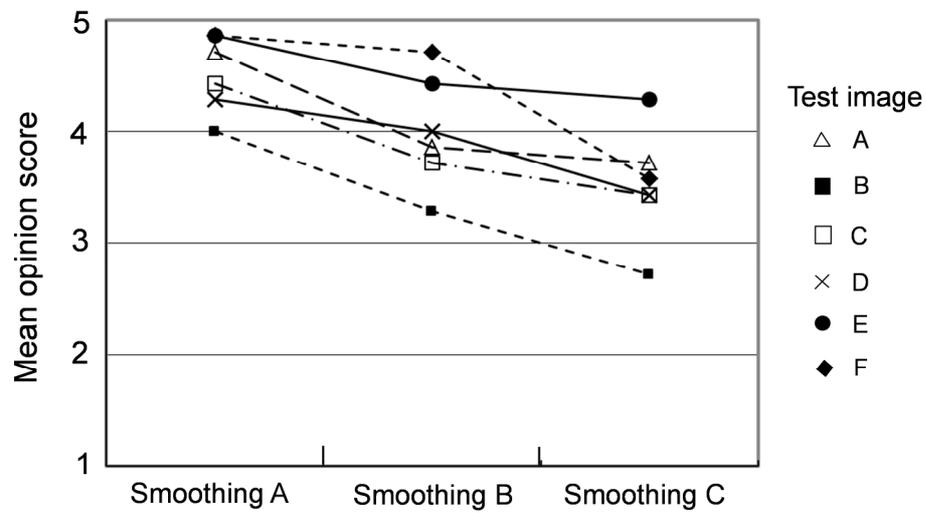


図 5.26 主観評価結果

表 5.4 5段階劣化尺度

評点	評定語
5	劣化がわからない
4	劣化がわかるが気にならない
3	劣化がわか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

表 5.5 主観評価実験の諸元

評定者	非専門家 7名
モニター	23インチHDTV (液晶モニターにドットバイドットで表示)
評価方法	5段階劣化尺度法
視距離	3H (H:画面高)

5.10 従来研究との比較

提案手法の有効性を確認するために、提案手法および従来手法で平滑化を行った評価画像の画質の比較を行った。従来手法の平滑化は、PDP のアドレス駆動回路の電力を検知し、その値が一定値以上になった場合に総電力を抑制するために、低ビットサブフィールドのアドレスデータのすべてを 0 または 1 に平滑化し、より多くの電力を削減する必要がある場合には、さらに上位ビットのサブフィールドにおける輝度が高い領域のアドレスデータを平滑化するという手法である[10]。ウェーバーの法則から平均画像レベルが大きくなると平滑化誤差が視認されにくくなるという知見に基づいている。平滑化するサブフィールドの数はアドレス駆動回路の電力に依存する。5.4 節で説明したように、低ビットサブフィールドのアドレスデータはノイズ状の領域が大きく存在するので、平滑化による電力削減効果も大きい。しかしながら、低ビットサブフィールドで発生する平滑化誤差の値が小さくても低輝度の平坦な領域では平滑化誤差が視認されやすくなるので、画面全体のデータを平滑化することにより低輝度の平坦領域で画質劣化が生じてしまう。これに対して提案手法では、平滑化領域を画質に影響を与えない領域に限定しているのでこの問題は発生しない。IEC 評価画像の中からアドレス駆動回路での消費電力が大きくなると予測される画像を選び、アドレスデータ平滑化後の画像を比較した。図 5.27 に比較に用いた評価画像を示す。アドレス回路における電力損失の削減率が同程度となる条件で比較した。No.151 の画像の場合を示すと、提案手法では、第 1～第 3 サブフィールドで一括平滑化を用い、第 4、第 5 サブフィールドでモルフォロジ平滑化を用いた。この平滑化処理を行った場合に予測されるアドレス回路における電力損失の削減率がおよそ 51%であった。従来手法においても提案手法と同程度の削減率とするために、第 1 サブフィールドと第 2 サブフィールドのアドレスデータのすべてを平滑化し、第 3 サブフィールドでは、グレースケール画像における画素レベルが 50 以上の領域のアドレスを平滑化した。ここでグレースケール画像の画素レベルは 0～255 である。この場合に予測されるアドレス回路

における電力損失の削減率はおよそ 50%であった。他の画像においてもほぼ同様な処理で平滑化を行った。図 5.28 に No.151 の評価画像を従来手法および提案手法で平滑化を行った画像を示す。従来手法では、図中の点線で示した領域で量子化誤差による擬似輪郭が視認された。他の画像においても同様な劣化が確認された。これに対して提案手法ではこのような疑似輪郭は生じていない。図 5.29 および図 5.30 に提案手法および従来手法で平滑化を行った画像の PSNR 値と SSIM 値を示す。SSIM の計算は、平滑化前後のカラー画像をグレースケール画像に変換して実施した。No.151 の画像では提案手法は従来手法と比較して、PSNR で 5.5 dB, SSIM で 0.043 勝っていた。

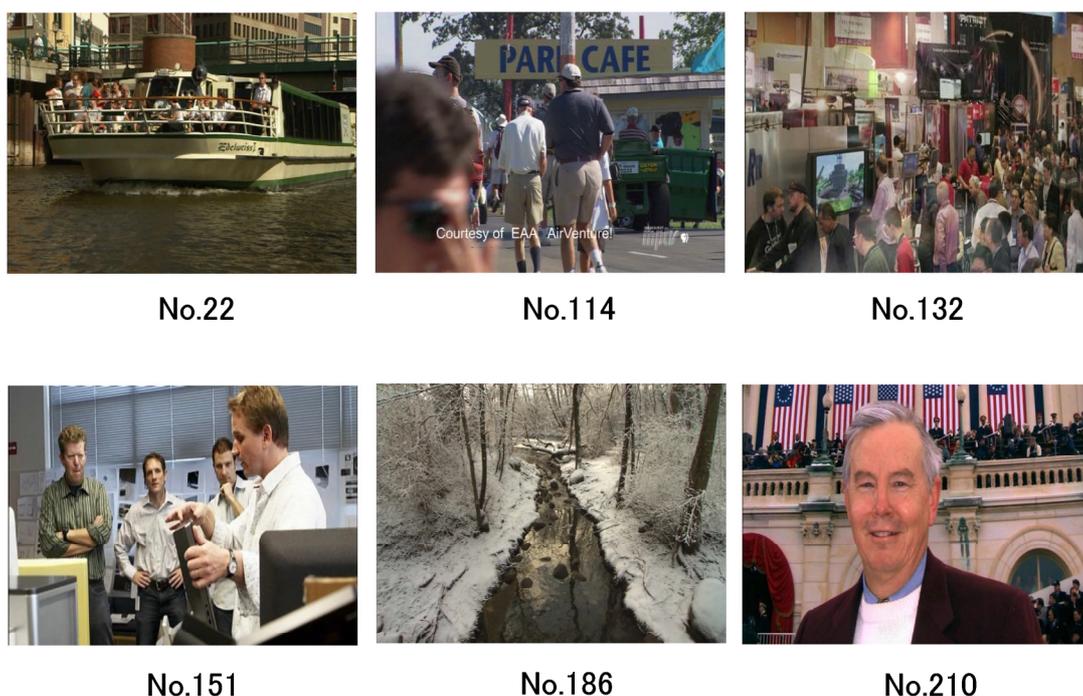


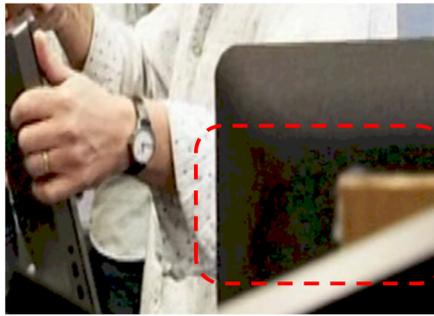
図 5.27 提案手法と従来手法の比較に用いた評価画像



(a) 原画像



(b) 原画像(部分)



(c) 従来手法



(d) 提案手法

図 5.28 提案手法および従来手法による平滑化画像

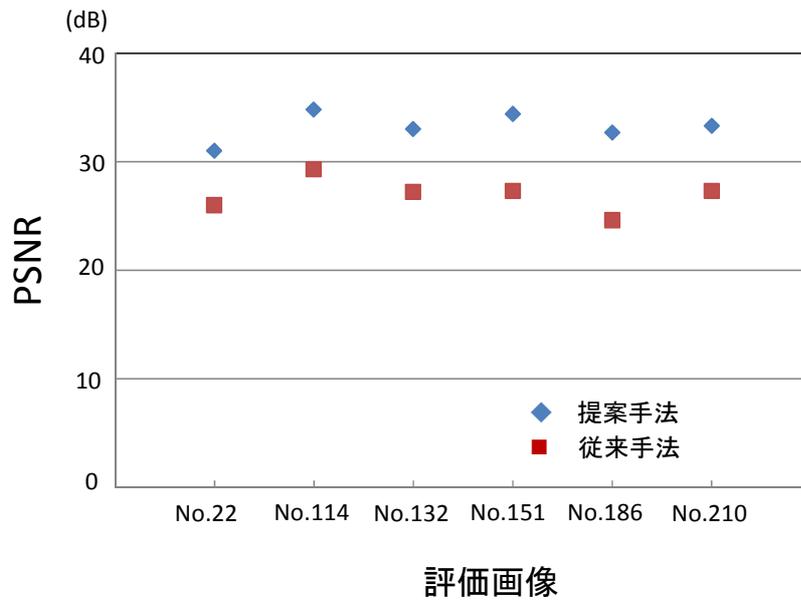


図 5.29 平滑化画像の PSNR

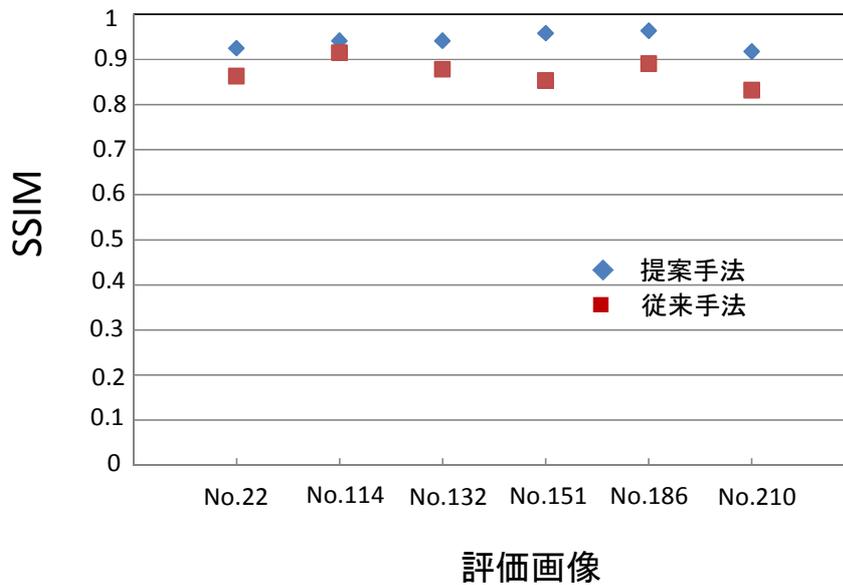


図 5.30 平滑化画像の SSIM

5.11 この章のまとめ

PDP の高精細化や高フレームレート化が進むことにより、アドレス駆動回路の電力損失が増大するという課題に対して、視覚マスクング効果を利用したアドレスデータの平滑化を行うことで、画質を維持しながら電力削減を行う可能性を示した。視覚マスクング効果が高い領域を、類似輝度セグメントを用いた提案手法で高精度に検出することにより、アドレスデータの平滑化で生じる平滑化誤差の視認性を効果的に改善できることを示した。提案手法によるアドレスデータの平滑化を行った画像で、アドレスデータの遷移回数の削減率がおおよそ 50%であったことから、アドレス駆動電力の損失についてもほぼ同率の削減が得られると予想される。また、85 インチスーパーハイビジョン PDP に提案方式を適用した場合、アドレス駆動回路の電力を IC 許容損失以内に抑えられる見込みが得られた。IEC 評価画像から選択した 6 枚の画像に提案手法のアドレスデータ平滑化を実施し主観評価を行ったところ、すべての画像の平均オピニオ

ン評点が4以上であったことから、画質が維持されていることが確認された。

PDPでは、階調を補う目的で誤差拡散やディザ処理が行われるが[24]-[26]、これらの処理と提案手法の親和性を確認する必要がある。これらの処理は、画素値の変化がゆるやかな領域で効果があるため、提案方式との両立は可能と考えられる。

5.12 第5章の参考文献

- [1] K. Ishii, T. Usui, Y. Murakami, Y. Motoyama, M. Seki, Y. Noguchi, T. Furutani, T. Nakakita and T. Yamashita, "Developments of a 145-inch diagonal super Hi-Vision plasma display panel", Society for Information Display International Symposium 2012 Digest of Technical Papers, pp.71-74, Jun. 2012.
- [2] 薄井武順, 石井啓二, 斎藤信雄, 清水直樹, 関 昌彦, 古谷 崇, 中村信彦, 山下 武, 野口康幸, 村井隆一:「145 インチスーパーハイビジョン用プラズマディスプレイの表示画質」, 映情学誌, vol.67, no.10, pp.369-375, 2013.
- [3] Y. Hirano, Y. Murakami, M. Kumoi and R. Murai, "Analysis of the display characteristics of a large-screen ultra-high-resolution PDP by a new plasma array simulation", Proceedings of the 16th International Display Workshops, pp.917-918, Dec. 2009.
- [4] C. Suzuki and T. Shiga, "Determination method of pixel values for combined single-line and multi-line scanning method for 120-Hz PDPs", Society for Information Display International Symposium 2013 Digest of Technical Papers, pp.53-56, May 2013.
- [5] ITU-R Rec. BT2020: Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange 2012.
- [6] C. Mas, G. Troussel and E. Benoit, "A new IC for generating AC power supply for column PDP addressing", Society for Information Display International Symposium 2000 Digest of Technical Papers, pp.216-219, May 2000.
- [7] 浦壁隆浩, 岩田明彦, 田中正明:「AC-PDP におけるアドレス電力回収回路の特性」, 1997 信学総大, C-9-4, p.88, 1997.
- [8] Y. Sano, T. Kawada and Y. Sugimoto, "Power reduction methods for PDP

- address driver circuit", Proceedings of the 8th Asian Symposium on Information Display, pp.232-235, Feb. 2004.
- [9] Y. Sano, A. Takagi, T. Kawada, H. Inoue and K. Kariya, "Reduction of power consumption in address driver ICs for PDP by power distributing method", Society for Information Display International Symposium 2001 Digest of Technical Papers, pp.1228-1231, Jun. 2001.
- [10] F. Han, X. Zhang, Z. Tu, W. Wang and Z. Liang, "Adaptive subfield data optimization for low address power in PDPs", Proceedings of the 19th International Display Workshops in conjunction with Asia Display 2012, pp.995-998, Dec. 2012.
- [11] J. Y. Lee, "Picture-based address power saving method for high resolution plasma display panel (PDP)", IEEE Trans. Industrial Electronics, vol.55, no.1, pp.49-58, Jan. 2008.
- [12] 三枝信彦, 秋山徹, 小口富弘, 志保沢弘行, 佐藤陽一:「50 インチ AC 型ハイビジョン PDP の開発」, 1998 年映情学年次大, p.270, 1998.
- [13] X. N. Zhang, C. L. Liu, Z. T. Tu and J. Zhang, "Analysis of the address power in PDPs with a newly developed equivalent circuit model", IEEE Trans. Consumer Electronics, vol.53, no.2, pp.243-248, May 2007.
- [14] Z. Xiaoning, L. Chunliang, T. Zhentao and Z. Jun, "Reducing average address power of color PDPs", Proceedings of the 12th International Display Workshops in conjunction with Asia Display 2005, pp.473-476, Dec. 2005.
- [15] C. Mas, G. Troussel and E. Benoit, "A new IC for generating AC power supply for column PDP addressing", Society for Information Display International Symposium 2000 Digest of Technical Papers, pp.216-219, Jun. 2000.
- [16] パナソニック プレスリリース, "85v 型フルハイビジョン プラズマディスプレイを開発",

<http://news.panasonic.com/jp/press/data/jn090617-2/jn090617-2.html>,

Jun. 2009.

- [17] STMicroelectronics, "PLASMA DISPLAY PANEL DATA DRIVER", STV7699 datasheet, Jan. 1999.
- [18] 篠田 傳, 脇谷雅行, 吉川和生:「アドレス・表示期間分離型サブフィールド法による AC-PDP の高階調化」, 信学論, vol.J81-C-II, no.3, pp.349-355, Mar. 1998.
- [19] I. Pitas and A. N. Venetsanopoulos, "Morphological shape decomposition", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.12, no.1, pp.38-45, Jan. 1990.
- [20] 万 頃涛, 藤吉正明, 貴家仁志:「多重モルフォロジーに基づく画像改ざん検出」, 信学技法, vol.107, no.22, pp.49-54, 2007.
- [21] "Methods of measurement for the power consumption of audio, video and related Equipment", International Electrotechnical Commission, IEC 62087, 2008.
- [22] 吉田昌弘, 大鷹伸章, 上田壽男, 田島正也, 乙部幸男:「プラズマディスプレイ多階調表示コントローラ」, 信学技法, vol.96, no.300, pp.17-24, 1996.
- [23] Rec. ITU-R BT.500-13: "Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures", 2012.
- [24] R. Floyd and L. Steinberg, "An adaptive algorithm for spatial gray scale", Society for Information Display International Symposium 1975 Digest of Technical Papers, pp.36-37, May 1975.
- [25] 中嶋正之, 安居院 猛, 太田 稔:「誤差拡散法を用いた限定色画像の平滑化」, 情処学研報, vol.CAD-30, no.3, pp.1-8, 1987.
- [26] 栗田泰市郎:「PDP の動画質と信号処理」, 映情学誌, vol.51, no.4, pp.464-469, Apr. 1997.

第6章 MEMSシャッター方式ディスプレイのアドレス駆動電力削減

6.1 はじめに

MEMS シャッター方式ディスプレイは、半導体加工技術を応用して各画素に形成した微小シャッターを高速に開閉させて、バックライトの光量を制御することにより画像を表示するディスプレイである[1],[2]。図 6.1 は MEMS シャッター方式ディスプレイの構造である。ディスプレイは、導光板の端面に LED を装着したバックライトと、1 画素ごとに MEMS 方式で形成されたシャッター群から構成される。図には表示していないが、各画素にシャッターを開閉するための駆動回路が設置されている。図 6.2 は発光原理である。シャッターが閉じるとバックライトの光が遮断され、開くとディスプレイ外に光が放射され発光状態となる。液晶ディスプレイの液晶の代わりに機械式シャッターでバックライトの光を制御している。赤緑青の3色の画像を時系列で表示するフィールドシーケンシャル方式でカラー化しているのでカラーフィルタが不要である。3色の切り替えは、バックライトの LED 発光を切り替えて行う。また、液晶ディスプレイで用いている偏光板がないので、液晶ディスプレイに比較して光利用率を高めることが可能で、消費電力が少ないという特徴を有する。スマートフォン用や車載用のディスプレイとして開発されている[3][4]。電池の消耗を減らして駆動可能な時間を延ばすために、さらなる消費電力の削減が求められている。MEMS シャッター方式ディスプレイは外光を利用した反射型も可能で、この場合、発光に関わる電力が必要なくなり、シャッターの駆動電力が主な消費電力となる[5]。携帯端末用電子ディスプレイは画素数が飛躍的に増加しており、一定時間内に行うシャッターの開閉回数が増加しシャッター駆動電力の増加に繋がる。本章では、アドレスデータに対して視覚特性を加味した画像処理を行うことで、シャッターの開閉に関わる電力を削減する技術について提案する。

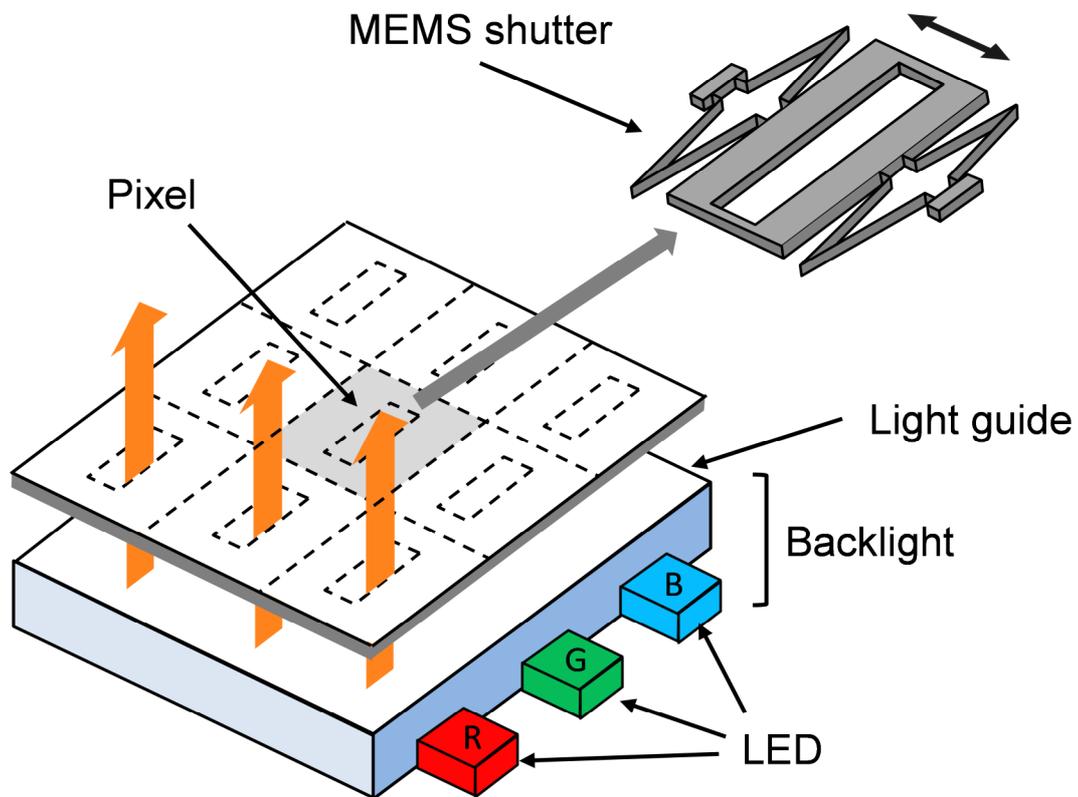


図 6.1 MEMS シャッター方式ディスプレイの構造

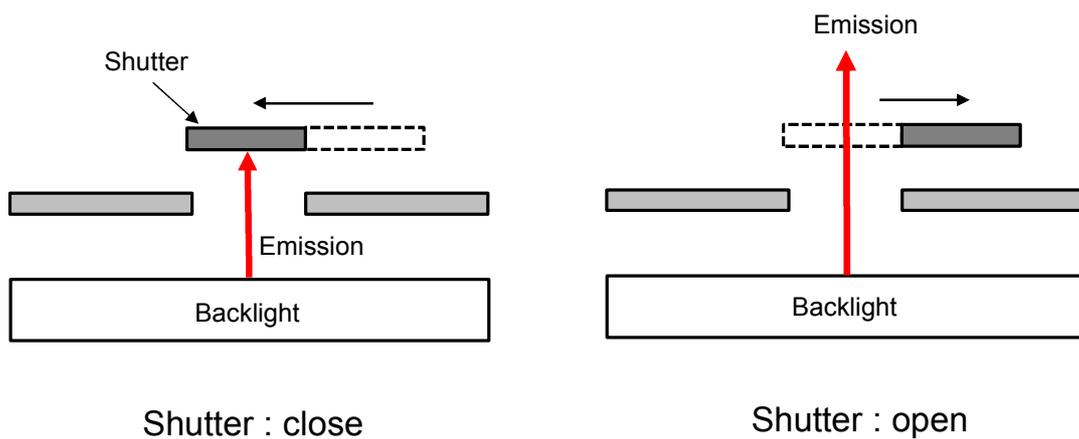


図 6.2 MEMS シャッター方式ディスプレイの発光原理

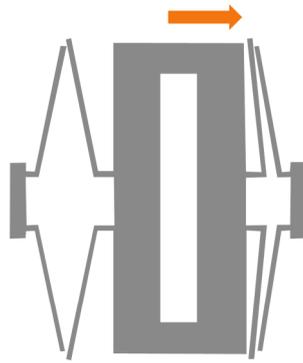
6.2 MEMS シャッター方式ディスプレイのアドレス駆動電力

MEMS シャッター方式ディスプレイは、アドレスデータに従ってシャッターの開閉が制御されている[6]。アドレスデータは1行ごとにアドレスデータ制御回路から出力され、各画素に設置されたTFT (Thin Film Transistor) とキャパシタで構成されるデータ保持回路に保持され、シャッター駆動回路を通してシャッターの開閉を行う。図 6.3 の静電容量型アクチュエータを用いてシャッターを駆動している。アクチュエータに電圧を印加し、電圧がしきい値を超えると静電力によりばね構造が変形し、シャッターが水平方向に移動して開閉動作を行う。シャッター駆動回路の負荷は容量性となるため[7],[8]、シャッターの駆動に要する電力 P は次式で示され、その消費電力はシャッターの開閉回数に比例して増加する。

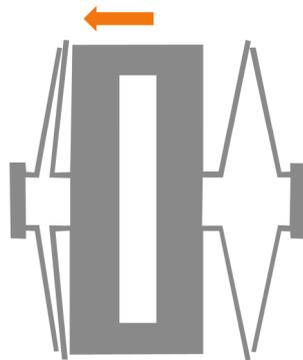
$$P = \frac{1}{2} f C V^2 \quad (6.1)$$

ここで、 f は駆動データの周波数、 C は負荷容量、 V は駆動電圧である。

発光の制御にシャッターを用いているので発光は ON か OFF の2通りとなるため、中間調を表示するためにビットプレーン方式を用いている。本研究では図 6.4 に示すような中間調表示方式を用いる場合を想定して考察する。アドレス期間に1行目から各画素におけるシャッターの開閉動作を確定していき、すべての行で確定した後、表示期間で発光を制御している。図 6.4 では4ビットのアドレスデータを例に示したが、考察で対象とするアドレスデータは8ビットとする。表示画面のすべての画素でシャッターの開閉動作が定まった後にバックライトを点灯させる。各サブフィールドでの発光時間を2のべき乗の重みを付けた長さとして、1TV フィールドで中間調を表現している[9]。図 6.4 では、発光の長さの比が8:4:2:1になるように設定されている。一連の動作を1TV フィールド期間に3回繰り返し、発光色を赤、緑、青に切り替えることでカラー表示を行っている。



(a) 右側移動



(b) 左側移動

図 6.3 静電容量型アクチュエータによるシャッターの移動

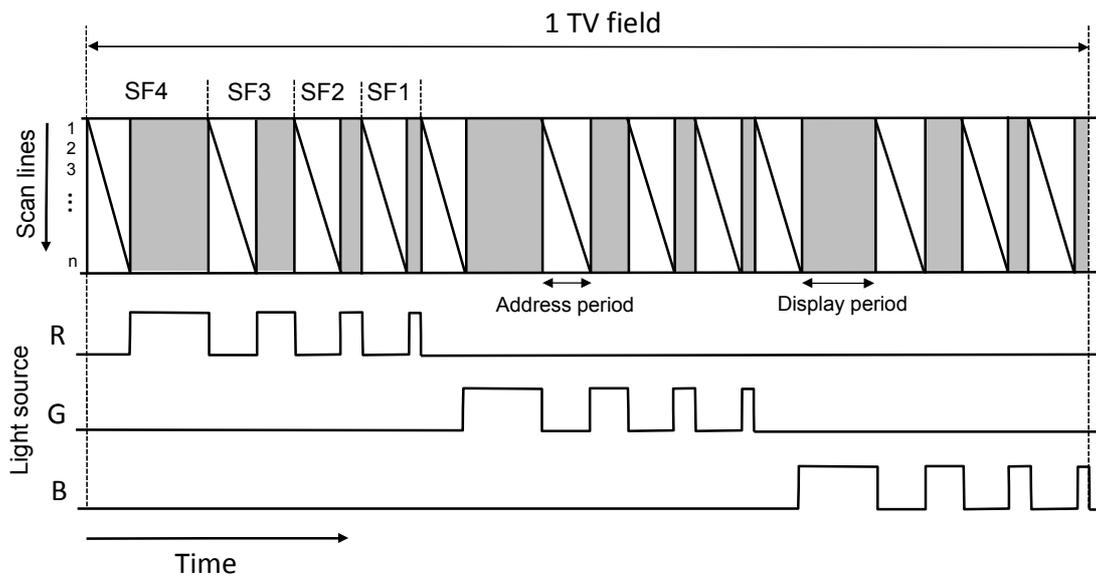


図 6.4 カラー画像の中間調表示方式

6.3 アドレスデータの平滑化

シャッター駆動電力を削減するには、シャッターの開閉回数を減らすことが効果的である。表 6.1 はシャッター開閉回数を減らす手法を示したもので、連続するサブフィールドのデータを同一にしてデータの平滑化を行うものである。サブフィールド間のデータを平滑化することでシャッターの開閉回数を減らして電力を削減している。表の例では、画素値が 55 のアドレスデータに対して、第 1 サブフィールドから第 3 サブフィールドのデータを第 4 サブフィールドのデータと同一にしている。この処理によりシャッターの開閉回数が 4 回から 2 回に削減される。しかしながら、画素値が 55 から 48 に変化し画質が劣化してしまう。この劣化を抑制するために、視覚マスキング効果が高い領域のみで平滑化を実施する。この領域を選択するために、視覚マスキング効果の定量的評価に関する本提案手法を用いる。

表 6.1 サブフィールド間のアドレスデータ平滑化例

		SF8	SF7	SF6	SF5	SF4	SF3	SF2	SF1	シャッター開閉回数
平滑前	データ	0	0	1	1	0	1	1	1	4
	シャッター状態	閉	閉	開	開	閉	開	開	開	
	シャッター動作			↗	↘		↗		↘	
平滑後	データ	0	0	1	1	0	0	0	0	2
	シャッター状態	閉	閉	開	開	閉	閉	閉	閉	
	シャッター動作			↗	↘					

↗ : 開 ↘ : 閉

6.4 視覚マスキング効果を用いたアドレスデータ平滑化領域の選択

第 3 章で述べた視覚マスキング効果の定量的評価手法を用いて平滑化領域を

選択する。図 6.5 は平滑化領域を選択する手法の手順を示した図である。図では、平滑化するサブフィールドを、第 1 のみ、第 1 および第 2、第 1 から第 3 までの 3 種類としてアドレスデータを平滑化する例を示した。平滑化を行うサブフィールドの数が増えるほどインパルス状の平滑化誤差の大きさが大きくなり、この平滑化誤差をマスクするために必要な視覚マスクングの強度も増していく。

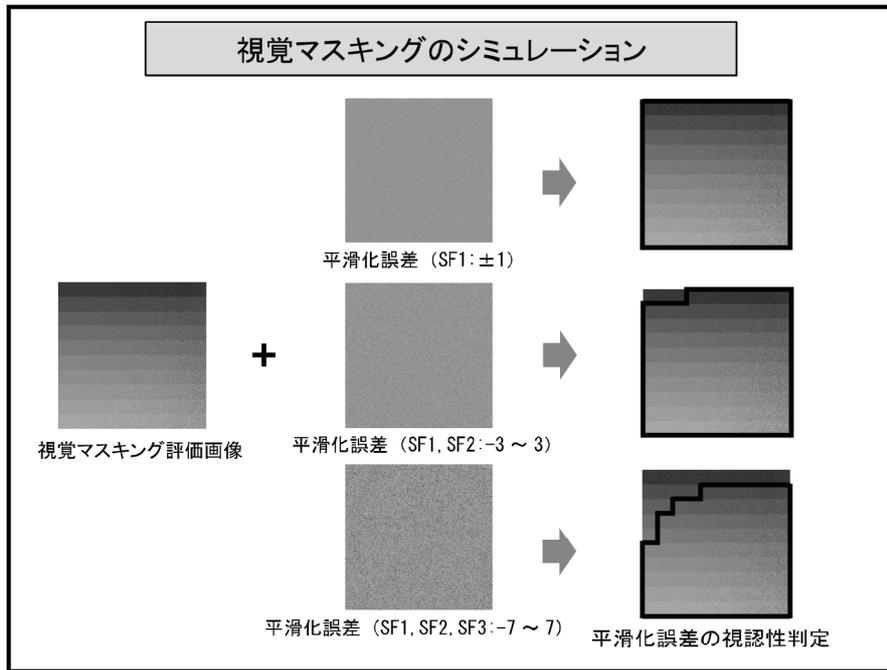
6.4.1 視覚マスクングシミュレーションの実施

(1) 平滑化誤差の特定

サブフィールド間のアドレスデータの平滑化を行った場合に生じるインパルス状の平滑化誤差について考察する。平滑化誤差の大きさは平滑化を行うサブフィールドの数で定まる。第 1 サブフィールドのアドレスデータのみを平滑化する場合に ± 1 の平滑化誤差となる。原画像の第 2 サブフィールドが「開」で、第 1 サブフィールドが「閉」の場合は誤差が $+1$ となり、第 2 サブフィールドが「閉」で第 1 サブフィールドが「開」の場合は誤差が -1 となる。複数のサブフィールドでアドレスデータの平滑化を行う場合は各サブフィールドで生じる誤差が累積される。図 6.6 (a) に、第 1 サブフィールドから第 3 サブフィールドまでのデータを第 4 サブフィールドのデータに揃えた場合の画像信号の入出力特性を示す。図 6.6 (b) に示すように、平滑化を行うことで $-7 \sim 7$ の誤差を生じる。

(2) 視覚マスクングシミュレーションによる平均画素値—しきい値テーブルの取得

特定された平滑化誤差を視覚マスクング評価画像に付加して、平滑化誤差が視認されない因子の条件を求め、この条件から平均画素値—しきい値テーブルを取得する。複数サブフィールドで平滑化を行う場合は、生じる可能性のあるそれぞれの誤差が等確率で元画像に付加されるものとしてシミュレーションを行う。例えば平滑化するサブフィールドの数が 3 の場合は、 $-7 \sim 7$ の各誤差を等確率で視覚マスクング評価画像に付加してシミュレーションを行う。



- ↓
- 第1サブフィールド : 平均画素値 - しきい値テーブル1
 - 第1・第2サブフィールド : 平均画素値 - しきい値テーブル2
 - 第1・第2・第3サブフィールド : 平均画素値 - しきい値テーブル3

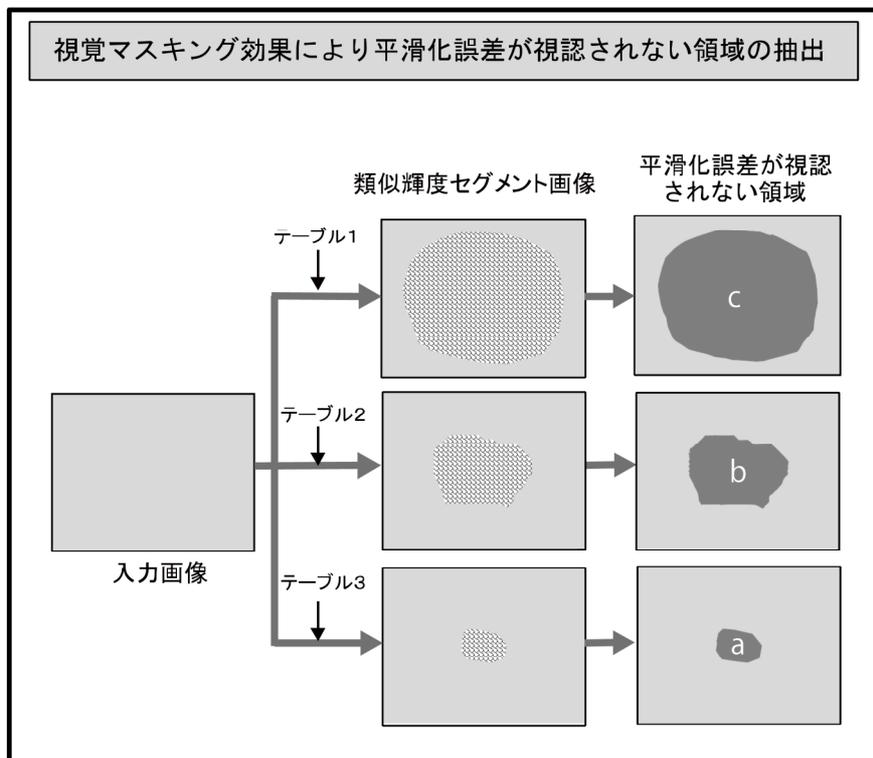
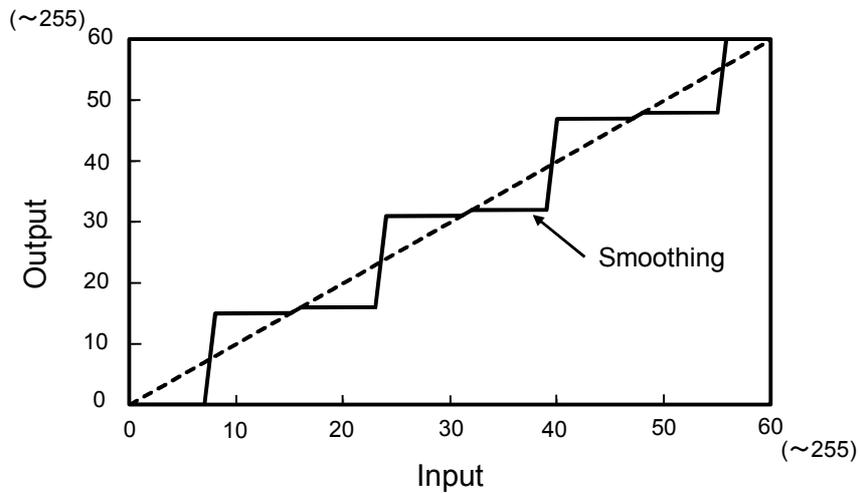
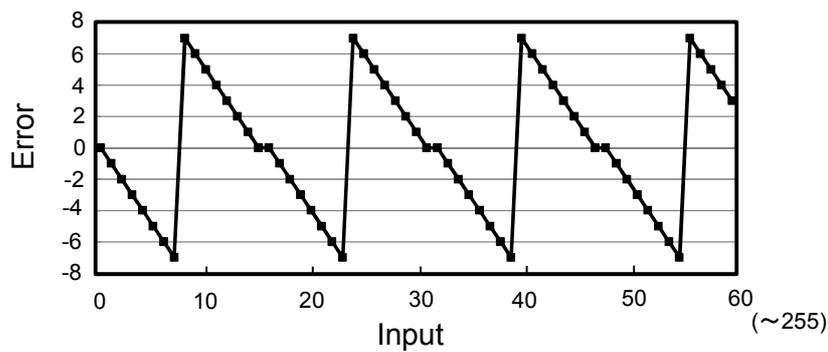


図 6.5 平滑化するサブフィールド数に対応した平滑化領域選択の手順



(a) 入出力特性



(b) 誤差

図 6.6 第1から第3サブフィールドのアドレスデータを平滑した場合の画像信号の (a) 入出力特性と (b) 誤差

6.4.2 平滑化領域の決定

それぞれの平滑化誤差を基にした視覚マスキングシミュレーションで求めた平均画素値-しきい値テーブルで入力画像を類似輝度セグメントに変換して平滑化領域を求める。求めたそれぞれの領域を図 6.5 の a, b, c とすると、領域の包含関係は $c \supset b \supset a$ となる。この関係から図 6.7 のように、平滑化を行うサブフィールドの数を基に入力画像を領域分割する。C の領域では第1サブフィールドのみ、B の領域では第1, 第2サブフィールド, A の領域では第1~第3サブフィールドのアドレスデータを平滑化する。それぞれの領域の視覚マスキ

グの強度は $A > B > C$ となる。

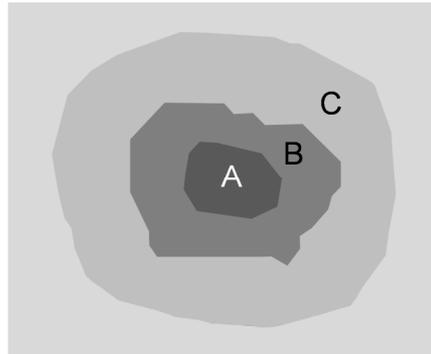


図 6.7 平滑化を行うサブフィールド数を基にした領域分割

6.5 アドレスデータの実際の平滑化手法

第1サブフィールドから第3サブフィールドのアドレスデータを第4サブフィールドのデータに揃えるという平滑化を行う場合、図 6.6 に示すように、入力信号のわずかな変化に対して出力が大きく変化する個所があるので、隣接画素の差分が小さい領域で不自然な出力となる場合がある。この現象を緩和するために、第4サブフィールドのデータについても制御を行い、図 6.8 のような入出力特性になるように平滑化を行う。表 6.2, 表 6.3 は、0~10 の入力データに対して、第4サブフィールドに揃える手法と輝度差を緩和させる手法で平滑化した出力を示したものである。輝度差を緩和させる手法では、入力が 5, 7, 8, 10 の時に第4サブフィールドのデータを反転させている。シャッターの開閉回数を削減させる効果は両手法ともほぼ同一と考えられる。輝度差を緩和させる手法では、画素値が空間的に平均化され輝度差が視覚的に少なくなり、不自然な表示を抑制することが可能となる。図 6.9 は、緩和手法を使った出力と使わない出力を比較した例である。緩和手法を使わない場合、量子化誤差に似た画質劣化が生じている。

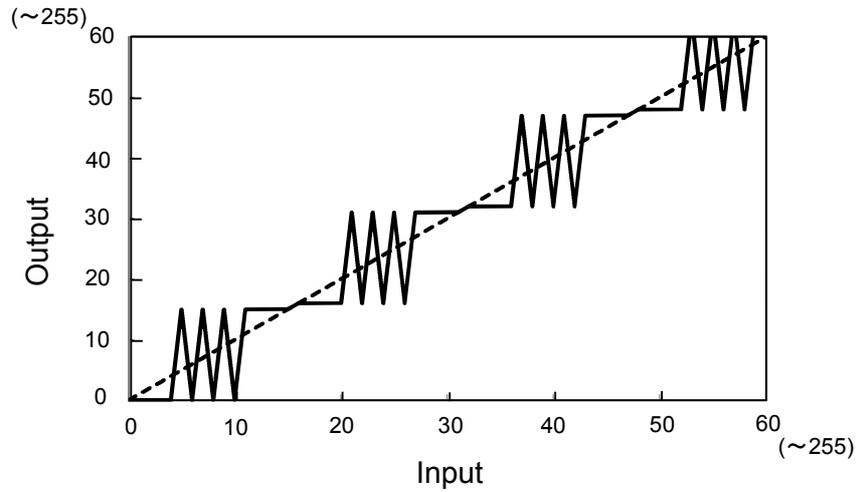


図 6.8 視覚的に大きな輝度差を緩和させるための入出力特性

表 6.2 第 4 サブフィールドのデータに揃える平滑化

入力					平滑出力				
入力値	SF4	SF3	SF2	SF1	出力値	SF4	SF3	SF2	SF1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	1	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	1	0	0	0	0	0
6	0	1	1	0	0	0	0	0	0
7	0	1	1	1	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	15	1	1	1	1
9	1	0	0	1	15	1	1	1	1
10	1	0	1	0	15	1	1	1	1

表 6.3 輝度差を緩和させる手法による平滑化

入力					平滑出力				
入力値	SF4	SF3	SF2	SF1	出力値	SF4	SF3	SF2	SF1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	1	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	1	15	1	1	1	1
6	0	1	1	0	0	0	0	0	0
7	0	1	1	1	15	1	1	1	1
8	1	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	0	0	1	15	1	1	1	1
10	1	0	1	0	0	0	0	0	0

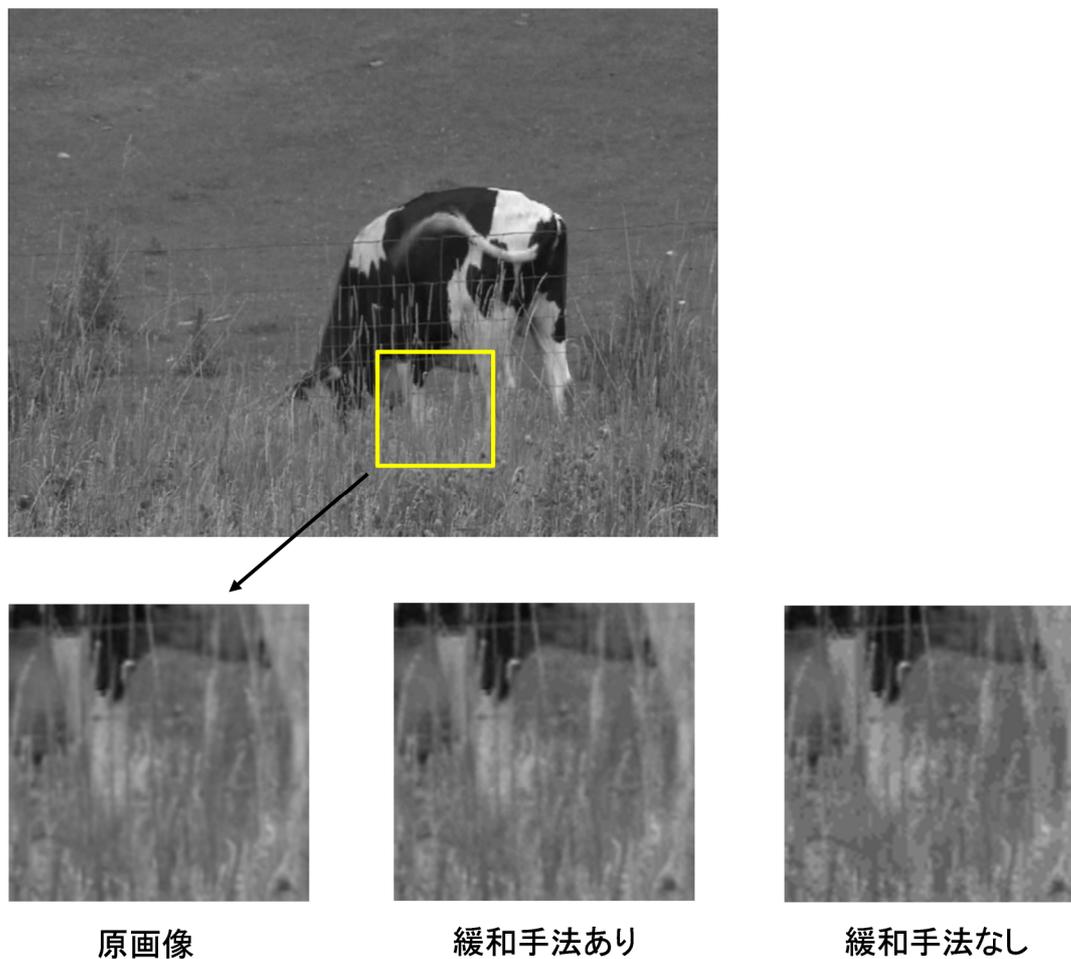


図 6.9 輝度差を緩和させる手法による平滑化の効果

6.6 アドレスデータ平滑化の実験

IEC 評価画像から無作為に選んだ 10 枚のカラー画像（640×480 画素）による画質に関する事前検討の結果から、平滑化するサブフィールドの数を 3 までとした。表 6.4 に示す平滑化の内容に基づいて IEC 評価画像を領域分割し、アドレスデータの平滑化を行った。平滑化を行った IEC 評価画像のシャッター開閉数を算出して、アドレス駆動電力の削減率について見積もった。

表 6.4 アドレスデータ平滑化実験で用いた 3 つの平滑化

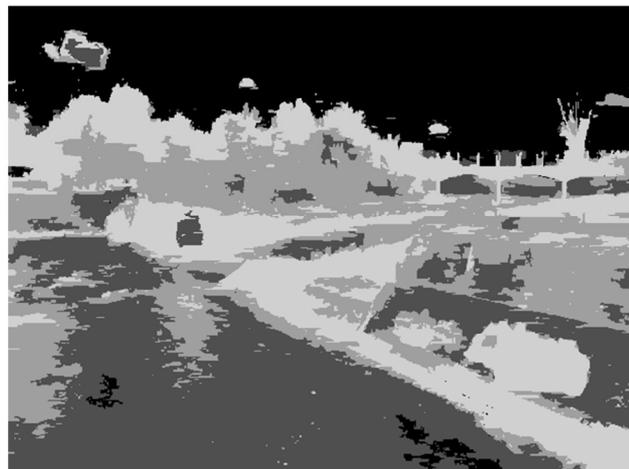
	平滑化する SF 数	平滑化を行う SF	データを揃える SF	平滑化誤差
平滑 1	1	SF1	SF2	±1
平滑 2	2	SF1, SF2	SF3	-3~3
平滑 3	3	SF1, SF2, SF3	SF4	-7~7

6.6.1 領域分割の例

図 6.10 は、視覚マスキングシミュレーションで得られた平均画素値—しきい値テーブルを基に、平滑化するサブフィールドの数で領域分割した例である。C の領域は第 1 サブフィールドのみを平滑化し、B の領域は第 1 および第 2 サブフィールドを平滑化し、A の領域は第 1 ~ 第 3 サブフィールドを平滑化し、D の領域は原画像のままとする。A の領域は他の領域に比較して比較的明るい、あるいは複雑な画像になっていて視覚マスキング効果が高い領域である。



(a) 原画像



(b) 領域分割画像

図 6.10 平滑化サブフィールド数を基にした領域分割例

6.6.2 シャッター駆動電力削減率の推定

241 枚の IEC 評価画像に提案手法を適用して、アドレス駆動回路におけるシャッター駆動電力の削減率を推定した。図 6.11 は平滑化によるシャッター開閉回数の削減率 R_{oc} を算出した図である。削減率は次式で表される。

$$R_{oc} = \frac{NS_{original} - NS_{smooth}}{NS_{original}} \quad (6.2)$$

ここで、 $NS_{original}$ は原画像のシャッターの開閉回数、 NS_{smooth} は平滑化後のシャッターの開閉回数である。

PDP のアドレスデータの遷移回数の削減率がほぼ 50% であることと比較すると、削減率が全体に約 25% と小さくなっている。

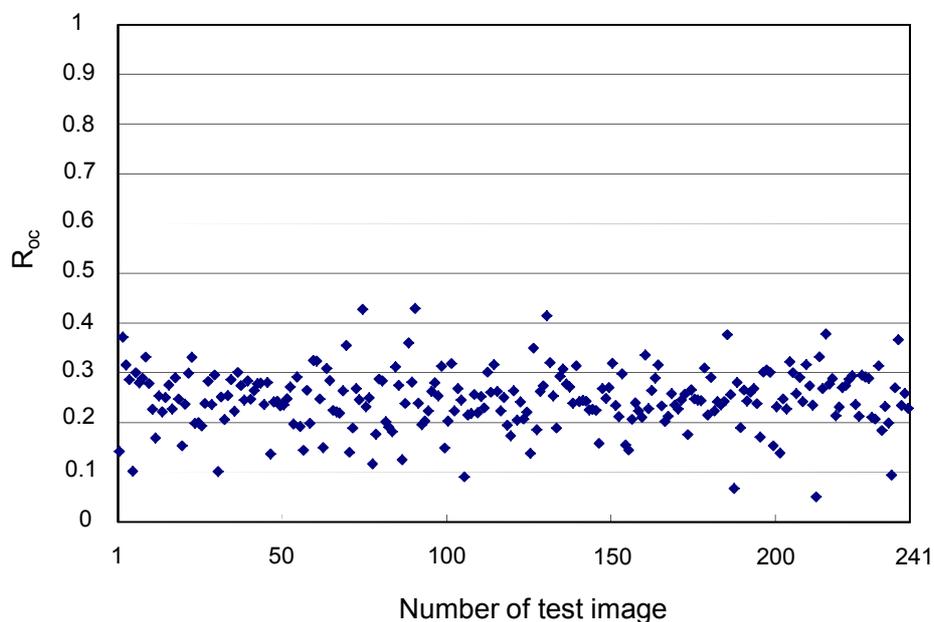


図 6.11 アドレスデータ平滑化後のシャッター開閉回数の削減率

6.6.3 SSIM による平滑化画像の画質評価

原画像と比較対象画像間の類似性を判定する客観的画質評価尺度で、PSNR よりも人間の感覚に近い値を与える手法として広く用いられている SSIM により、平滑化を行った画像の画質評価を行った。図 6.12 は、241 枚の IEC 評価画像に対して、表 6.4 に示した提案手法のアドレスデータの平滑化を行った画像の SSIM 値である。平滑化は、視覚マスクングの定量的評価手法を用いて抽出した平滑化誤差が視認されないと判定された領域のみで行っている。SSIM の計算は、平滑化前後のカラー画像をグレースケール画像に変換して実施した。SSIM の平均値が 0.995 と高い値を示し、平滑化後も画質が維持されていることを確認した。図 6.13 は本手法で平滑化を行った画像と原画像の例である。

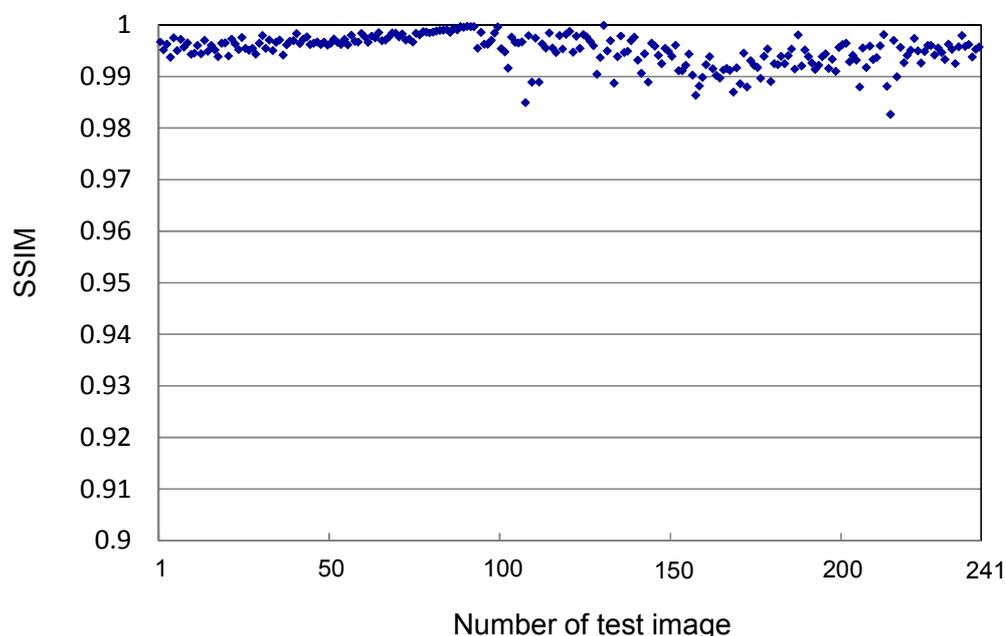


図 6.12 SSIM による平滑化画像の画質評価



(a) 原画像



(b) アドレスデータ平滑画像

図 6.13 原画像と平滑画像

6.7 この章のまとめ

MEMS シャッター方式ディスプレイは液晶ディスプレイと比較して消費電力が少ないという特徴を有するが、さらなる消費電力の削減を行って電池消費を減らすことが可能になれば、充電せずに長時間使用を目指す携帯端末用途では有利となる。本研究では、上位ビットのデータに揃えるというサブフィールド間のアドレスデータの平滑化を行うことで、シャッターの開閉回数を減らして、アドレス駆動電力を削減する手法を提案した。アドレスデータの平滑化で生じるインパルス状平滑化誤差は、各サブフィールドでの平滑化誤差が累積され、平滑化を行う連続したサブフィールドの個数で変化するという特徴がある。平滑化を行うサブフィールド数を基に、画像の領域を分割して領域毎に対応した平滑化を行うことで、視覚マスキング効果により平滑化誤差の視認性を改善でき、画質を保持しながら平滑化できることを示した。

IEC 評価画像に提案手法を適用した場合のシャッター開閉回数の削減率がおよそ 25%であったことから、アドレス駆動電力についてもほぼ同率の削減ができると予想される。

MEMS シャッター方式ディスプレイのカラー化で使用されるフィールドシーケンシャル表示法では、色が時分割で表示されるので色割れという現象が発生する。この現象に対応するために、各色のサブフィールドを相互に入れ替えるなど、さまざまな表示方法が提案されており、そのような条件で提案手法が所期の機能を発揮するか検証する必要がある。また、スマートフォン用などの小型ディスプレイの場合、信号処理に関わる電力の総電力に対する比率が大きくなるため[10]、アドレス駆動電力削減効果を得るには、提案手法の信号処理電力を極力低減する必要がある。

6.8 第6章の参考文献

- [1] N. Hagood, R. Barton, T. Brosnihan, J. Fijol, J. Gandhi, M. Halfman, R. Payne and J. L. Steyn, "A direct-view MEMS display for mobile applications", Society for Information Display International Symposium 2007 Digest of Technical Papers, pp.1278-1281, May 2007.
- [2] J. Gandhi, J. H. Kim, N. Hagood, L. Steyn, J. Fijol, T. Brosnihan, S. Lewis, G. Fike, R. Barton, M. Halfman and R. Payne, "High image quality of ultra-low power digital micro-shutter based display technology", Society for Information Display International Symposium 2009 Digest of Technical Papers, pp.532-535, Jun. 2009.
- [3] シャープ, 「業界初, MEMS-IGZO ディスプレイ搭載 7.0 型タブレット端末を開発」(2014 年 10 月 6 日), <http://www.sharp.co.jp/corporate/news/141006-a.html>.
- [4] 吉田成人:「モバイルディスプレイ」, 映情学誌, vol.68, no.5, pp.367-371, 2014.
- [5] J. Gandhi, J. H. Kim, N. Hagood, L. Steyn, J. Fijol, T. Brosnihan, S. Lewis, G. Fike, M. Halfman and R. Payne, "Sunlight readability of digital micro shutter based display technology", Society for Information Display International Symposium 2010 Digest of Technical Papers, pp.834-837, May 2010.
- [6] J. H. Wu, J. L. Steyn, T. Brosnihan, G. Fike, J. Fijol, R. Payne and N. Hagood, "Mechanical reliability of digital micro shutter (DMSTM) displays", Society for Information Display International Symposium 2011 Digest of Technical Papers, pp.1419-1422, May 2011.
- [7] R. Legtenberg, J. Gilbert and S. Senturia, "Electrostatic curved electrode actuators", Journal of Microelectromechanical Systems, vol.6, no.3, pp.257-265, Sept. 1997.

- [8] W. C. Tang, T.-C. H. Nguyen and R. T. Howe, "Laterally driven polysilicon resonant microstructures", *Sensors and Actuators*, vol.20, pp.25-32, 1989.
- [9] N. Hagood, L. Steyn, J. Fijol, J. Gandhi, T. Brosnihan, S. Lewis, G. Fike, R. Barton, M. Halfman and R. Payne, "MEMS-based direct view displays using digital micro shutters", *Proceedings of the 15th International Display Workshops*, pp.1345-1348, Dec. 2008.
- [10] A. Carroll and G. Heiser, "An analysis of power consumption in a smartphone", *Proceedings of the 2010 USENIX Annual Technical Conference*, pp.271-284, Jun. 2010.

第7章 結言

7.1 各章のまとめ

本論文は、映像信号に視覚マスキングを主体とした視覚特性を利用した画像処理を施すことにより、画質を保持しながら電子ディスプレイのアドレス駆動電力の削減を可能とする表示方式の構築と、その有効性を確認するために実施した主観評価実験をまとめたものである。以下の基本方針の基に表示方式の構築を行った。

- ・ 画像中の平滑化誤差が視認されなくなる背景画像の条件を明らかにするために、平滑化誤差と背景画像間の視覚マスキングの特性について考察する。
- ・ 対象とする画像は主に放送画像とし、平滑化誤差の視認性の判定や画質に関する主観評価では、画像を表示するディスプレイの画素構造が検知できない距離から見た場合を議論する。

研究の過程で得られた成果を以下の7章にまとめて述べる。

第1章では電子ディスプレイの消費電力の削減が求められている背景と本研究の目的を述べた。

第2章では、視覚マスキングに関する先行研究を基に、視覚マスキング効果に影響が大きいと考えられる因子について考察し、テスト刺激を平滑化誤差を想定した信号（白色ガウスノイズとインパルスノイズ）に特定し、マスク刺激である背景画像の空間周波数特性、コントラスト、平均輝度を影響因子として選択した。

第3章では、電子ディスプレイのアドレス駆動電力削減を行うための画像処理システムへ応用することを目的に、視覚マスキングの定量的評価手法を提案した。視覚マスキング効果を定量的に扱うために、視覚マスキング効果を数値化することを目指し、平滑化誤差と背景画像間の視覚マスキング効果により見えなくなる最大の平滑化誤差の大きさと視覚マスキングの強度を関連付けた。これを基に視覚マスキングの定量的評価手法を構築した。平滑化誤差と背景画

像の特徴量の関係を簡便にシミュレートできるように、空間周波数特性が平滑化誤差と同等で、平均画素値とコントラストを変化させた視覚マスキング評価画像を作成し、この画像に平滑化誤差を付加して平滑化誤差の視認性を判定した。この手法を採ることで、1枚の画像で平滑化誤差と影響因子を関係づけることが可能になった。局所領域の空間周波数のように演算での取り扱いが難しい画像特徴量に対して、画像を局所的に類似した濃度を有するセグメントに分割し、セグメントの大きさを特徴量を表す指標とした類似輝度セグメントを導入することで、対処することが可能になった。

第4章では、ノイズを含んだ画像からノイズを除去して画像を復元するという課題の中で、第3章で提案した視覚マスキング効果の定量的評価手法の検証を行った。提案手法から導かれる視覚マスキングの強さに従って、画像を領域に分け、領域ごとにノイズフィルタの強度を調整しながら画像復元を実施した。この結果、ノイズが効果的に除去され、提案した画像復元手法と視覚マスキングの定量的評価手法の有効性を確認した。ノイズ除去に関する従来研究では、画像全体でなにがしかのスムージングフィルタ操作を行うことを前提としてノイズの除去手法が研究されていたが、本研究では、視覚マスキング効果により視覚的にノイズが視認されないと判定された領域では、スムージングのフィルタ操作を行わないという手法としているので、細かいテクスチャなどの高周波情報を保存しながらノイズを除去することが可能になった。

第5章では、PDPのアドレス駆動回路の容量性負荷で生じる電力損失を削減する表示方式を提案した。サブフィールド内のアドレスデータを平滑化し、データの遷移回数を減らして電力損失を削減する表示方式である。平滑化後の画質を維持するために、アドレスデータの平滑化で生じるインパルス状の平滑化誤差が視覚的に視認されない領域のみで平滑化を行っているが、この領域を選択するために視覚マスキングの定量的評価手法を用いた。241枚のIEC評価画像に提案手法を適用し、平滑化後のアドレスデータの遷移回数を判定したところ、およそ50%の削減率が得られた。この結果から、アドレス回路での電力損失を半減できる見込みを得た。平滑化後の画質を確認するために主観評価実験

を行って評価したところ、MOS 評価値が 4 以上と高い評価が得られた。

第 6 章では、MEMS シャッター方式ディスプレイのアドレス駆動回路で大きな比率を占めるシャッターの開閉に関わる電力を削減する表示方式を提案した。サブフィールド間のアドレスデータを平滑化することで、1 フィールド期間のシャッターの開閉回数を減らして、シャッターを制御している静電容量型アクチュエータの駆動電力を削減するものである。PDP と同様に平滑化後の画質を維持するために、平滑化誤差が視覚的に視認されないと判定された領域のみで平滑化を行っている。この領域を選択するために視覚マスクングの定量的評価手法を用いている。PDP ではサブフィールド内のアドレスデータの平滑化を行ったが、MEMS シャッター方式ディスプレイではサブフィールド間のアドレスデータの平滑化を行う。このため、平滑化で生じる平滑化誤差の特性も違ってくる。241 枚の IEC 評価画像に提案手法を適用して、アドレスデータの平滑化後のシャッターの開閉回数を評価したところ、およそ 25%の削減率が得られた。画質については、平滑化後の各画像に対する SSIM の平均値が 0.995 と高い結果が得られ、画質が保持されていることを確認した。

7.2 今後の展望

最後に残された課題と今後の展望を述べる。

本研究はシミュレーションを主体とした解析に基づいて、PDP と MEMS シャッター方式ディスプレイのアドレス駆動電力を削減する最も基本的な表示方式を提案した。しかし、実際のディスプレイでは、さまざまな課題に対処した表示方式を採用している。例えば、PDP では、動画像擬似輪郭に対処するためにサブフィールドの数やビット配列を適応的に変更している。また、低輝度領域の階調不足の課題に対してディザや誤差拡散などの画像処理で対処している。MEMS シャッター方式ディスプレイでは、カラー表示で生じる色割れ現象に対処するために、各色のサブフィールドを交互に入れ替えるなどの表示方式が検討されている。これらの実際の電子ディスプレイが採用している表示方式に対

応するために、提案手法をそれぞれの方式に適応させ、その効果を検証する必要がある。加えて、小型の MEMS シャッター方式ディスプレイでアドレス電力削減効果を得るために、提案手法を実現する上で必要となる信号処理に関わる電力を低減するための検討が必要となる。

本研究では、静止画像を扱ってきたが動画像に対する検討が必要である。アドレスデータの平滑化で生じる平滑化誤差が動画像ではどのような効果をもたらすかなどの検討が必要である。また、動画像では静止画とは異なった冗長な情報を削減する可能性も出てくるので、新規な視点で提案方式を発展させる余地があると考えている。

電子ディスプレイの消費電力は個々の技術進歩により減少している。しかしながら、大画面、高精細、高画質化の流れは止まることはないと予想され、さらなる省エネルギー技術が今後も必要とされる。画質を維持しながら消費電力を削減することが重要になる。本提案方式も含めて、このような分野で視覚特性の応用がさらに広がり、省エネルギーの進展に貢献できることを期待したい。

付録 A

バイラテラルフィルタの計算

バイラテラルフィルタはエッジ部分の情報を保持しながら平滑化を行うことを目的とした非線形平滑化フィルタである。周囲画素の空間的な距離による重み付け平均を行うガウシアンフィルタに、周囲画素の輝度差による重み付けを加味したフィルタで、重みはどちらも正規分布に従う。平滑化前の画像データを $f(i,j)$ とすると、平滑化後の画像データ $g(i,j)$ は次式で表される。

$$g(i,j) = \frac{\sum_{n=-w}^w \sum_{m=-w}^w f(i+m,j+n) \exp\left(-\frac{m^2+n^2}{2\sigma_d^2}\right) \exp\left(-\frac{(f(i+m,j+n)-f(i,j))^2}{2\sigma_r^2}\right)}{\sum_{n=-w}^w \sum_{m=-w}^w \exp\left(-\frac{m^2+n^2}{2\sigma_d^2}\right) \exp\left(-\frac{(f(i,j)-f(i+m,j+n))^2}{2\sigma_r^2}\right)} \quad (\text{A.1})$$

ここで、 σ_d は距離のパラメータ、 σ_r は輝度のパラメータである。この値が大きくなると平滑度が大きくなる。 $2w+1 \times 2w+1$ がカーネルの大きさになる。

付録 B

ノンローカルミーンフィルタの計算

ノンローカルミーンフィルタは、画像中で似ている領域を探し出し、それらの領域で加重平均を計算することによってノイズを除去する手法である。本研究では、注目画素 $P(i, j)$ を中心とする矩形領域 ($A_P, E \times E$ 画素) で似ている領域を探索する。注目画素と探索領域 A_P 内の画素 $Q(u, v)$ との間で、それぞれの点での近接矩形領域 ($B_P, B_Q, D \times D$ 画素) の類似度 (重み付きユークリッド距離) に基づいて重み付けを行い加重平均する。 A_P を探索範囲, B_P, B_Q をパッチ範囲と呼ぶ。図 B.1 に注目画素に対する探索範囲とパッチ範囲の位置関係を示す。平滑化前の画像データを $f(u, v)$ とすると、平滑化後の画像データ $g(i, j)$ は次式で表される。

$$g(i, j) = c^{-1}(i, j) \sum_{(u, v) \in A_P} w(i, j; u, v) f(u, v) \quad (\text{B.1})$$

ここで、 $c(i, j)$ は画素 P における正規化係数、 $w(i, j; u, v)$ は画素 P と画素 Q の間の重み係数である。

$$c(i, j) = \sum_{(u, v) \in A_P} w(i, j; u, v) \quad (\text{B.2})$$

$$w(i, j; u, v) = \exp\left(-\frac{S(f(i, j), f(u, v))}{\sigma_h^2}\right) \quad (\text{B.3})$$

$$S(f(i, j), f(u, v)) = \sum_{(m, n) \in B_p} H(m, n; \sigma_a) (f(i + m, j + n) - f(u + m, v + n))^2 \quad (\text{B.4})$$

$$H(m, n; \sigma_a) = \exp\left(-\frac{m^2 + n^2}{2\sigma_a^2}\right) \quad (\text{B.5})$$

ここで、パラメータ σ_h は平滑化の程度を制御するパラメータで値が大きくなるほど平滑度が大きくなる。パラメータ σ_a はパッチ範囲の各位置における重みを制御するパラメータである。

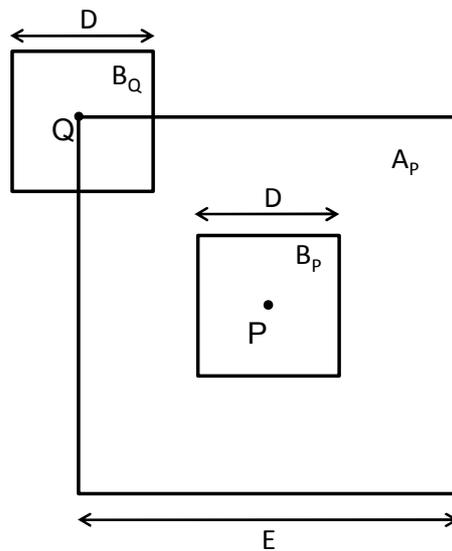


図 B.1 注目画素に対する探索範囲とパッチ範囲の位置関係

付録 C

SSIM と PSNR の計算

C.1 SSIM の計算

SSIM は処理前後の画像の類似度を示す指標で、客観画質評価指標であるが相関係数を取り入れることで主観評価に近づけた指標としている。原画像を $f(i, j)$ 、処理後の画像を $g(i, j)$ とし、輝度の比較項を $l(f, g)$ 、コントラストの比較項を $c(f, g)$ 、類似度の項（ピアソンの相関係数）を $s(f, g)$ とすると、SSIM は次式で表され、画像 $f(i, j)$ と画像 $g(i, j)$ が完全に一致すると最大値 1.0 となる。

$$SSIM(f, g) = [l(f, g)]^\alpha [c(f, g)]^\beta [s(f, g)]^\gamma \quad (\text{C.1})$$

ここで、 l, c, s は次式で表される。

$$l(f, g) = \frac{2\mu_f\mu_g + C_1}{\mu_f^2 + \mu_g^2 + C_1} \quad (\text{C.2})$$

$$c(f, g) = \frac{2\sigma_f\sigma_g + C_2}{\sigma_f^2 + \sigma_g^2 + C_2} \quad (\text{C.3})$$

$$s(f, g) = \frac{\sigma_{fg} + C_3}{\sigma_f\sigma_g + C_3} \quad (\text{C.4})$$

ここで、 μ_f, μ_g と σ_f^2, σ_g^2 は各画像における 11×11 画素の平均と分散である。 σ_{fg} は共分散である。

本研究では、 $\alpha = \beta = \gamma = 1$ 、 $C_3 = C_2/2$ とし、式 (A.1) ~ 式 (A.4) より導かれる次式を用いる。画像全体の SSIM を求める場合は、各画素で計算した SSIM の

平均をとる。

$$SSIM(f, g) = \frac{(2\mu_f\mu_g + C_1)(2\sigma_{fg} + C_2)}{(\mu_f^2 + \mu_g^2 + C_1)(\sigma_f^2 + \sigma_g^2 + C_2)} \quad (C.5)$$

ここで、 $C_1=(K_1L)^2$ 、 $C_2=(K_2L)^2$ である。局所的な平均または標準偏差がゼロに近い領域で SSIM の値が不安定になるのを防止する役割がある。本研究では $K_1=0.01$ 、 $K_2=0.03$ 、 $L=255$ とした。

C.2 PSNR の計算

ピーク信号対雑音比 (PSNR)は客観画質評価指標である。原画像を $f(i, j)$ 、処理後の画像を $g(i, j)$ 、画像の大きさを $m \times n$ 画素とすると、平均二乗誤差 (MSE: Mean Squared Error) は次式で表される。

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(i, j) - g(i, j)]^2 \quad (C.6)$$

輝度信号が 8 ビットの場合、PSNR は次式で定義される。

$$PSNR = 20 \cdot \log_{10} \frac{255}{\sqrt{MSE}} \quad (C.7)$$

謝辞

本論文を執筆するにあたり，長期間にわたる懇切なるご指導，ご鞭撻を賜りました電気通信大学 志賀智一准教授に謹んで感謝の意を表します。また，ご多忙にも関わらず審査をお引き受け頂いた電気通信大学 上野芳康教授，西岡一教授，岡田佳子准教授，高橋裕樹准教授には熱心なご討論と貴重なご意見，ご指導を賜りました。ここに深く感謝いたします。本論文をまとめるに当たりご指導を賜った電気通信大学 渡邊恵理子准教授に感謝いたします。

学位取得のため，職に身をおきながら，大学院に入学することを認めて頂いたNHKエンジニアリングシステムの河口正人前理事長および藤澤秀一理事長に深謝いたします。

また，電気通信大学志賀研究室において多大なご協力を頂きました藤井雅人氏および被験者実験に快くご協力頂いた電気通信大学志賀研究室の院生，学生の皆さんに感謝いたします。

関連論文の印刷公表の方法及び時期

1. 関昌彦, 志賀智一

論文題目「視覚マスクング効果を利用したノイズ劣化画像の復元」

平成27年4月 電子情報通信学会論文誌 Vol.J89-D, No.4, pp.598-605

(3章, 4章に関連)

2. Masahiko Seki, Masato Fujii and Tomokazu Shiga

論文題目「Address power reduction method for high-resolution plasma display panels using address data smoothing based on a visual masking effect」

平成28年11月 IEICE Transactions on Electronics, Vol.E99-C, No.11,

pp.1277-1282 (5章に関連)