

博士学位論文

画素適応処理による
立体映像表示・自由視点画像合成の
高画質化の研究

平成25年12月13日

指導教員 苗村 健 教授

東京大学大学院情報理工学系研究科
電子情報学専攻 48-117411

浜田 宏一

Abstract

In recent years, pixel adaptive image processing methods have begun to be used in consumer products. The development of the semi-conductor technology and the enhancement of the signal processing technology enable us to use high-cost image processing methods such as pixel adaptive image processing. This dissertation focuses on the image quality enhancement based on the pixel adaptive processing. I propose pixel adaptive methods which improve the image quality for stereoscopic display and free-viewpoint image synthesis . The realtime or fast implementation of the methods is also proposed.

First, this dissertation introduces a field-sequential stereoscopic display system with a 42-inch diagonal HDTV DC-type plasma display panel (PDP). This system uses an LCD shutter stereoscopic eyeglass, synchronized with the left and right pictures on the display by infrared signals. The light-emission scheme with twelve sub-fields for stereoscopic display and a signal-processing method for improving grayscale expression are developed. The effectiveness of the signal-processing method is confirmed by subjective evaluation. Though the stereoscopic images are displayed on the PDP using the proposed light emission scheme and grayscale signal processing, it is found that crosstalk impairment is incurred due to leakage between light to the left and right images. We calculate the amount of crosstalk as a function of phosphor decay time and estimated the desirable decay time for a field-sequential stereoscopic display system. This enables us to develop a signal processing method for reducing the crosstalk impairment with pixel adaptive processing, and a subjective evaluation confirms the effectiveness of the method. This system becomes the prototype of the 3D PDP television which is available today.

Second, the image quality enhancement of free-view point image synthesis is proposed. Free-viewpoint image synthesis refers to the process of combining a set of multi-view images to generate an image from a new viewpoint where no camera is

actually located. The reconstruction-based super-resolution technology is used in combination with the synthesis. A fast GPU (graphic processor unit) implementation of the super-resolved free-viewpoint image synthesis is proposed. To speed up the super-resolution reconstruction process, an efficient and compact matrix representation that is suitable for parallelization using a GPU is proposed. I also modify the initial image and regularizer for the reconstruction process to reduce the iteration time until convergence. As a result, I achieve a speed up of about 70 times compared to the original CPU-implemented algorithm, requiring only 130ms for synthesizing a 320x240 pixel free-viewpoint image from 160x120 pixel input images. In order to improve the image quality, I also propose a super-resolution method which is robust for registration errors. The super-resolution processing requires precise registration of low-resolution images and the registration error degrades the resulting high-resolution image. In order to handle inaccuracies in registration, the robust super-resolution methods have been proposed. I propose an adaptive pixel weighting method which uses pixel weighting variables for the input pixels. The proposed method is the extension of the conventional pixel selection type robust super-resolution. The cost function which includes the regularization term for the weighting variables is defined and the cost function is minimized against the weighting variables and the resulting high-resolution image simultaneously. The proposed adaptive pixel weighting method can define the weight properly without knowing how to define it. This is a large contribution in practical use of super resolution. The effectiveness of the proposed method is confirmed with super-resolved free-viewpoint image synthesis.

The methods proposed in this dissertation realize the image quality enhancement in the field of stereoscopic display system and the super-resolution technology. I hope the pixel adaptive image processing are widely used in consumer products and people enjoy high quality images with the methods.

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の目的	1
1.2	本論文の構成	3
第 2 章	研究の背景	5
2.1	はじめに	5
2.2	リアルタイム画像処理技術	6
2.2.1	パイプライン処理	6
2.2.2	並列処理	8
2.3	立体表示技術	8
2.3.1	メガネ式立体表示	10
2.3.2	裸眼立体表示	11
2.3.3	多眼式立体表示	11
2.3.4	現在の立体表示の課題	11
2.4	超解像処理技術	13
2.4.1	再構成法	13
2.4.2	Fast and Robust Super Resolution	15
2.4.3	関連研究	16
2.5	自由視点映像合成の概要	17
2.5.1	超解像 plane-sweeping による自由視点映像合成	18
2.5.2	超解像自由視点映像生成手法の高速化実装に向けて	19
2.6	本研究の位置づけ	20
	参考文献	20
第 3 章	PDP を用いた時分割 2 眼立体映像表示の実現	25
3.1	はじめに	25
3.2	PDP における時分割立体表示方式	26

3.2.1	駆動電圧マージン	26
3.2.2	シャッタメガネの時間応答	26
3.2.3	サブフィールド発光スキーム	27
3.2.4	大形パネルへの適用	27
3.2.5	AC 駆動形パネルへの適用	28
3.3	階調信号処理の改善	29
3.3.1	フィールド間誤差拡散	29
3.3.2	相補的誤差拡散	30
3.3.3	階調信号処理の構成	31
3.4	立体画像表示実験	34
3.4.1	実験装置	34
3.4.2	表示結果	35
3.5	画質主観評価実験	35
3.5.1	評価実験方法	35
3.5.2	結果と考察	37
3.6	むすび	38
	参考文献	39
第 4 章	PDP を用いた立体表示における画素適応クロストークキャンセラ	41
4.1	はじめに	41
4.2	DC 形 PDP を用いた時分割立体表示方式	41
4.3	クロストーク妨害とその理論値	43
4.3.1	クロストーク妨害の原因	43
4.3.2	蛍光体残光量の計算	43
4.3.3	残光時定数とクロストーク量との関係	46
4.4	クロストーク量の測定とクロストークの改善	47
4.4.1	クロストークキャンセラ	47
4.4.2	クロストーク量の測定と蛍光体の所要特性	48
4.4.3	サブフィールドのビット割り当てとクロストーク量	50
4.4.4	クロストークキャンセラの最適化	52
4.5	画質主観評価実験	52
4.5.1	クロストークキャンセラの効果	52
4.5.2	評価実験方法	52
4.5.3	結果	54
4.6	むすび	56

参考文献	57
第 5 章 超解像自由視点画像合成の高速化	59
5.1 はじめに	59
5.2 超解像自由視点画像合成の概要	60
5.2.1 デプス推定と位置合わせの関係	60
5.2.2 評価関数 (E1)	61
5.3 GPU を用いた並列化実装	62
5.3.1 観測行列作成の並列化	62
5.3.2 観測行列の格納方式	64
5.3.3 疎行列データ格納順序による演算速度差	65
5.4 高速化のためのアルゴリズムの改善	66
5.4.1 再構成演算における初期画像の提案	67
5.4.2 再構成演算の初期画像に関する実験	69
5.4.3 再構成演算における正規化項の改善：評価関数 (E2)	70
5.4.4 評価関数の違いによる再構成演算の速度差	74
5.5 実験	77
5.6 むすび	80
参考文献	81
第 6 章 画素適応重み付けによる超解像の提案と超解像自由視点画像合成への応用	83
6.1 はじめに	83
6.2 ロバスト超解像処理の概要	84
6.3 画素適応重み付けによる超解像処理の提案	85
6.3.1 画素適応重み付けによるコスト関数	85
6.3.2 最適化方法	86
6.4 実験	87
6.4.1 超解像自由視点画像合成の概要	87
6.4.2 他方式との比較	88
6.4.3 実験条件	89
6.4.4 出力画像の比較	91
6.4.5 重み係数の視覚化	92
6.4.6 観測画像ごとの寄与割合	93
6.4.7 別の画像セットを用いた実験	96
6.4.8 設計のしやすさに関する考察	97

6.5	むすび	99
	参考文献	103
第7章	結論	105
7.1	本論文の成果	105
7.2	今後の課題と展望	107
	発表文献	109
	謝辞	113

目次

1.1	本論文の構成	3
2.1	テレビ向け高画質化信号処理技術の変遷	5
2.2	画像処理方法の演算方法の形態	7
2.3	GPU NVIDIA Fermi architecture.	9
2.4	立体視の生理的要因	9
2.5	2眼式立体表示	10
2.6	多眼式立体表示	12
2.7	現在の立体表示の課題	12
2.8	超解像技術の例	13
2.9	レジストレーション (Registration) と復元 (Restoration)	14
2.10	観測モデル (Observation model)	14
2.11	Fast and Robust super-resolution	16
2.12	カメラアレイ	17
2.13	奥行き平面	18
3.1	LCD シャッタ ON/OFF 信号 (上側) に対する光の透過率 (下側) の測定値	27
3.2	時分割立体表示のためのサブフィールド発光スキーム	28
3.3	大形 DC パネルの場合のサブフィールド発光スキーム	28
3.4	AC 駆動形 PDP の場合のサブフィールド発光スキーム	29
3.5	フィールド間誤差拡散の原理	30
3.6	左右逆スキャンによる相補的誤差拡散	31
3.7	階調信号処理のブロック図 (L 側)	32
3.8	階調信号処理のブロック図 (R 側)	33
3.9	実験装置のブロック図	34
3.10	信号処理のブロック図	34
3.11	実験装置	35

3.12	“肌色チャート”	36
3.13	“フラワーポット”	36
3.14	主観評価実験の結果	37
4.1	DC 形パネルのサブフィールド発光スキーム	42
4.2	実験装置のブロック図	42
4.3	発光の漏込み (緑)	44
4.4	蛍光体への入力紫外線束 (上), および付活剤励起密度 (下)	45
4.5	発光輝度とクロストーク量 (緑, パネル下側中央部)	46
4.6	発光輝度とクロストーク量 (赤, パネル下側中央部)	47
4.7	クロストークキャンセラ	48
4.8	クロストーク測定用パターン	48
4.9	測定値と理論値との比較 (緑)	49
4.10	測定値と理論値との比較 (赤)	49
4.11	サブフィールドの配列とクロストーク量 (緑, パネル下側中央部)	51
4.12	サブフィールドの配列とクロストーク量 (赤, パネル下側中央部)	51
4.13	クロストークキャンセラ無し (計算機シミュレーション)	53
4.14	クロストークキャンセラ有り (計算機シミュレーション)	53
4.15	“ライオン”	54
4.16	“フィッシュ”	54
4.17	“フラワーポット”	55
4.18	主観評価実験の結果	55
5.1	基本設定	60
5.2	デプス推定と位置合わせの関係	61
5.3	観測行列	63
5.4	疎行列に対する格納方式 (提案方式)	65
5.5	疎行列の格納順序	65
5.6	超解像処理における高解像度画像と低解像度画像の関係	67
5.7	ぼけ関数 \mathbf{b}	68
5.8	ラプラシアンフィルタ	68
5.9	繰り返し演算回数に対する高域強調割合 k と MSE の関係 (評価関数 (E1) を使用)	69
5.10	混色による画像合成の拡大 $I_{(t)\uparrow}$	70
5.11	高域強調後の初期画像 $I_{(t)\uparrow}^h (k = 0.3)$	70

5.12	評価関数 (E1) を使った場合の超解像合成画像 (繰り返し演算回数 13 回)	71
5.13	(5.5) 式, (5.11) 式の第一項と第二項の動きを示す模式図	72
5.14	(5.10) 式による超解像結果	72
5.15	繰り返し演算回数に対する高域補償割合 k と MSE の関係 (評価関数 (E2) を使用)	74
5.16	評価関数 (E2) を使った場合の超解像合成画像 (繰り返し演算回数 5 回, (5.12) 式の演算後)	75
5.17	繰り返し演算回数に対する $ \alpha_j \nabla E_{sr}(X_j) $ の値	75
5.18	(5.5) 式, (5.11) 式における第一項と第二項の 1 次ノルム ($L_1 norm$)	76
5.19	(5.5) 式, (5.11) 式において, 第一項と第二項の符号が同じとなる画素の割合	76
5.20	入力画像 (筑波大学多視点画像データベースより)	78
5.21	処理結果例	79
6.1	基本設定	87
6.2	位置合わせと奥行き推定の関係	88
6.3	入力画像 (city)	90
6.4	デプスマップ (左) と最小コストマップ (右) (city)	90
6.5	入力画像枚数に対する MSE 値 (city)	92
6.6	正解画像と超解像結果 (入力画像枚数: 24 枚)	93
6.7	位置合わせの信頼性に基づく正則化を用いた方式 (depth-reliability-based regularization method) と提案方式 (adaptive pixel weighting method) の超解像結果の差分画像	94
6.8	重みを全て 1 とした方式 (baseline method) において, λ の値を小さくした場合の超解像結果	94
6.9	画素選択方式 (pixel selection method) における重み係数を可視化した画像	95
6.10	提案方式 (adaptive pixel weighting method) における重み係数を可視化した画像	95
6.11	入力画像の寄与割合	96
6.12	入力画像 (CD cases and a poster (unclouded))	97
6.13	デプスマップ (左) と最小コストマップ (右) (CD cases and a poster (unclouded))	98
6.14	入力画像 (Humvee)	98
6.15	デプスマップ (左) と最小コストマップ (右) (Humvee)	99

6.16	入力画像枚数に対する MSE 値 (CD cases and a poster(unoccluded)) . . .	100
6.17	入力画像枚数に対する MSE 値 (Humvee)	100
6.18	画素選択方式 (pixel selection method) におけるパラメータ th_{sel} に対する MSE 値の変化	101
6.19	提案方式 (adaptive pixel weighting method) におけるパラメータ λ_2 に対する MSE 値の変化	101

表目次

3.1	駆動電圧マージンの測定結果	26
3.2	主観評価実験の評価条件	37
4.1	パネルに使用されている蛍光体	44
4.2	サブフィールドと励起パルス数 (配列 A)	46
4.3	サブフィールドと励起パルス数 (配列 B)	50
4.4	主観評価実験の評価条件	55
5.1	行列データ格納順序と演算スループットの関係	66
5.2	実験環境	77
5.3	処理速度計測結果 (単位 ms)	78
6.1	パラメータ値と MSE 値 (city)	91
6.2	パラメータ値と MSE 値 (入力画像:CD case)	99
6.3	パラメータ値と MSE 値 (入力画像:Humvee)	102

第1章

序論

1.1 研究の目的

近年，半導体技術の進歩や実装方法の改善により，一画素ごとに処理とパラメータを変化させる画像処理である画素適応処理の研究が民生分野で活用されつつある．これは，より高品質な画像・映像を視聴したいというユーザの要求に答えるものであり，今後ますます活用の機会が増えるものと想定される．画面全体で同じ処理を行う画像処理と比較して，一画素ごとに処理とパラメータを変化させる画素適応処理は，画質改善処理に適していると考えられるが，その演算量の多さから，リアルタイム処理化が困難であるという課題があった．

本論文では，画素適応処理を用いた画像の高画質化に着目する．立体映像表示と自由視点画像合成を，高画質化のターゲットとして取り上げ，それぞれリアルタイムもしくは高速化実装を通して高画質化を実現するアルゴリズムを提案する．立体映像表示に関しては，プラズマディスプレイパネル（PDP）を用いた時分割2眼立体表示方法を提案し，そのハードウェア実装および画質改善方法に関して提案を行う．また，自由視点画像合成においては超解像技術を組み合わせた超解像自由視点画像合成の研究において，その高速化実装および画質改善方法に関して提案する．さらに高画質化のために提案した方式を一般化し，幅広く他の実装においても適用可能であることを示す．

画像処理技術の高画質化の検討を行う際には，その処理が，リアルタイムもしくは，十分に高速に実行される事が望ましい．例えば，立体映像表示方式の検討においてはフリッカー（映像の時間方向の点滅）の見え具合も画質の要件となるため，その画質を評価するためにはリアルタイム実装が必須となる．また，リアルタイム実装が必須でない場合であっても，処理の高速実装が可能となると，処理結果を見ながらのパラメータ調整が可能となるため，パラメータ調整自体が容易となるだけでなく，提案する画質改善方式が有効かどうかの確認が容易に行えるというメリットがある．そのため，本論文においては，

PDP を用いた立体映像表示方式および超解像自由視点画像合成の二つの画像処理方式に関して高画質化方式の検討を行うが、その検討に先立ち、リアルタイム実装方法もしくは高速化実装方法の検討を行う。

立体表示装置における高画質化信号処理方式の提案では、PDP と液晶シャッターメガネを用いて、時分割立体画像が表示可能なサブフィールド発光スキームを提案する。研究当初、PDP を用いた立体表示装置は発表されておらず、本論文にて提案する方法が、初めての試みであった。PDP を用いる場合に課題となっていた階調信号処理に関して、立体表示に適した改善方法を提案する。提案した階調信号処理をハードウェア実装し、より実際のパネルを用いて時分割立体画像が表示可能なことを確認する。高画質化の観点から、立体映像表示時に課題となっていたクロストーク妨害について検討する。クロストーク妨害とは、左目用の画像が右目に漏れ込む（もしくは、右目用の画像が左目に漏れ込む）画質を劣化させる妨害である。本論文では、クロストーク妨害の原因を調べるとともに、蛍光体の残光時定数とクロストーク量との関係を定量的に求めた。さらにクロストークキャンセラと呼ぶ画素適応処理方式を提案、実装し、クロストーク妨害を低減できることを主観評価実験により確認した。PDP を用いた立体表示方式の研究は、その後、メーカーとの共同研究へと発展し、立体表示が可能な PDP テレビとして製品化された。画素適応処理による高画質化の研究が民生品へと適用された例である。

自由視点画像合成における高画質化方式の提案では、自由視点画像合成と超解像技術を組み合わせた超解像自由視点画像合成方式の高画質化に取り組んだ。まず、超解像自由視点画像合成の演算高速化に向けて、超解像再構成演算の実装上の提案と、アルゴリズム面での提案を行い、全体のアルゴリズムをグラフィックプロセッシングユニット (GPU) を用いて実装した。超解像自由視点画像合成の高速化実装が可能となったことで、出力結果を見ながらのパラメータ調整が可能となり、画質改善に貢献した。さらなる画質改善に向けて、入力画像一画素ごとに重み係数を割り当てる、画素適応重み付けによる超解像処理の提案をおこなった。提案する方式は、従来、ロバスト超解像処理として提案されていた方式を拡張するものであり、これまで何らかのヒューリスティックにより設定されていた重み係数を、コスト関数の最小化の枠組みにより設定することを可能とした。重み係数に対する正則化項をコスト関数に導入し、再構成演算におけるコスト関数の最適化と同時に重み係数も最適化するという新しい枠組みを提案する。提案方式は、一般的なロバスト超解像方式の一つとして提案するが、その重み決定方法を超解像自由視点画像合成へ適用し、画質が改善されることを確認した。位置合わせ誤差という、実運用上の課題に対処できる方式を提案できたことは、画素適応処理の民生分野での活用に大きく貢献できたと考えられる。

本論文で提案する画素適応処理による高画質化技術は、画像処理研究としては当然のごとく行われている技術であるが、その技術を民生品に搭載しようとする、リアルタイム

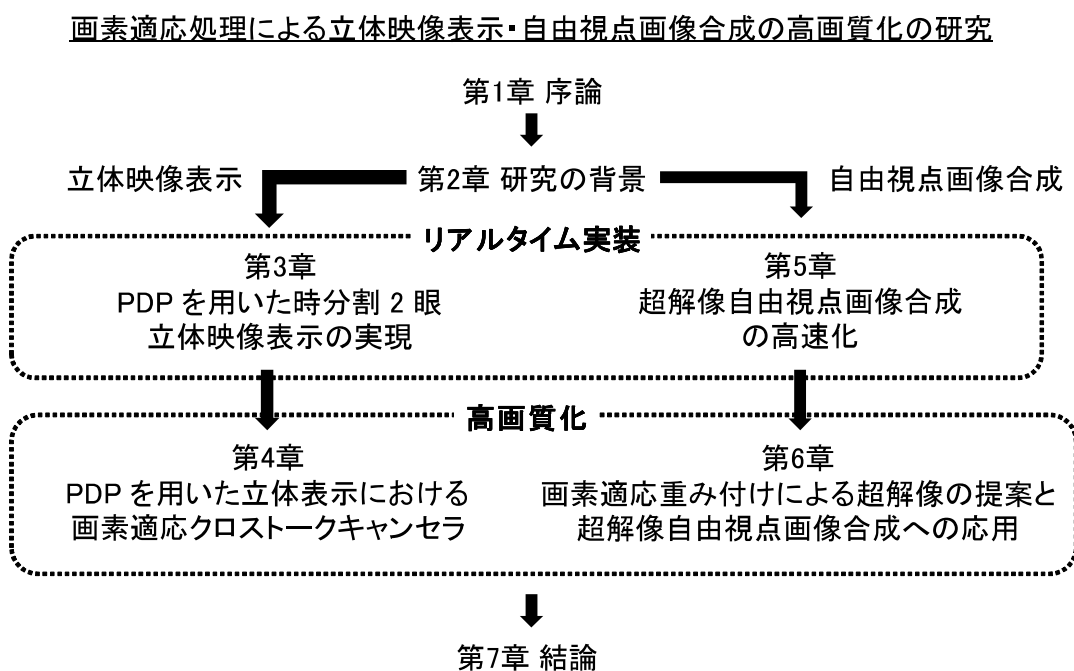


図 1.1 本論文の構成

処理化や高速処理化が必要となり、アルゴリズム面でも処理を見直す必要が生じる。日々目覚ましい進歩を遂げている画素適応処理による高度な画像処理技術が、実装技術の進歩と半導体技術の進歩により、民生分野においても広く活用され、発展していることが期待される。

1.2 本論文の構成

本論文の構成は次のとおりである。

- 第1章 序論
- 第2章 研究の背景
- 第3章 PDPを用いた時分割2眼立体映像表示の実現
- 第4章 PDPを用いた立体表示における画素適応クロストークキャンセラ
- 第5章 超解像自由視点画像合成の高速化
- 第6章 画素適応重み付けによる超解像の提案と超解像自由視点画像合成への応用
- 第7章 結論

図 1.1 は、各章の関係を示したものである。以下、本論文の流れを簡単に説明する。

第2章では、本研究の背景について述べる。本論文の主題である画素適応処理による高画質化について、民生品への適用の観点から、関連研究を紹介する。

第3章では、プラズマディスプレイパネル (PDP) と液晶シャッターメガネを用いて、時分割立体画像が表示可能な立体表示装置を実現する。立体表示に適したサブフィールド発光スキームと階調信号処理に関する提案を行う。提案したサブフィールド発光スキームと、階調信号処理をハードウェア実装し、実際のパネルを用いて時分割立体画像が表示可能なことを確認する。

第4章では、第3章にて作成した時分割立体表示装置の課題であるクロストーク妨害の低減方法について検討する。クロストーク妨害が主に蛍光体残光により発生していることを示すとともに、残光時定数とクロストーク量との関係を定量的に求める。また、画素適応処理によるクロスロークキャンセラを提案し、その効果を主観評価実験により確認する。

第5章では、立体映像表示装置の信号源としても活用が期待されている自由視点画像合成技術に着目し、超解像技術を組み合わせることで高画質化を実現する超解像自由視点画像合成の高速化実装を行う。演算高速化に向けて、超解像再構成演算の実装上の提案と、アルゴリズム面での提案を行い、全体のアルゴリズムをグラフィックプロセッサ (GPU) を用いて実装する。

第6章では、高画質化の観点で画素適応処理である超解像処理を見直し、位置合わせ誤差にロバストな超解像処理を提案する。提案するロバスト超解像処理は、一般的なロバスト超解像処理のパラメータを、超解像再構成演算の繰返し演算中に同時最適化する新しい枠組みであり、超解像自由視点画像合成だけでなく、広く一般の超解像処理に用いることができることを示す。また、提案するロバスト超解像処理を、超解像自由視点画像合成に適用し、画質が改善されることを示す。

第7章では、本論文の成果をまとめるとともに、今後の課題と展望に触れ、全体の結論とする。

第2章

研究の背景

2.1 はじめに

本章では画素適応処理による高画質化の研究の背景に関して述べる。まず最初に、高画質化を検討する際に重要となるリアルタイム画像処理技術に関して概要を述べる。次に、第3章、第4章にて検討を行う立体映像表示に関連して、立体感を与える表示技術に関してまとめる。最後に第5章、第6章にて検討を行う超解像技術および自由視点画像合成技術に関して、それぞれ概要を述べる。

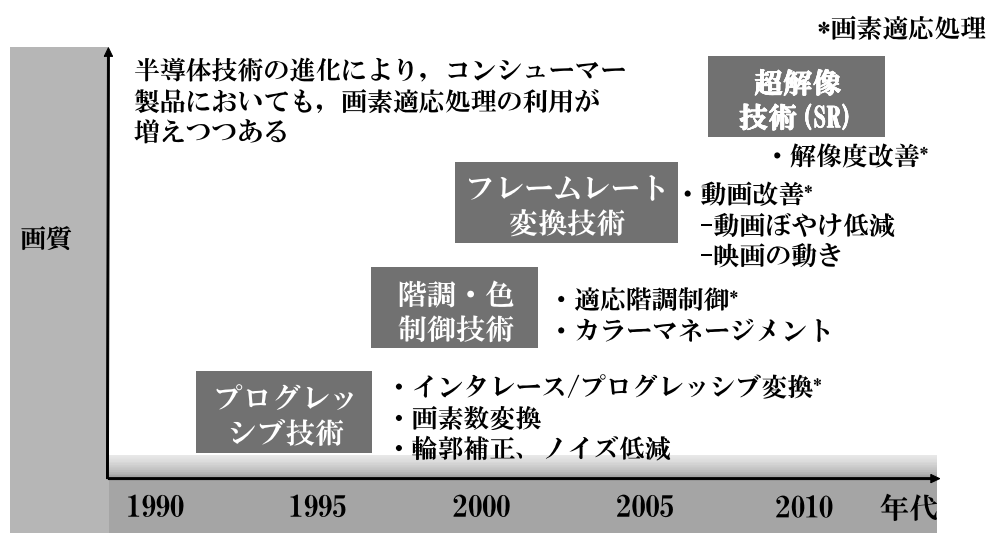


図 2.1 テレビ向け高画質化信号処理技術の変遷

2.2 リアルタイム画像処理技術

画像処理技術の高画質化の検討を行う際には、その処理自体が、リアルタイムもしくは、十分に高速に実行される事が望ましい。第3章、第4章で論じる立体映像表示方式の検討においては、フリッカー（映像の時間方向の点滅）の見え具合も画質の要件となるため、リアルタイム実装は必須となる。また、リアルタイム実装が必要ない場合であっても、処理の高速実装が可能となると、処理結果を見ながらのパラメータ調整が可能となるため、画質改善が可能かどうかの確認が容易となる。

民生品において、画素適応処理が積極的に用いられてきた例として、テレビ向け高画質化技術が挙げられる。図 2.1 にテレビ向け高画質化信号処理技術の変遷を示す [1]。1990年代からのフラットパネルディスプレイの登場に伴い、テレビ側での画素数変換が必須となった。放送映像は、インタレース画像（飛び越し走査画像）であるため、垂直方向に正しく画素数変換を行うためプログレッシブ画像（順次走査画像）に変換する信号処理技術がテレビに実装された。このインタレース・プログレッシブ変換は、一画素ごとに被写体の動きを検出して補間処理を変えろという画素適応処理の例である。その後、フレーム間の被写体の動きを予測してフレーム内挿を行うフレームレート変換技術や、解像度を改善するための超解像技術等がテレビ向けに実装されてきている。民生品においても、高画質な映像提示に向けて、画素適応処理の利用が増えつつあることがわかる。

一方、画像処理において、リアルタイム実装や処理の高速化を行うには、逐次実効（順序処理）方式から、パイプライン処理型や並列処理型等に処理を変更することがよく行われる。本論文では、第3章、第4章で述べるプラズマディスプレイパネル (PDP) を用いた立体映像表示装置の実装においては、パイプライン処理型の実装を行う。また、第5章、第6章にて述べる超解像を用いた自由視点画像合成手法においては、グラフィックプロセッシングユニット (GPU) を用いた並列処理型の実装を行う。ここでは、パイプライン処理と並列処理について、その概要を記す。図 2.2 は、処理形態の概念を示す図である。図中の A, B, C が一つの命令のステップを表し、添えてある数字が同じ A, B, C が一つの処理であることを意味している。

2.2.1 パイプライン処理

図 2.2(2) は、パイプライン処理の概念図である。パイプライン処理は単一のデータの処理を高速化するわけではなく、データストリームの処理をする際のシステムのスループットを向上させる。ステージ 1 ~ 3 と書いたそれぞれのステップに対応する処理装置を用意し、各命令の A のステップはステージ 1 に、B はステージ 2 にというように、各

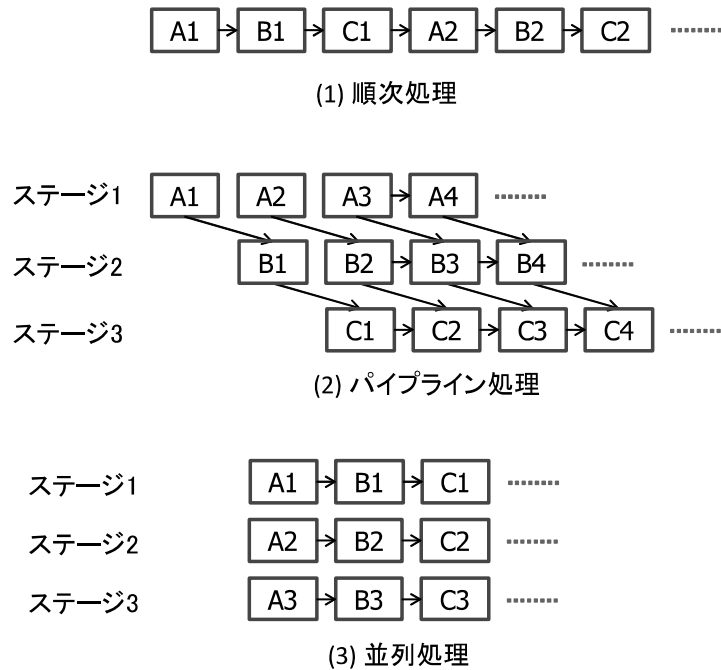


図 2.2 画像処理方法の演算方法の形態

ステップをステージに割付け、1 ステップ終るとに以降の処理を次のステージに送り、そのステージには次の命令の該当するステップを割付ける、という方法である。この方法は同じような命令が連続する場合、特にループ処理などには適した方法である。繰返し処理が必要な浮動小数点処理やベクトル処理と呼ばれる配列データの処理などに応用される場合が多い。他の場合にも同一ステージでの処理が可能であれば一般的に採用することができるが、その場合は、各ステップの時間幅を一番時間がかかる処理に合わせる、どこかのステージで処理が間に合わなくなった場合の救済処置を用意する、などの配慮が必要になる。

パイプラインを長くすると、レイテンシは増大し、1つの信号がパイプの先から先まで到達するのに時間がかかるようになる。パイプライン化されたシステムでは、あるステージが前のステージのリソース（回路、処理装置、メモリなど）を再利用できないため、一般に1つずつ処理するシステムよりも多くのリソースを必要とする。さらに言えば、パイプライン処理によって1つの命令の完了にかかる時間は増大する可能性がある

FPGA(field-programmable gate array) や、ASIC(application specific integrated circuit) を用いて画像処理を実装する場合には、このパイプライン処理がよく用いられる。

2.2.2 並列処理

図 2.2(3) は、並列処理の概念図である。この方式は、一連の命令による処理を同時に並行して行う方法である。図では一連の命令のみを並行するように書いてあるが、複数の命令列を平行に行うことも可能であり、またその作業内容が同種でなければならないなどの制約もあまりない。しかし、演算処理部全体を複数ステージ用意するので、装置は大型化しやすく、コストなどの点では不利である。一般の命令列を並列化するには、並行する処理の時間幅を合わせるためにスケジューリングと呼ばれる前処理が必要になる。個々の処理時間を調べ長いものと、短いものを支障のない範囲で入換えたり、実行の順序を変えたりの操作（優先処理）が行われる場合もある。

2.2.2.1 GPU を用いた高速化

並列演算の代表的な例として、近年著しく計算性能が向上しているグラフィックスハードウェア (GPU) を用いた並列計算が挙げられる。

図 2.3 に、NVIDIA 社 GPU の構成例 (Fermi アーキテクチャ) を示す [2]。多数の演算コアが搭載されており、並列演算を想定した構成となっていることが分かる。多数の演算コアがあったとしても、GPU は (CPU も同じであるが) 外部メモリへのアクセスのレイテンシが非常に長いため、演算性能を出すのは容易ではない。NVIDIA 社 GPU の場合は、一回外部メモリにアクセスすると最低でも 200 サイクル、通常、400~600 サイクルの間、演算コアが待たされてしまう。そのため、メモリレイテンシを隠蔽して、演算コアを稼働させ続けないとパフォーマンスが出ない構造となっている。Fermi アーキテクチャに代表される最近の GPU は、CPU と同様に、メモリキャッシュを内蔵することで、外部メモリへのアクセスを減らし、メモリレイテンシの問題を解決しようとしている。

2.3 立体表示技術

立体表示は、人間の立体視機能を利用して実現される。人間が立体を知覚する要因 [4] には、生理的要因と心理的要因がある。生理的要因を図 2.4 に示す [3]。輻輳は、一点を注視したときの左右の目の網膜像の対応点の水平ずれ量にもとづく奥行き知覚である。調節は、目のピント合わせによる奥行き知覚である。運動視差は、視点移動に伴う網膜像の変化をもとに奥行きを知覚する。輻輳が注視点までの絶対距離を知覚するのに対して、両眼視差は注視点からの相対距離を知覚するという違いがある。生理的要因は人間が意識しなくとも機能する。そのため、立体表示装置の研究では、これらの要因について考慮する必要がある点が、2次元表示装置の研究との違いである。

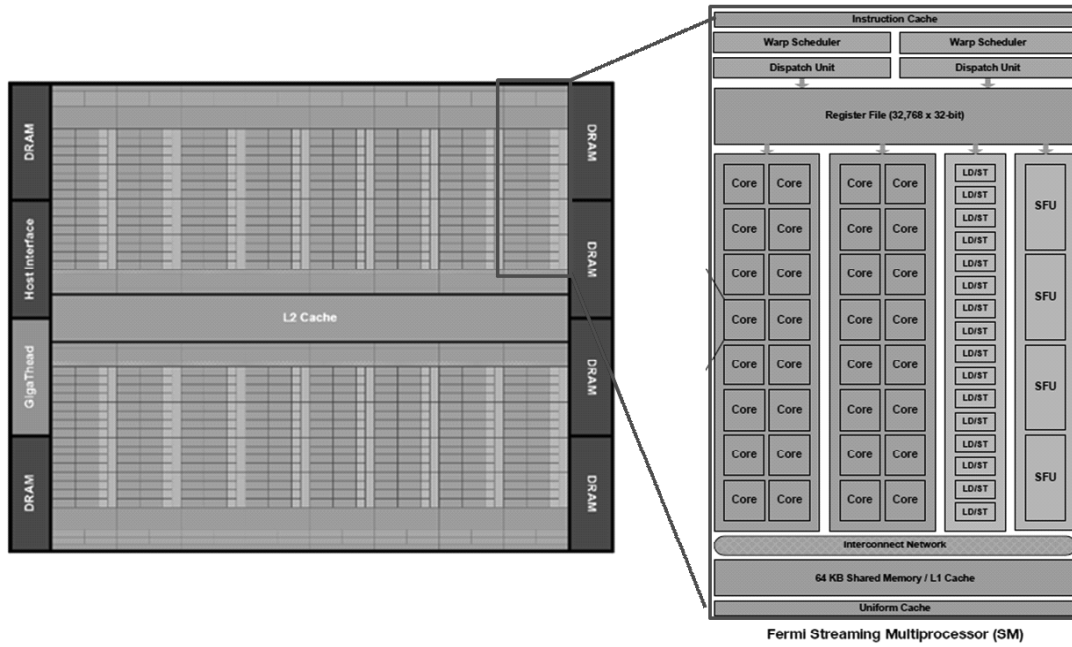


図 2.3 GPU NVIDIA Fermi architecture [2]

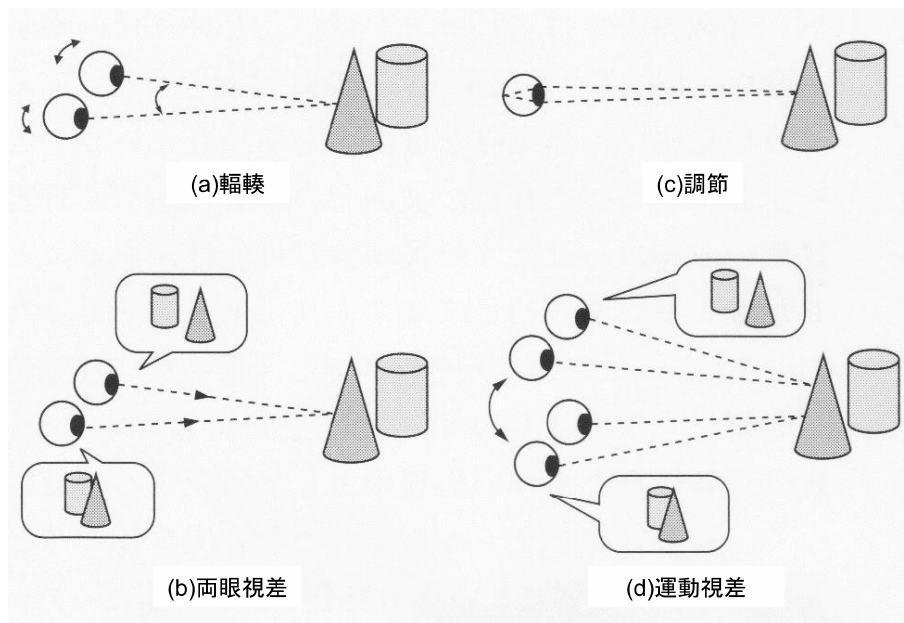


図 2.4 立体視の生理的要因 [3]

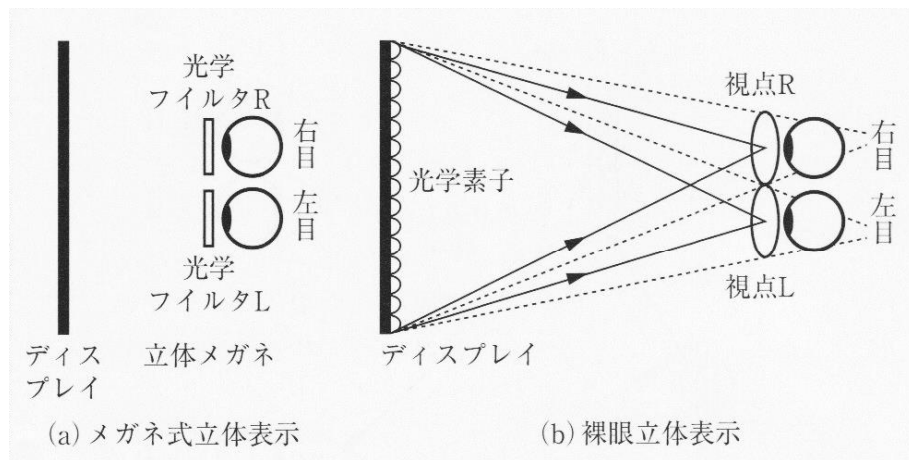


図 2.5 2 眼式立体表示 [3]

2.3.1 メガネ式立体表示

人間は、左右の目に映る画像の差をもとに、立体視の生理的要因により立体を知覚する。そこで、左右の目に対応した視差をもつ視差画像を表示することで立体表示を実現できる。これが2眼式立体表示であり、最も基本的な立体表示方式である。この場合、輻輳と両眼視差で立体視することになる。

2眼式立体表示では、左右の画像を同一のディスプレイ画面に表示して、これらを左右の目に分離して見せる必要がある。そのために、図 2.5(a) に示すように、光学フィルタを取り付けた立体メガネを用いるのがメガネ式立体表示である。立体テレビでは、光学フィルタとして偏光フィルタ (偏光子) や液晶シャッタが用いられる。

偏光メガネを用いる方法では、ディスプレイ画面に走査線毎に回転方向が逆の円偏光を与える波長板を貼り付け、奇数と偶数の走査線で左右の画像を表示する。左右に対応する円偏光のみを通過する偏光子を取り付けた偏光メガネをかけて観察する。偏光メガネは安価であるが、立体表示の垂直解像度がもともとのディスプレイの半分に減少する。

液晶シャッタメガネを用いる方法では、ディスプレイを高速駆動して、左右の映像を交互に時分割表示する。これに同期して、メガネに取り付けた左右の液晶シャッタを交互に開閉する。液晶シャッタメガネは高価であるが、立体表示の解像度はもともとのディスプレイと等しい。第3章、第4章にて述べる立体表示方式においても、画質の観点から解像度の劣化しない液晶シャッタメガネを用いた2眼式立体表示方式を用いる。

2.3.2 裸眼立体表示

図 2.5(b) に、裸眼立体表示方式の概念図を示す。光学フィルタを用いることができない裸眼立体表示では、右目と左目を置いて見る視点を空間に設定することで左右の画像を分離する。図 2.5(b) に示すように、それぞれの視点に集光する光線で、対応する右目用と左目用の画像を表示する。視点位置に目を置くと、対応する画像が見える。メガネの着用は不要になるが、観察位置に制限が生じる。裸眼立体表示を実現する視点の形成方法にはさまざまな方法が存在する [5] が、視点数倍の表示画素数が必要となるため、高解像度の裸眼立体表示を実現することは、現状困難である。

2.3.3 多眼式立体表示

多眼式立体表示では、例えば図 2.6 に示すように、レンチキュラレンズの各レンズに 3 個以上のピクセルを対応させ、3 個以上の視点を空間に発生させる [6]。視点間隔は、平均両眼間隔 65mm 以下、あるいはその半分程度にすることが多い。

多眼式立体表示では、視点数分だけ、視域が水平方向に広がる。目を水平方向に移動すると、目の位置に応じて見える視差画像が変化するので、運動視差が得られる。すなわち、輻輳と両眼視差に加えて、運動視差による立体知覚が可能となる。多眼立体表示では、観察範囲は、視点が並ぶ水平方向のみでなく、奥行き方向にも広がる [7]。

フラットパネルディスプレイを用いる場合には、そのピクセル配置により、水平解像および垂直解像度が決まるため、多眼立体表示用に開発されたピクセル配置 [7]、レンチキュラレンズやパララックスバリアを傾ける方法 [8]、色フィルタの並べ方を変える方法 [9] 等が提案されている。

2.3.4 現在の立体表示の課題

2 眼式立体表示の第一の問題点は、図 2.7(a) に示されるように、調節と輻輳の不一致である。左右の目に正しい視差画像が表示されると、輻輳は正しく奥行きを知覚する。しかし、目のピントは画像を表示しているディスプレイ画面に合うため、調節は正しく機能しない。このような調節と輻輳の不一致は、実世界では生じないため、視覚疲労を引き起こすと言われている。

第二の問題点は、運動視差の欠如あるいは不完全さである。図 2.7(b) に示すように、2 眼式では運動視差は機能しない。人間は、自身の運動に対する網膜像変化を無意識のうちに予測しているため、このような運動視差の欠如や不完全さが違和感となり、臨場感が低下すると言われている。

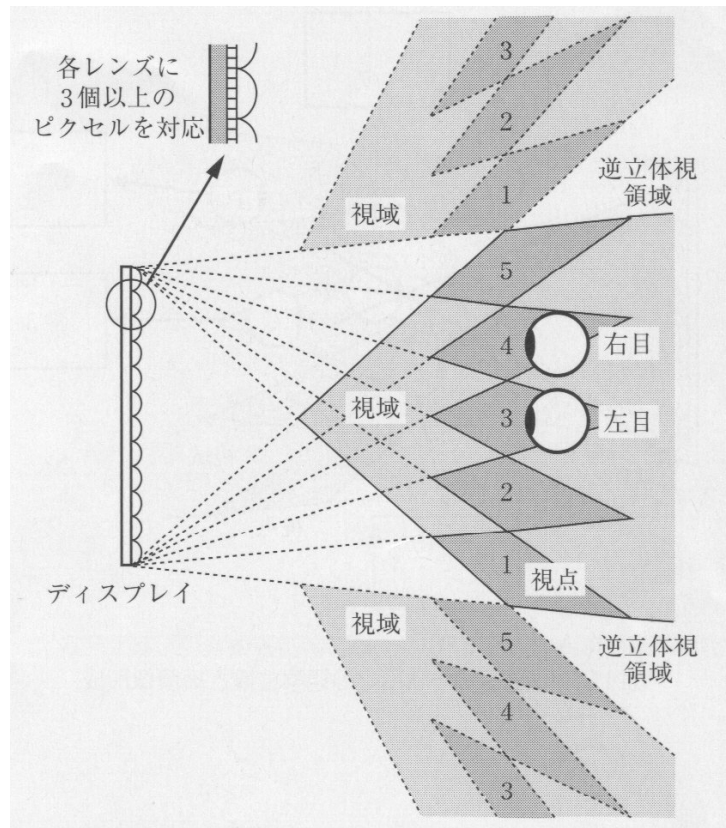


図 2.6 多眼式立体表示 [6]

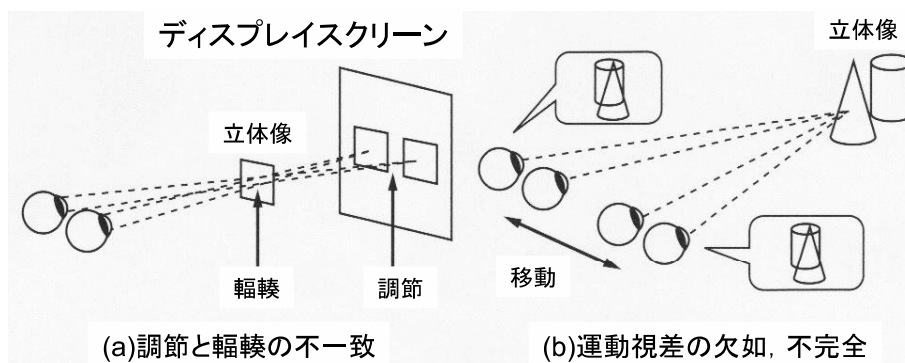


図 2.7 現在の立体表示の課題 [3]

以上の問題点を解決する立体表示技術として、超多眼表示や高密度指向性表示の研究が行われている [6]. さらに、光を光線としてではなく、波面として再現する立体表示技術として電子ホログラフィ [10] の研究も進められている。

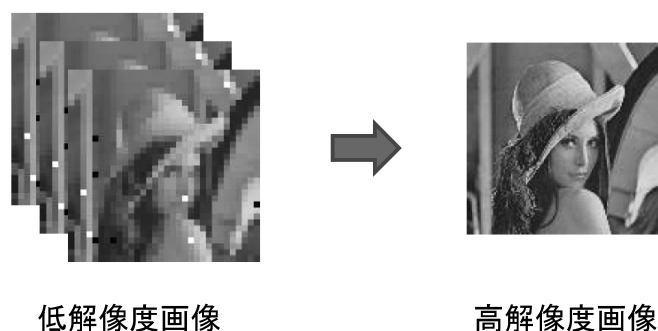


図 2.8 超解像技術の例

2.4 超解像処理技術

低解像度画像から高解像度画像を得る超解像処理の研究は数十年の歴史を持つ。近年、低コストで画素数の少ないカメラで撮影された画像の高画質化，スマートデジタルズームや，大型ディスプレイに表示するための高画質化などへの応用が期待されている。図 2.8 に複数枚の低解像度画像を用いて高解像度画像を作成した例を示す。

超解像は大きく二つの種類に分類される。一つは，1枚の観測画像だけを利用した超解像である。学習やデータベースに基づき，高周波成分を復元する方法や [11]，補間の考え方に基づく信号処理的なアプローチが知られている [12–14]。もう一つは，複数の観測画像を利用して行う超解像である [15–23, 41–45]。また，両方の要素を兼ね備えた手法 [49] も存在する。本論文では，主に再構成型の超解像手法に関して述べる。

図 2.9 は，超解像における二つの主要プロセスを示している。ここでは，まず 4 枚の観測画像（低解像度画像）の各画素の位置的対応関係を求める。この処理は，レジストレーションと呼ばれ，領域マッチングやオプティカルフロー推定などを利用して各画素の位置的対応関係をサブピクセル単位で推定する。このレジストレーション処理は，自由視点映像生成においては，奥行き推定と等価である [50]。画像のサブピクセル単位の位置合わせに関しては，文献 [51, 52] 等が詳しい。次のステップでは，情報を統合して 1 枚の超解像画像を生成する。この処理は復元 (Restoration) と呼ばれ，この復元ステップにおける処理方法が，超解像技術における主要な研究対象といえる。

2.4.1 再構成法

一般的な再構成法に関して，図 2.10 を用いて説明する。図 2.10 は，シーンがカメラに入力され，連続-離散変換，変形（画素の動き），PSF（点広がり関数）の影響，ダウンサンプリング，ノイズの付与を経て，観測画像が得られる様子を示している。再構成法では，

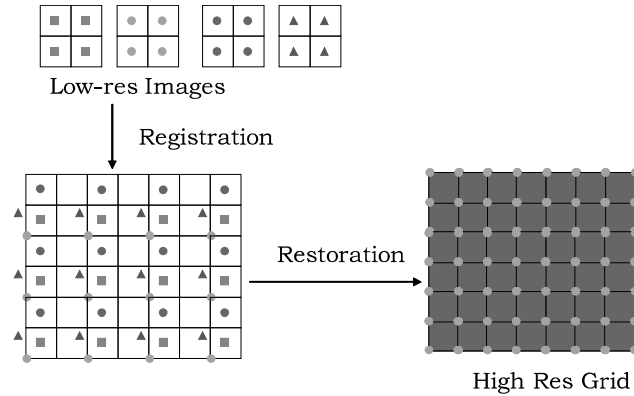


図 2.9 レジストレーション (Registration) と復元 (Restoration)

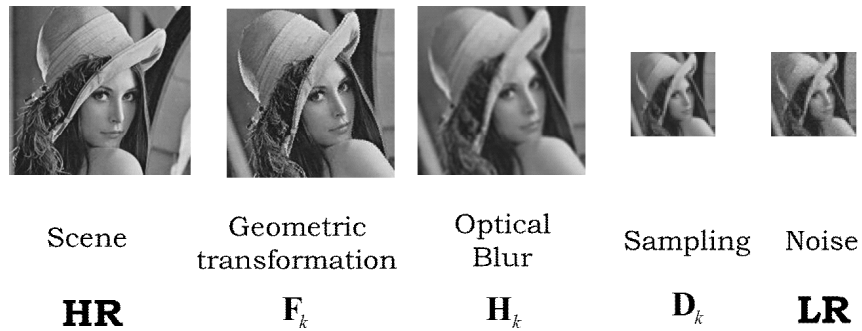


図 2.10 観測モデル (Observation model)

この観測モデル (劣化モデル) に基づき, 超解像画像と観測画像との関係を記述する.

低解像度画像を \mathbf{y}_k 超解像技術で高解像度化された画像 (以降, 超解像画像) を \mathbf{x} とする. k は, 観測される低解像度画像のインデックスを示す. それぞれの画素値をラスタスキャン順に並べたベクトル \mathbf{y}_k, \mathbf{x} を考えると, 観測モデルは次のように定式化できる.

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{D}_k \mathbf{H}_k \mathbf{F}_k \mathbf{x} + \mathbf{n}_k \quad (2.1)$$

ただし, \mathbf{D} はダウンサンプリング, \mathbf{H} は, (PSF) の影響, \mathbf{F} は, 各画素の動き (位置関係) を表す行列を示し, \mathbf{n}_k は, 低解像度画像に含まれるノイズを表すベクトルである.

以上の $\mathbf{D}_k \mathbf{H}_k \mathbf{F}_k$ をまとめて \mathbf{A}_k とし, さらに $k = 1, 2, \dots, K$ に関する式をひとまとめにして表記すると,

$$\mathbf{y} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2.2)$$

と記述できる. ただし, $\mathbf{y} = [\mathbf{y}_1^T, \mathbf{y}_2^T, \dots, \mathbf{y}_K^T]^T$, $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1^T, \mathbf{A}_2^T, \dots, \mathbf{A}_K^T]^T$, $\mathbf{n} = [\mathbf{n}_1^T, \mathbf{n}_2^T, \dots, \mathbf{n}_K^T]^T$ である.

式 (2.2) から \mathbf{x} を得るためには, よく知られている最小二乗推定を利用し, 誤差

$\|\underline{\mathbf{y}} - \mathbf{A}\underline{\mathbf{x}}\|^2$ を最小にするように $\underline{\mathbf{x}}$ を求めればよい。しかし、この問題は一般に ill-posed 問題であり、 \mathbf{A} から直接 $\underline{\mathbf{x}}$ を求めることができない。そこで、正則化項 $f(\underline{\mathbf{x}})$ を用い、エネルギー関数 $E[\underline{\mathbf{x}}]$ を次のように定義する。

$$E[\underline{\mathbf{x}}] = \|\underline{\mathbf{y}} - \mathbf{A}\underline{\mathbf{x}}\|^2 + f(\underline{\mathbf{x}}) \quad (2.3)$$

この $E[\underline{\mathbf{x}}]$ を最小化するように解 $\underline{\mathbf{x}}$ を得ようというのが再構成法の基本的な考え方となる。実際に $\underline{\mathbf{x}}$ を得る方法は、最急降下法などの繰り返し演算による最適化手法が利用される [24]。このようにして $\underline{\mathbf{x}}$ を得る方法は \mathbf{n} を平均ゼロの正規ノイズと想定した場合の MAP (Maximum A Posteriori, 最大事後確率) 推定手法と等価となる [18]。すなわち、式 (2.3) の右辺第一項のみを利用した場合は ML 推定であり、第二項は、事前確率 (事前知識) の項となる。

再構成型超解像の分野において、初期の研究では、空間領域での非一様補間や、周波数領域でのエイリアシング成分の構造を用いた手法 [46] など直感的なアプローチが試みられたが、近年では、画像に対する事前知識 (平坦性など) を組み入れた MAP 推定の原理に基づく手法が主流となっている [17]。超解像の手法としては、他にも POCS (Projection onto Convex Sets) 法 [47] や IBP (Iterative Back Projection) 法 [48] など計算手順の簡潔さを特徴とする手法も開発されているが、唯一の最適解が保証されないなどの問題が指摘されている。

2.4.2 Fast and Robust Super Resolution

現実問題として式 (2.2) の \mathbf{A} を完全に既知とすることは、以下の理由により困難である。

- 動き推定の誤り
- ぼやけ関数のずれ
- 映像劣化モデルの不一致

よって、これらのパラメータの誤差にロバストに再構成の演算が行えることが実用上望ましい。その解決法の一つとして、Farsiu [17] らの手法を紹介する。彼らはエネルギー関数として、

$$E[\underline{\mathbf{x}}] = \sum_{k=1}^K \|\underline{\mathbf{y}}_k - \mathbf{D}_k \mathbf{H}_k \mathbf{F}_k \underline{\mathbf{x}}\|_1 \quad (2.4)$$

を定義しており、最急降下法を用いて、

$$\underline{\mathbf{x}}_{n+1} = \underline{\mathbf{x}}_n - \beta \sum_{k=1}^K \mathbf{F}_k^T \mathbf{H}_k^T \mathbf{D}_k^T \text{sign}(\mathbf{D}_k \mathbf{H}_k \mathbf{F}_k \underline{\mathbf{x}}_n - \underline{\mathbf{y}}_k)$$

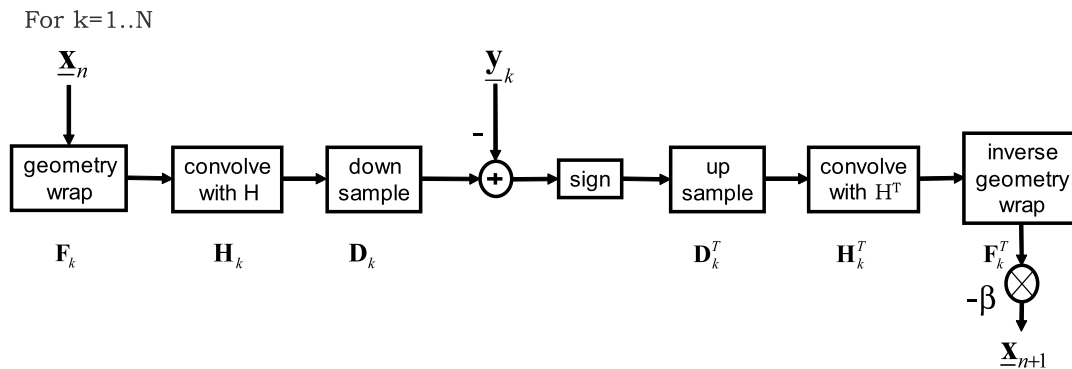


図 2.11 Fast and Robust super-resolution(Reconstruction-Based Method)

の演算を繰り返すことにより、解 \underline{x} を求める。ただし $sign$ は符号関数、 β は定数である。この計算ステップを図 2.11 に示す。パラメータ推定誤差による影響が、符号の形に集約されるため、その影響を受けにくくなっていることがわかる。また、実験結果等により、パラメータの推定誤差にロバストに超解像を行えることが示されている。

2.4.3 関連研究

超解像では、解像度をどこまで改善することができるのかという疑問がある。この疑問に対して、いくつかの理論的な研究が行われている [25–27] これらの研究により、観測画像を無限に利用可能だとしても、解像度の改善には限界があることが理論的に示されている。

多くの超解像に関する研究はグレイ画像に関するものであるが、単板式カラー撮像素子により得られる Raw Data から、色相関を利用して、効果的にフルカラー高解像度画像を直接再構成する方法も報告されている [28, 29]。

超解像を実用レベルに引き上げるにあたり、大きな障壁が二つある。一つは低解像度画像どうしの位置合わせである。一般に、同一の画面内であっても、領域ごとに位置ずれ量は大きく異なり、正確な位置ずれ量が推定できない部分もある。二つ目の問題は、計算コストである。MAP 法の最適化問題は、高解像度画像の各画素を変数とする、きわめて規模の大きな問題であり、いかに効率的に解くかは重要な課題である。

適応的フィルタの考え方に基づき動画像を超解像する方法や [30]、画素ではなく時間方向に関する超解像 [31] なども研究されている。また、他の技術と超解像を組合わせた応用技術も幾つか報告されている。例えば、画素混合へ応用した技術や [32]、動画符号化へ応用した技術 [33]、超解像の考え方を応用して解像度とフレームレートの異なる画像を統合する技術 [34] などがある。

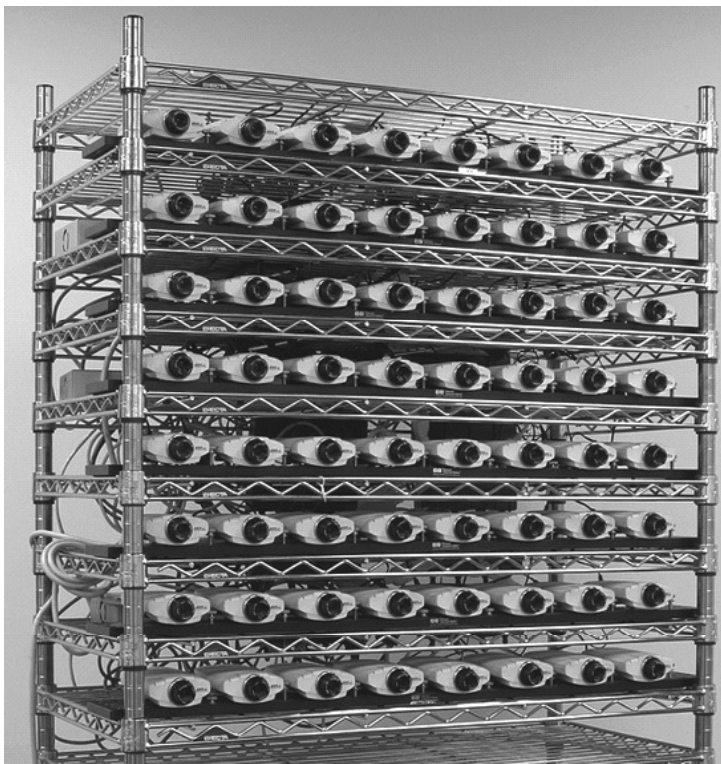


図 2.12 カメラアレイ

2.5 自由視点映像合成の概要

近年、高い臨場感や直感的な情報提示を目的として、3次元実空間の視覚情報そのものを記録・再生する技術に関する研究が盛んに行われている。3次元実空間の視覚情報を再生する技術として、自由視点映像合成が挙げられる。

自由視点画像合成とは、複数の視点で撮影された多視点画像をもとに、任意の新しい視点から見た画像を合成する技術である。この技術は、高度なリアリティを持つ3次元的な映像効果を可能にするものであり、次世代の放送・通信分野への応用が期待されている [35]。

自由視点映像の合成には、多視点の映像が必要であり、カメラアレイ等を用いて撮影を行う。図 2.12 に、カメラアレイの例を示す。このように2次元アレイ上に配列されたカメラを用いて、被写体空間全体を実時間で自由視点合成するシステムも検討されている [36–38]。カメラアレイを用いて撮影を行う自由視点映像は、全体としての画素数は多いものの、一つ一つのカメラの解像度が低いため、自由視点映像として合成された映像の解像度も低いという課題があった。超解像技術と自由視点映像生成技術を組み合わせれば、高解像度の自由視点映像を生成する処理が可能となる。

一般的な意味での超解像は、複数枚の低解像度画像のうちの一つを基準画像とし、基準画像を高解像度化するものであり、新しい視点から見た画像の合成を意図したものではない。超解像を自由視点画像合成に導入した例としては、入力多視点画像を超解像する手法 [39] や、被写体のテクスチャマップを超解像合成する手法 [40] が挙げられる。どちらも、被写体の3次元形状の復元と映像の高解像度化を交互もしくは同時に実現しており、形状の精度と高解像度化の品質は表裏一体である。また、単一オブジェクトを対象とした処理のため、全画面処理は行っていない。本論文では、これらの手法と異なり、画面全体を超解像合成する手法に関して検討を行う。

2.5.1 超解像 plane-sweeping による自由視点映像合成

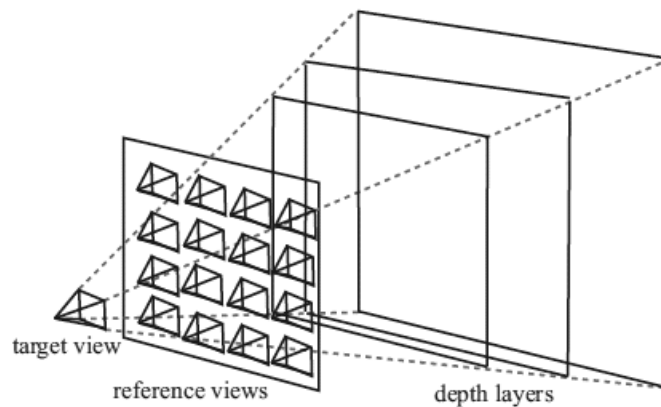


図 2.13 奥行き平面

ここでは、全画面処理を目指す研究として、plane-sweeping 型自由視点映像合成と超解像との組み合わせに関して紹介する。plane-sweeping 型の自由視点映像合成とは、合成対象の映像（仮想視点映像）の各画素に対して、奥行き推定と色づけを同時に実現する枠組みの一つである [53]。この枠組では、シーン内に配置した奥行き平面 (図 2.13 の depth layers) に対して、入力映像を投影し、混合 (blending) することで、その平面上に合焦しているかのような映像（仮想焦点映像）を合成する。シーン全体にわたって奥行き平面を走査しながら、この合成処理を繰り返すことにより、複数の仮想焦点映像を得る。最後に、これらの合成映像を統合することによって、仮想視点から見た全焦点映像を合成できる。ある仮想焦点映像に対して、超解像処理をそのまま適用した場合、奥行き平面上にある領域に対しては高精細化が可能であるが、奥行き平面から離れた領域に関しては、画質が大きく損なわれる。なぜなら超解像のモデルでは、入力画像どうしの精密な位置合わせが前提とされており、奥行き平面から離れた領域はこの前提を満たしていないためである。

石井 [50] らは、多視点映像を入力とする plane-sweeping 型の自由視点映像合成に対して、超解像処理を組合せることで高画質化する手法を提案している。提案手法では、各奥行き平面上で超解像処理を行う。この際にマッチングコストを加味した超解像のモデルを導入することで、奥行き平面上にある領域では超解像が行われ、それ以外の領域では blending に基づく合成に近い画像を得ている。

すなわち、高解像度画像の仮想焦点画像 \mathbf{x}_d と、仮想焦点画像から入力画像 \mathbf{y}_k への画素単位の対応関係を行列として書き下したものを $\mathbf{W}_d^{k \rightarrow t}$ とし、式 (2.3) に相当するエネルギー関数 $\mathbf{E}(\mathbf{x})$ を

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}_d) = \sum_{k=1}^K \mathbf{e}_k^T \mathbf{M}_{\text{inv}} \mathbf{e}_k + \lambda \|\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_d^0\|^2 \quad (2.5)$$

$$\text{where } \mathbf{e}_k = \mathbf{y}_k - \mathbf{D}_k \mathbf{W}_d^{t \rightarrow k} \mathbf{x}_d \quad (2.6)$$

$$\mathbf{M}_{\text{inv}} = \text{diag}\left(\frac{\mathbf{1}}{\alpha \mathbf{D}_k \mathbf{W}_d^{t \rightarrow k} \mathbf{m}_d + \mathbf{1}}\right) \quad (2.7)$$

と定義する。ここで、 λ, α は正の整数、 \mathbf{m}_d は入力画像の類似度を評価した値（マッチングコスト）であり、類似度が高いほど小さな値を取るものとする。 diag は、ベクトルの要素を対角要素とする行列を表す。また \mathbf{x}_d^0 は、あらかじめアップサンプリングした入力画像を用い、blending に基づく合成手法によって得られる画像である。この手法は plane-sweeping 特有のマッチングコストを利用したエネルギー関数を設計して、超解像処理を行っていることが特徴である。

2.5.2 超解像自由視点映像生成手法の高速化実装に向けて

再構成型超解像処理は、反復計算によるエネルギー最小化問題として定式化される。高解像度画像の各画素を変数とする大規模な問題となるため、多大の計算コストを要する。現状では、動画（単一視点）を対象とする超解像のリアルタイム化がようやく可能になりつつある段階である [22, 23]。

また、従来の超解像技術においては、式 (2.3) における PSF が、通常、数種類に限定され、被写体の動きも、いくつかの並進（+回転）で表現されるため、観測行列が簡単な構造で表されるのに対し、自由視点映像を用いて超解像を行う場合には、画素毎に観測行列の係数が全て変化するという特徴があるため、計算量的にも大きな違いがある。

高速実装に向けた、アルゴリズム面の工夫としては、費用対効果を考慮した最適化計算の簡略化が必要であると考えられる。一般の超解像処理においても、厳密に収束するまで反復計算を行うと、一枚の高解像度画像を得るのに数分の計算時間を要する場合がある。したがって、処理時間を短縮するには、画質向上と計算時間とのトレードオフを見極めて、適切ところで反復計算を打ち切ることが有効である。

2.6 本研究の位置づけ

本論文では、画素適応処理を用いた画像の高画質化に着目し、リアルタイムもしくは高速化実装を通して高画質化を実現するアルゴリズムに関して検討する。

2.2 節では、リアルタイム画像処理技術に関して述べた。画素適応処理を民生分野で活用する場合には、リアルタイム実装もしくは高速化実装は重要な要素であり、本論文においては、高画質化に先立ちリアルタイム実装を行う方法を提案する。

2.3 節では、立体表示技術に関して述べた。本論文では、最初に PDP を用いた 2 眼立体表示装置の提案を行う。提案する 2 眼立体表示は、立体表示方式としては、プリミティブなものであり、今後、多眼立体表示等の、より臨場感の高い表示装置へと発展していくと考えられる。2.5 節で述べた自由視点画像合成技術は、多眼立体表示装置への入力画像生成に用いることが可能であるため、本論文で述べる技術は、立体映像表示に向けた高画質化のコンテキストでも捉えることができる。

2.4 節では、超解像技術に関して述べた。超解像技術は、近年、実装を含めて研究が活発な画素適応処理である。本論文においては、2.5 節で述べた自由視点画像合成と組み合わせた、超解像自由視点画像合成の高速化実装検討を行う。さらに、超解像技術に関して、ロバスト超解像処理の新しい枠組みを提案し、超解像自由視点画像合成の画質改善を試みる。

参考文献

- [1] 浜田宏一: “超解像技術でテレビはこう変わる”, 日経エレクトロニクスセミナー もっと楽しいテレビ (2009)
- [2] NVIDIA Corporation: “Fermi Compute Architecture Whitepaper,”, http://www.nvidia.com/content/PDF/fermi_white_papers/NVIDIA_Fermi_Compute_Architecture_Whitepaper.pdf (2010)
- [3] 高木康博: “立体ディスプレイの基礎”, 映情学誌, Vol.67, No.11, pp.966–971 (2013)
- [4] 大越孝敬: “3次元画像工学”, 朝倉書店 (1991)
- [5] 高木康博: “裸眼 3D ディスプレイ (講座誰にでもわかる 3D 第 5 回)”, 映情学誌, Vol.65, No.5, pp.654–659 (2011)
- [6] 高木康博: “多眼式・超多眼式 3D 技術”, 映情学会, Vol.65, No.7, pp.933–939 (2011)
- [7] N.A. Dodgson: “Analysis of the viewing zone of the Cambridge autostereoscopic display,” Appl. Opt., Vol.35, pp.1705–1710 (1996)
- [8] Y. Takaki: “Multi-view 3-D display employing a flat-panel display with slanted

- pixel arrangement,” J. Soc. Inf. Display, Vol.18, pp.476–482 (2010)
- [9] C. van Berkel and J.A. Clarke: “Characterization and optimization of 3D-LCD module design,” Proc. SPIE 3012, pp.179-186 (1997)
- [10] F. Yaras, H. Kang and L. Onural: “State of the Art in Holographic Displays: A survey”, J. Display Technool., Vol.6, No.10, pp.443–454 (2010)
- [11] Freeman, W.T. and Jones, T.R. and Pasztor, E.C.: “Example-based super-resolution,” Computer Graphics and Applications, IEEE Vol.22, No.2, pp.56–65 (2002)
- [12] X. Xu, L. Ma, S.H. Soon, and C.K.Y. Tony: “Image Interpolation based on the Wavelet and Fractal,” International Journal of Information Technology (2001)
- [13] 小松 隆, 齊藤隆弘: “Total-Variation 正則化を用いたシャープニング-デモザイキング法”, 映情学誌, Vol.11, pp.1621–1632 (2007)
- [14] 小松 隆, 齊藤隆弘: “TV 正則化法を用いた JPEG 圧縮画像の超解像デコーディング”, 信学論誌, Vol.7, pp.1671–1674 (2007)
- [15] Ng, M.K. and Bose, N.K., “Mathematical analysis of super-resolution methodology,” Signal Processing Magazine, IEEE, Vol.20, No.3, pp.62–74 (2003)
- [16] Capel, D. and Zisserman, A.: “Computer vision applied to super resolution,” Signal Processing Magazine, IEEE, Vol.20, No.3, pp.75–86 (2003)
- [17] Farsiu, S. and Robinson, M.D. and Elad, M. and Milanfar, P.: “Fast and robust multiframe super resolution,” IEEE Transactions on Image Processing, Vol.13, No.10, pp.1327–1344 (2004)
- [18] Schultz, R.R. and Stevenson, R.L.: “Extraction of high-resolution frames from video sequences,” Image Processing, IEEE Transactions on, Vol.5, No.6, pp.996–1011 (1996)
- [19] 中沢裕二, 小松 隆, 齋藤隆弘: “フレーム間統合による空間解像度の改善”, 電子情報通信学会秋季大会講演論文集, pp.277, (1994)
- [20] 池谷彰彦, 佐藤智和, 池田 聖, 神原誠之, 中島 昇, 横矢 直和: “カメラパラメータ推定による紙面を対象とした超解像ビデオモザイキング”, 電子情報通信学会論文誌. D, Vol.88, No.8 pp.1490–1498 (2005)
- [21] 田中正行, 神田崇史, 奥富正敏: “残差画像に基づく漸進的ぶれ画像復元”, 電子情報通信学会論文誌. D, Vol.92, No.8, pp.1208–1220 (2009)
- [22] 田中正行, 矢口陽一, 古川英治, 奥富 正敏: “位置ずれ量を考慮した画素選択に基づくロバスト超解像処理”, 電子情報通信学会論文誌. D, Vol.92, No.5, pp.650–660 (2009)
- [23] 田中正行, 奥富正敏: “周波数領域最適化法による MAP 型超解像処理の高速化”,

- 情報処理学会論文誌. コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.47, No.10, pp.12–22 (2006)
- [24] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, and B.P. Flannery: “Numerical Recipes in C++,” Cambridge Univ. Pr. (2003)
- [25] S. Baker and T. Kanade: “Limits On Super-Resolution and How to Break Them,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.24, No.9, pp.1167–1183 (2002)
- [26] Z. Lin and H.Y. Shum: “Fundamental Limits of Reconstruction based Super Resolution Algorithms Under Local Translation,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.26, No.1, pp.83–97 (2004)
- [27] 田中正行, 奥富正敏: “再構成型超解像処理の理論限界に関する検討”, 情報処理学会誌, Vol.47, SIG5 (CVIM13), pp.80–89 (2006)
- [28] S. Frasiu, M. Elad, and P. Milanfar: “Multiframe Demosaicing and Super Resolution of Color Images,” IEEE Transactions on Image Processing, Vol.15, No.1, pp.141–159 (2006)
- [29] 後藤知将, 奥富正敏: “単板カラー撮像素子の RAW データを利用した高精細画像復元”, 情報処理学会誌, Vol.45, SIG 8 (CVIM 9), pp.15–25 (2004)
- [30] M.Elad and A. Feuer: “Super-Resolution Reconstruction of Image Sequences,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 21, No.9, pp.817–834 (1999)
- [31] E. Shechtman, Y. Caspi, and M. Irani: “Space-Time Superresolution,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.27, No.4, pp.531–545 (2005)
- [32] 田中正行, 奥富正敏: “組合わせ画素混合を利用した超解像処理”, 信学論誌, Vol.J90–D, No.8, pp1948–1956 (2007)
- [33] S. Kondo and T. Toma: “Video Coding with Super-Resolution Post-Processing,” IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), pp.3141–3144 (2006)
- [34] 渡邊清高, 岩井儀雄, 長原一, 谷内田正彦, 鈴木俊哉: “ウェーブレット領域での動き補償と画像統合による高解像度高フレームレート動画の生成”, 情報処理学論誌, Vol.47, SIG10, pp195–207 (2006)
- [35] A. Kubota, A. Smolic, M. Magnor, M. Tanimoto, T. Chen, and C. Zhang: “Multi-view imaging and 3dtv,” Signal Processing Magazine, IEEE, Vol.24, No.6, pp.10–21 (2007)
- [36] T. Naemura, J. Tago, and H. Harashima: “Real-Time Video-Based Modeling and Rendering of 3D Scenes”, IEEE Computer Graphic and Applications, Vol.22,

- No.2, pp.66–73 (2002)
- [37] J.C. Yang, M. Everett, C. Buehler, and L. McMillan: “A Real-Time Distributed Light Field Camera,” Proc. 13th Eurographics Workshop on Rendering, pp.77–86 (2002)
- [38] R. Yang, G. Welch, and G. Bishop: “Real-Time Consensus-Based Scene Reconstruction Using Commodity Graphics Hardware,” Proc. Pacific Graphics, pp.225–235 (200)
- [39] Tung, T. and Nobuhara, S. and Matsuyama, T.” “Simultaneous super-resolution and 3D video using graph-cuts,” IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), pp.1–8 (2008)
- [40] Goldluecke, B. and Cremers, D.: “Superresolution texture maps for multi-view reconstruction,” IEEE 12th International Conference on Computer Vision, pp.1677–1684 (2009)
- [41] 田中正行, 奥富正敏: “再構成型超解像処理の理論限界に関する検討”, 情報処理学会論文誌. コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.47, No.5, pp.80–89 (2006)
- [42] D. Capel: “Image Mosaicing and Super-Resolution,” Springer (2004)
- [43] Sung Cheol Park, Min Kyu Park, Moon Gi Kang: “Super-resolution image reconstruction: a technical overview,” Signal Processing Magazine, IEEE, Vol.20, No.3, pp.21–36 (2003)
- [44] Rajan, D. and Chaudhuri, S. and Joshi, M.V.: “Multi-objective super resolution: concepts and examples,” Signal Processing Magazine, IEEE, Vol.20, No.3, pp.49 - 61 (2003)
- [45] Segall, C.A. and Molina, R. and Katsaggelos, A.K.: “High-resolution images from low-resolution compressed video,” Signal Processing Magazine, IEEE, Vol.20, No.3, pp.37–48 (2003)
- [46] R. Tsai and T. Huang: “Multiframe image restoration and registration,” In Advances in Computer Vision and Image Processing, JAI Press, Vol.1, pp. 317–330 (1984)
- [47] Patti, A.J. and Sezan, M.I. and Murat Tekalp, A.: “Superresolution video reconstruction with arbitrary sampling lattices and nonzero aperture time,” IEEE Transactions on Image Processing, Vol.6, No.8, pp.1064–1076 (1997)
- [48] M. Irani and S. Peleg: “Improving Resolution by Image Registration,” CVGIP: Graphical Models and Image Processing, Vol.53, pp.231–239 (1991)
- [49] Hardie, R.C. and Barnard, K.J. and Armstrong, E.E.: “Joint MAP registration and high-resolution image estimation using a sequence of undersampled images,”

- IEEE Transactions on Image Processing, Vol.6, No.12, pp.1621–1633 (1997)
- [50] 石井雅人, 高橋桂太, 苗村 健: “超解像 plane-sweeping による自由視点画像合成”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU), OS11-2, pp.1483-1490 (2010)
- [51] Patrick Vandewalle and Sabine Süsstrunk and Martin Vetterli: “A Frequency Domain Approach to Registration of Aliased Images with Application to Super-Resolution,” EURASIP Journal on Applied Signal Processing, pp.1–14, (2006)
- [52] 清水雅夫, 矢野高宏, 奥富正敏: “画像変形を表す N パラメータの高精度同時推定法と超解像への応用”, 情報処理学会論文誌. コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.45, No.13, pp.83–98 (2004)
- [53] 高橋桂太, 苗村 健: “自由視点画像合成のための視点依存奥行きマップの実時間推定法”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU), pp.197–204 (2005)

第3章

PDP を用いた時分割 2 眼立体映像表示の実現

3.1 はじめに

PDP (プラズマディスプレイパネル) は、ハイビジョンテレビなど大形テレビ用ディスプレイデバイスとして期待されており、すでに 40 インチサイズ以上のディスプレイが実用になっている [1-3]。これらの PDP で立体映像を表示できれば、医療用、VR 用などその応用範囲もさらに広がると期待される。

本章では、高精細 42 形ハイビジョン DC-PDP [2] と液晶シャッタメガネを用いる時分割 2 眼立体画像表示システムについて述べる [4,5]。

時分割立体表示システムの特徴として、

- ディ스플레이デバイスには本質的に何も付加・修正の必要がない
- 2 次元表示／立体表示コンパチブルなディスプレイが実現可能
- 空間解像度の低下がない

等があげられる。これらの利点に着目し、PDP による時分割 2 眼立体表示法の検討を行った。

PDP による時分割表示の問題点として階調表示性能があげられる。PDP の発光機構は ON または OFF の 2 値発光であり、中間調の表示にサブフィールド法を用いている。しかし、時分割立体表示では、左右両眼用の映像を交互に表示するためにサブフィールド数が従来の 2 倍必要なことになり、これは応答速度の点から現時点では実現困難である。現状のパネルと駆動回路においては、後に述べるように 1 フィールドでは 12 サブフィールド、すなわち片目用の画像に 6 サブフィールド程度を割り当てることが実用的な限界と考えられる。また、ディスプレイと組合せて使用する液晶シャッタメガネの応答時間を

表 3.1 駆動電圧マージンの測定結果

サブフィールド数	サステイン周期* (μs)	マージン (V)
8	4.0	20.0
10	3.2	21.3
12	2.7	20.0
14	2.3	11.4

(測定セル数: 32 × 32 セル)

**サステイン周期とは、パネルの放電維持パルスの間隔である

考慮すると、実際に階調表示に使用できるサブフィールド数はさらに低下する可能性がある。そこで、本章ではパネルとシャッタメガネの特性について検討し、現状のデバイスでも立体表示可能な表示方式と階調信号処理方法を提案する。

3.2 PDP における時分割立体表示方式

3.2.1 駆動電圧マージン

より自然な階調を表現するには、多くのサブフィールドが必要である。しかし、サブフィールド数を多くすると駆動電圧マージンが減少し [6]、パネル全体を均一に点灯させることが困難になる。ここで駆動電圧マージンとは、正常な放電を維持できる放電維持電圧の最大値と最小値との差である。文献 [2] に示した 42 形の ハイビジョン DC-PDP を CPM 駆動 [7] で駆動したときの (小面積) 駆動電圧マージンを測定した結果を表 3.1 に示す。

時分割立体表示では、サブフィールド数は偶数である必要がある。表 3.1 によると、サブフィールド数が 8, 10, 12 では、20V 以上の駆動電圧マージンが得られるが、サブフィールド数が 14 になると、それが 11V 程度に低下し、大形パネルでの均一な駆動が困難となる。

3.2.2 シャッタメガネの時間応答

時分割立体表示に使用する目的で市販されている液晶シャッタメガネの光の透過率の時間応答を測定した。

シャッタメガネの切り替え信号に対する光の透過率の関係 (応答波形) を測定した結果を図 3.1 に示す。シャッタの切り替え信号の周波数は 120 Hz である。

シャッタが定常状態の 70% まで開くのに約 1.5ms の時間を要する。このため、この期間に駆動されるサブフィールドは階調表示に寄与しないことになり、実効的なサブフィー

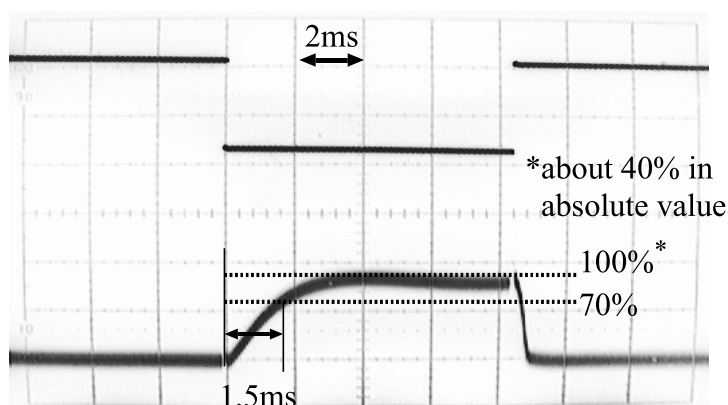


図 3.1 LCD シャッタ ON/OFF 信号 (上側) に対する光の透過率 (下側) の測定値

ルド数が減少する。

3.2.3 サブフィールド発光スキーム

3.2.1 節から、現状のパネルと駆動回路においては、1 フィールド (16.7ms) を 12 サブフィールドで駆動するのが限界と考えられる。そこで、前半 6 サブフィールドを左眼用、後半 6 サブフィールドを右眼用の画像表示に割り当てる。また 3.2.2 節によると、液晶シャッタメガネが開くのに 1.5ms 程度の時間が必要なため、この 6 サブフィールドのうち、最初の 1 サブフィールドは階調表示には使用できず、残り 5 サブフィールドで階調を表示する必要がある。階調表示の改善方法については 3.3 節で述べる。

これらの条件を満足する立体表示の発光スキーム (サブフィールド駆動法) として図 3.2 を提案する。映像信号のビット毎にサブフィールドを割り当て、上位ビットより b_4, b_3, \dots, b_0 と記述してある。また、シャッタメガネの立ち上がり立ち下りの部分には、できるだけ下位ビットを割り当てて、メガネの開閉期間中の透過率変化の影響を少なくしている。また、サブフィールド法特有の動画偽輪郭 [8,9] をできるだけ目立たなくするため、サブフィールド点灯順をビット順でなく、前後に振り分けるように並べ替えている。

3.2.4 大形パネルへの適用

大形のパネルの場合、駆動速度の制約からパネルを上下に 2 分割して別々に駆動する方法がある [1]。この場合の立体表示のサブフィールド発光スキームを図 3.3 に示す。通常の 2 次元映像の表示の場合には、上下パネルの駆動の境目 (図 3.3 においては垂直 512 本目付近) が見えないように上側パネルの発光と下側パネルの発光が 1 フィールドにわたって、上から下に連続に接続されるような発光形態を取っている [1]。

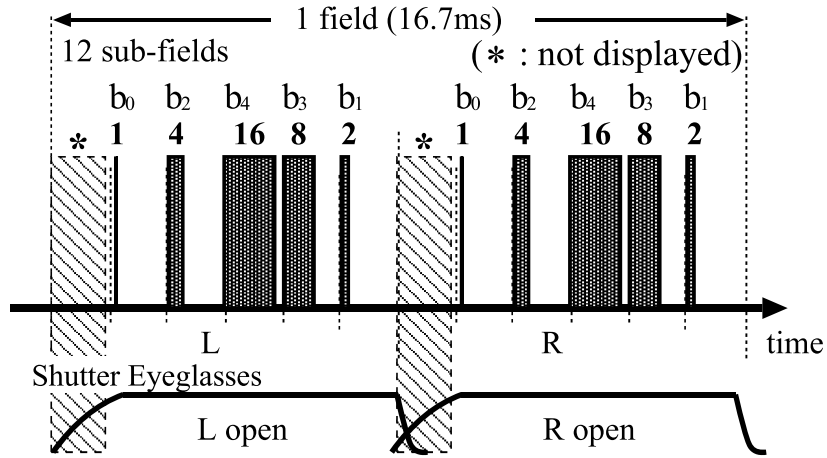


図 3.2 時分割立体表示のためのサブフィールド発光スキーム

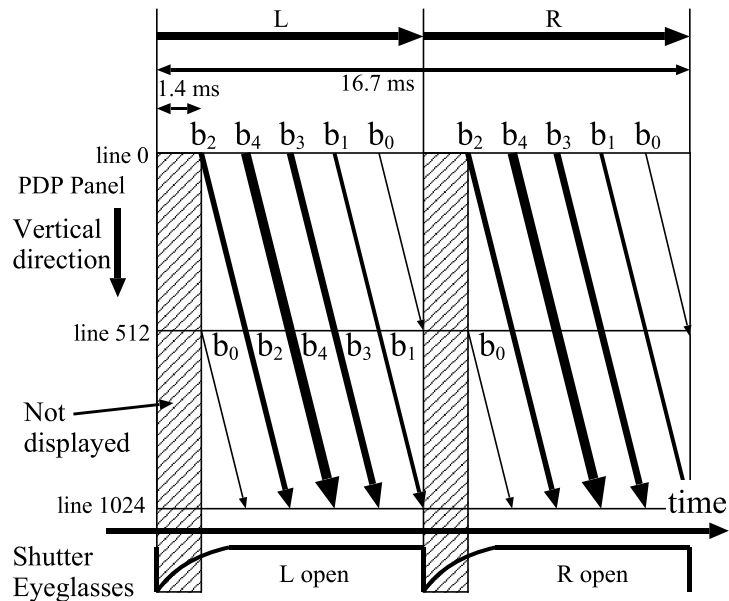


図 3.3 大形 DC パネルの場合のサブフィールド発光スキーム

しかし、時分割立体表示においては、通常駆動の $\frac{1}{2}$ フィールドの時点で、左目用の映像と右目用の映像とが切り替わるため、この部分で連続的にサブフィールドを点灯できない。そこで、この左右映像の切り替わる境界のタイミングには、映像信号の最下位ビットを割り当てて、上下パネルの駆動の境目を見えにくくしている。

3.2.5 AC 駆動形パネルへの適用

以上のサブフィールド発光スキームは、すべて DC 駆動形 PDP に対するものであったが、同様な手法は、AC 駆動形 PDP へそのまま適用することもできると考えられる。

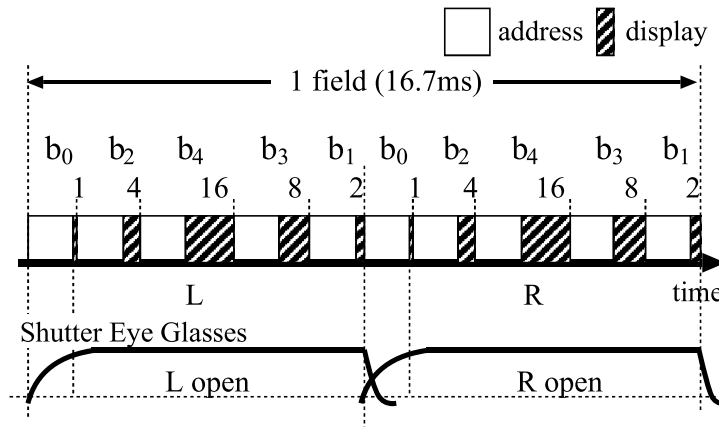


図 3.4 AC 駆動形 PDP の場合のサブフィールド発光スキーム

AC 駆動形 PDP はアドレス/表示分離駆動方式 [10] によって駆動されている。アドレス期間中は、パネルは発光していないため、この期間をシャッターメガネが開くための応答時間に割り当てることができる。この場合、階調表示に寄与しないサブフィールドがなくなるためサブフィールドを有効に利用できる。よって、1 フィールドを 10 サブフィールド駆動した場合でも、左右それぞれ 5 サブフィールドずつを階調表示に用いることが可能である。この場合のサブフィールド発光スキームを図 3.4 に示す。

3.3 階調信号処理の改善

通常の 2 次元表示においては、自然な階調表示を実現するためには少なくとも 7 サブフィールド (128 階調) 以上が必要と考えられる [11]。しかし、図 3.2, 3.3, 3.4 の発光スキームによる立体表示では、階調表示用として片目に 5 サブフィールド (32 階調) しか割り当てることができない。そこで階調に関する信号処理のさらなる改善が必要となる。

少ない階調数でより自然な階調を表現するために、従来の PDP 信号処理 [11] で用いられていた擬似階調表現法である誤差拡散法 [12]、ライン間ディザ法に加えて、

- フィールド間誤差拡散
- 左右逆スキャンによる相補的誤差拡散

の 2 つの手法を用いることを提案する。

3.3.1 フィールド間誤差拡散

各画素の表示すべき輝度と実際に表示する輝度との誤差を、フィールド間にわたって拡散させることで階調を擬似的に表現するフィールド間誤差拡散 [13] を用いる。フィール

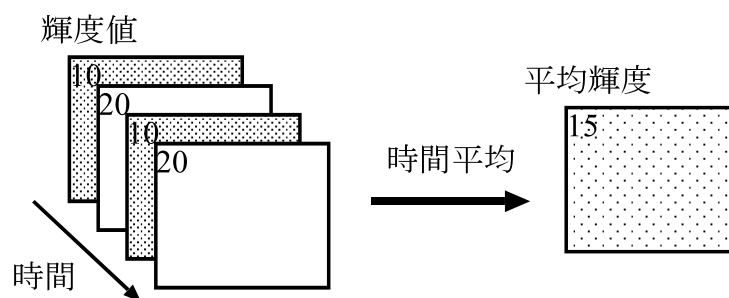


図 3.5 フィールド間誤差拡散の原理

ド間誤差拡散の原理を 図 3.5 に示す。この例では、輝度値 10 と 20 を交互に表示することで、その中間の輝度である輝度値 15 を擬似的に表示している。

具体的には、5bit の階調しか表現できない表示装置において、6bit 相当の階調を擬似的に表現したい場合には、6bit の映像入力信号の最下位ビット (LSB) を次のフィールドの同じ位置の映像入力信号の最下位ビット (LSB) に加算することを繰り返しながら上位 5 bit を表示する。この操作により、(LSB+1) bit 目が 1 と 0 を繰り返すことになり、時間積分値として擬似的に 6 bit 相当の階調を表現できる。

通常の 2 次元表示においてフィールド間の誤差拡散を行うと、その原理から周波数 30Hz のフリッカを生じやすいという欠点がある。しかし、観視する輝度が低い場合、フリッカに対する視覚の感度も低下する。時分割立体視の場合、パネルでの発光を液晶シャッタメガネを通して観視するため、時分割方式を用いていることにより 50%、さらに液晶シャッタメガネの透過率により約 40% に低下するので観視される輝度はトータルで約 20% に低下する。仮りにパネルのピーク輝度を $300(\text{cd}/\text{m}^2)$ とした場合、通常の番組においてはパネルの平均輝度は $100(\text{cd}/\text{m}^2)$ 程度と考えられるので、実際には $20(\text{cd}/\text{m}^2)$ 程度の平均輝度が観視される。文献 [14] によると、周波数 30Hz においては、平均輝度 $20(\text{cd}/\text{m}^2)$ の時、フリッカを感じる変調輝度の閾値は約 $0.6(\text{cd}/\text{m}^2)$ (変調割合にして 3%) と評価されている。本方式では、信号の 5bit 目で変調をかけるから、変調割合は最大で $\frac{1}{2^5} = \text{約 } 3\%$ であり、フィールド間誤差拡散によって生じるフリッカは大きな問題にはならないことがわかる。今後、液晶シャッタメガネの透過率が改善され、観視される平均輝度が高くなる可能性があるが、その場合には、現在よりサブフィールド数を多くした駆動が望まれる。

3.3.2 相補的誤差拡散

立体視におけるランダムノイズに関する「左右のノイズに相関がない場合、3 ~ 5dB 程度 2 次元画像よりノイズが見えにくくなる」 [15, 16] という視覚特性を利用して、新たに

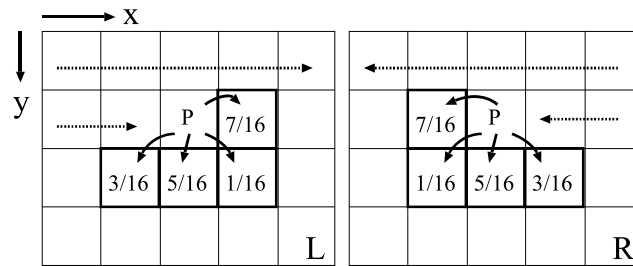


図 3.6 左右逆スキャンによる相補的誤差拡散

左右逆スキャンによる相補的誤差拡散を提案する。

通常の誤差拡散法では、図 3.6(左図)のように、周辺の画素に、表示すべき輝度と実際に表示する輝度との差である誤差 (P) を図の割合 ($\frac{n}{16}$) で分配して拡散させている。一般に、この拡散された誤差はノイズ状に見える。左/右眼用の画像に同様に、この誤差拡散を適用すると、この拡散された誤差は両眼視差のない部分では左右で相関のあるノイズとなる。

そこで、このノイズを無相関化するために、左右の画像で、別の誤差拡散パターンを用いる。具体的には左眼用の画像は図 3.6(左図)の誤差拡散を用い、右眼用の画像には図 3.6(右図)のように、水平方向逆向きスキャンに変換してから誤差拡散を用いる。このことにより、左右の誤差拡散によるノイズの相関が小さくなり、ノイズが見えにくくなる。

3.3.3 階調信号処理の構成

フィールド間誤差拡散，フィールド内誤差拡散を行う信号処理回路のブロック図を図 3.7, 図 3.8 に示す。図 3.7 が左目用，図 3.8 が右目用である。これらの信号処理は、緑 (G), 青 (B), 赤 (R) の 3 原色画像信号に対してそれぞれ同様かつ独立に行われる。図中の記号 F はフィールドディレイ， H はラインディレイ， D は 1 画素のディレイをそれぞれ表す。

図 3.7 において、信号処理回路への入力信号 I_L のビット数を M ビット、表示装置で表示可能なビット数を N ビットすると、ビット分割器によって、下位 $(M - N - 1)$ ビット (P_{Ld} と表す) と、上位 $(N + 1)$ ビット (I''_L) に分割される、 P_{Ld} は、フィールド内誤差拡散され、入力信号に加算される。 k_0, k_1, k_2, k_3 は係数器であり、それぞれの値は

$$\begin{aligned}
 k_0 &= \frac{7}{16}, & k_1 &= \frac{3}{16} \\
 k_2 &= \frac{5}{16}, & k_3 &= \frac{1}{16}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

である。

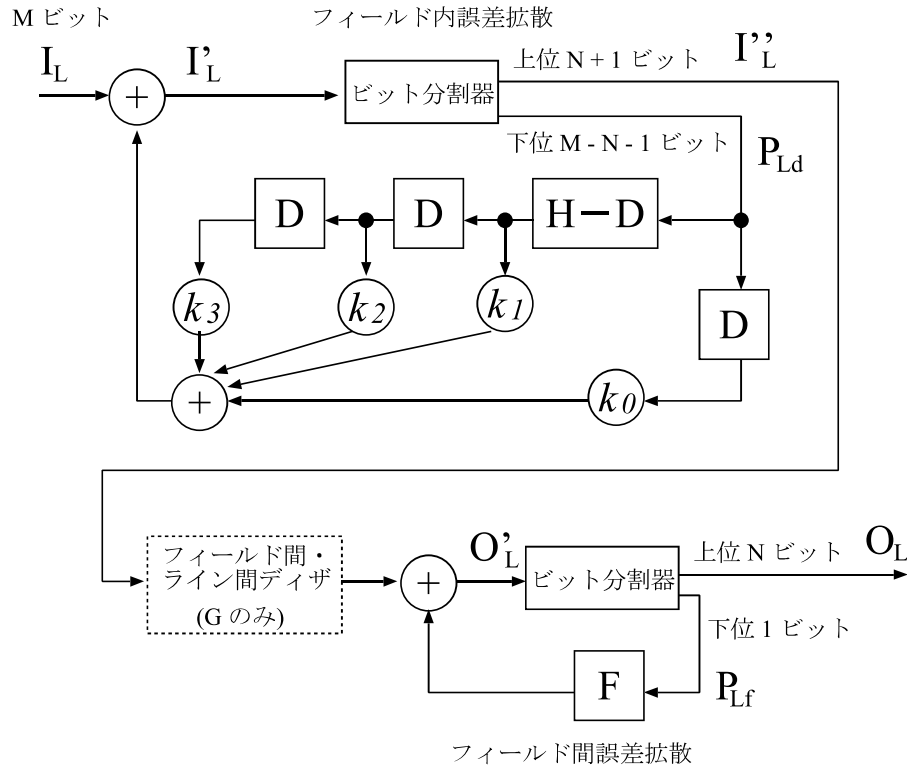


図 3.7 階調信号処理のブロック図 (L 側)

一方，上位 $(N + 1)$ ビットのうちの最下位 1 ビット (P_{Lf} と表す) は，フィールド間誤差拡散されて，最終的に N ビットの表示データ O_L となる。

以上の処理を数式で表す．画面左上の画素を原点として，水平方向に x 軸，垂直方向に y 軸，時間を t (フィールド単位) とする．入力信号 I_L の水平方向 x 番目，垂直方向 y 番目の画素の時間 t における信号値を $I_L(x, y, t)$ のように表すと，出力信号 O_L は， $[\cdot/]$ を整数除算として次のように表せる．

$$\begin{aligned}
 I'_L(x, y, t) &= I_L(x, y, t) \\
 &\quad + k_0 P_{Ld}(x - 1, y, t) \\
 &\quad + k_1 P_{Ld}(x + 1, y - 1, t) \\
 &\quad + k_2 P_{Ld}(x, y - 1, t) \\
 &\quad + k_3 P_{Ld}(x - 1, y - 1, t)
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$I''_L(x, y, t) = [I'_L / 2^{M-N-1}] \tag{3.3}$$

$$P_{Ld}(x, y, t) = I'_L - I''_L \times 2^{M-N-1} \tag{3.4}$$

$$O'_L(x, y, t) = I''_L + P_{Lf}(x, y, t - 1) \tag{3.5}$$

$$O_L(x, y, t) = [O'_L / 2] \tag{3.6}$$

$$P_{Lf}(x, y, t) = O'_L - O_L \times 2 \tag{3.7}$$

R 側の信号に関しては，図 3.8 に示されるように，スキャン方向を逆向きにするために

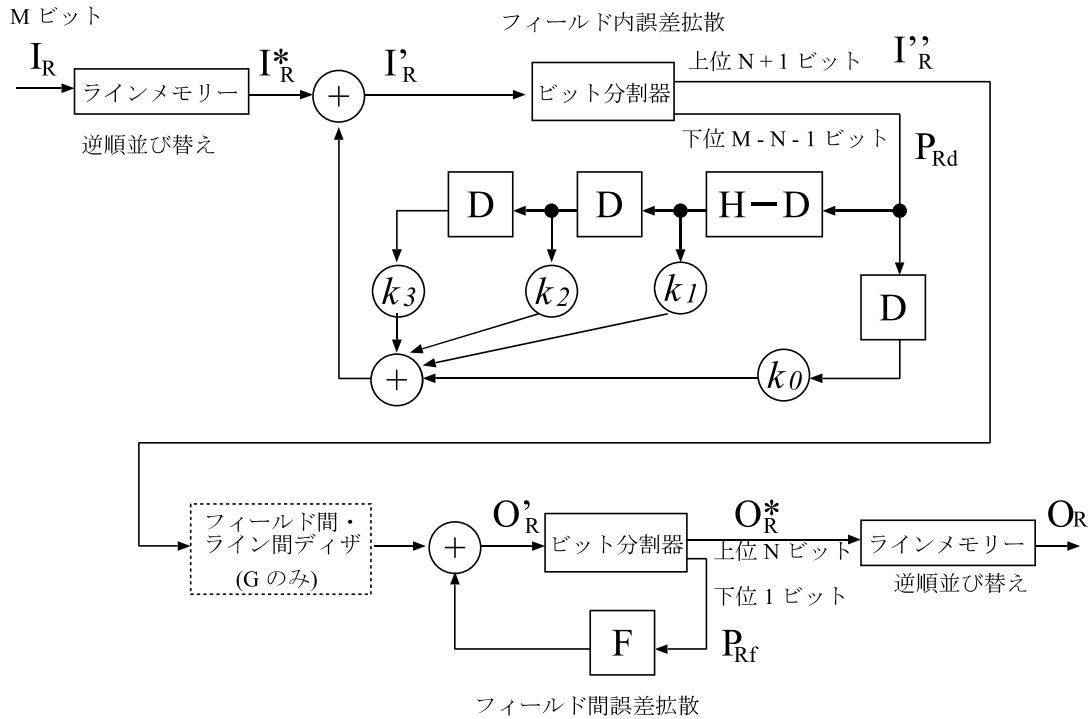


図 3.8 階調信号処理のブロック図 (R 側)

図 3.7 の入力と出力の部分にラインメモリを備えている以外は L 側と同様である。すなわち、図 3.8 において

$$I_R^*(x, y, t) = I_R(X - x, y, t) \tag{3.8}$$

$$O_R(x, y, t) = O_R^*(X - x, y, t) \tag{3.9}$$

とし、(3.1) ~ (3.7) 式と同様な処理を行う。ここで X は、1 ラインの画素数である。

G 信号に関しては、DC 形 PDP の GRBG カルテット形セル配列 [2,3] により、他の色に比べてセル数が 2 倍あるため、ホワイトバランスを保つために、各セルで表示する明るさを $\frac{1}{2}$ にする必要がある。このために生じる階調劣化はライン間のディザで補っている。したがって、G 信号に関してのみ、これらの誤差拡散回路の他にディザ回路が必要である。このディザ回路は、信号値を $\frac{1}{2}$ にする際に失われるビットのみをフィールド毎に、偶数ラインの画素は奇数ラインに、奇数ラインの画素は偶数ラインに加算することを交互に繰り返す [17].

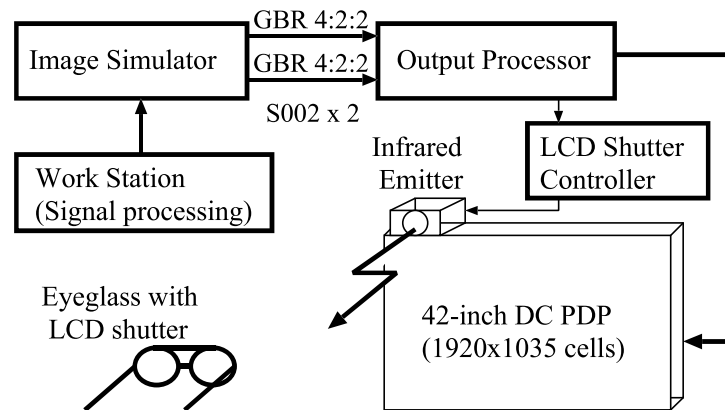


図 3.9 実験装置のブロック図

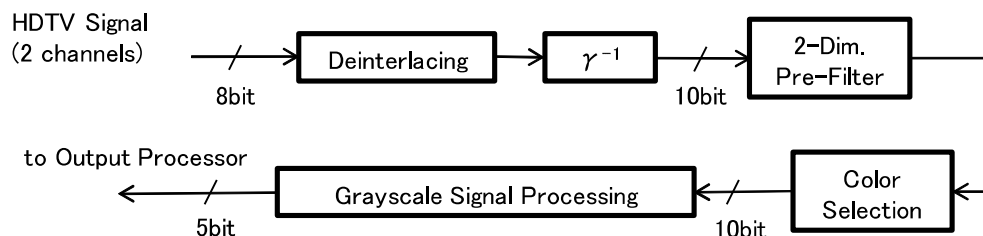


図 3.10 信号処理のブロック図

3.4 立体画像表示実験

3.4.1 実験装置

PDP を用いた装置全体のブロック図を 図 3.9 に示す．あらかじめ計算機 (Work Station) で信号処理を施された画像信号は，画像シミュレータに蓄えられ，順次走査のハイビジョンデジタル信号として駆動装置 (Output Processor) に送られる．赤外線エミッタによって送られる同期信号 (120Hz) に同期した液晶シャッターメガネを用い，左右の目に交互に 60 Hz 順次走査の画像を提示する．

信号処理部分のブロック図を 図 3.10 に示す．信号処理はすべて計算機によるシミュレーションで行っている．入力信号は，G, B, R の各色 8bit/pixel のハイビジョン映像信号である．この映像信号は，最初に順次走査変換 [11] によってインタレース信号から順次走査の映像信号に変換される．また，映像信号は送像側でガンマ補正がなされているため，逆ガンマ補正回路で，リニアな信号 (その値が表示すべき光の明るさに対してリニアな信号) に変換する．さらに，DC 形 PDP のセル構造にあわせて信号に空間フィルタをかけ，色選択を行う [11]．その後，図 3.7, 3.8 に示した階調信号処理を行い，信号を



図 3.11 実験装置

駆動装置 (Output processor) へと送る. 図 3.7, 3.8 および (3.3)(3.4) 式における M, N は, $M = 10, N = 5$ である.

図 3.11 は, 本装置を用いて表示実験を行っている様子である.

3.4.2 表示結果

現状のパネルを用いて時分割立体ハイビジョン画像が表示可能なことを確認できた. 画面の隅々にまでわたって, 均一な輝度で立体映像が表示できている. 提案した表示方式は CRT でいえば 120Hz の順次走査に相当し, 観察では CRT を用いた 120Hz インタレース表示よりも画像の安定感が得られている. また PDP は, CRT やプロジェクタと異なり幾何ひずみが生じない点も, 立体視における奥行き知覚にとって有利であり, PDP 立体表示の特徴と考えられる. 解像度については, 時分割方式であるため, 立体表示においても 2 次元表示と同じ 700 本の解像度 (水平, 垂直とも) が得られている. 階調表示の特性については, 3.5 節で述べる.

3.5 画質主観評価実験

3.3 節で提案した階調信号処理により, 立体表示においてどの程度の階調表示が可能となっているかを主観評価実験により評価した.

3.5.1 評価実験方法

8bit/pixel 相当 (256 階調) の 2 次元画像を基準画像とし, 次の A から E の 5 つの階調信号処理を行った立体画像を評価画像として 2 重刺激劣化尺度法 (EBU 法) により画質主観評価実験を行った.



図 3.12 “肌色チャート”



図 3.13 “フラワーポット”

- 方式 A: 信号処理なし (32 階調)
- 方式 B: 誤差拡散 (従来法 [11] を左右同様に適用)
- 方式 C: 相補的誤差拡散
- 方式 D: 方式 B + フィールド間誤差拡散
- 方式 E: 相補的誤差拡散 + フィールド間誤差拡散

使用した絵柄は、BTA ハイビジョン標準画像から肌色チャート (図 3.12, 静止画), ハイビジョン立体標準チャートからフラワーポット (図 3.13, 動画) の 2 種類である。肌色チャートは立体画像ではないが、階調特性の差が目立つ画像であるため、左右の入力に同一の画像を入力して評価した。また、フラワーポット画像は、実験装置のメモリー容量の制約のため、1.1 秒間の画像を 9 回繰り返して約 10 秒の評価画像とした。評価条件を表 3.2 に記す。

表 3.2 主観評価実験の評価条件

評価法	2 重刺激劣化尺度 (EBU 法)
評価項目	階調劣化
評価尺度	5 段階劣化尺度
表示装置	42 形 高精細 PDP
ピーク輝度	200cd/m ²
信号源	フレームメモリー
視距離	3H
評定者	専門家 10 名
その他	標準観視条件に準ずる

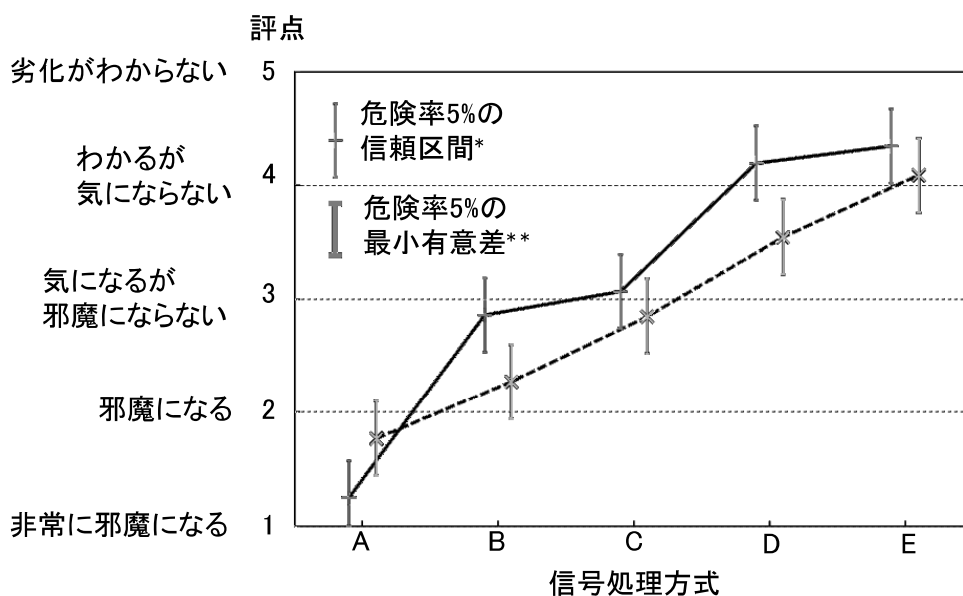


図 3.14 主観評価実験の結果

3.5.2 結果と考察

評価実験結果を 図 3.14 に示す。図中に、分散分析による危険率 5 % の信頼区間^{*1}と最小有意差^{*2}を示す。肌色チャートにおいては、すべての信号処理方式の間で画質に有意な差が得られることが確認できた。

フラワーポット画像においては、方式 B と C、方式 D と E の間では有意な差が得られていないが、方式 C と D の間では有意な差が得られており、方式 E においては、検知限

^{*1} 真の平均値がこの範囲から外れる確率は 5% である。

^{*2} 評価結果の平均値の差が、この値以上あるとき、95 % の確率で真の平均値にも差がある。

(評点 4.5) 付近まで画質が改善されている。方式 B と C, 方式 D と E は, 共に相補的誤差拡散をするか否かの差である。

相補的誤差拡散の目的は, 誤差拡散によって生じるノイズをランダム化することにより, 立体視した場合にノイズを低減することである。左右の画像に視差のない肌色チャートの場合には, この効果がよく表れて画質が改善されている。これに対し一般の立体画像では視差を有する部分が多いため, フラワーポット画像の場合は, 誤差拡散によって生じるノイズパターンも左右で異なり, 特に相補的誤差拡散を行わなくてもノイズが見えにくくなっていると考えられる。しかし, フラワーポット画像においても視差の少ない部分では相補的誤差拡散を行った方が若干画質が改善される傾向があり, 相補的誤差拡散が有効と考えられる。

3.6 むすび

現状のパネルと液晶シャッターメガネを用いて時分割立体画像が表示可能なサブフィールド発光スキームを提案するとともに, 階調信号処理に関して, 立体表示に適した改善方法を提案した。そして, 実験によりその有効性を確認した。

提案した発光スキームにより実際のパネルを用いて時分割立体画像が表示可能なことを確認した。画面の隅々にまでわたって, 均一な輝度で立体映像が表示できている。

また, 従来の PDP 信号処理に用いられていた擬似階調表現法である誤差拡散法, ライン間ディザ法に加えて, フィールド間誤差拡散, および新たに提案した左右逆スキャンによる誤差拡散を用いることにより, 少ない階調しか得られない場合でも立体表示において, より自然な階調を表現できる方法を提案し, その効果を主観評価実験により確認した。提案した階調処理方法は, 発光パルス数により階調表示を行っている他の表示デバイスで立体表示を行う場合にも活用できる。例えば, プロジェクタ用のデバイスとして用いられている DMD (Digital Mirror Device) [18] を用いて時分割立体表示を行う際にも画質改善に利用可能である。

提案した表示方式は CRT でいえば 120Hz の順次走査に相当し, CRT を用いた 120Hz インタレース表示よりも画像の安定感が得られている。また PDP は, CRT やプロジェクタと異なり幾何ひずみが生じない点も, 立体視における奥行き知覚にとって有利であり, PDP 立体表示の特徴と考えられる。なお, 実験における観察により, パネルの蛍光体の残光特性によるものと考えられる左右画像間のクロストークが, CRT より目立ちやすいという点が指摘された。

次章にて, クロストークの原因の究明と, その改善方法の検討を行う。

参考文献

- [1] 国分秀樹, 高野善道, 山本敏裕, 石井啓二, 小浦寿三, 馬嶋圭三, 栗田泰市郎, 山口孝一, 小林希一, 三橋哲雄, 村上 宏: “42 インチハイビジョン PDP システムの開発”, 映情学年次大 No.28-5, pp.358-359(1997)
- [2] M. Seki, T. Katoh, T. Kawai, T. Takei, S. Ueda, M. Ushirozawa, T. Kuriyama, T. Tajima, J. Koike, H. Murakami, Y. Sasaoka, T. Atsumi, F. Sakamoto, K. Kiriya, S. Uemura and K. Takahashi: “Fabrication Techniques for High-Resolution 42-inch HDTV PDP,” Proc. IDRC '97, pp.281-284(Sep. 1997)
- [3] T. Kurita, M. Seki, Y. Takano, T. Yamamoto, H. Kokubun, K. Kobayashi, H. Murakami, Y. Sasaoka, K. Takahashi: “A 42-inch-diagonal HDTV Plasma Display,” Proc. IEEE ISCE'97, pp.55-58(Dec. 1997)
- [4] 浜田宏一, 山本敏裕, 栗田泰市郎, 高野善道, 湯山一郎: “PDP 時分割 2 眼立体表示法の検討”, 映情学会年次大, No.19-12, pp.262-263 (1998)
- [5] K. Hamada, T. Yamamoto, T. Kurita, Y. Takano and I. Yuyama: “A Field-Sequential Stereoscopic Display System with 42-in. HDTV DC-PDP,” Proc. IDW'98, pp.555-558 (1998)
- [6] 村上 宏, 鳥井直哉: “パルスメモリー駆動による放電パネルのカラーテレビ表示”, テレビ学技報, ED-546, pp.75-80(1980)
- [7] 高野善道: “40 型 PDP の CPM 駆動”, 信学技報, EID93-118, pp.37-42(1994)
- [8] S. Mikoshiba, G. Izumi, T. Nakamura, K. Igarashi: “Appearance of False Pixels and Degradation of Picture Quality in Matrix Displays having Extended Light-Emission Periods,” SID 92 Digest, pp.659-662(May 1992)
- [9] 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(1997)
- [10] T. Makino, et al.: “Improvement of Video Image Quality in AC-Plasma Display Panels by Suppressing the Unfavorable Coloration Effect with Sufficient Gray Shades Capability,” Asia Display'95, S19-3(1995)
- [11] T. Kurita, T. Yamamoto, Y. Takano, K. Ishii, T. Koura, H. Kokubun, K. Majima, K. Yamaguchi, H. Murakami: “Improvement of Picture Quality of 40-in. Diagonal HDTV Plasma Display,” Proc. IDW'96, pp.287-290(Nov. 1996)
- [12] Robert Floyd, Louis Steinberg: “An Adaptive Algorithm for Spatial Grey Scale”, Proc. SID'75, pp.36-37(1975)
- [13] 小林 貢, 上原久夫, 中門 孝: “誤差拡散法で 512 色表示液晶を 1670 万色に, 専用

- LSI 開発”, 日経エレクトロニクス, pp.131–142(1994)
- [14] D. H. Kelly: “Visual Responses to Time-Dependent Stimuli. (I. Amplitude Sensitivity Measurements),” *Journal of the Optical Society of America*, Vol.51, No.4, pp.422–429 (1961)
- [15] 磯野, 安田: “時分割立体視の成立条件”, *テレビ誌*, Vol.41, No.6, pp549–555(1987)
- [16] 湯山一郎: “3次元テレビジョンと符号化”, *信学論 (D-II)*, Vol.J80–D–II, No.2, pp.407–414(Feb. 1997)
- [17] Toshihiro Yamamoto, Tako Kuriyama, Masahiko Seki, Toshihiro Katoh, Tatsuya Takei, Takashi Kawai, Hiroshi Murakami, Koji Shimada: “A 40-Inch-Diagonal HDTV DC Plasma Display,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol.42, No.5, pp.847–855 (1995)
- [18] Dana Dudley, Walter M. Duncan, John Slaughter: “Emerging digital micromirror device (DMD) applications,” *Proc. SPIE 4985, MOEMS Display and Imaging Systems*, (2003)

第4章

PDP を用いた立体表示における画素適応クロストークキャンセラ

4.1 はじめに

前章では、パネルとシャッタメガネの特性について検討し、現状のハイビジョン用 PDP でも立体表示可能な表示方式と階調信号処理方法を提案した。しかし、実験の結果、左右の画像間のクロストーク妨害が CRT より目立つことが判明した。その後の検討により、このクロストーク妨害は、主に PDP に用いられている蛍光体の残光特性によって生じていることが明らかになった [3,4]。しかし、PDP 用蛍光体に求められる条件は、残光特性よりも重要な条件がいくつかあり [5]、PDP に適してかつ残光特性の良い蛍光体を見出すことは現状では難しい。

本章では、蛍光体の残光時定数とクロストーク量との関係を定量的に示し、PDP 時分割立体表示に求められる蛍光体の残光特性について明らかにする。また、画素適応処理によりクロストーク妨害を信号処理により改善する手法を提案し、その有効性を主観評価実験により確認する。

4.2 DC 形 PDP を用いた時分割立体表示方式

図 4.1 に本方式におけるサブフィールドの点灯タイミングとシャッタ眼鏡の開閉状態を示す。この図は、駆動速度の制約からパネルを上下に 2 分割して別々に駆動する場合である。現状のパネルと駆動回路では、1 フィールド (16.7ms) を 12 サブフィールドで駆動するのが限界と考えられる。そこで、前半 6 サブフィールドを左眼用、後半 6 サブフィールドを右眼用の画像表示に割り当てる。液晶シャッタメガネが開くのに 1.5ms 程度の時間が必要なため、この 6 サブフィールドのうち、最初の 1 サブフィールドは表示

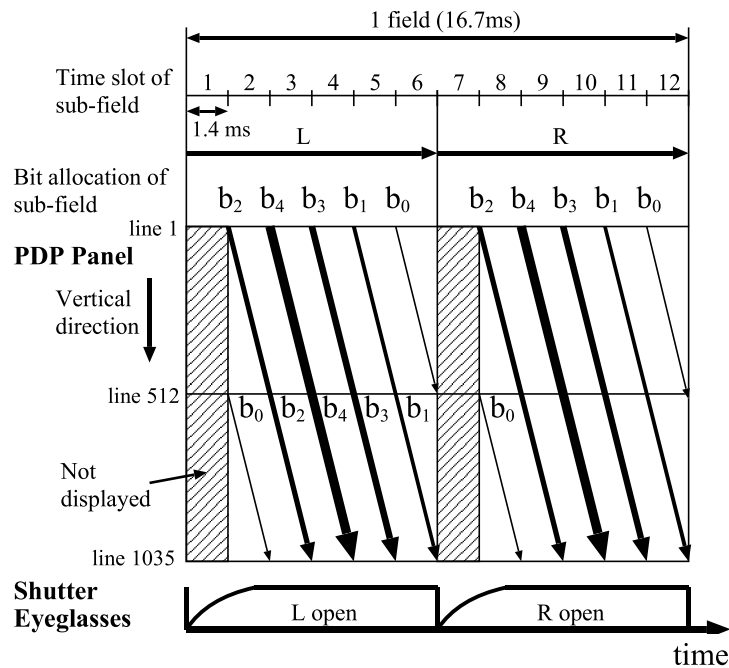


図 4.1 DC 形パネルのサブフィールド発光スキーム

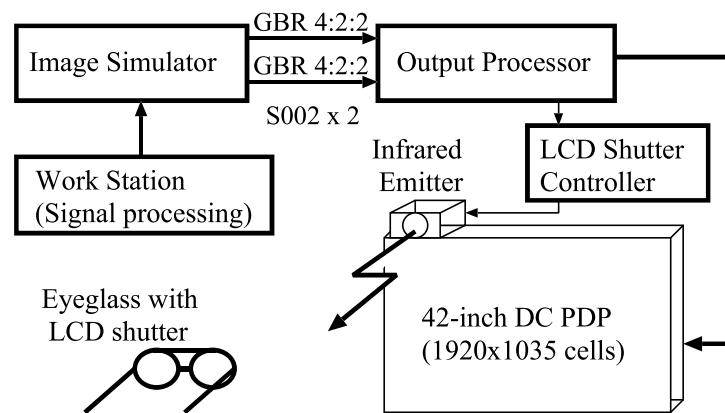


図 4.2 実験装置のブロック図

には用いず，残り 5 サブフィールドを用いて画像を表示する．映像信号のビット毎にサブフィールドを割り当ててるが，図 4.1 においては，上位ビットより b_4, b_3, \dots, b_0 と記述してある．

前記の通り，パネルを上下 2 分割駆動しているが，良好な動画質を得るためには上下で同じビットのサブフィールドを連続的に駆動する必要がある [6]．しかし，時分割立体表示においては， $\frac{1}{2}$ フィールドの時点で，左眼用の映像と右眼用の映像とが切り替わるため，この部分で連続的にサブフィールドを点灯できない．そこで，ここに映像信号の最下位ビット (b_0) を割り当てて，上下パネルの駆動の境目（図 4.1 においては垂直 512 本目

付近) を見えにくくしている。

5 サブフィールドでは、5 bit 分の階調 (32 階調) しか表現できないので、より自然な映像を表示するためには、従来の擬似階調表現法であるディザ法やフレーム内誤差拡散法 [7] に加えて、フレーム間誤差拡散法、相補的フレーム内誤差拡散法 [2] 等の手法を用いることが必要である。

PDP を用いた装置全体のブロック図を図 4.2 に示す。信号処理はすべて計算機によるシミュレーションで行っている。赤外線エミッタの信号 (120Hz) に同期した液晶シャッタメガネを用い、左右の眼に交互に 60 Hz 順次走査の画像を表示する。ハイビジョン用 42 インチ DC 形パネルを用いた実験により、現状のパネルを用いて時分割立体画像が良好な階調特性で表示可能なことを確認した [2]。しかし、左右の画像間のクロストークが CRT より目立ちやすいという問題点が判明した。クロストークを生じると画像が 2 重に見え、一種の画質妨害となる。画質改善のために、このクロストークを低減する必要がある。

4.3 クロストーク妨害とその理論値

4.3.1 クロストーク妨害の原因

クロストークの原因を探るために、サブフィールドのうち左眼用の 1 つのみを点灯させて、それが右眼にどの程度漏れ込んでいるかをシャッタ眼鏡を通して観測したものが図 4.3 である。かなりの量の残光が右眼に漏れ込んでいることがわかる。なお、この左眼用の発光は、パネル下側中央付近で緑の b_2 に相当するサブフィールドのみを点灯させたものであり、励起パルス数は 64 である。

CRT に用いられている緑色蛍光体の残光時定数 ($1/e$) が 1ms 程度以下なのに対し、PDP に用いられているものは残光時定数が 3.9ms であり、かなり長い。これが CRT よりもクロストークが見えやすい原因であると考えられる。

4.3.2 蛍光体残光量の計算

表 4.1 に、使用している蛍光体の種類と残光時間を示す。青の蛍光体を除いて、残光時間がかなり長いことがわかる。

蛍光体の時定数に対するクロストーク量 (残光量) を計算するために、以下のような条件を仮定する [8]。

1. 1 個の紫外線光子は、蛍光体母体中に 1 つの電子 - ホール対を作り、その対は付活剤を 1 回のみ励起する。

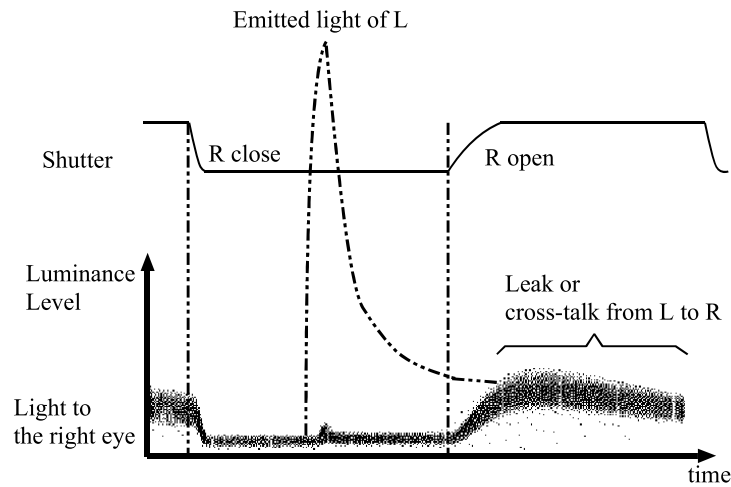


図 4.3 発光の漏込み (緑)

表 4.1 パネルに使用されている蛍光体

発光色	材料	1/e 時定数
赤	(Y, Gd)BO ₃ :Eu	4.3ms
緑	Zn ₂ SiO ₄ :Mn	3.9ms
青	BaMgAl ₁₀ O ₁₇ :Eu	1ms 以下

2. 電子 - ホール対が付活剤に到達するまでに要する時間は無視する.
3. 付活剤は基底状態からある 1 つの励起状態へのみ励起される.
4. 付活剤を励起しなかった電子 - ホール対の持つエネルギーはフォノンを経て熱へと交換される.
5. 蛍光体発光輝度の減衰は指数的である.
6. 蛍光体飽和は無視する.

以上の仮定のもとでは、蛍光体母体結晶の物理的特性の影響は無視でき、単位面積当たりの付活剤数は、付活剤密度に紫外線吸収層の厚さを乗じたもので一定値をとるものとすることができる。

図 4.4 は、入射紫外線光束 ϕ と付活剤励起密度 n^* の関係を示している。ここで、入射紫外線光束は、理想的な矩形波であると仮定する。図中の横軸は時間を示す。付活剤の密度を n_0 、そのうち励起状態にあるものを n^* 、基底状態付活剤に対する紫外線の等価衝突断面積を σ 、付活剤発光の自然遷移時定数を τ とする。これらの条件のもとでは、励起状

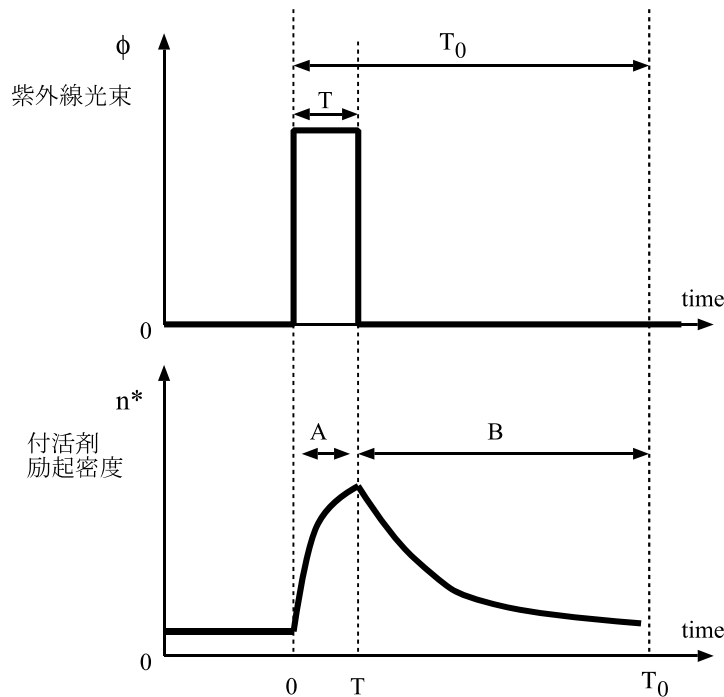


図 4.4 蛍光体への入力紫外線束 (上), および付活剤励起密度 (下)

態にある付活剤の密度 $n^*(t)$ は

$$n^* = \begin{cases} \phi\sigma n_0\tau + (n^*(0) - \phi\sigma n_0\tau)\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) & (0 \leq t < T) \\ n^*(T)\exp\left(-\frac{t-T}{\tau}\right) & (T \leq t < T_0) \end{cases} \quad (4.1)$$

と表される [8]. ここで, $n^*(0)$ および $n^*(T)$ は, それぞれ時刻 0 と T の時の付活剤励起密度である. また, 蛍光体の発光強度は, $n^*(t)$ に比例関係にある.

以上のことから, 蛍光体発光輝度は図 4.4 の期間 A においては, 初期値に加えて $1 - \exp(-t/\tau)$ の形で増加し, 期間 B においては, $\exp(-t/\tau)$ の形で同じ時定数で減少するとしてよい. 実際の蛍光体発光では, 蛍光体の飽和に伴ってパルス励起時の立ち上がり時定数と, 立ち下がり時定数に差が生じるが, 本論文では蛍光体飽和を無視していることから, 同じ時定数として扱う.

パネルの点灯順と, それに対応する励起パルス数を, 表 4.2 に示す. パネルは図 4.1 のように上下に 2 分されて駆動されており, パネルの上側と下側でビットの割り当てが異なっている. さらに, DC 形パネル特有の RGGB カルテット形セル配列のため, 発光のうち緑の MSB (b_4) は使われない [1]. 発光周期 $2.5\mu\text{s}$, 各パルスの発光デューティ比を 40% として蛍光体発光波形を計算することにより, 蛍光体残光量を計算することができる.

表 4.2 サブフィールドと励起パルス数 (配列 A)

Sub-field No.		1	2	3	4	5	6
上側	対応ビット	無	b_2	b_4	b_3	b_1	b_0
	パルス数 (G)	0	64	0	128	32	16
	" (R, B)	0	64	256	128	32	16
下側	対応ビット	無	b_0	b_2	b_4	b_3	b_1
	パルス数 (G)	0	16	64	0	128	32
	" (R, B)	0	16	64	256	128	32

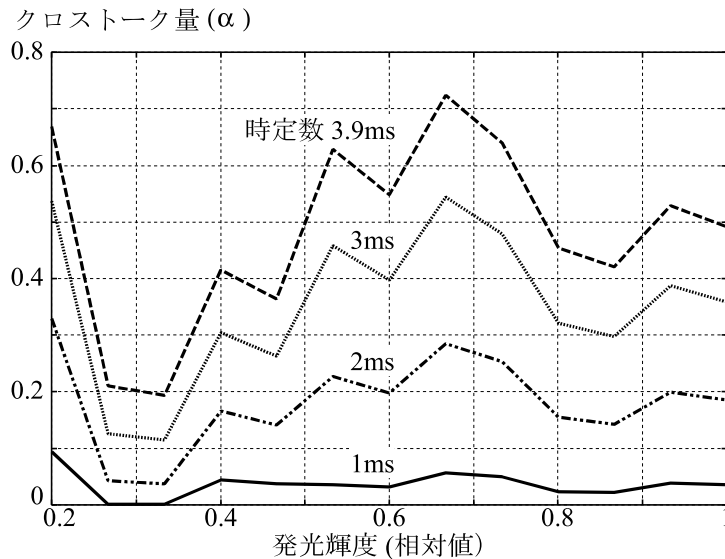


図 4.5 発光輝度とクロストーク量 (緑, パネル下側中央部)

4.3.3 残光時定数とクロストーク量との関係

蛍光体の発光波形の計算をもとにして、クロストーク量を計算する。残光のうち、シャッタ眼鏡が開くまでの部分は、たとえ光が漏込んでいたとしても眼には入らないため、その分を差し引く必要がある。用いたシャッタ眼鏡には π 形配向の液晶が用いられているが、時間応答の関数近似等の解析は、ほとんど行われていないので、応答の実測値に合うように適当な関数で近似する。今回は、(4.2) 式を用いて近似した。

$$Tr(t) = \begin{cases} A(1 - \exp(-\frac{t}{\tau_g})) & (0 \leq t < T_1) \\ 1.0 & (t \geq T_1) \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\text{ただし } A = \frac{1}{1 - \exp(-\frac{T_1}{\tau_g})}$$

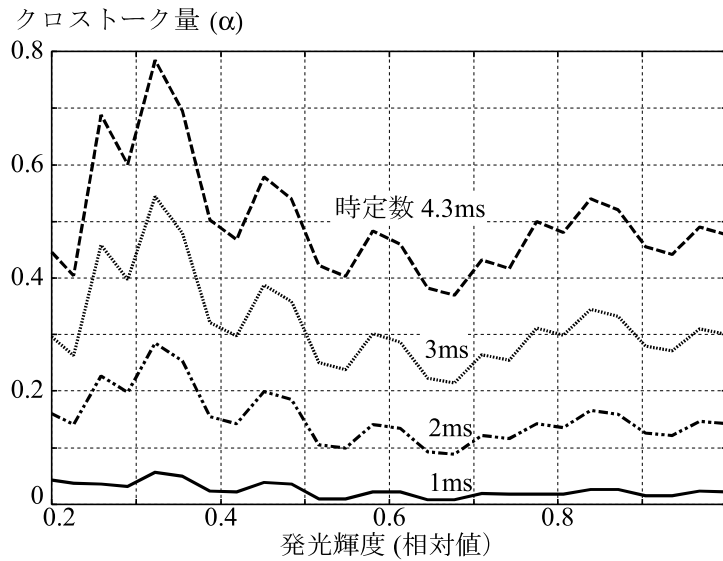


図 4.6 発光輝度とクロストーク量 (赤, パネル下側中央部)

シャッタ眼鏡の実測結果から, $T_1 = 3(\text{ms})$, $\tau_g = 1.65$ とした.

これを用いて, 緑と赤の蛍光体に対して, 時定数を変えて相対的なクロストーク量 (α) (発光輝度と残光輝度の比) をパネル下側中央部について計算すると, それぞれ図 4.5, 図 4.6 のようになる. ここで発光輝度とは, 左眼用の期間の発光を左眼の期間だけ時間積分したものであり, 残光輝度は, 左眼の発光が右眼に漏込んだものを右眼の期間だけ積分したものである.

4.4 クロストーク量の測定とクロストークの改善

4.4.1 クロストークキャンセラ

クロストークを信号処理で低減するために, 図 4.7 に示されるようなクロストークキャンセラを提案する. これは, 画像を表示する前に, あらかじめ左眼用の映像信号から右眼用の映像信号を, また右眼用の映像信号から左眼用の映像信号をそれぞれ, クロストーク量だけ減算してから表示することによりクロストークを低減させようというものである.

図中 α は, キャンセルすべきクロストークの割合である. 通常の映像信号は CRT の表示が前提となっているので, CRT の入出力特性, いわゆるガンマ特性を補正するため送像側でガンマ補正がなされている. ガンマ補正された信号は, その値が表示すべき光の明るさに対してリニアな信号でないため, このままでは画像信号同士の加減算ができない. そこで逆ガンマ補正回路 (図中の γ^{-1}) をそれぞれ用いてリニアな信号に変換する. この逆ガンマ補正回路はガンマ補正回路と逆特性の入出力特性を有している. 映像信号を

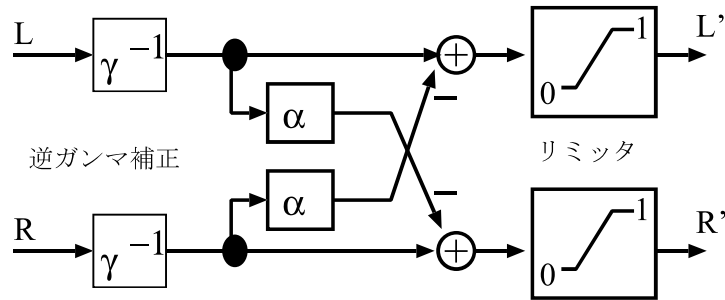


図 4.7 クロストークキャンセラ

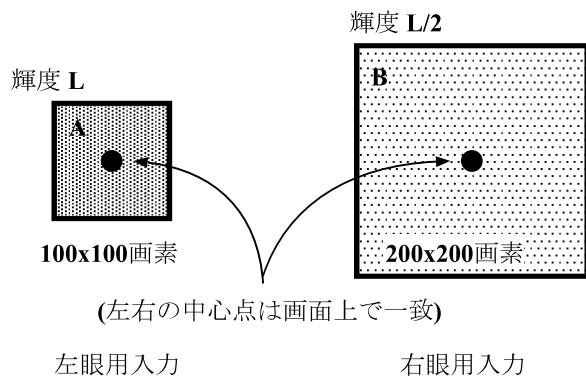


図 4.8 クロストーク測定用パターン

減算した後、負になったものについては 0 にクリップする必要がある。

発光輝度が映像信号に対してリニアである PDP は通常、信号処理回路に逆ガンマ補正回路を有しており、以上の方法は、CRT よりも PDP 等に適した方法であるといえる。

4.4.2 クロストーク量の測定と蛍光体の所要特性

緑と赤の蛍光体について、発光輝度を変えてクロストーク量を測定した。この測定には図 4.7 のクロストークキャンセラを用い、図 4.8 のような信号を表示して行った。α の値を変化させ、右眼から見て、図中 A の左眼の発光からのクロストークが見えなくなる α の値をクロストーク量とした。各サブフィールドは、上から下の方にスキャンしながら発光させている。したがって、下に行くほどサブフィールドの発光が遅い時点で生じる。このため、パネルの下の方がクロストーク量が多い。そこで、上パネルの中心付近と下パネルの中心付近でクロストーク量を測定した。測定結果を図 4.9、図 4.10 に示す。

緑の蛍光体に関して、図 4.9 中に実線および点線で示したのは、残光時定数を 2.5ms とした場合の理論的なクロストーク量であり、緑の蛍光体の残光時定数 (1/e) の公称値は 3.9ms であるので約 65% の時定数の値で理論値とよく合う実測値が得られていることがわかる。これは、おそらく蛍光体の発光波形が (4.1) 式の指数カーブからずれているこ

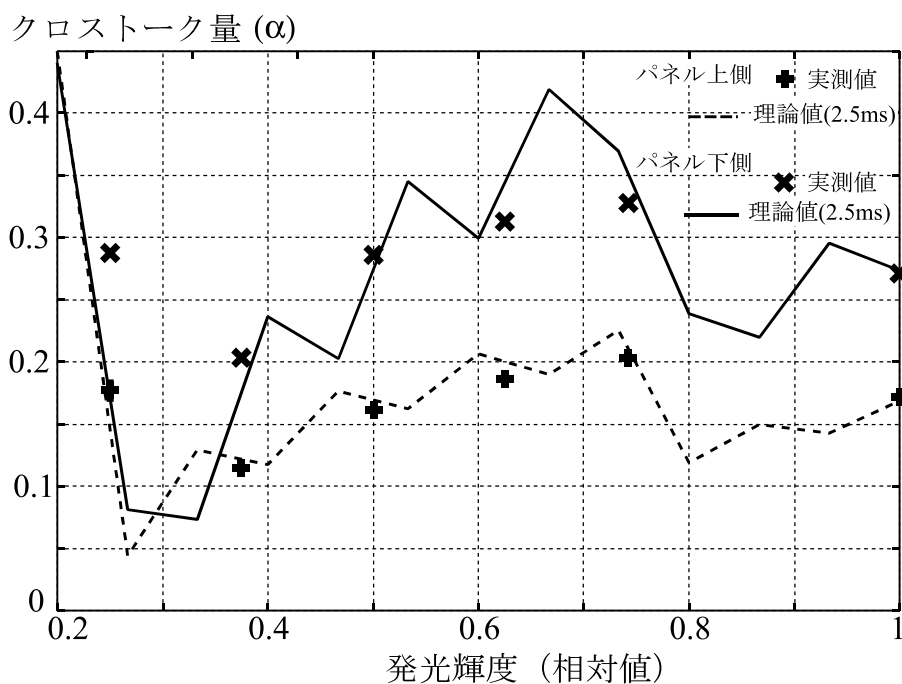


図 4.9 測定値と理論値との比較 (緑)

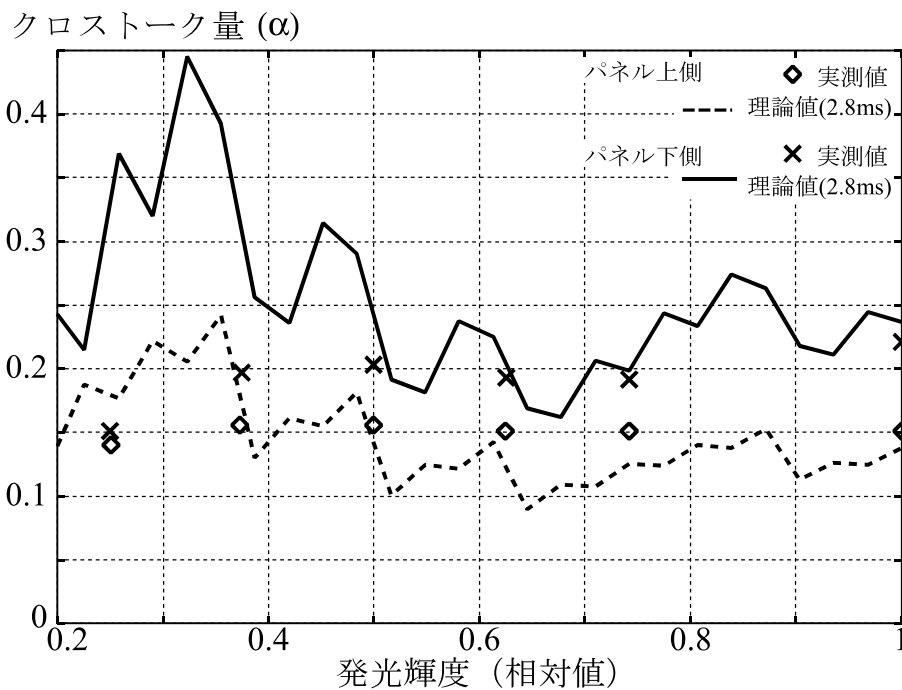


図 4.10 測定値と理論値との比較 (赤)

表 4.3 サブフィールドと励起パルス数 (配列 B)

Sub-field No.		1	2	3	4	5	6
上 側	対応ビット	無	b_4	b_3	b_2	b_1	b_0
	パルス数 (G)	0	0	128	64	32	16
	" (R, B)	0	256	128	64	32	16
下 側	対応ビット	無	b_0	b_4	b_3	b_2	b_1
	パルス数 (G)	0	16	0	128	64	32
	" (R, B)	0	16	256	128	64	32

とによるものと考えられる。

赤の蛍光体に関しても、残光時定数を 2.8ms とした場合の理論的なクロストーク量とほぼ一致している。公称値 4.3ms との比は緑と同じく約 65% である。また、表 4.1 にあるように、緑の蛍光体よりも残光時間が長いにも関わらず、発光輝度によってはクロストーク量が緑より低く測定されている。これは、残光時間が長い分だけ残光量も多いのであるが、緑と異なり、重みの大きい MSB のサブフィールド (b_4) も点灯している。残光となる前の発光量自体が大きく、かつ MSB のフィールド内時間位置も早いので、クロストーク量としては小さな値となっている。この状況は図 4.5, 図 4.6 においても確認できる。

なお、青の蛍光体に関しては、残光時間が充分短いためクロストーク量は今回の測定でも 0 であった。

以上のようにクロストーク量の実測値は、理論値よりも少ない値となっている。しかし、仮りに図 4.5, 図 4.6 が正しいとしても、残光時定数が 1.0ms 程度以下になると、クロストーク量は数 % 以下になることがわかる。クロストーク量が数 % 以下では、クロストークの見え方は、ほとんど気にならないレベルになると考えられ [9], 今後の蛍光体の改善が期待される。もし、今回の実測値と理論値の比が常に適用できるのであれば、残光時定数は 1.5ms 程度でも許容できる可能性がある。

4.4.3 サブフィールドのビット割り当てとクロストーク量

クロストークは、主に蛍光体の残光によって発生するので、発光輝度の高いサブフィールドは、できるだけ早く点灯させた方がよいと考えられる。そこでサブフィールドの発光順番を並び替えて表 4.3 のようにした場合について、クロストーク量の理論値を計算した。結果は図 4.11, 図 4.12 のようになった。輝度の高い方では、クロストークが減少しているが、輝度の低い方では、逆にクロストークが増加していることがわかる。

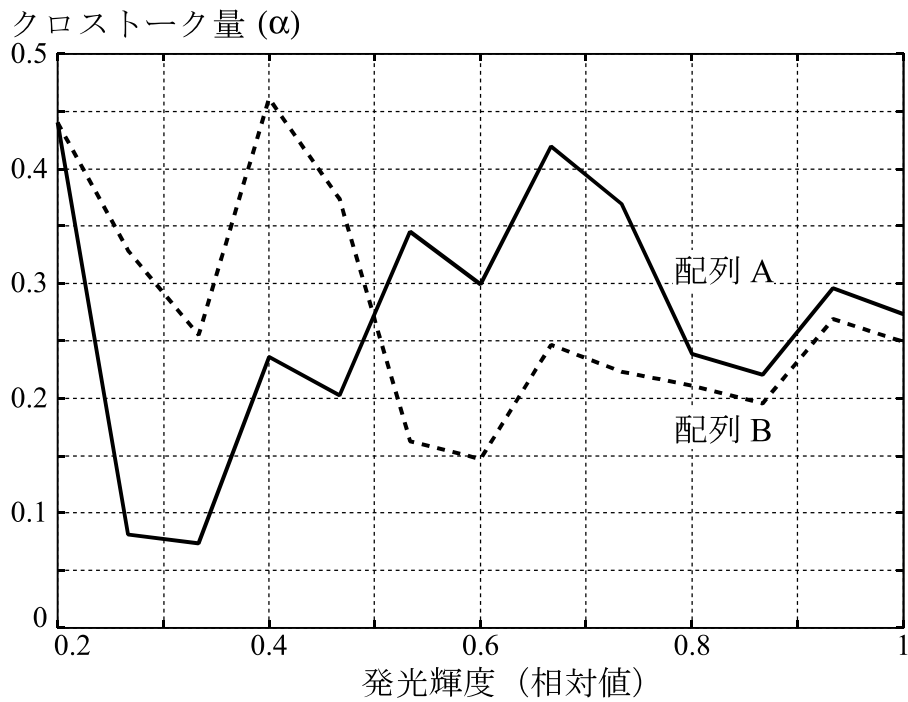


図 4.11 サブフィールドの配列とクロストーク量 (緑, パネル下側中央部)

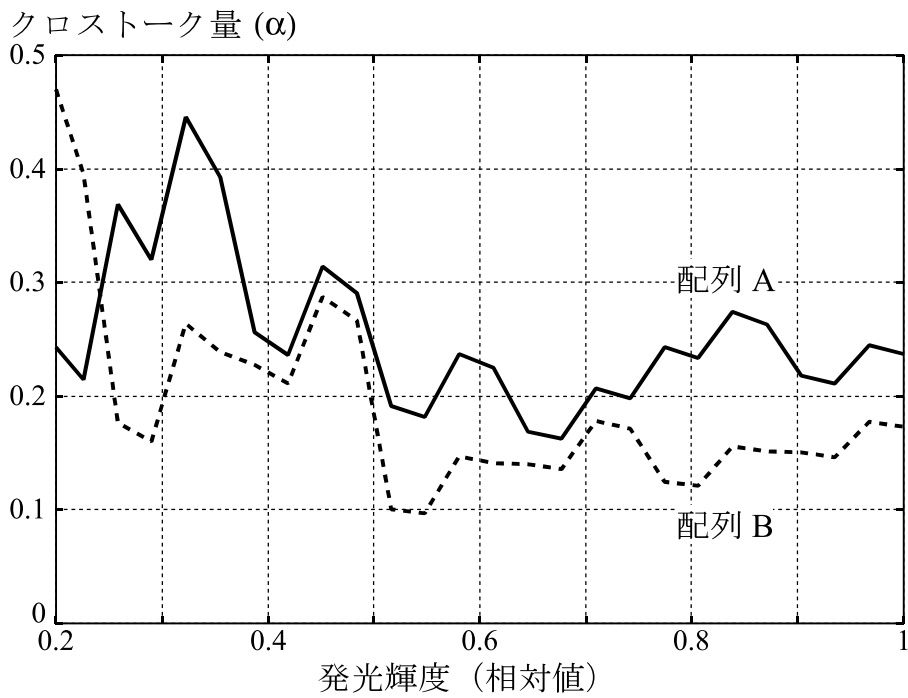


図 4.12 サブフィールドの配列とクロストーク量 (赤, パネル下側中央部)

4.4.4 クロストークキャンセラの最適化

図 4.7 に示したクロストークキャンセラは、時間方向の位相関係を考慮してない。左眼用、右眼用の映像を交互に表示しているため、左眼用フィールドの発光には、前フィールドの右眼用の発光が漏込み、また右眼用フィールドの発光には、現フィールドの左目用の発光が漏込む。よって、図 4.7 のキャンセラの構成のままでは静止画に関してはクロストークを基本的に除去できるが、動画の場合には、動きの量に応じたクロストークが左眼に残留してしまう。この問題は、左眼用の信号から、右眼の信号を減算する前に、右眼用の信号にフィールドディレイを入れてから減算することにより解決できる [10]。

4.5 画質主観評価実験

4.5.1 クロストークキャンセラの効果

計算によって得られるクロストーク量の理論値を用いてクロストークを計算機シミュレーションにより再現し、CRT に表示した画像が図 4.13 である。実際の PDP 表示ではシャッタメガネによるクロストークも生じるが、このシミュレーションでは考慮していない。このクロストークを、提案したクロストークキャンセラを用いてキャンセルしたシミュレーション画像が図 4.14 である。

チューリップの部分でクロストーク（2重像）が減少していることがわかる。しかし、背景が暗い画像などでは図 4.7 における減算結果が負となってしまう、クロストークをキャンセルできない場合があった。

4.5.2 評価実験方法

クロストークキャンセラを用いることにより、立体表示においてどの程度の画質が改善されているかを主観評価実験により評価した。

次に示す A から C の 3 つの信号処理を行った立体画像を評価画像として単一刺激劣化尺度法 [11] により画質主観評価実験を行った。クロストークおよび、クロストークによって生じる解像度劣化を画質劣化要因として評価してもらった。評価した画像は、2 秒の動画を 7 回繰り返して表示したものである。使用した絵柄は、ライオン（図 4.15）、フィッシュ（図 4.16）およびハイビジョン立体標準チャートからフラワーポット（図 4.17）である。評価条件を表 4.4 に記す。キャンセラは 4.4.4 節の最適化を行ったものを用いた。

評価画像を作成する際に用いたクロストーク割合 (α) は、画面を垂直方向に 10 分割し、それぞれの領域において図 4.9, 4.10 に示されるように、赤と緑へのそれぞれの入力信号



図 4.13 クロストークキャンセラ無し (計算機シミュレーション)



図 4.14 クロストークキャンセラ有り (計算機シミュレーション)



図 4.15 “ライオン”

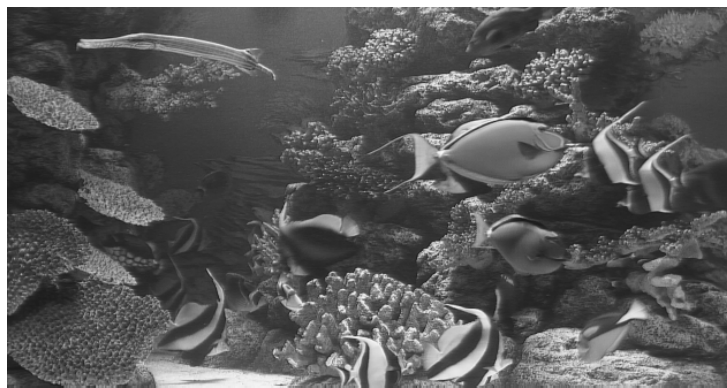


図 4.16 “フィッシュ”

レベルを変えて 6 点測定した。実測されてない値に関しては、これらの実測により得られた値を線形補完して用いた。予備実験から、 α の多少の誤差は画質に大きな影響がないことがわかっていたので、6 点測定で充分と判断した。

評価した方式は以下の通りである。

方式 A: サブフィールド配列 A (表 4.2), キャンセラ無し

方式 B: サブフィールド配列 A (表 4.2), キャンセラ有り

方式 C: サブフィールド配列 B (表 4.3), キャンセラ有り

4.5.3 結果

評価実験結果を図 4.18 に示す。図中に、分散分析による危険率 5% の信頼区間*1 を示す。

ライオン画像は、暗い部分が少なくキャンセラが良く効くと考えられ、キャンセラにより、1.5 ランク程度の大きな画質改善効果が得られている。その結果、許容限 (評価 3.5)

*1 真の平均値がこの範囲から外れる確率は 5% である。



図 4.17 “フラワーポット”

表 4.4 主観評価実験の評価条件

評価法	単一刺激法
評価項目	クロストークによる画質劣化
評価尺度	5段階劣化尺度
表示装置	42形 高精細 PDP
ピーク輝度	200cd/m ²
信号源	フレームメモリー
視距離	3H
評定者	非専門家 12名
その他	標準観視条件に準ずる

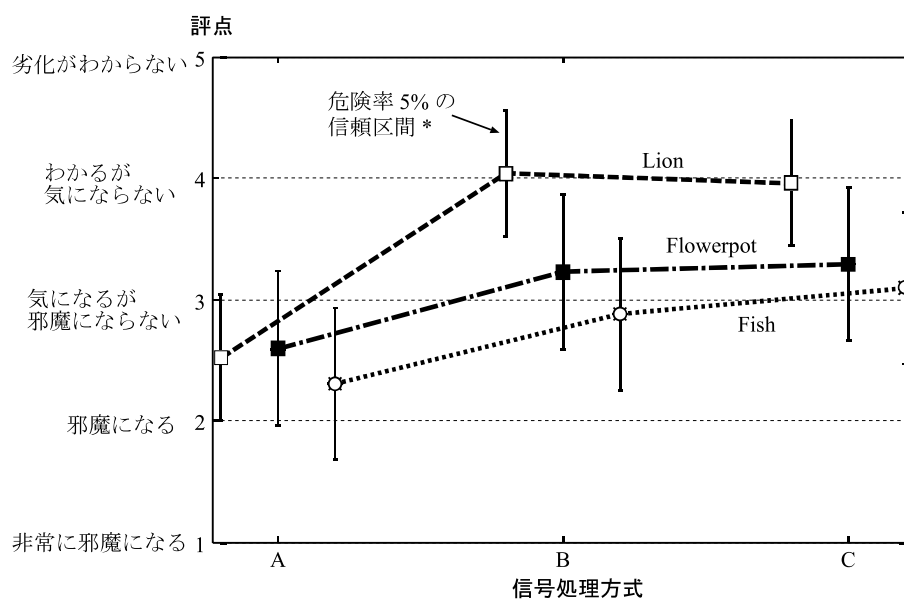


図 4.18 主観評価実験の結果

以上の画質となっている。フラワーポット画像の場合でもキャンセラを入れることにより許容限近くまで画質を改善できる。フィッシュ画像は、コントラストが高く、暗い部分も多いため、提案したキャンセラが効きにくい画像と考えられ、画質も 0.5 ランク程度しか改善されていない。

いずれの画像の場合も、方式 B と方式 C では明らかな差は見られなかった。これは、図 4.11 に示されるように、方式 C の場合の方が輝度の高い方ではクロストークが減少しているものの、輝度の低い方ではクロストークが増加しているため、平均すると画質に差が表れないためと考えられる。

クロストークキャンセラを用いることにより、現状の蛍光体であっても絵柄によっては許容限以上の画質を得られることが確認できた。

4.6 むすび

ハイビジョン用 PDP を用いて時分割立体画像を表示する際に問題となっていたクロストーク妨害について検討し、残光時定数とクロストーク量との関係を定量的に求めた。その結果、残光によるクロストーク妨害を無くすためには、残光時定数 ($1/e$) が 1.0 ~ 1.5ms 程度以下になればよい可能性が導かれた。また、クロストークキャンセラを提案し、現状の蛍光体でも絵柄によっては許容限以上の画質で表示可能なことを主観評価実験により確認した。

ただ、提案したクロストークキャンセラは、左右の画像の映像信号どうしの減算によりクロストークを除去している。この際に減算結果が負になった画素に関しては、負の映像信号は表示できないため 0 にクリップしている。4.5.1 節や 4.5.3 節で述べたように、この現象は背景が暗い画像かつコントラストが高い画像部分で生じやすい。原理的には、このような部分でのみクロストークが残留するが、負にならない部分に関しては蛍光体の残光によって生じるクロストークは完全に除去できる。蛍光体の時定数が小さくなると残光量も小さくなり、減算結果が負になる画素も少なくなるので、画面上でクロストークをキャンセルできない部分が減る。

蛍光体の残光量が大きいと、クロストークキャンセラだけでは、すべてのクロストークを除去しきれない。残光時間が短く、効率の高い蛍光体の開発が望まれる。その場合でも今回提案したキャンセラを用いることにより蛍光体の残光特性への要求条件を緩和できると考えられる。

第3章、第4章にて検討を行った PDP 立体表示装置に関する我々の発表論文 [3, 12] は、表示装置のクロストーク妨害に関するレビュー論文 (Crosstalk in stereoscopic displays: a review (2012) [13]) において、PDP による世界初の時分割立体表示装置として引用されており、立体表示装置研究の進展に貢献できたと考えられる。

参考文献

- [1] 栗田泰市郎, 山本敏裕, 石井啓二, 国分秀樹, 関 昌彦, 高野善道, 村上 宏, 山本久米次, 香川 実, 笠原光弘, 細川拓央: “42 形ハイビジョン PDP 表示システムの開発”, 映情学誌, Vol.54, No.2, pp.310–318 (2000)
- [2] 浜田宏一, 山本敏裕, 栗田泰市郎, 高野善道, 湯山一郎: “DC 形 PDP を用いた時分割 2 眼立体表示法の検討”, 映情学誌, Vol.54, No.3, pp.452–458 (2000)
- [3] K. Hamada, T. Yamamoto, T. Kurita, Y. Takano and I. Yuyama: “A Field-Sequential Stereoscopic Display System with 42-in. HDTV DC-PDP,” Proc. IDW’98, pp.555–558 (1998)
- [4] 浜田宏一, 山本敏裕, 栗田泰市郎, 高野善道, 湯山一郎: “PDP 時分割 2 眼立体表示法とクロストーク改善による高画質化”, 信学技報, EID98–100, pp.119–124 (1999)
- [5] 村上由紀夫, 小池純郎, 小栗康生, 久宗孝之, 高橋 敦: “プラズマディスプレイ用蛍光体の特性改善”, テレビ学技報, IDU 94–175 (1994)
- [6] 山本敏裕, 石井啓二, 栗田泰市郎, 小浦寿三, 高野善道, 国分秀樹, 村上 宏: “PDP における動画偽輪郭妨害による動画質劣化の改善”, 映情学誌, Vol.54, No.5, pp.717–725 (2000)
- [7] T. Kurita, T. Yamamoto, Y. Takano, K. Ishii, T. Koura, H. Kokubun, K. Majima, K. Yamaguchi, H. Murakami: “Improvement of Picture Quality of 40-in. Diagonal HDTV Plasma Display,” Proc. IDW’96, pp.287–290 (Nov. 1996)
- [8] Zhu Yi-Wen, 山口高弘, 志賀智一, 御子柴茂生, 上田嘉男, 苅谷教治, 篠田 傳: “カラー PDP の動画偽輪郭に対する蛍光体残光の影響と視覚特性”, テレビ学技報, IDY98–24, pp.137–142 (1998)
- [9] 花里敦夫, 奥井誠人, 星野春男, 三橋哲雄: “2 眼立体表示におけるクロストーク妨害の評価”, 1996 年映情学冬季大, p.26 (1996)
- [10] 浜田宏一, 山本敏裕, 栗田泰市郎, 高野善道, 湯山一郎: “PDP 時分割立体表示におけるクロストークキャンセラの改善”, 1999 年映情学年次大, No.12–11, pp.177–178 (1999)
- [11] “Methodology for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures”, ITU–R Recommendations, BT.500–7, pp.307–329 (1995)
- [12] K. Hamada, T. Kurita, M. Kanazawa, K. Yamamoto: “A 3D Hi-Vision Display with 50-in. AC PDP,” AD/IDW’01, pp.785–788 (2001)
- [13] Andrew J. Woods: “Crosstalk in stereoscopic displays: a review,” Journal of Electronic Imaging, SPIE, Vol. 21, No.4 (2012)

第 5 章

超解像自由視点画像合成の高速化

5.1 はじめに

本章では、画素適応処理として超解像技術を用いて、自由視点画像合成の画質向上を行う超解像自由視点画像合成の高速化実装についての検討を行う。

自由視点合成画像手法の大半は、多視点画像を混色して画像を合成する。混色合成は、形状推定の誤差を目立たなくする効果があるが、合成画像をぼかしてしまうという限界がある。一方、多視点画像を超解像再構成 [1] の枠組みを用いて統合すれば、解像感の高い画像合成が実現できると考えられる。本章で対象とする超解像自由視点合成画像とは、再構成型超解像を応用して、高解像度で任意の視点から見た画像を自在に合成する技術を指す。

高橋ら [4, 5] は、セミグローバル・ステレオ法 [6] を基にした高精度なデプス推定と、オクルージョン処理、デプスの信頼性に基づく正則化を含めた超解像再構成を組合せた、自由視点画像合成手法を提案している。本章では、文献 [4, 5] の手法全体をグラフィックプロセッサユニット (GPU) を用いて並列実装した [7]。さらに、演算高速化に寄与する改善として、超解像再構成演算の初期画像および正則化項の変更を行った [8]。結果として、 160×120 画素の入力画像 4 枚から 320×240 画素の超解像自由視点合成画像 1 枚を約 130ms で合成可能とした。これは、並列演算化を行わない場合の従来手法 [4, 5] と比較して約 70 倍の速度である。

本章の構成は、以下の通りである。5.2 節にて、文献 [4, 5] を理論的背景とする超解像自由視点画像合成の概要に関して述べ、5.3 節にて、その演算並列化に関して述べる。5.4 節で、超解像再構成演算の初期画像および正則化項の変更に関して述べる。5.5 節にて、実験結果を示し演算速度の向上を確認し、5.6 節にてまとめとする。

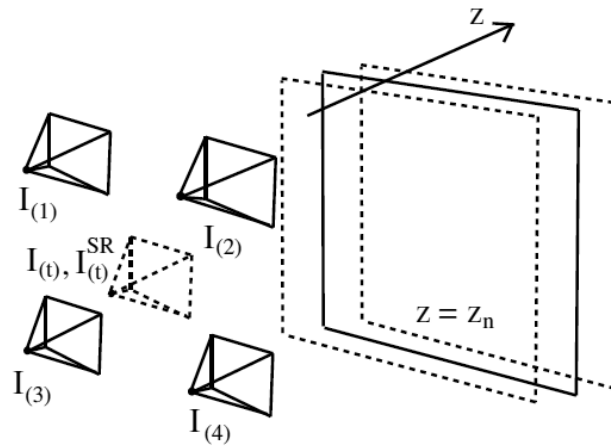


図 5.1 基本設定

5.2 超解像自由視点画像合成の概要

本章で用いる設定を図 5.1 に示す. 入力視点は, ほぼ同一平面上に配置されるとし, 入力多視点画像を $I_{(m)}$ ($m = 1, \dots, M$) と表記する. カメラパラメータは既知とする. z は入力視点平面からの距離を表す. 新たな視点 (合成対象視点) t から見た画像を合成することを考える. 入力画像と同じ解像度の混色による合成画像を $I_{(t)}$, 超解像による高解像度の合成画像を $I_{(t)}^{SR}$ と表記する.

文献 [4, 5] の手法では, 合成対象視点 t の座標系において入力多視点画像の位置合わせを行い, 再構成型超解像の枠組みを当てはめることで, 高解像度の自由視点画像を得る.

5.2.1 デプス推定と位置合わせの関係

多視点画像の位置合わせは, デプス推定に等価であり, 最初に, 合成対象視点から見たデプス D を求める. デプス推定と位置合わせの関係を図 5.2 を用いて説明する. 図中に合成対象視点 $I_{(t)}$ の, ある画素に対応する光線を点線で示す. デプスがわかっているならば, その光線と被写体表面 (object surface) との交点ができる. その交点から, 入力カメラ $I_{(m)}$ への光線をたどる. こうすることにより, 合成対象視点 $I_{(t)}$ 上の元の画素に対応する入力カメラ $I_{(m)}$ 上の画素が求まる. デプスが不正確な場合は, 対応画素の位置に誤差を生じる (図中に薄線で示す) ため, デプスは正確なほど良い. この操作をすべての画素に対して繰り返せば, 合成対象視点 $I_{(t)}$ と入力カメラ $I_{(m)}$ の位置合わせが達成できる. デプスマップを求める解像度は入力画像と同一とするが, $I_{(t)}^{SR}$ のサイズに拡大して \hat{D} とし, 超解像演算に用いる. この \hat{D} を用いて入力多視点画像を合成対象視点の座標系に対

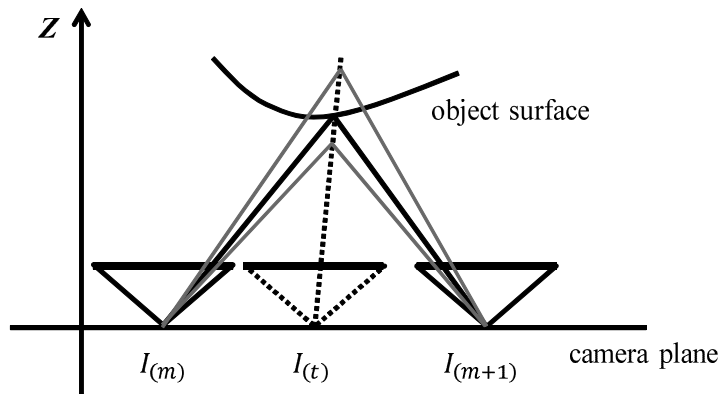


図 5.2 デプス推定と位置合わせの関係

応付け，その視点から見た高解像度合成画像 $I_{(t)}^{SR}$ を得る．

このとき，デプス推定の過程で得られた最小コストマップ \hat{S}_{min} を正則化に用いることで，デプスの信頼性の高い画素にのみ超解像が強く作用するように制御する．最小コストマップ \hat{S}_{min} は，セミグローバル法 [6] による各画素の最終的なマッチングコストの値を保持している．奥行き推定は最終的なマッチングコストの和を最小化することによって達成されるので，領域ごとに見た場合にも，マッチングコストが小さいほど奥行き情報が信頼できるとみなせる．実際，図 5.21 に例を示すように，形状が平坦な領域など，画像どうしが精度よく対応づけられ高い確度でデプスを得られる部分では，マッチングコストが小さくなる．逆に，オクルージョン境界や鏡面反射等のためにデプスが不安定な部分でマッチングコストが大きくなる．したがって，最小コストマップ \hat{S}_{min} を位置合わせの信頼性を表すマップとみなし正則化に用いることは妥当と考えられる [4, 5]．このようにして，混色と超解像を融合し，ノイズを抑制しつつ解像感の高い画像合成を実現する．

5.2.2 評価関数 (E1)

実際の超解像再構成演算は，入力多視点画像と高解像度合成画像との対応関係を表す尤度項と，最小コストマップに基づく正則化項により構成される評価関数の最適化問題として定式化される．文献 [4, 5] にて高橋らが提案している評価関数を以下に示す．

$$E_{sr}(X) = \sum_m \|Y_m - A_m X\|^2 + \lambda(X - \bar{X})^T W(X - \bar{X}) \tag{5.1}$$

X, \bar{X}, Y_m は，それぞれ $I_{(t)}^{SR}, I_{(t)\uparrow}$ ，および $I_{(m)}$ のベクトル表現である． $I_{(t)\uparrow}$ は，混色による合成画像 $I_{(t)}$ を， $I_{(t)}^{SR}$ と同じサイズにバイキュービック法により拡大した画像である．(5.1) 式の第一項は尤度項，第二項は正則化項を表している． λ は非負定数である．

A_m は、デプスマップ \hat{D}_\uparrow を用いて、高解像度合成画像 $I_{(t)}^{SR}$ を入力画像 $I_{(m)}$ の座標系に変換する処理を表す係数を記述したものである。これには、視点位置の変換に伴う座標の変換だけでなく、解像度の変換も含まれる。

W はコストマップ \hat{S}_{min} より作成されるデプス推定の信頼度 w を1次元のベクトルに展開して対角行列としたもので、 $I_{(t)}^{SR}$ 上の座標 \vec{p} に対して、

$$w(\vec{p}) = \max\{\|\hat{S}_{min\uparrow}(\vec{p})\|^4, w_{min}\} \quad (5.2)$$

により定義される。 w_{min} は非負定数である。

(5.1) 式の最小化には、勾配法による反復解法を用いる。

$$X_{j+1} = X_j - \alpha_j \nabla E_{sr}(X_j) \quad (5.3)$$

$$\alpha_j = \frac{\|\nabla E_{sr}(X_j)\|^2}{\nabla E_{sr}(X_j)^\top (\nabla^2 E_{sr}) \nabla E_{sr}(X_j)} \quad (5.4)$$

勾配は (5.5) 式のように表される。

$$\begin{aligned} \nabla E_{sr}(X) = & -2 \sum_m A_m^\top (Y_m - A_m X) \\ & + 2\lambda W (X - \bar{X}) \end{aligned} \quad (5.5)$$

5.3 GPU を用いた並列化実装

デプス推定含めた超解像自由視点画像合成演算を、グラフィックスハードウェア (GPU) 上に、並列演算として実装する。セミグローバル・ステレオ法を基にしたデプス推定の並列化実装は、筆者らが独自に実装を進めたものであるが、同様の取り組みが既に文献 [9] 等で発表されているので、本章では詳細は述べない。高速化が達成できたポイントは、奥行きごとのマッチングコストの計算を画素単位に並列化したこと、また、セミグローバル・ステレオ法特有の累積コストの計算処理を、行ごと (行は 45 度刻みで合計 8 方向考える) に並列化したことである。一方、超解像再構成演算の並列化には、独自の提案が含まれるので、本章で詳細に述べる。

超解像再構成演算の並列化は、(5.5) 式の演算に関して考えればよい。観測行列 A_m 作成の並列化 (5.3.1 節) と、演算性能を引き出すための観測行列格納方式 (5.3.2 節, 5.3.3 節) について述べる。

5.3.1 観測行列作成の並列化

観測行列 A_m の要素 $A_m(i, j)$ は、高解像度画像の j 番目の画素と低解像度画像の i 番目の画素とを対応付ける重みを表している。 A_m は、行数が低解像度画像の画素数、列

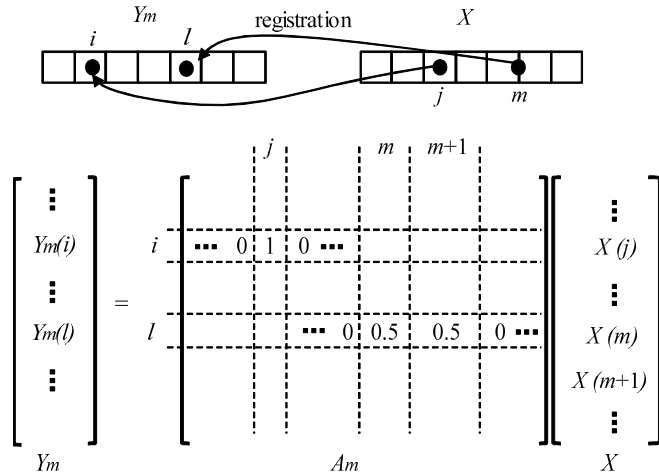


図 5.3 観測行列

数が高解像度合成画像の画素数の巨大な行列となる。観測行列 A_m の概念を図 5.3 で説明する。本来画像は 2 次元であるが，ここでは，1 次元のベクトルとして表現されており，高解像度画像 X と低解像度画像 Y_m が $Y_m = A_m X$ を満たす場合を考える。例えば， Y_m と X との間の位置合わせによって， $Y_m(i)$ が $X(j)$ に 1 対 1 で対応付けられるとする。このとき， A_m の第 i 行目は， j 列目のみが 1 となり，その他の要素が 0 となる。一方， $Y_m(l)$ は，画像の非整数位置画素に対応付けられており，その画素値が $X(m)$ と $X(m+1)$ の混色によって生成されると仮定する。このとき， A_m の第 l 行では， $m, m+1$ 行目の要素がそれぞれ 0.5 となっており，その他の要素は 0 となっている。なお，ここで示した例は説明のために簡略化したものであり，実際の行列の係数は，画素間の補間手法や点広がり関数 (PSF) に基づいて決定される。係数の導出の詳細は文献 [5] の付録にあるが，ここでは要点のみ述べる。

高解像度画像 (合成対象視点) と低解像度画像 (入力視点) の対応付けは，

1. 高解像度画像を補間して連続画像を生成する
2. 連続画像に対して，低解像度画像の画素位置で点広がり関数 (PSF) を畳み込みつつサンプリングする

というプロセスをたどることで実装する。高解像度画像と低解像度画像の画素の位置関係はデプスマップ \hat{D} によって求められるが，視点位置が変わる度に変化する。連続画像の生成および PSF に，有限のサポートを持つカーネル関数を用いれば，高解像度画像の各画素が影響する低解像度画像の画素はごく少数であり， A_m は疎行列となる。本章では，連続信号の生成に線形補間，点広がり関数として入力画像の画素サイズと同一のサポートを持つ方形関数を用いる。さらに，合成対象視点が入力多視点画像と同一平面上に配置さ

れる場合に限定しているため、入力画像と高解像度合成画像のサンプリング密度が奥行きに依存せず一定となり、行列 A_m の各行の非零要素の数が一定となる。なお、(2) の過程では、デプスマップ \hat{D} を用いてデプステストを行っており、オクルージョンで対応が付かない画素については、行列 A_m の対応する要素はすべて零とする。

視点が前進および後退する場合には、文献 [11] で示されているように、入力画像と高解像度合成画像のサンプリング密度の比が奥行きに依存するようになるため、行列 A_m の非零要素の数は行ごとに異なる。視点の前進、後退については、本章ではカバーしないが、今後、対応する予定である。

観測行列 A_m は、合成対象視点が変わるたびに再作成される必要がある。観測行列の係数作成には $I_{(t)}^{SR}$ の各画素位置に対して、上に述べた対応付けにより非零となる要素を算出する必要があるが、 $I_{(t)}^{SR}$ 上の各画素間には依存関係がないという特徴を利用し、 $I_{(t)}^{SR}$ の画素数分の並列演算にて A_m の係数作成を行う。

5.3.2 観測行列の格納方式

(5.4) 式、(5.5) 式の演算は、観測行列 A_m もしくは A_m^T を左からかける演算で構成されている。行列の左からの積は、その行列の行ごとに独立に計算できる。したがって、この独立性を活かせるような方式で、観測行列を格納することが重要である。

観測行列 A_m のサイズは、行数を低解像度画像の画素数、列数を高解像度合成画像の画素数とする大規模な行列となっており、そのままの形で行列の要素を保持すること自体困難である。ただし、前述のように、 A_m は、ごく少数の要素のみを非零とする疎行列であり、非零要素とその位置のみを保持すればよいため、効率的に表現が可能である。疎行列を効率的に格納する方法の一つとして、圧縮行格納方式 (Compressed Row Storage, CRS) [12] が提案されている。この CRS 方式は、大規模な疎行列を少ないメモリ量で表現するのに適しているが、データ配列以外にも二つの配列を用意する必要があることや、行列の要素へのアクセスが、必ず間接アドレッシングとなるため、演算速度の観点からは優れているとはいえない。

そこで、本章では、図 5.4 に示されるように、観測行列 A_m を、列幅固定 (列幅: L) の二つの行列に格納することを提案する。一つは A_m の非零の要素を左づめで並べた配列 V_m 、もう一つは、 A_m の非零要素のカラム位置を示す配列 C_m である。配列中の空白の要素は 0 とする。この構造の特長は、列幅が固定となることにより、並列演算時の演算時間の粒度が揃うだけでなく、演算に必要な行列要素のアドレス計算が簡略化されるため、演算高速化が期待できる点である。また、先に述べたように、合成対象視点が入力多視点画像と同一平面上に配置されるので、配列 V_m 、配列 C_m の列幅は行に依存せず一定とできる。

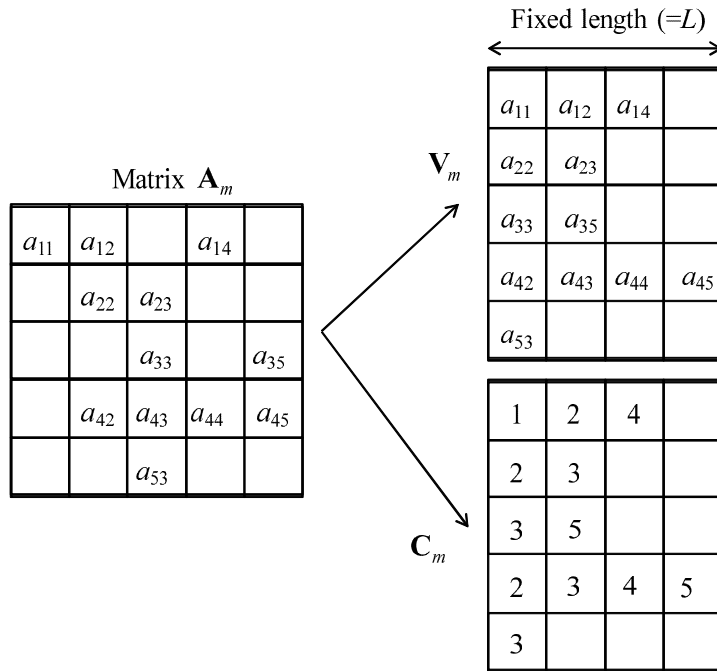


図 5.4 疎行列に対する格納方式 (提案方式)

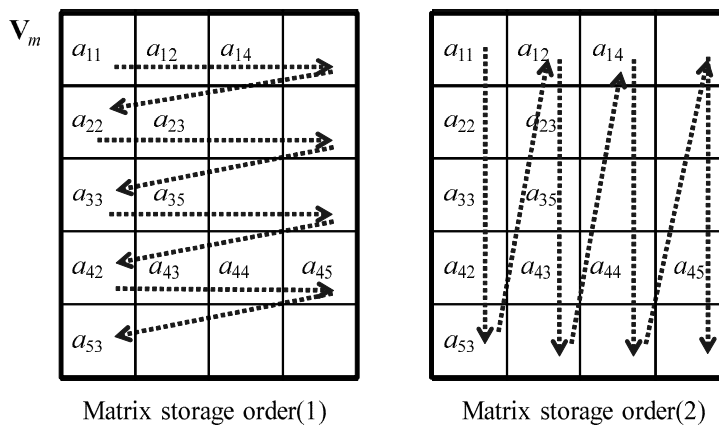


図 5.5 疎行列の格納順序

転置行列に関しては、観測行列 A_m 作成の際に、行と列を入れ替えた行列をあらかじめ作っておき、図 5.4 に示される行列構造にて別途保持しておくことにより、演算のたびに A_m から転置行列を作る処理を省く工夫を行った。

5.3.3 疎行列データ格納順序による演算速度差

疎行列演算は、演算時間よりもデータ転送時間の方が大きな割合を占めるため、データ転送速度を高めるような工夫が必要である。提案する疎行列格納方式をメモリー上に 1 次

表 5.1 行列データ格納順序と演算スループットの関係

	GPU time (μ s)	Throughput (GB/s)
Matirx storage order (1)	869.7	6.5
Matrix storage order (2)	59.6	94.2

元のデータ配列として実装する際にも注意が必要である。配列 V_m を例にとると、図 5.5 に示されるように、行方向に順番に格納する格納順序 (1) と、列方向に順に格納する格納順序 (2) が考えられる。このデータ格納順序は、GPU を利用して実装を行う際には、coalesced メモリアクセス [13] に関係し、大きな性能差となって表れる。

観測行列の行列格納順序 (1) の場合と行列格納順序 (2) の場合のデータスループットに関して CUDA Toolkit に付属する Profiler を用いて、解析を行った結果を表 5.1 に示す。この解析結果は、超解像処理の疎行列演算 ($Y_m - A_m X$) に関するものである。今回の実装では、 A_m の行毎に並列化演算を行う構成となっており、表 5.1 は、その 256 行分の演算に要する値を示している。行列格納順序 (2) を用いると、coalesced メモリアクセスの効果により、行列格納順序 (1) と比較して、演算時間で約 14 倍、データスループットで 6.5GB/s から 94.2 GB/s へと大幅に改善していることがわかる。なお、今回用いた GPU のデータのピークスループットが 148.0GB/s であることから、行列格納順序 (2) は、ピーク値の 68% 性能を得られていることになる。

この例のように、超解像再構成演算のような演算量よりもデータ量の割合が高い処理の場合には、データスループットを高めるような仕組みを利用することが重要である。

5.4 高速化のためのアルゴリズムの改善

5.3 章では、超解像再構成演算の演算並列化を行い、演算速度を向上させるための実装上の工夫を行った。本章では、さらに演算高速化に寄与するアルゴリズム面の改善を行う。文献 [4,5] では、(5.3) 式の繰り返し演算の回数のデフォルト値は 40 回に設定されている。繰り返しごとの評価関数の変化量を解析すると、収束が比較的緩やかであり、アルゴリズム面の改善による高速化の余地があると見込まれる。5.4.1 節、5.4.2 節では超解像再構成演算の初期画像の提案、5.4.3 節、5.4.4 節では評価関数の正則化項の変更を提案する。

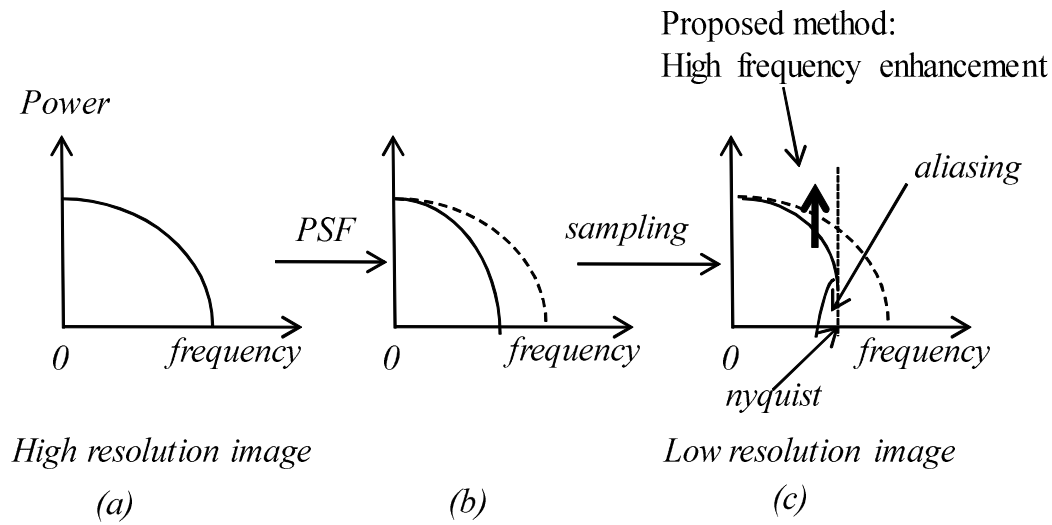


図 5.6 超解像処理における高解像度画像と低解像度画像の関係

5.4.1 再構成演算における初期画像の提案

超解像再構成演算の初期画像を工夫することにより、繰り返し演算の回数を低減する方法を提案する。

文献 [4, 5] の手法では、超解像再構成演算の初期画像として、自由視点合成画像 $I_{(t)}$ をバイキュービック法により拡大した画像 $I_{(t)\uparrow}$ を用いていた。一般的な意味での超解像 [1] においても、基準となる画像をバイキュービック法等で高解像度化画像の画素数まで拡大した画像が用いられることが多いため、 $I_{(t)\uparrow}$ も妥当な初期画像といえる。

一般に、高解像度画像から低解像度画像が作られる際の画像の周波数成分の変化を模式的に示したものを図 5.6 に示す。簡単のため、1次元のモデルを使い、横軸に各周波数成分 (frequency)、縦軸にエネルギー値 (Power) を示している。図 5.6 は、高解像度画像 (a) に PSF が畳み込まれた画像 (b) に対し、サンプリング処理により低解像度画像 (c) が作成される流れを表している。サンプリング処理によりナイキスト周波数以上の周波数がナイキスト周波数内に折り返し成分 (aliasing) として混入する。超解像処理は、この (a)→(b)→(c) の流れを逆に辿る処理と考えることができる。低解像度画像 (c) は、PSF の影響により高解像度画像 (a) と比較して、画像の高周波成分が低下しているが、再構成演算を繰り返していくことにより、低下していた高周波成分が元の状態に復元される。

再構成演算より前に、低下している高周波成分の強調処理を行えば、より真の解 (高解像度画像) に近い画像から再構成演算を開始できるため、同じ画質を得るための繰り返し演算回数が少なくなると期待できる。そこで、従来用いていた初期画像 $I_{(t)\uparrow}$ に対して高

0	$\frac{1}{8}$	0
$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{8}$
0	$\frac{1}{8}$	0

図 5.7 ぼけ関数 \mathbf{b}

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

図 5.8 ラプラシアンフィルタ

周波成分を強調した画像を初期画像として用いる方法を提案する. すなわち, ぼけ関数を \mathbf{b} とすると, 次式で表せるように, $I_{(t)\uparrow}$ に \mathbf{b} を畳み込んだ結果を $I_{(t)\uparrow}$ より引くことで高周波成分 H を取り出す (* は畳み込み演算を表す).

$$H = I_{(t)\uparrow} - I_{(t)\uparrow} * \mathbf{b} \tag{5.6}$$

さらに, k_0 を正の定数として, 次式のように H と $I_{(t)\uparrow}$ を加算することで, 高周波成分が強調された画像 $I_{(t)\uparrow}^h$ を得る.

$$I_{(t)\uparrow}^h = I_{(t)\uparrow} + k_0 H \tag{5.7}$$

(5.6), (5.7) 式をまとめると,

$$I_{(t)\uparrow}^h = I_{(t)\uparrow} + k_0(\delta - \mathbf{b}) * I_{(t)\uparrow} \tag{5.8}$$

となる. ただし, δ は, 中心画素のみを 1, その他を 0 とする関数である.

本研究では, 再構成演算の高速化が目的であるため, 簡易な処理で高周波成分を強調する必要がある. そのため, ぼけ関数として, 図 5.7 に示される係数のローパスフィルタを用いる. この場合, (5.8) 式は, 図 5.8 に示される 4 近傍のラプラシアンフィルタを用いた画像の高域強調処理と等価となる. すなわち, 正の定数 k ($= k_0/8$) を高域強調割合とし, 新たな初期画像 $I_{(t)\uparrow}^h$ を

$$I_{(t)\uparrow}^h = I_{(t)\uparrow} + k(-\nabla^2 I_{(t)\uparrow}) \tag{5.9}$$

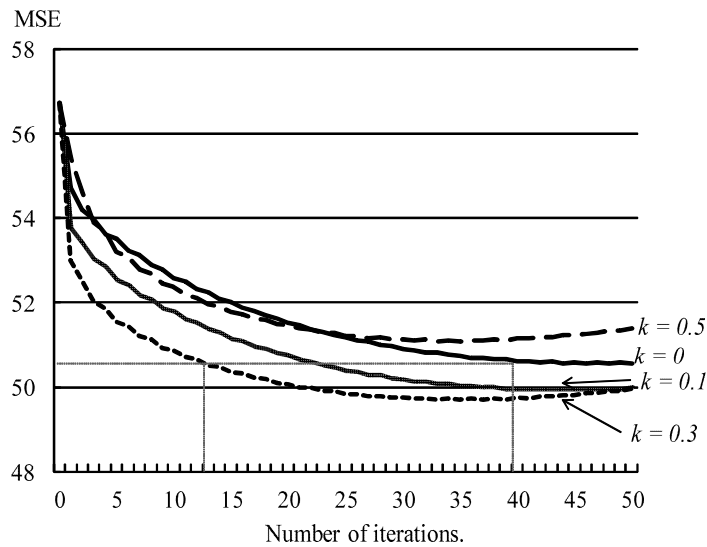


図 5.9 繰り返し演算回数に対する高域強調割合 k と MSE の関係（評価関数 (E1) を使用）

により定義する。

5.4.2 再構成演算の初期画像に関する実験

詳細な実験条件は 5.5 章に示すが，合成視点を正解画像が存在する位置に設定し，(5.9) 式により定義される初期画像を用いて作成された超解像合成画像の品質を，正解画像との平均二乗誤差 (MSE: Mean Square Error) で評価した。対応が取れない領域が含まれる画面の端部（上下左右の端部 24 画素）は評価から外した。

(5.9) 式の高域強調割合 k を変化させて，繰り返し演算回数と MSE による画像品質の評価を行った結果を図 5.9 に示す。例えば $k = 0.3$ においては，提案する初期画像を用いることにより，繰り返し回数 40 回で得られる $MSE = 50.6$ を得るのに必要な繰り返し演算回数が 13 回程度に減っていることがわかる。従来，初期画像として用いていた画像を図 5.10 に示す。これは，(5.9) 式に当てはめると $k = 0$ に相当する。また， $k = 0.3$ として作成された初期画像を図 5.11 に示す。図 5.10 と比較して，図 5.11 では，画像の高域が強調されていることがわかる。さらに，この初期画像を用いて再構成演算した結果画像を図 5.12 に示す。この画像は，従来の初期画像を用いて繰り返し回数を 40 回とした場合の画像と，主観的にも同等の画質が得られている。すなわち，従来 40 回程度の繰り返し演算によって得られていた MSE 値が，初期画像を工夫することにより，13 回程度で得られることが確認できた。

図 5.10 混色による画像合成の拡大 $I_{(t)\uparrow}$ 図 5.11 高域強調後の初期画像 $I_{(t)\uparrow}^h$ ($k = 0.3$)

5.4.3 再構成演算における正則化項の改善：評価関数 (E2)

ここでは、さらに、正則化項を見直すことで、超解像再構成演算の高速化を試みる。

従来の評価関数 (E1) の第一項は、入力多視点画像と高解像度合成画像との対応関係を表すが、デプスが不正確な領域では、その対応関係が信頼できない。そのため、第二項の正則化項で、再構成結果画像が混色による合成画像 \bar{X} に近くなるという制約を付加している。デプスが信頼できる領域では、正則化の寄与度を小さくして、解像度の向上を促進



図 5.12 評価関数 (E1) を使った場合の超解像合成画像 (繰り返し演算回数 13 回)

し、デプスが信頼できない領域では、正則化の寄与度を大きくすることによって、画像の破綻を防いでいる。

この設計方針は、自由視点超解像によく適合するものであるが、評価関数 (E1) の最適化は、必ずしも高速ではない。後ほど図 5.17 で示すが、評価関数 (E1) の場合は、繰り返し演算一回あたりの更新量が小さく、これが収束の遅さに結びついていると考えられる。この理由を図 5.13 を用いて説明する。この図は、勾配法の演算により、初期画像 \bar{X}^h から結果画像 X に向かって画像が更新されていく様子を模式的に示したものである。初期画像 \bar{X}^h は、混色による拡大画像 \bar{X} を高域強調した画像である。評価関数 (E1) では、第二項において現在の画像が混色による拡大画像 \bar{X} に近くなるように正則化されている。したがって、現在の画像が混色による拡大画像 \bar{X} から離れていくと、正則化項の勾配 $\nabla E1_{(2)}$ は、常に現在の画像を混色による拡大画像 \bar{X} に引き戻す方向に作用する。これは、解像度を向上させる勾配方向である第一項の勾配 $\nabla E1_{(1)}$ と逆方向になることが多いと考えられるため、勾配法による更新が抑制される。

そこで、正則化項として、従来から再構成型超解像に広く用いられている画面の滑らかさによる正則化を用いる構成を考える。この場合、評価関数は、以下のように表される。

$$E_{sr}(X) = \sum_m \|Y_m - A_m X\|^2 + \beta \|DX\|^2 \quad (5.10)$$

尤度項は、評価関数 (E1) と同じである。 D は例えば、ラプラシアンカーネルの畳み込み演算に対応する行列、 β は拘束の強さを表す拘束パラメータである。(5.10) 式の評価関

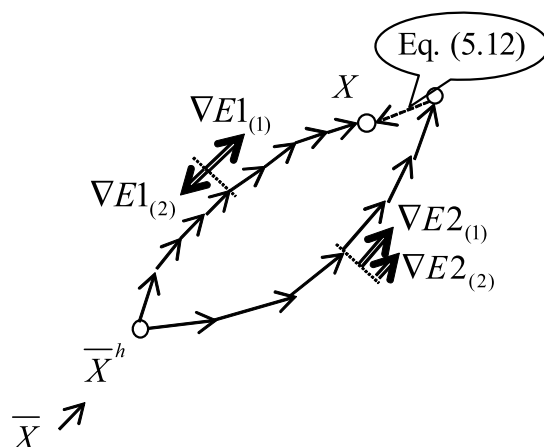


図 5.13 (5.5) 式, (5.11) 式の第一項と第二項の動きを示す模式図



図 5.14 (5.10) 式による超解像結果

数の最小値も勾配法により求めるが、勾配は (5.11) 式のように表される。

$$\nabla E_{sr}(X) = -2 \sum_m A_m^T (Y_m - A_m X) + 2\beta D^T D X \tag{5.11}$$

この正則化項は、混色による拡大画像 \bar{X} を含まないため、評価関数の第一項と第二項の勾配が常に逆向きになることはないと考えられる。

しかし、この評価関数 (E2) で再構成演算を行うと、オクルージョン領域やその境界領域等、デプスが不正確な領域 ((5.2) 式の $w(\vec{p})$) が大きな値を取る領域) において、結果画像の品質が悪くなってしまふ。処理結果例を図 5.14 に示す。そこで、評価関数 (E2) の最小化演算後に、デプス推定の信頼度を利用する。最終的な超解像演算結果 X_2 を、

(5.10) 式の最小化により得られた X と \bar{X} (混色による合成画像) を用いて,

$$X_2 = (I - W_2)X + W_2\bar{X} \quad (5.12)$$

とする. I は単位行列である. W_2 はコストマップ \hat{S}_{min} より作成されるデプス推定の信頼度 w_2 を 1 次元のベクトルに展開して対角行列としたもので, $I_{(t)}^{SR}$ 上の座標 \vec{p} に対して,

$$w_2(\vec{p}) = \min\{\lambda_2 \|\hat{S}_{min}(\vec{p})\|^4, 1.0\} \quad (5.13)$$

により定義される. λ_2 は定数である.

評価関数 (E1) は, デプスが信頼できないところは, 混色による合成画像 \bar{X} のままにしたいという設計指針で定義されている. ここで提案するアルゴリズムにおいても, この設計上の指針は依然として有効であり, 評価関数 (E2) の最小化後に, この要請を後処理で満たしているということになる. また, 評価関数 (E1) と, 提案するアルゴリズムは, 異なる式を最小化しているので, 同じ解が得られるわけではないが, どちらも, デプスの信頼度が高い部分は観測モデルに基づく合成結果が選択され, デプスの信頼度が低い部分は混色による合成結果が選択されるように設計されており, 定性的には同じような解が得られると期待できる.

図 5.13 の模式図を用いて, このアルゴリズムを説明する. 評価関数 (E2) では, 評価関数 (E1) と異なり, 第一項と第二項の勾配方向が互いに打ち消し合う場合は少ないと予測される (この予測の妥当性は実験により確認される (図 5.19)) ため, 勾配法による更新量が大きく, 収束が速くなると期待される. ただし, 収束先の画像は, デプスの信頼度が考慮されていないため, デプスが不正確な領域で品質の悪い画像である. これを (5.12) 式の後処理により, 混色による合成画像 \bar{X} と混色することで, 所望の結果画像を得ることを目指す.

なお, 5.4.1 節で提案した再構成演算の初期画像に関しては, 正則化項の違いにより MSE が最小になる k の値が異なる. 評価関数 (E2) を用いた場合に, 高域強調割合 k を変化させて, 繰り返し演算回数と MSE による画像品質の評価を行った結果を図 5.15 に示す. 評価関数 (E1) と比較して, 少ない繰り返し演算回数で同程度の MSE 値が得られていることがわかる. また, 評価関数 (E2) を用いた場合には, 画質 (MSE) が最適となる繰り返し演算回数を過ぎると MSE が増加していることがわかる. この理由を考察するにあたり, 評価関数 (E2) を用いる提案手法が 2 段階の処理 (まず (5.10) 式の評価関数の反復的な最小化を行った後, (5.12) 式による混色を行う) を経て最終的な画像を合成する点に注意が必要である. 後段の混色処理を併せて考えると, 評価関数 (E2) を用いる手法は単純な最小化ではないため, 最終的な合成画像の収束性の議論は容易ではない. また, 前段の反復的な最小化のみを考えた場合においても, 勾配法は反復するたびに (5.10) 式の評価関数が単調減少するように設計されているが, 正解画像と比較した MSE が単調

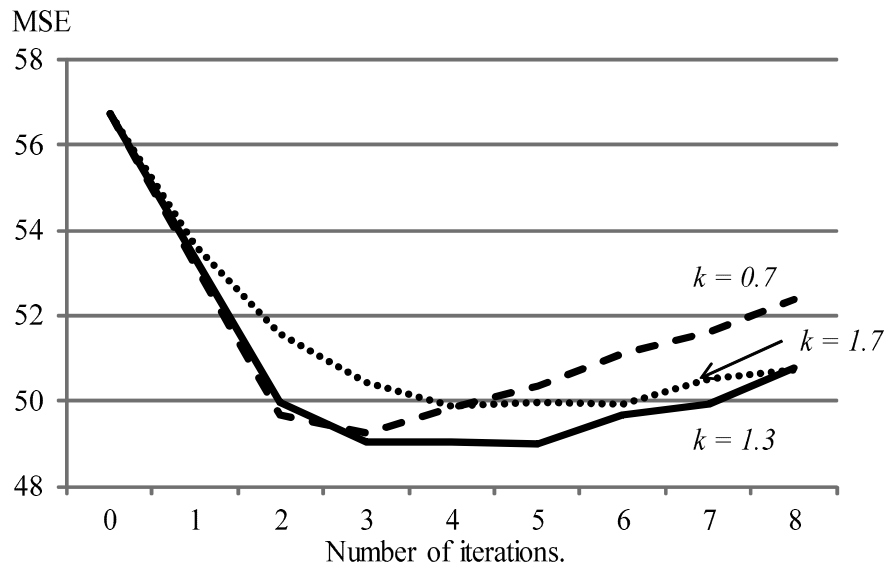


図 5.15 繰り返し演算回数に対する高域補償割合 k と MSE の関係（評価関数 (E2) を使用）

減少することは保証できないことに注意が必要である*1。今回は、正解画像がわかっている状況で実験を行ったため、画質（MSE）が最適となった時点で繰り返しを停止したが、一般には、正解画像が存在しないために、MSE 値が得られない。実用上は、予め定めた繰り返し回数で反復を止めるか、繰り返し演算毎の解の更新量が十分に小さくなった時点で反復を止める方法をとる。本章の実験データでは、 $k = 1.3$ とした場合には、繰り返し回数 5 回が最適であったが、データの条件が異なる場合には、必ずしも 5 回が最適とは限らない。正解画像が未知の利用場面では、ユーザが合成画像を見ながらインタラクティブに繰り返し回数の調整をする等の工夫が必要であると考えられる。

また、図 5.16 には、 $k = 1.3$ とした初期画像を用い、繰り返し演算回数を 5 回として作成した超解像合成画像を示す。図 5.12 と図 5.16 は、用いている評価関数は異なるが、MSE も同程度であり、主観的にも同等の画質が得られている。

5.4.4 評価関数の違いによる再構成演算の速度差

図 5.9, 図 5.15 を比較すると、評価関数 (E2) の方が、同じ MSE 値を得るための繰り返し演算回数が少ないことがわかる。この原因に関して考察する。(5.9) 式における $k = 0$ とした同じ初期画像を用いて、評価関数 (E1), (E2) それぞれの繰り返し演算毎の

*1 これは、評価関数の最小化に基づく画像再構成一般に当てはまる課題である。すなわち、評価関数を最小にする解が、画質の面でも最適解であることを期待して評価関数を設計するが、一般に、両者を厳密に一致させることは困難である。したがって、評価関数そのものが繰り返しごとに単調減少するように解を更新したとしても、正解画像と比較した MSE については、必ずしも単調減少しない。



図 5.16 評価関数 (E2) を使った場合の超解像合成画像 (繰り返し演算回数 5 回, (5.12) 式の演算後)

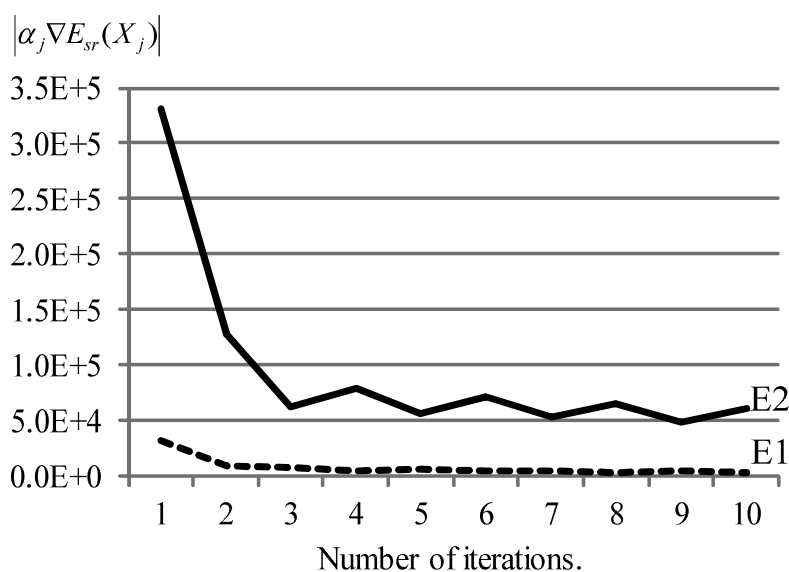


図 5.17 繰り返し演算回数に対する $|\alpha_j \nabla E_{sr}(X_j)|$ の値

勾配の 1 次ノルム ((5.3) 式における $|\alpha_j \nabla E_{sr}(X_j)|$) の値を比較したものを図 5.17 に示す。評価関数 (E1) の勾配と比較して、評価関数 (E2) の勾配の方が大きな値となっており、勾配法による解の更新が速く進んでいくことがわかる。

さらに、この勾配の大きさの違いの原因を調べる。評価関数 (E1) の勾配である (5.5) 式の第一項, 第二項をそれぞれ $\nabla E1_{(1)}, \nabla E1_{(2)}$ と表記する。同様に、評価関数 (E2) の勾配である (5.11) 式においても、第一項, 第二項をそれぞれ $\nabla E2_{(1)}, \nabla E2_{(2)}$ と表記す

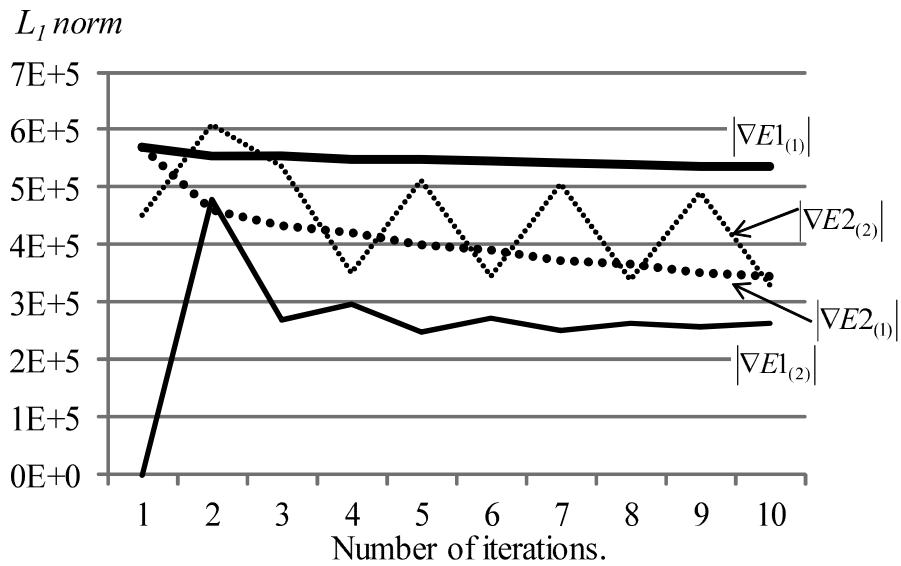


図 5.18 (5.5) 式, (5.11) 式における第一項と第二項の 1 次ノルム ($L_1 norm$)

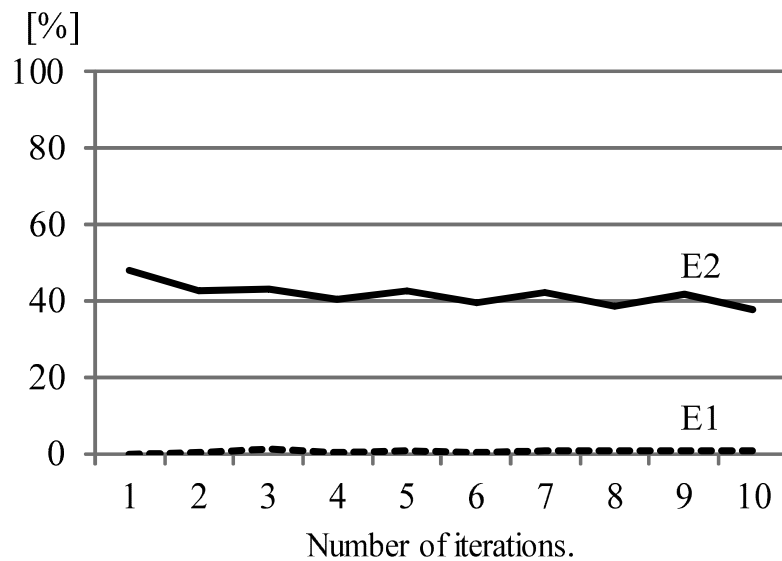


図 5.19 (5.5) 式, (5.11) 式において, 第一項と第二項の符号が同じとなる画素の割合

ると, 繰り返し演算回数に対する, 評価関数の勾配の第一項, 第二項それぞれの 1 次ノルムは, 図 5.18 に示されるようになる. この図からは, 評価関数 (E1) の正則化項の勾配 $\nabla E_{1(2)}$ と比較して, 評価関数 (E2) の正則化項の勾配 $\nabla E_{2(2)}$ は, 繰り返し演算が進んでも, 大きな値を持ち続けていることがわかる.

評価関数 (E1), 評価関数 (E2) において, それぞれの勾配の第一項と第二項の符号が同じとなる画素割合を図 5.19 に示す. この図からは, 評価関数 (E1) の勾配においては,

表 5.2 実験環境

CPU	Intel Xeon X5680 (3.33GHz)
Memory	DDR3-10600 12GB
GPU	NVIDIA C2070 (448 Cores, CUDA Capability 2.0)
OS	Ubuntu 11.04 x86_64
Development Environment	CUDA Toolkit 4.1, CUDA SDK 4.1, gcc 4.4.6

$\nabla E1_{(1)}$ と $\nabla E1_{(2)}$ の符号が同じ画素の割合が数 % 程度であるのに対し、評価関数 (E2) の勾配においては、 $\nabla E2_{(1)}$ と $\nabla E2_{(2)}$ の符号が同じである画素の割合が 40% 程度あり、第一項と第二項が打ち消しあう画素の数が少ないことがわかる。この結果は、図 5.13 で示した考察の妥当性を支持している。

5.5 実験

シミュレーション実験の入力画像には、「筑波大学多視点画像データベース」より街のジオラマの 4 枚の画像 (図 5.20) を用いた。入力画像は一辺を 16mm とする正方形の頂点 (データベースの表記で, (1, 6), (3, 6), (3, 8), (1, 8) の位置) に配列されている。5.4.2 節で用いた正解画像は、中央の位置 (2, 7) の画像である。元データは 640×480 画素のカラー画像であるが、これをグレースケール変換し、 160×120 画素に縮小したものを入力画像として用いた。実験では、与えられた新しい視点において、入力画像と同じ 160×120 画素でデプスマップを推定したのち、超解像合成により 320×240 画素の自由視点画像を得る。また、パラメータは、評価関数 (E1) の (5.1) 式の $\lambda = 5.0 \times 10^{-13}$, (5.2) 式の $w_{min} = 10$, 評価関数 (E2) の (5.10) 式の D を 4 近傍のラプラシアンカーネルの畳み込み演算に対応する行列, $\lambda_2 = 5.0 \times 10^{-12}$, β を 0.3 とした。

合成対象視点は、入力視点を頂点とする正方形内部に配置した。図 5.21 に処理結果例を示す。左上から順にデプスマップ \hat{D} , 最小コストマップ \hat{S}_{min} , 混色による画像合成の拡大 $I_{(t)\uparrow}$, 超解像による合成画像 $I_{(t)}^{SR}$ である。いずれも電子版での閲覧を推奨する。

処理時間の計測に用いた実験環境を表 5.2 にまとめた。GPU 実装には、CUDA 4.1 を用い、演算精度は単精度 (float) とした。提案する観測行列格納方式の列幅 $L = 25$ とした。観測行列は図 5.4 の方式で格納し、1次元のデータ配列として格納する際に、図 5.5 の行列格納順序 (2) を用いた。

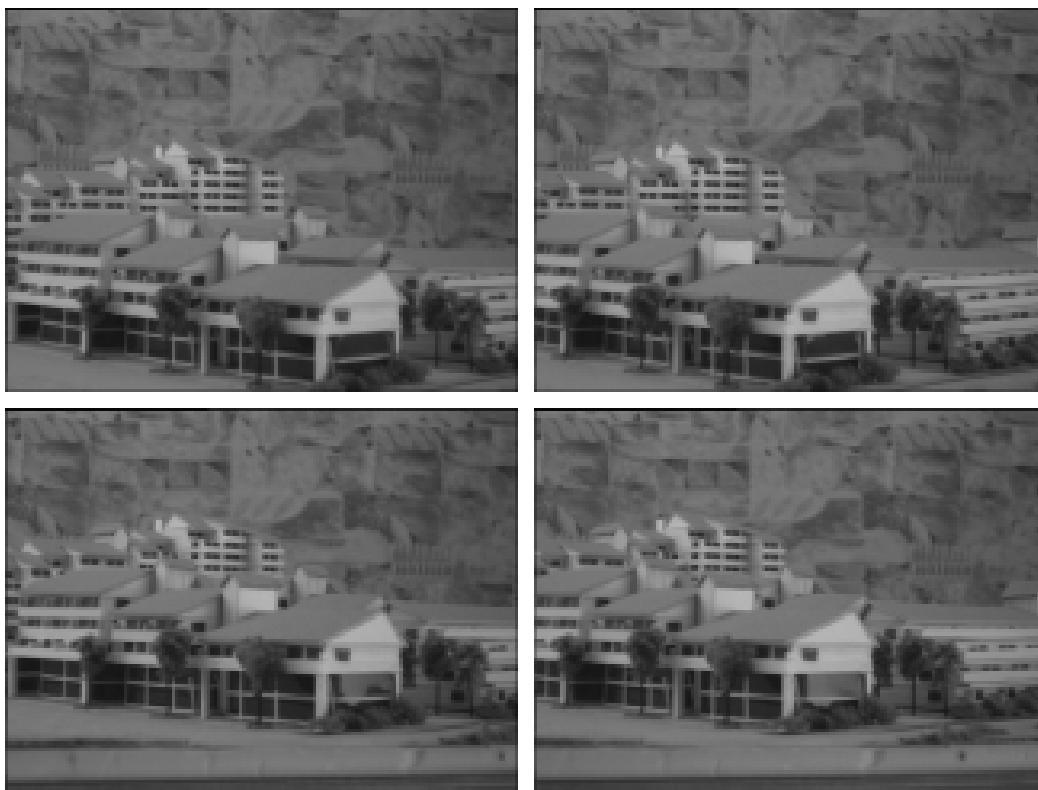


図 5.20 入力画像（筑波大学多視点画像データベースより）

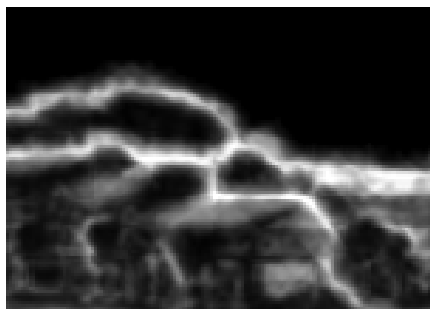
表 5.3 処理速度計測結果（単位 ms）

evaluation function	E1			E2
	CPU	GPU	GPU	GPU
processor				
k (eq. (5.7))	0	0	0.3	1.3
Number of iterations.	40	40	13	5
depth estimation	1589	39	39	39
matrix A_m creation	732	64	64	64
SR reconstruction	5822	85	26	11
others	985	12	15	16
total	9128	200	144	130

処理時間を計測した結果を表 5.3 に示す。表中の CPU は、すべての処理を CPU で行なっている。実験を行った環境では、CPU は複数の演算コアを有しているが、並列化は行なっていない。表中の GPU は、並列化可能な演算を GPU に割り当てている。比較を公平とするため、CPU/GPU の両者でなるべく同一のコードを用いて、修飾子 `__device__` の有無で関数毎に CPU/GPU 実行を切り替える形にした。その他 (others) と記された処理には、デプス推定結果から自由視点合成画像を作成する処理、およびその高域強調



デプスマップ \hat{D}



最小コストマップ \hat{S}_{min}



混色による画像合成の拡大 $I_{(t)\uparrow}$



超解像による合成画像 $I_{(t)}^{SR}$

図 5.21 処理結果例

処理，画像の拡大処理等が含まれる．各処理時間は，10 回の処理の平均値である．評価関数 (E1) の場合には $k = 0.3$ ，繰り返し演算回数を 13 回，評価関数 (E2) の場合には $k = 1.3$ ，繰り返し演算回数を 5 回とし，両者で同程度の画質 (MSE 値) になるようにした．

結論として，初期画像の改善および，正則化項の改善と GPU による並列化の活用により，画像一枚あたりの処理時間を約 130 ms とすることができ，インタラクティブな描画に向けて有望な結果を得ることができた．これは，元的手法 [4, 5] を CPU のみを用いて実装した場合と比較して約 70 倍の速度である．

5.6 むすび

超解像自由視点画像合成の演算高速化に向けて，超解像再構成演算の実装上の提案と，アルゴリズム面での提案を行い，全体のアルゴリズムを GPU を用いて実装した．

実装上の提案では，超解像再構成演算の並列化実装において，疎行列演算を，密行列演算へと変換可能であることを示し，並列化による高速演算を可能とした．

アルゴリズム面での提案では，超解像再構成演算時の初期画像の提案を行った．超解像再構成演算の初期画像として，混色による合成画像に高域強調を施した画像を用いることで，同じ画質を得るための繰り返し演算回数を低減できることを示した．また，従来から超解像に用いられてきた滑らかさの拘束を正則化項として再構成演算を行い，その結果をデプスの信頼度に応じた重み付け処理により混色合成の結果と統合する新しい手法を提案した．これにより，デプスの信頼度を直接正則化に用いた従来手法と比較して，再構成演算の繰り返し回数を大幅に削減しつつ，従来手法と同等の画質が得られるようになった．

結果として，従来手法を CPU のみを用いて実装した場合と比較して約 70 倍の高速化を達成し， 160×120 画素の入力画像 4 枚から 320×240 画素の超解像自由視点合成画像 1 枚を約 130 ms で合成可能とした．今後の課題として，複数の GPU を用いた実装や，パイプライン化によるスループットの向上が挙げられる．

本章では，画素適応処理として超解像技術を用いることにより，自由視点画像合成の画質向上をおこなう超解像自由視点画像合成の高速化実装に関する提案を行った．次章では，一般的な超解像処理の画質を改善する方式を提案し，その提案方式を，超解像自由視点画像合成に適用することにより，さらなる画質改善を図る方法に関して提案する．

参考文献

- [1] S.C. Park, M.K. Park, and M.G. Kang: “Super-resolution image reconstruction: a technical overview,” *Signal Processing Magazine, IEEE*, Vol.20, No.3, pp.21–36 (2003)
- [2] T. Tung, S. Nobuhara, and T. Matsuyama: “Simultaneous super-resolution and 3d video using graph-cuts,” *IEEE CVPR*, pp.1–8 (2008)
- [3] B. Goldluecke and D. Cremers: “Superresolution texture maps for multiview reconstruction,” *IEEE CVPR*, pp.1677–1684 (2009)
- [4] 高橋桂太, 苗村 健: “視点依存型アプローチによる超解像自由視点画像合成”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU), IS4–21 (2011)
- [5] K. Takahashi, T. Naemura: “Super-Resolved Free-Viewpoint Image Synthesis Based on View Dependent Depth Estimation,” *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications (TCVA)*, Vol.4, pp.119–133 (2012)
- [6] H. Hirschmuller: “Stereo processing by semiglobal matching and mutual information,” *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, Vol.30, No.2, pp.328–341 (2008)
- [7] 浜田宏一, 高橋桂太, 苗村 健: “超解像自由視点画像合成における超解像演算の高速化実装”, 信学技報 IE2011–77, Vol.111, No.284, pp.1–6 (2011)
- [8] 浜田宏一, 高橋桂太, 苗村 健: “超解像自由視点画像合成の高速化実装”, 画像センシングシンポジウム (SSII2012), IS3–02 (2012)
- [9] Christian Banz, Holger Blume, Peter Pirsch: “Real-time semi-global matching disparity estimation on the GPU,” *Computer Vision Workshops (ICCV Workshops)*, pp.514–521 (2011)
- [10] H. Hirschmuller: “Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information,” *IEEE CVPR*, pp.807–814 (2005)
- [11] 福嶋 慶繁, 石橋 豊: “超解像処理による自由視点画像の画質改善”, 信会論 (D), Vol.93, No.9, pp.1700–1703 (2010)
- [12] 大島聡史, 櫻井隆雄, 片桐孝洋, 中島研吾, 黒田久泰, 直野 健, 猪貝光祥, 伊藤祥司: “Segmented scan 法の cuda 向け最適化実装”, 情報処理学会研究報告, 2010–HPC–126, pp.1–87 (2010)
- [13] NVIDIA, “CUDA Programming Guide,”
http://www.nvidia.com/object/cuda_develop.html

第6章

画素適応重み付けによる超解像の提案と超解像自由視点画像合成への応用

6.1 はじめに

本章では、位置合わせ誤差にロバストな超解像方式を提案し、超解像自由視点画像合成に適用する。前章にて実装した超解像自由視点画像合成は、デプス推定の際に、オクルージョン領域周辺で位置合わせ誤差の大きい画素を含んでいるため、本章にて提案する方式が有効に機能すると考えられる。なお、提案方式は、一般的な超解像にも活用可能である。

超解像処理は、画像間の位置合わせ処理と再構成処理からなり、低解像度画像の高精度な位置合わせが必要不可欠である。しかしながら遮へいなどの様々な要因により、位置合わせ処理が失敗、若しくは不正確になってしまうことも多い。位置合わせが不正確な領域や遮へいが生じている領域を利用して再構成処理を行うと生成される高解像度画像は大きく劣化してしまう。

このような劣化を軽減する方法はこれまでも研究されており、ロバスト超解像処理と呼ばれる。前章で実装した、位置合わせの信頼性に基づく正則化方法 [1] も、このロバスト超解像の枠組みのとして考えることができる。これまでのロバスト超解像処理は、ロバスト誤差関数を利用する方法 [2,3]、再構成処理に利用する画素を選択する方法 [4,5]、位置合わせの信頼性に基づく正則化方法 [1] と大きく三つのタイプに分類される。

一般的に誤差関数としては L2 ノルムが利用されることが多いが、Farsiu らは L1 ノルムを利用することにより、前述の劣化が軽減できると報告している。また、誤差関数にロバスト M-estimator を利用する方法 [3] も提案されている。再構成処理に利用する画素を選択する方法としては、画素値の差や小領域の類似度に基づく方法 [4] や、類似度の評

価に加えて位置ずれ量を直接評価し、画素を選択する方法も提案されている [5]。位置合わせの信頼性に基づく正則化を用いた方法としては、超解像自由視点画像合成方式 [1] が挙げられる。

本章では、従来方式 [4,5] において画素選択の目的で導入されている誤差関数への画素ごとの重みを利用する。その重みに対する正則化を考慮したコスト関数を定義することにより、その重みを含めた最適化を行う方法を提案する。従来方式は、画素ごとの重みが何かしらの尺度で事前に固定された値であるのに対し、提案方式は、評価関数の最適化の過程で、その重みが自動的に決定されるという特長がある。

本章の構成は、以下の通りである。6.2 節にて、一般的なロバスト超解像処理の概要に関して述べる、6.3 節にて、提案する画素適応重み付けによる超解像方式と、その最適化方法に関して述べる。6.4 節にて、超解像自由視点画像合成を用いた実験結果を示し、6.5 節にてまとめとする。

6.2 ロバスト超解像処理の概要

一般的な超解像処理に広く利用されている MAP(Maximum A Posteriori) 法を本論文においても利用する。MAP 法による超解像処理は、評価関数の最小化問題として定式化される。MAP 法における評価関数は、観測された観測画素値と高解像度画像から推定される画素値の差に基づく誤差項と、高解像度画像の事前確率に基づく拘束項の和として (6.1) 式のように表される。

$$E_{sr}(X) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} (\mathbf{a}_{m,n}^T \cdot X - y_{m,n})^2 + \lambda r(X) \quad (6.1)$$

ここで、 X は求めたい高解像度画像のベクトル表現を、 $y_{m,n}$ は m 番目の観測画像の n 番目の画素の値を、 $\mathbf{a}_{m,n}$ は高解像度画像から $y_{m,n}$ を推定することを表すベクトルを、 $r(X)$ は高解像度画像の事前情報に基づく拘束を表す関数を、 λ は拘束の強さを表す拘束パラメータを、 M は観測画像の数を N_m は、 m 番目の観測画像の画素数を、それぞれ表す。

ベクトル $\mathbf{a}_{m,n}$ は、位置合わせ情報、画素間の補間方式、点広がり関数 PSF(Point Spread Function) に基づいて決定される。そのため、位置合わせが正確でないと、正しくないベクトル $\mathbf{a}_{m,n}$ が生成される。位置合わせ誤差にロバストな超解像処理として、(6.2) 式に示されるようなコスト関数が提案されている。

$$E_{sr}(X) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} k_{m,n} \rho(\mathbf{a}_{m,n}^T \cdot X - y_{m,n}) + \lambda r(X) \quad (6.2)$$

ここで $\rho(x)$ はロバスト誤差関数を、 $k_{m,n}$ は m 番目の観測画像の n 番目の画素に対する

重みを、それぞれ表す。ロバスト超解像処理は、ロバスト誤差関数 $\rho(x)$ の設計に関する研究 [2, 3], 正則化項 $r(X)$ [1] の設計に関する研究, 画素ごとの重み $\{k_{m,n}\}$ [4, 5] の設計に関する研究に大きく分類される。これらの方法を組み合わせることも当然可能である。

(6.1) 式は, $\rho(x) = x^2$ に対応し, L2 ノルムであると考えられる。誤差関数に L1 ノルムを利用する方法 [2] は, $\rho(x) = |x|$ とした場合である。また, ロバスト M-estimator [3] を用いる方法も提案されている。

正則化項の設計に関しては, 位置合わせの信頼性に基づいた正則化 [1, 6] が提案されている。文献 [6] においては, 正則化の強度を, 超解像再構成演算の中で同時に最適化する方式が示されている。本章にて提案する方式と, 尤度項の構成は異なるが, 超解像再構成演算の中で重みも同時に最適化するという思想は同じである。また, 文献 [1] の方式においても, 位置合わせの信頼性に基づいた正則化を行っているが, 入力画素に対する位置合わせの信頼性は, 全て同一として扱っている。超解像自由視点画像合成においては, 位置合わせ誤差の影響はカメラ位置によって異なるため, 必ずしもこの仮定は正しくない。これらの方式は, 出力画像に対する重み係数を調整しており, 入力画素位置画素ごとの重みを調整するものではない。これから提案する方式は, 入力画素への適応的重み付けを行う。

重みの設計に関しては, 重み $k_{m,i}$ を 0 もしくは 1 にすることで, 利用する画素を選択する手法が提案されている [4, 5]。文献 [4] では, 観測画素の画素値と基準画像の対応する画素値の差に基づく画素選択を, 文献 [5] では, 画素の類似度と位置ずれ量に基づく画素選択を行なっている。位置合わせ誤差と重みの関係は必ずしも明らかでないため, これらの従来手法では, 重みが何らかの関数 (例えばスレッシュホルディング) により決定されていた。

6.3 画素適応重み付けによる超解像処理の提案

6.3.1 画素適応重み付けによるコスト関数

ここでは, 従来のロバスト超解像処理における画素ごとの重みを, コスト最小化の枠組みで自動的に設定する画素適応重み付けによる超解像処理の提案を行う。すなわち, 従来のロバスト超解像処理における重み $\{k_{m,n}\}$ を変数として扱い, 超解像再構成演算の中で高解像度画像 X と同時に最適化を行う。これを実現する最も直感的な方法は, (6.2) 式における $\{k_{m,n}\}$ を定数でなく変数とみなして, (6.2) 式を最小化することである。しかしながら, これは, 全ての $k_{m,n}$ が 0 の場合が (6.2) 式を最小化するといった自明な解におちいつてしまう。そこで, 重み $\{k_{m,n}\}$ に対する正則化項を加え, コスト関数を次のよう

に定義する.

$$\begin{aligned}
 E_{sr}(X, \{k_{m,n}\}) &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} k_{m,n} \rho(\mathbf{a}_{m,n}^\top \cdot X - y_{m,n}) \\
 &\quad + \lambda r(X) + \lambda_2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} r_2(k_{m,n}), \tag{6.3}
 \end{aligned}$$

ここで, λ_2 は非負の定数, $r_2(k_{m,n})$ は重み $k_{m,n}$ に対する正則化を表す関数である. (6.3) 式に対し X と $k_{m,n}$ の二つの変数を対象とした最適化演算を行うことで高解像度画像を求めつつ, 最適な重みも同時に決定する.

6.3.2 最適化方法

最適化演算はコスト最小化の繰返し演算の中で, X に対する更新と $\{k_{m,n}\}$ に対する更新を交互におこなうことで実現する.

変数 X に対する最適化は, 例えば, 勾配法による反復解法を用ればよい. 重みに対する正則化項は, 変数 X に対しては定数とみなせるので, 従来方式 [7,8] がそのまま適用可能である. すなわち s を繰返し演算回数として,

$$X_{s+1} = X_s - \alpha_s \frac{\partial}{\partial X} E_{sr}(X_s), \tag{6.4}$$

とする. ただし, α_s は, 1 回の反復演算あたりの解の更新割合を決めるパラメータである.

重み $\{k_{m,n}\}$ に対する最適化は, 重み変数や正則化項の形状によらず 1 変数関数の最適化問題となるので, X に対する最適化演算と同様, 勾配法による反復解法でも実現可能であるが, 重み変数や正則化項の形によっては, 解析的に最適化可能な場合も存在する.

例えば, 正則化項として, 重みが 1 に近いほどよいという正則化

$$r_2(x) = (\sqrt{x} - 1)^2. \tag{6.5}$$

を用いた場合, (6.3) 式の m, n 番目の要素のみを取り出した $E_{sr(m,n)}$ は,

$$\begin{aligned}
 E_{sr(m,n)} &= k_{m,n} \rho(\mathbf{a}_{m,n}^\top \cdot X - y_{m,n}) \\
 &\quad + \lambda_2 (\sqrt{k_{m,n}} - 1)^2, \tag{6.6}
 \end{aligned}$$

と $\sqrt{k_{m,n}}$ に対して 2 次式となる. よって (6.6) 式を最小化する $k_{m,n}$ は

$$k_{m,n} = \left(\frac{\lambda_2}{\rho(\mathbf{a}_{m,n}^\top \cdot X - y_{m,n}) + \lambda_2} \right)^2. \tag{6.7}$$

と表すことができる. これは, 誤差関数 $\rho(\mathbf{a}_{m,n}^\top \cdot X - y_{m,n})$ の大きさに応じて重みを設定すればよいことを示している. すなわち, 誤差関数の値が大きい場合には, 重みを小さ

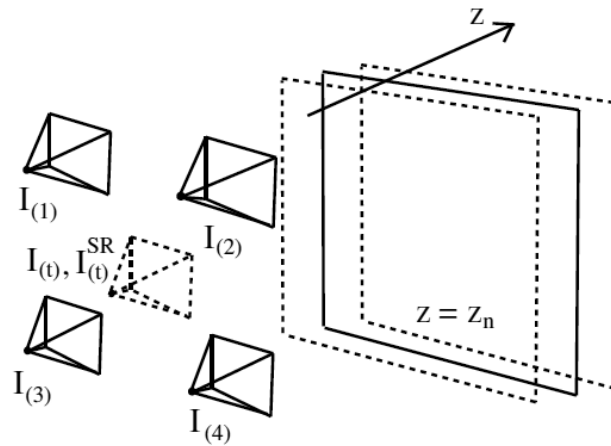


図 6.1 基本設定

くし、誤差関数の値が小さい場合には重みを大きくするといったように、重みが自動的に設定されることを示している。誤差関数は、位置合わせの信頼度を反映していると考えられ、提案手法は再構成演算後の高解像度画像を用いて、最適な重みを設定する手法となっている。

6.4 実験

提案する超解像手法は、一般的なビデオ超解像においても有効に機能すると考えられるが、我々は、前章にて実装したように、セミグローバル・ステレオ法を基にした高精度な位置合わせ処理と、位置合わせの信頼度を利用可能な環境を既に構築している。そのため、超解像自由視点画像合成を用いた実験により、提案方式の有効性を示す。

6.4.1 超解像自由視点画像合成の概要

本章での実験に必要ないくつかの要素を、前章から引用して説明する。超解像自由視点画像合成の設定を図 6.1 に示す。入力視点は、ほぼ同一平面上に配置されるとし、入力多視点画像を $I_{(m)}$ ($m = 1, \dots, M$) と表記する。カメラパラメータは既知とする。 z は入力視点平面からの距離を表す。新たな合成対象視点 t の座標系において入力多視点画像間の位置合わせを行い、再構成型超解像の枠組みを当てはめることで高解像度の自由視点画像を得る。ここで、入力画像と同じ解像度の混色による合成画像を $I_{(t)}$ 、超解像による高解像度の合成画像を $I_{(t)}^{SR}$ と表記する。

超解像自由視点画像合成も、通常の超解像処理と同様、位置合わせのステップと、再構成処理の二つのステップから構成される。ここで、多眼画像の位置合わせは、デプス推定

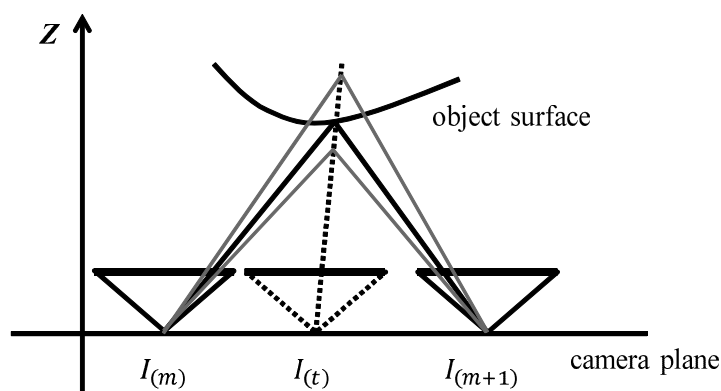


図 6.2 位置合わせと奥行き推定の関係

に等価であることを，図 6.2 を用いて説明する．図中に合成対象視点 $I_{(t)}$ の，ある画素に対応する光線を点線で示す．デプスがわかっているならば，その光線と被写体表面 (object surface) との交点が出る．その交点から，入力カメラ $I_{(m)}$ への光線をたどる．こうすることにより，合成対象視点 $I_{(t)}$ 上の元の画素に対応する入力カメラ $I_{(m)}$ 上の画素が求まる．デプスが不正確な場合は，対応画素の位置に誤差を生じる（図中に薄線で示す）ため，デプスは正確なほど良い．この操作をすべての画素に対して繰り返せば，合成対象視点 $I_{(t)}$ と入力カメラ $I_{(m)}$ の位置合わせが達成できる．

最初に，合成対象視点から見たデプス D を求める．デプスマップを求める解像度は入力画像と同一とするが， $I_{(t)}^{SR}$ のサイズに拡大して \hat{D} とし超解像演算に用いる．この \hat{D} と，点拡がり関数 (PSF) およびサンプリングモデルを考慮することによりベクトル $\mathbf{a}_{m,n}$ が定義される．オクルージョン付近においては，正しいデプスを推定することが困難であるため，高品質な超解像結果を得るためには，ロバスト超解像の枠組みが必要である．

6.4.2 他方式との比較

提案方式を，以下の 4 つの従来方式と比較する実験を行う．

- baseline method: 重みを全て 1 とした方式
- depth-reliability-based regularization method: 前章にて，実装した位置合わせの信頼性に基づく正則化を用いた方式 [1]
- pixel selection method: 画素選択方式 [4, 5]
- pixel weighting (fixed) method: 重みの値を更新しない方式

なお，提案方式は，

- adaptive pixel weighting method: 画素適応重み付け方式

とする。

位置合わせの信頼性に基づく正則化を用いた方式 (depth-reliability-based regularization method) [1] に関しては、デプス推定の過程で得られた最小コストマップ \hat{S}_{min} を正則化に用いることで、デプスの信頼性の高い画素にのみ超解像が強く作用するように制御する。なお、最小コストマップ \hat{S}_{min} は、セミグローバル法 [9] による各画素の最終的なマッチングコストの値を保持している。奥行き推定は最終的なマッチングコストの和を最小化することによって達成されるので、領域ごとに見た場合にも、マッチングコストが小さいほど奥行き情報が信頼できるとみなせる。

画素選択方式 (pixel selection method) に関しては、(6.2) 式において $\rho(x)$ として L2 ノルムを用い、 $|\mathbf{a}_{m,n}^T \cdot \bar{X} - y_{m,n}|$ の値により、重み $k_{m,n}$ を 0 または 1 とした。具体的には

$$k_{m,n} = \begin{cases} 1 & \text{if } (\mathbf{a}_{m,n}^T \cdot \bar{X} - y_{m,n})^2 < th_{sel}, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (6.8)$$

とした。

重みの値を更新しない方式 (pixel weighting (fixed) method) に関しては、重み $\{k_{m,n}\}$ の値を、(6.7) 式を用いて、 $X = \bar{X}$ として初期化した後、繰返し演算の中の $k_{m,i}$ を更新しないこととした。

提案方式である画素適応重み付け方式 (adaptive pixel weighting method) に関しては、画素ごとの重みと重みの正則化に関しては、前節の最適化方法の例で示した関数を用いた。 $\{k_{m,n}\}$ の初期値を 1 とし、 X が更新されるたびに (6.7) 式に従い $\{k_{m,n}\}$ を更新することとした。

6.4.3 実験条件

シミュレーション実験の入力画像には、「筑波大学多視点画像データベース」より街のジオラマの画像を用いた。全ての実験において、デプス推定には 4 枚の観測画像 (データベースの表記でそれぞれ (1, 6), (3, 6), (1, 8), (3, 8) の位置) から推定したものを用いた。これらの 4 枚の画像を図 6.3 に示す。合成対象視点は、正解画像の存在する中央の位置 (データベースの表記で (2, 7)) とする。元データは 640×480 画素のカラー画像であるが、これをグレースケール変換し、 160×120 画素に縮小したものを入力画像として用いた。実験では、合成対象視点において、入力画像と同じ 160×120 画素でデプスマップを推定したのち、超解像合成により 320×240 画素の合成画像を得る。初期画像は、混色合成画像を拡大した画像 \bar{X} を用いた。

再構成演算の最適化には、全ての方式において、(6.4) 式を用いた勾配法による反復解

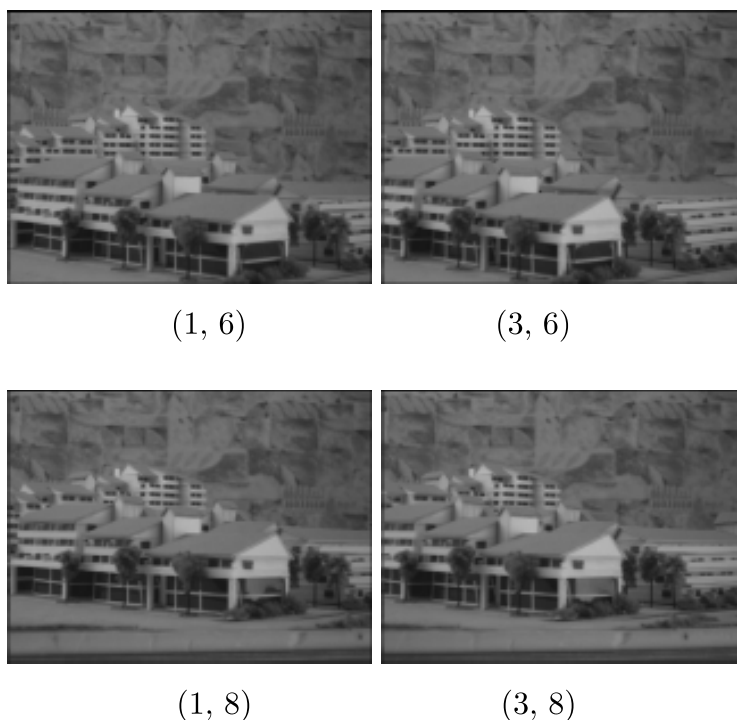


図 6.3 入力画像 (city)

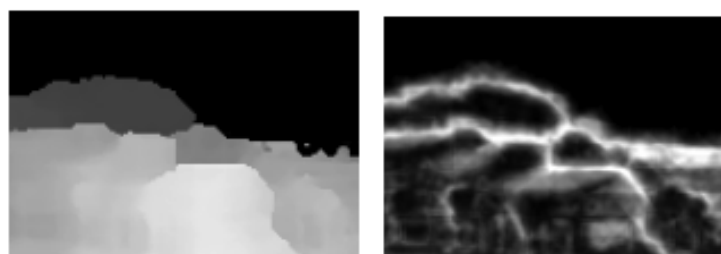


図 6.4 デプスマップ (左) と最小コストマップ (右) (city)

法を用いた。ただし,

$$\alpha_s = \frac{\|\nabla E_{sr}(X_s)\|^2}{\nabla E_{sr}(X_s)^\top (\nabla^2 E_{sr}(X_s) \nabla E_{sr}(X_s))} \quad (6.9)$$

とした [1].

また, 反復演算一回のごとの X に対する更新量が十分小さくなった時点で繰り返し演算を終了した. 具体的には, ベクトルの要素の最大値を抽出する関数を $\max(x)$ とすると,

$$|\max(X_{s+1} - X_s)| < th_{it} \quad (6.10)$$

となった時点で, 繰り返し演算を終了した. なお, 今回の実験では $th_{it} = 0.01$ とした.

正則化には, 混色合成画像を拡大した画像 \bar{X} による正則化

$$r(X) = \|X - \bar{X}\|^2 \quad (6.11)$$

表 6.1 パラメータ値と MSE 値 (city)

Num. of input images.		4	12	24
Baseline:	λ	1.0	2.5	5.0
	Num. of iterations	7	7	6
	MSE	42.55	43.0	42.84
Depth-reliability-based regularization:	λ	5.0E-13	1.5E-12	3.0E-12
	Num. of iterations	56	42	44
	MSE	32.27	33.0	31.97
Pixel selection:	λ	0.3	0.9	1.8
	th_{sel}	25	25	25
	Num. of iterations	37	37	37
	MSE	31.71	32.24	30.45
Pixel weighting (fixed):	λ	0.18	0.36	0.64
	λ_2	350	300	300
	Num. of iterations	17	24	26
	MSE	32.37	31.40	30.12
Adaptive pixel weighting (Proposed)	λ	0.26	0.45	0.9
	λ_2	320	320	320
	Num. of iterations	49	91	62
	MSE	31.70	30.17	28.26

を用いた。また、(6.3) 式の誤差関数として L2 ノルム ($\rho(x) = x^2$) を使い、オクルージョン等の影響でデプス推定がうまくいかず $\mathbf{a}_{m,n}$ の値がセットされていない画素に対しては $k_{m,n} = 0$ とした。

入力画像枚数 4 枚の場合、デプス推定に用いた 4 枚と同じ画像を入力とした。12 枚の場合は、上記 4 枚に加え、データベース表記で (0, 6), (0, 8), (1, 5), (1, 9), (3, 5), (3, 9), (4, 6), (4, 8) の 8 枚の画像を追加して用いた。24 枚の場合は、データベース表記で (0, 5), (4, 5), (0, 9), (4, 9) で囲まれる 25 枚の画像のうち、合成対象の画像 (2, 7) 以外の全ての画像を用いた。

6.4.4 出力画像の比較

再構成演算への入力画像枚数を変えながら、それぞれの方式で正解画像との MSE (Mean Square Error) が最小となるパラメータと MSE を表 6.1 にまとめる。MSE に関して、横軸を観測画像の枚数とし、それぞれの方式に対する MSE の値を示したグラフを図 6.5 に示す。

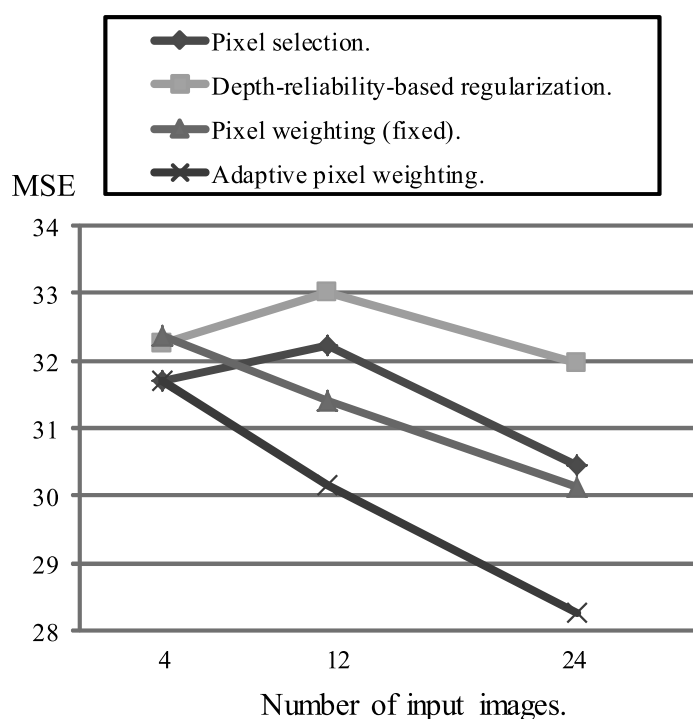


図 6.5 入力画像枚数に対する MSE 値 (city)

24 枚の入力画像を用いた場合のそれぞれの方式における処理結果を図 6.6 に示す。画素選択方式 (pixel selection method) においては、オクルージョン周辺に不自然なテクスチャが見て取れる。また、位置合わせの信頼性に基づく正則化を用いた方式 (depth-reliability-based regularization method) と提案方式 (adaptive pixel weighting method) は主観的には同等の画質が得られているように見えるが、差分画像を作ってみると図 6.7 に示されるように、オクルージョン領域周辺で方式による違いが出ていることがわかる。

重みを全て 1 とした方式 (baseline method) においては、 λ を小さくすることにより超解像処理がうまくいく部分の解像度は改善するが、図 6.8 に示されるようにオクルージョン領域近辺の画質が劣化し、画面全体としての画質 (MSE) は低下してしまう。そのため、MSE を下げようとする、 λ の値を大きくせざるをえず、超解像処理による効果がほとんど得られない結果となっている。

6.4.5 重み係数の視覚化

図 6.9 および図 6.10 に、画素選択方式 (pixel selection method) と提案方式における最適化演算終了時の重み $k_{m,n}$ の値を示す。 $k_{m,n}$ 値が小さいほど暗い色になっている。提案方式では、画素選択方式では白く塗りつぶされている領域であっても、被写体のテク

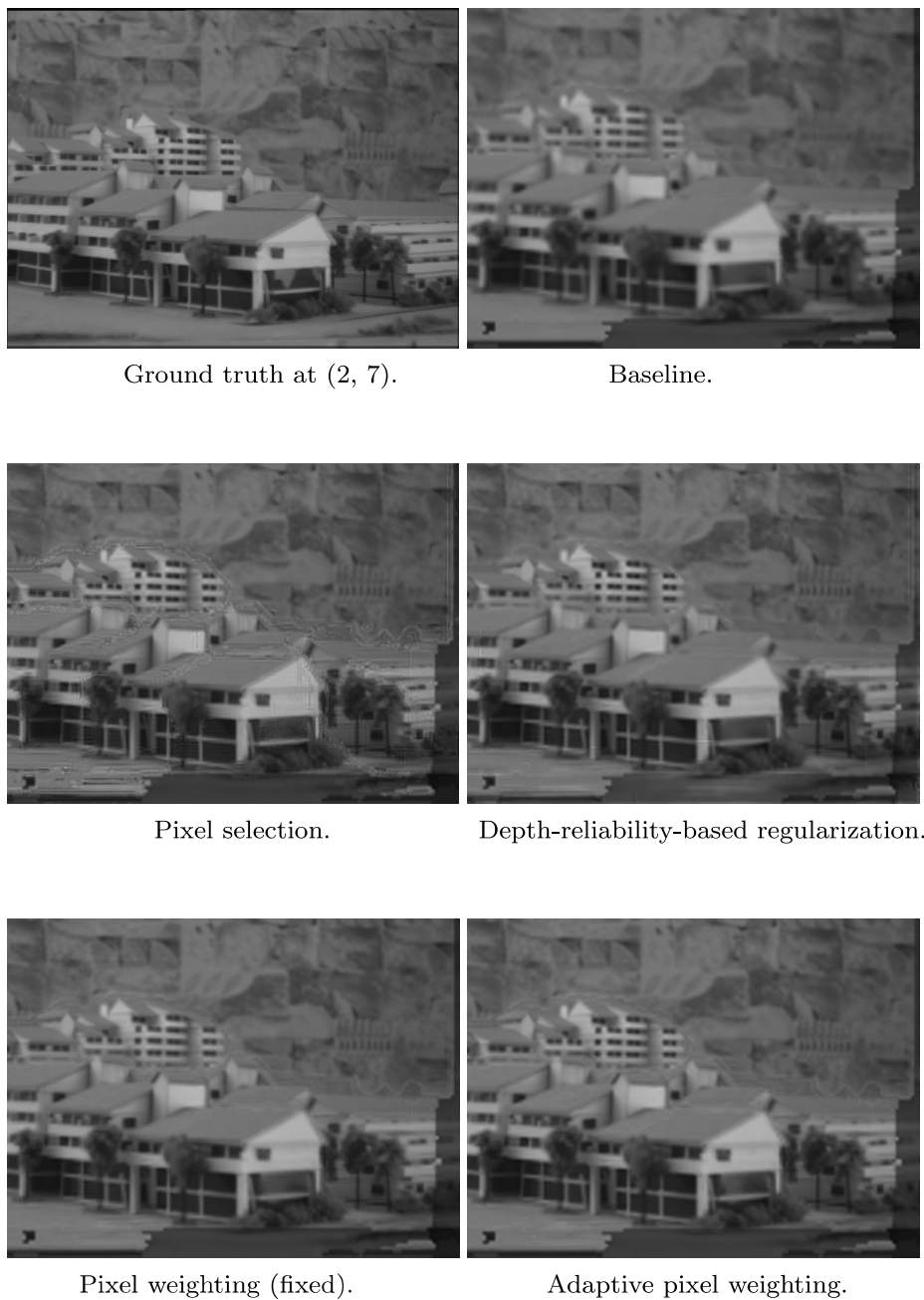


図 6.6 正解画像と超解像結果 (入力画像枚数: 24 枚)

スチャーに沿って、重み係数の値が変化していることが見て取れる。

6.4.6 観測画像ごとの寄与割合

高解像度画像上のある画素は、複数の入力画像の画素に対応付けられる。これら複数の入力画像の画素に対する重みの値を加算することにより、高解像度画像のある画素に対する入力画像の寄与割合とする。すなわち、 $\mathbf{a}_{m,n}^T$ を n 行目とするように並べた行列を観測

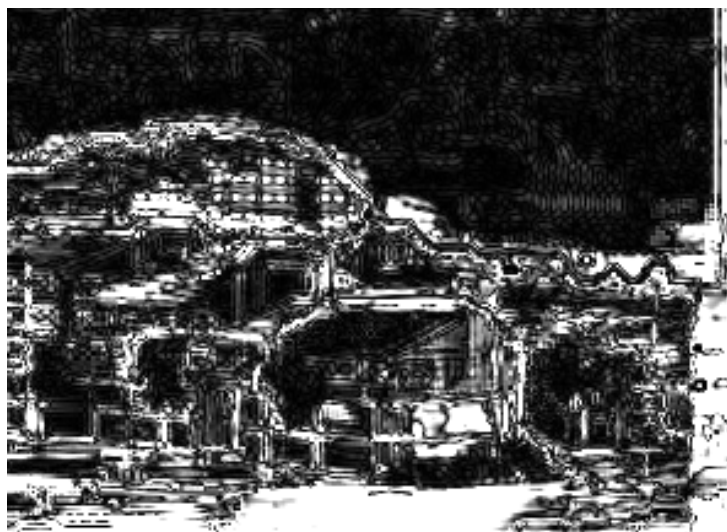


図 6.7 位置合わせの信頼性に基づく正則化を用いた方式 (depth-reliability-based regularization method) と提案方式 (adaptive pixel weighting method) の超解像結果の差分画像



図 6.8 重みを全て 1 とした方式 (baseline method) において、 λ の値を小さくした場合の超解像結果

行列 A_m とし、 $k_{m,n}$ を n 行目とするように並べたベクトルを \mathbf{k}_m とすると、ベクトル $A_m^T \mathbf{k}_m$ の各行が高解像度画像の各画素に対応する入力画像の寄与割合となる。

例えば、位置合わせの信頼性に基づく正則化を用いた方式 (depth-reliability-based regularization method) で用いるコストマップにおいて、コストが比較的低い領域 (P1) とコストが高い領域 (P2) において、提案方式での入力画像の寄与割合を示したものを図 6.11 に示す。ほぼ全ての入力画像に写っている P1 の領域では、均等に入力画像が寄与し

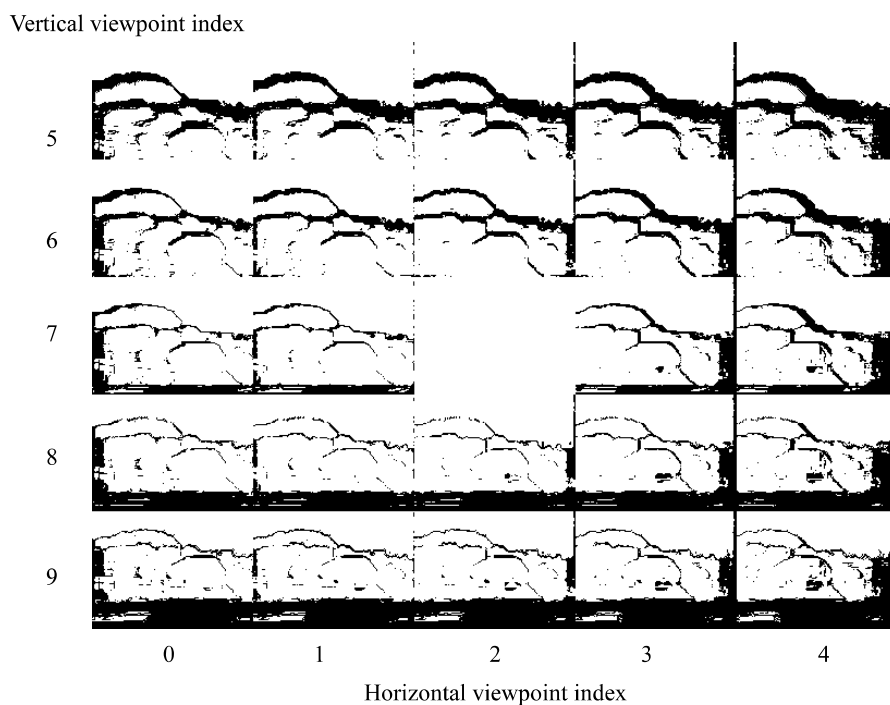


図 6.9 画素選択方式 (pixel selection method) における重み係数を可視化した画像

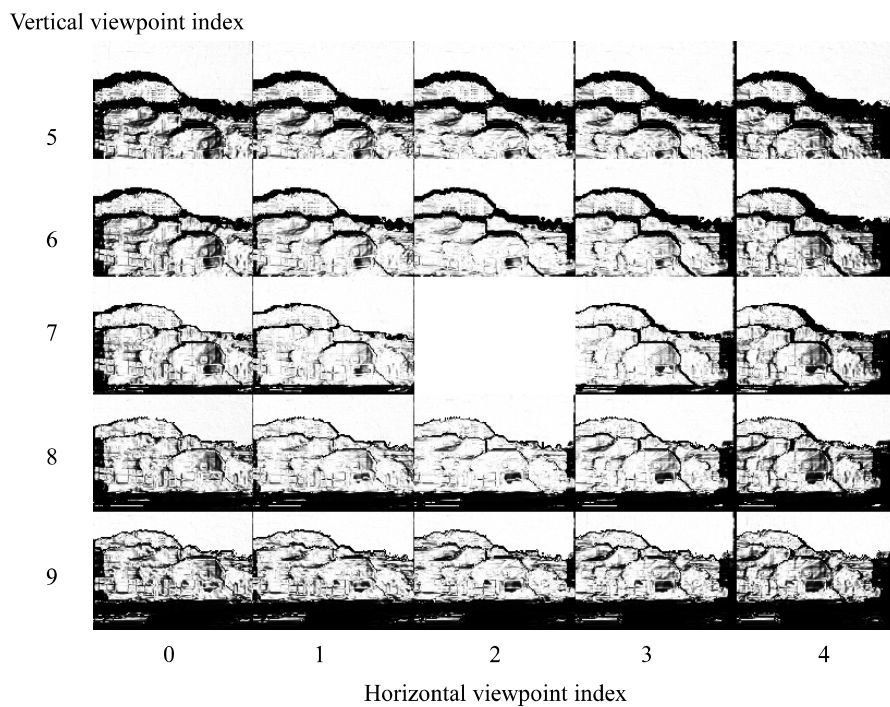


図 6.10 提案方式 (adaptive pixel weighting method) における重み係数を可視化した画像

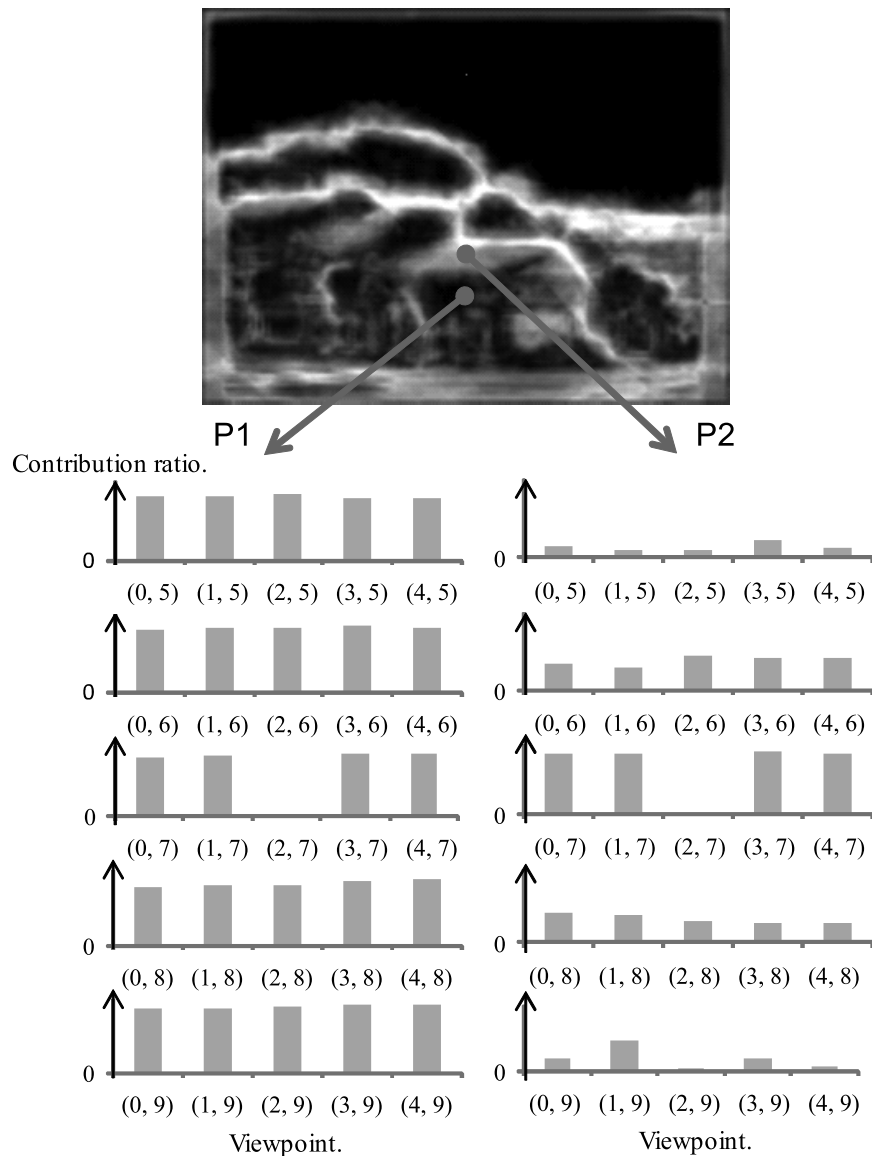


図 6.11 入力画像の寄与割合

ているのに対し、P2 の領域は、水平線のオクルージョン付近であることから、垂直方向にずれた入力画像よりも水平方向にずれた入力画像が多く使われていることがわかる。これらの寄与割合が、評価関数 (6.3) 式の最適化演算のなかで自動的に計算されることが提案方式の特長である。

6.4.7 別の画像セットを用いた実験

Stanford light field dataset [10] により提供されている画像セットを用いて、方式ごとの画質改善効果を調べる実験を行った。用いた画像セットは、CD cases and a

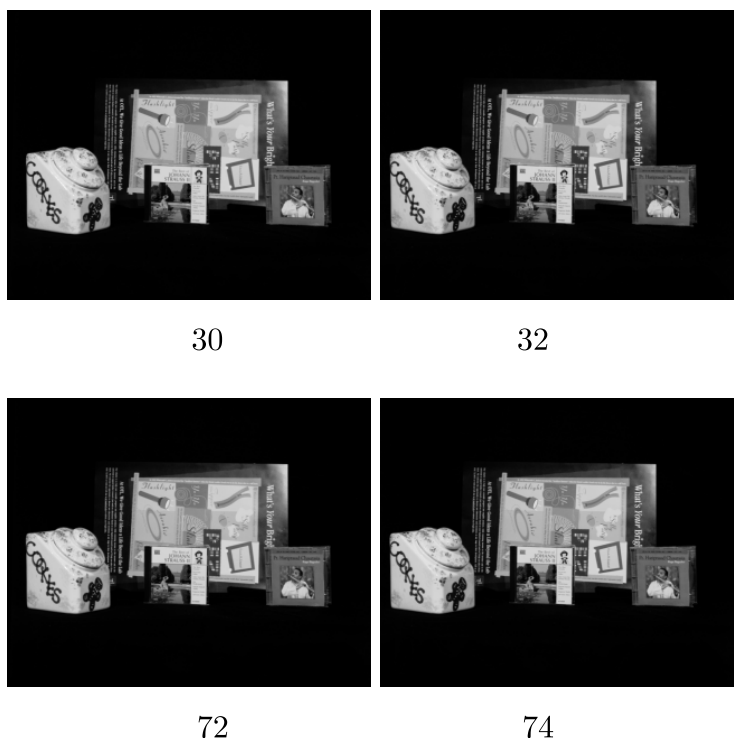


図 6.12 入力画像 (CD cases and a poster (unclouded))

poster(unoccluded) および, Humvee の二つである. どちらも, 元データは 650×515 画素のカラー画像であるが, これをグレースケール変換し, 325×258 画素に縮小したものを入力画像として用いた. デプス推定に用いた 4 枚の画像をそれぞれ, 図 6.12, 図 6.14 に示す.

デプスマップと, コストマップを図 6.13, 図 6.15 にそれぞれ示す. 実験では, 正解画像の存在する画像位置 (それぞれデータベース表記で 52 番, 136 番) において, 入力画像と同じ 325×258 画素でデプスマップを推定したのち, 超解像合成により 650×515 画素の合成画像を得る. 再構成演算に用いる入力画像枚数を変えて正解画像との MSE 値を比較した. パラメータと MSE 値を表 6.2, 表 6.3 にそれぞれ示す. また, MSE 値をグラフにしたものを図 6.16, 図 6.17 に示す. 全ての実験に置いて, 提案方式が最も MSE を下げることが可能であることが確認できた.

6.4.8 設計のしやすさに関する考察

画素選択方式 (pixel selection method) と, 提案方式 (adaptive pixel weighting method) は, どちらも観測画素値と推定画素値との差に基づく処理を行っているため, 画質の差も大きくないと考えられる. 画素選択方式 (pixel selection method) におけるパラメータ th_{sel} に相当する提案方式のパラメータは λ_2 であると考えられるため, それぞれ

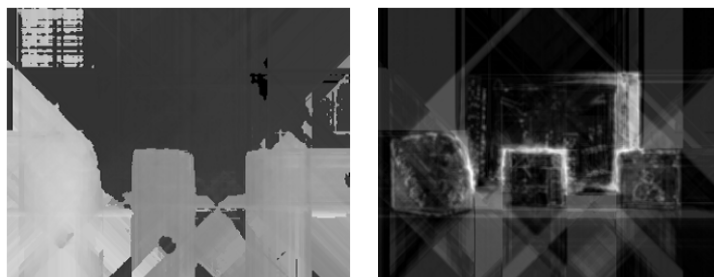


図 6.13 デプスマップ (左) と最小コストマップ (右) (CD cases and a poster (unclouded))

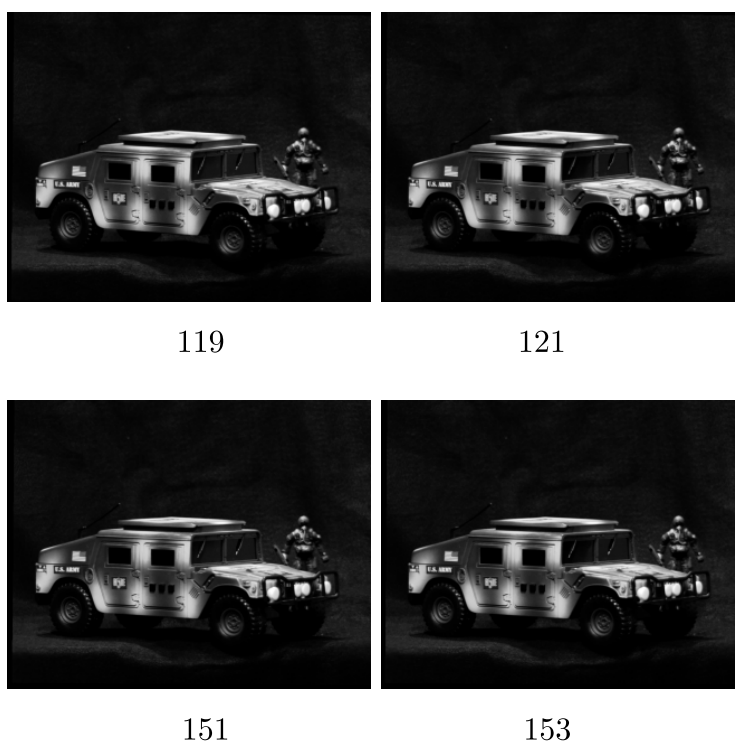


図 6.14 入力画像 (Humvee)

の値を変化させて、画質 (MSE) がどのように変化するかを調べる実験を行った。結果を図 6.18, 図 6.19 にそれぞれ示す。シミュレーション実験の入力画像には、「筑波大学多視点画像データベース」を用い、4 枚の観測画像 (データベースの表記でそれぞれ (1, 6), (3, 6), (1, 8), (3, 8) の位置) を用いた。

画素選択方式 (pixel selection method) の場合は、パラメータの変化に対する MSE の変化割合が大きいため、画像セットごとにパラメータを設定しなければいけない場合が多いと考えられる。これに対し、提案方式は、パラメータ変化に対する MSE 変化割合が小さいため、両方の画像セットで同じパラメータとしても、MSE の劣化が少ないと考えられる。すなわち、提案方式の方が、パラメータ設定ががより容易であると考えられる。

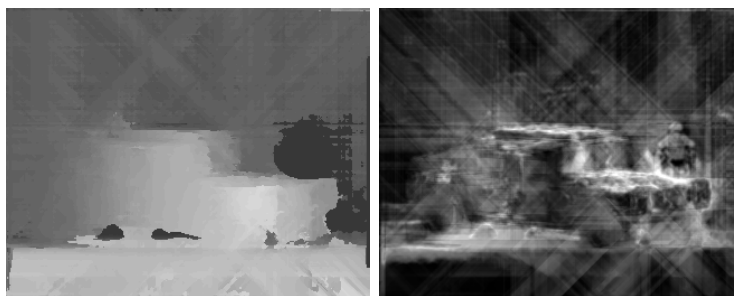


図 6.15 デプスマップ (左) と最小コストマップ (右) (Humvee)

表 6.2 パラメータ値と MSE 値 (入力画像:CD case)

Num. of input images.		4	12	24
Baseline:	λ	1.0	2.5	5.0
	Num. of iterations	8	9	8
	MSE	32.03	29.50	29.35
Depth-reliability-based regularization:	λ	5.0E-13	1.50E-12	3.00E-12
	Num. of iterations	100	100	100
	MSE	23.76	17.52	17.26
Pixel selection:	λ	0.3	1	2
	th_{sel}	40	40	40
	Num. of iterations	13	13	13
	MSE	24.8	21.4	21.0
Pixel weighting (fixed):	λ	0.04	0.08	0.16
	λ_2	300	300	300
	Num. of iterations	60	84	84
	MSE	21.86	17.05	16.81
Adaptive pixel weighting method (Proposed):	λ	0.15	0.45	0.9
	λ_2	350	350	350
	Num. of iterations	88	68	65
	MSE	21.79	15.64	15.08

6.5 むすび

オクルージョン等にロバストな超解像処理に向けて、再構成演算における誤差項への画素適応重みづけ方式に関して提案した [11].

誤差関数への画素ごとの重みを利用し、その重み変数に対する正則化項を加えた評価関数を最適化することにより、重みを自動的に決定する。従来方式は、画素ごとの重みが何

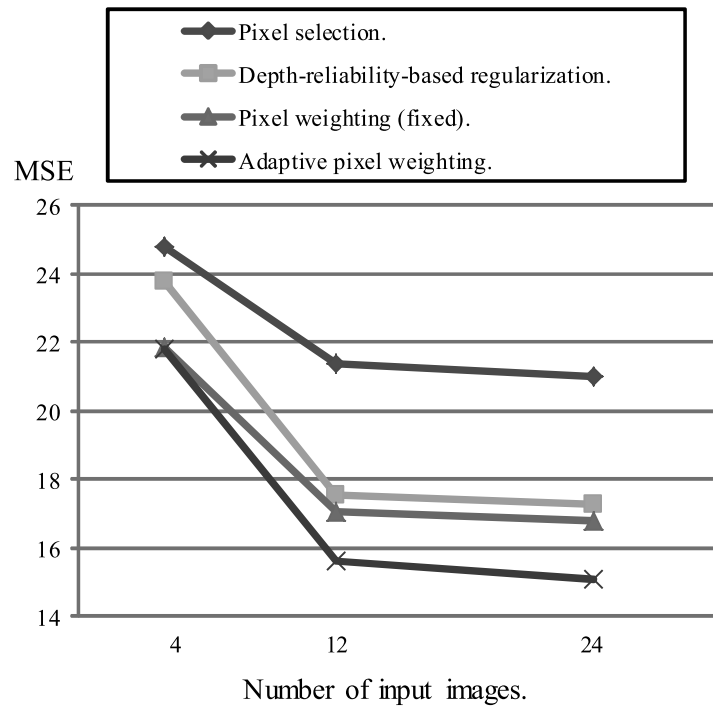


図 6.16 入力画像枚数に対する MSE 値 (CD cases and a poster(unoccluded))

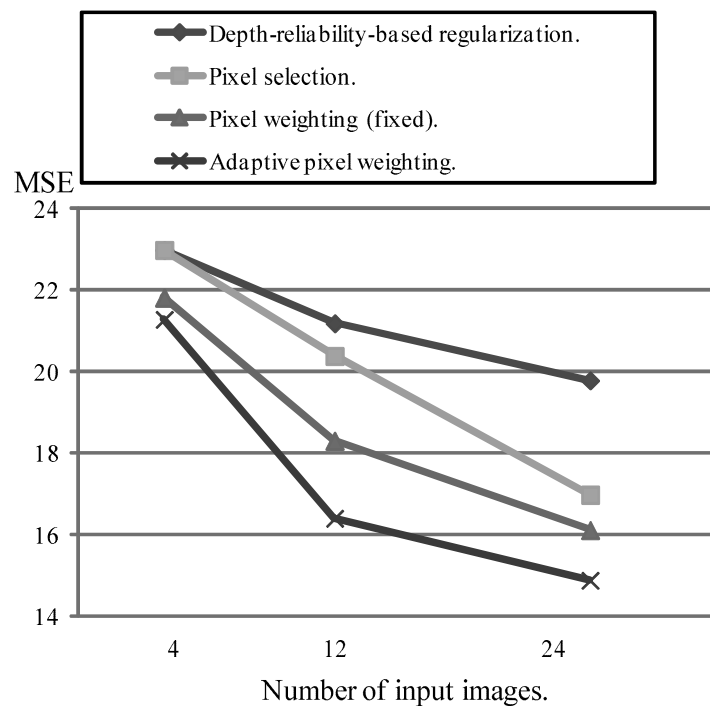


図 6.17 入力画像枚数に対する MSE 値 (Humvee)

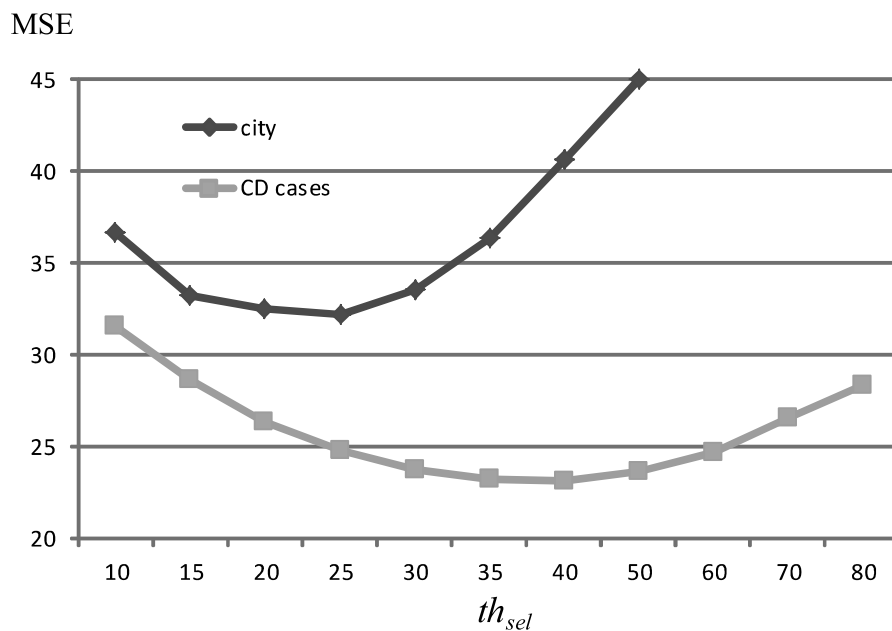


図 6.18 画素選択方式 (pixel selection method) におけるパラメータ th_{sel} に対する MSE 値の変化

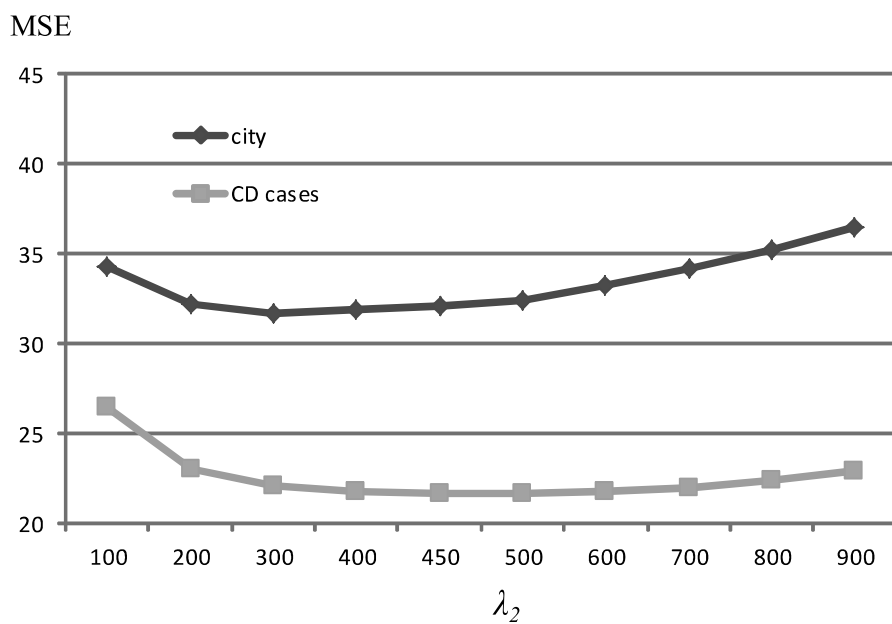


図 6.19 提案方式 (adaptive pixel weighting method) におけるパラメータ λ_2 に対する MSE 値の変化

表 6.3 パラメータ値と MSE 値 (入力画像:Humvee)

Num. of input images.		4	12	24
Baseline:	λ	1.0	2.5	5.0
	Num. of iterations	9	9	10
	MSE	33.0	30.0	29.8
Depth-reliability-based regularization:	λ	5.0E-13	1.50E-12	3.00E-12
	Num. of iterations	98	98	98
	MSE	23.0	21.2	19.8
Pixel selection:	λ	0.3	1	2
	th_{sel}	40	40	40
	Num. of iterations	17	17	18
	MSE	23.2	21.4	17.0
Pixel weighting (fixed):	λ	0.04	0.08	0.16
	λ_2	300	300	300
	Num. of iterations	62	86	86
	MSE	21.83	18.32	16.13
Adaptive pixel weighting method (Proposed):	λ	0.15	0.45	0.9
	λ_2	350	350	350
	Num. of iterations	80	69	69
	MSE	21.30	16.42	14.9

かしらの尺度で事前に固定された値であるのに対し、提案方式は、評価関数の最適化の過程で、推定された高解像度画像を利用しながら、その重みが自動的に決まっていくという特長がある。

提案する超解像方式の有効性を、超解像自由視点画像合成を用いて確認した。結果として、オクルージョン領域を多く含むような多眼画像を用いた超解像合成における画質が改善しただけでなく、入力画像枚数を増やした場合にも、その枚数に応じた画質改善を図ることが可能となった。

前章では、実装上の提案と、アルゴリズム面の提案により超解像自由視点画像合成の高速化実装を実現した。本章にて提案する画素適応重み付け方式は、尤度項に 2 次ノルムを使う限りにおいては、前章の実装上の高速化提案をそのまま活用することができる。また、アルゴリズム面の改善の一つである改良した初期値も、そのまま利用できるため、高速化を損なうものではない。

参考文献

- [1] K. Takahashi, T. Naemura: “Super-Resolved Free-Viewpoint Image Synthesis Based on View Dependent Depth Estimation,” *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications (TCVA)* (2012)
- [2] Farsiu, S.; Robinson, M.D.; Elad, M.; Milanfar, P.: “Fast and robust multi-frame super resolution,” *Image Processing, IEEE Transactions on*, Vol.13, No.10, pp.1327–1344 (2004)
- [3] El-Yamany, N.A.; Papamichalis, P.E.; Schucany, W.R.: “A Robust Image Super-Resolution Scheme Based on Redescending M-Estimators and Information-Theoretic Divergence,” *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2007. ICASSP 2007. IEEE International Conference on*, Vol.1, pp.741–744 (2007)
- [4] Z. A. Ivanovski, L. Panovski, and L. J. Karam: “Robust super-resolution based on pixel-level selectivity,” *Proc. SPIE 6077, Visual Communications and Image Processing* (2006)
- [5] 田中正行, 矢口陽一, 古川英治, 奥富 正敏: “位置ずれ量を考慮した画素選択に基づくロバスト超解像処理”, *信学論 (D)*, J92–D(5), pp.650–660 (2009)
- [6] E. S. Lee and M. G. Kang, “Regularized adaptive high-resolution image reconstruction considering inaccurate subpixel registration,” *IEEE Trans. Image Process.*, Vol.20, No.10, pp.1784–1797, 2003.
- [7] S.C. Park, M.K. Park, and M.G. Kang: “Super-resolution image reconstruction: a technical overview,” *Signal Processing Magazine, IEEE*, Vol.20, 3, pp.21–36 (2003)
- [8] David Capel: “Image Mosaicing and Super resolution,” Springer (2004)
- [9] H. Hirschmuller: “Stereo processing by semiglobal matching and mutual information,” *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, Vol.30, No.2, pp.328–341 (2008)
- [10] Stanford University Computer Graphics Laboratory: “The (new) stanford light field archive,” <http://lightfield.stanford.edu/>
- [11] K. Hamada, R. Nakashima, K. Takahashi, and T. Naemura: “Super-resolution with adaptive pixel weighting scheme and its application to super-resolved free-viewpoint image synthesis,” *Signal Image Technology and Internet Based Systems (SITIS), 2013 9th International Conference on* , pp.757–764 (2013)

第7章

結論

7.1 本論文の成果

PDP を用いた時分割 2 眼立体表示方法と超解像自由視点画像合成において、それぞれ、実装を通して、画素適応処理を用いた高画質化手法を提案した。ここでは、本論文の主たる成果をまとめる。

立体表示装置における高画質化信号処理手法の提案

立体表示装置における高画質化信号処理手法の提案では、PDP と液晶シャッターメガネを用いる時分割立体映像表示を実現した。PDP を用いて時分割立体画像が表示可能なサブフィールド発光スキームを提案するとともに、階調信号処理に関して、立体表示に適した改善方法を提案した。提案した階調信号処理をハードウェア実装し、実際のパネルを用いて時分割立体画像が表示可能なことを確認した。従来の PDP 信号処理に用いられていた擬似階調表現法である、誤差拡散法およびライン間ディザ法に加えて、フィールド間誤差拡散および新たに提案した左右逆スキャンによる誤差拡散手法を用いることにより、立体表示において少ない階調しか得られない場合でも、より自然な階調を表現できる方法を提案し、その効果を主観評価実験により確認した。提案した表示方式は CRT (Cathode Ray Tube, ブラウン管) でいえば 120Hz の順次走査に相当し、CRT を用いた 120Hz インタレース表示よりも画像の安定感が得られている。また PDP は、CRT やプロジェクタと異なり幾何ひずみが生じない点も、立体視における奥行き知覚にとって有利であり、PDP 立体表示の特徴と考えられる。

次に、PDP を用いて時分割立体画像を表示する際に課題となっていたクロストーク妨害の低減に関して検討した。クロストーク妨害とは、左目用の画像が右目に漏れ込み（もしくは、右目用の画像が左目に漏れ込み）画質を劣化させる妨害である。本研究では、ク

ロストーク妨害の原因を調べるとともに、蛍光体発光のシミュレーションにより、残光時定数とクロストーク量との関係を定量的に求めた。その結果、残光によるクロストーク妨害を無くすためには、残光時定数 ($1/e$) が $1.0\sim 1.5\text{ms}$ 程度以下になればよい可能性を導いた。さらに、画素適応信号処理によりクロストークを低減させるクロストークキャンセラを提案し、現状の蛍光体でも絵柄によっては許容限以上の画質で表示可能なことを主観評価実験により確認した。提案したクロストークキャンセラは、左右の画像の映像信号どうしの減算によりクロストークを除去する。クロストーク除去量を一画素ごとに推定する画素適応処理を行うことにより、高画質化を実現している。本論文では、残光時定数とクロストーク量の定量的関係を明らかにしたことで、PDP を用いた立体表示装置の蛍光体に対する設計指標を導き出すことに成功した。

自由視点画像合成における高画質化手法の提案

自由視点画像合成における高画質化手法の提案では、自由視点画像合成と超解像技術を組み合わせた超解像自由視点画像合成手法の高画質化に取り組んだ。まず、超解像自由視点画像合成の演算高速化に向けて、超解像再構成演算の実装上の提案と、アルゴリズム面での提案を行い、全体のアルゴリズムをグラフィックプロセッシングユニット (GPU) 上に実装した。実装上の提案では、超解像再構成演算の並列化において課題となっていた疎行列演算を、密行列演算へと変換可能であることを示し、並列化による高速演算を可能とした。アルゴリズム面での提案では、超解像再構成演算時の初期画像の提案と新しい合成手法の提案を行い、繰り返し演算回数を削減させた。超解像再構成演算の初期画像として、混色による合成画像に高域強調を施した画像を用いることで、同じ画質を得るための繰り返し演算回数を低減できることを示した。また、従来から超解像に用いられてきた滑らかさの拘束を正則化項として再構成演算を行い、その結果をデプスの信頼度に応じた重み付け処理により混色合成の結果と統合する新しい手法を提案した。これにより、デプスの信頼度を直接正則化に用いた従来の手法と比較して、再構成演算の繰り返し回数を大幅に削減しつつ、従来手法と同等の画質が得られるようになった。超解像自由視点画像合成の高速化実装が可能となったことで、出力結果を見ながらのパラメータ調整が可能となり、画質改善に貢献した。

画素適応重み付けによる超解像処理

超解像自由視点画像合成の高画質化の研究では、画素適応重み付けによる超解像処理の提案を行った。オクルージョン等によって生じる画素間の位置合わせ誤差の影響に対処するため、入力画素一画素ごとに重み係数を乗じる超解像手法を提案した。一般的に、位置

合わせ誤差は、超解像演算結果を大きく劣化させるため、位置合わせ誤差にロバストに対応するロバスト超解像処理が提案されている。従来のロバスト超解像処理においても、画素選択の目的で、入力画素一画素ごとに重み係数を乗じる手法が提案されているが、その重み係数は、例えばスレッシュホルディング等の何らかの関数を用いて超解像再構成演算の前に決定されていた。これに対し、提案する手法は、重み係数に対する正則化項をコスト関数に導入することにより、再構成演算におけるコスト関数の最適化と同時に重み係数も最適化するという新しい方式であり、ロバスト超解像処理として、超解像処理一般に広く活用可能なものである。重み係数の決定方法を、コスト関数の最小化の枠組みに取り込んだことで、重みの設定に関する知識がなくとも、適切に重みを設定可能とした。本論文では、その重み決定方法を超解像自由視点画像合成へ適用し、従来のロバスト超解像方法よりも、画質が改善されることを確認した。位置合わせ誤差という、実運用上の課題に対処できる手法を提案できたことは、画素適応処理の民生分野での活用に大きく貢献できたと考えられる。

7.2 今後の課題と展望

本論文では、画素適応処理により高画質化を実現する技術の適用先として、PDP を用いた立体映像表示技術と、超解像を用いた自由視点画像合成技術に着目した。それぞれにおいて、高品質な画像を実時間もしくは高速に合成する手法の提案・実践と理論的体系化を行った。本節では、本研究によって明らかになった今後の課題をまとめ、将来の展望について述べる。

PDP を用いた立体表示方法に関しては、メーカーとの共同研究に発展し、2010 年に 3D-PDP テレビとして製品化された。本研究の目的である画素適応信号処理の民生品への適用が達成できた例である。光の ON/OFF のみで階調表示を行うサブフィールド利用型のディスプレイと、シャッター眼鏡を用いた時分割立体映像表示方式は相性が良く、PDP に限らず DMD(Digital Mirror Device) を用いたディスプレイや今後のディスプレイデバイスへの活用が期待される。

自由視点画像合成の高画質化に関しては、超解像技術の枠組みを取り込んだ超解像自由視点画像合成の高画質化に取り組んだ。自由視点画像合成の民生分野での活用には、多数のカメラによる撮像や、十分な伝送路の確保等の課題があり、民生分野での活用には、多くの課題を解決する必要がある。高画質化の検討の中で生まれた画素適応重みづけ方式は、位置合わせ誤差にロバストな超解像方式として、自由視点画像合成に限らず一般の超解像技術に適用可能である。これまで何らかのヒューリスティックにより設定されていた重みを、コスト関数の最小化の枠組みに取り込んだことで、重みの設定に関する知識がなくとも、適切に重みが設定可能となるため、実運用上、有用な技術であると考えられる。

今後の提案方式の活用が期待される。

以上、本研究を発展させてゆく上で明らかになった課題や、今後の可能性について述べた。画像処理研究としては当然のごとく行われている画素適応処理であるが、その技術を民生品に搭載しようとする、リアルタイム処理化や高速処理化が必要となり、アルゴリズム面でも処理を見直す必要が生じる。日々目覚しい進歩を遂げている画素適応処理に高度な画像処理技術が、実装技術の進歩と半導体技術の進歩により、民生分野においても広く活用され、発展していきことが期待される。

発表文献

研究論文 (査読付き論文)

- [1] 浜田宏一, 高橋桂太, 苗村 健: “超解像自由視点画像合成の高速化実装”, 映情学誌, vol.66, no.10, pp.J385–J394 (2012)
- [2] 浜田宏一, 山本敏裕, 栗田泰市郎, 高野善道, 湯山一郎, 村上 宏: “DC 形 PDP を用いた時分割 2 眼立体表示法におけるクロストーク妨害とその改善”, 映情学誌, Vol.55, No.3, pp.439–446 (2001)
- [3] 浜田宏一, 山本敏裕, 栗田泰市郎, 高野善道, 湯山一郎, 村上 宏: “DC 形 PDP を用いた時分割 2 眼立体表示法の検討”, 映情学誌, Vol.54, No.3, pp.452–458 (2000)

国際会議論文

- [4] **Koichi Hamada**, Ryo Nakashima, Keita Takahashi, Takeshi Naemura: “Super-resolution with adaptive pixel weighting scheme and its application to super-resolved free-viewpoint image synthesis,” Signal Image Technology and Internet Based Systems (SITIS), 9th International Conference on, pp.757–764 (2013)
- [5] Masaru Kanazawa, **Koichi Hamada**, Fumio Okano: “Color error from an RGB-stripe pixel structure,” Journal of the Society for Information Display, Vol.11, No.2, pp.387–393 (2003)
- [6] Masaru Kanazawa, **Koichi Hamada**, Fumio Okano: “A proposal for the modification of s-CIELAB,” Journal of the Society for Information Display, Vol.10, No.4, pp.389–395 (2002)
- [7] **Koichi Hamada**, Taiichiro Kurita, Masaru Kanazawa, K. Yamamoto: “A 3D Hi-Vision Display with 50-in. AC PDP,” AD/IDW’01, pp.785–788 (2001)
- [8] **Koichi Hamada**, Toshihiro Yamamoto, Taiichiro Kurita, Yoshimichi Takano,

Ichiro Yuyama: "A Field-Sequential Stereoscopic Display System with 42-in. HDTV DC-PDP," IDW'98, pp.555-558 (1998)

表彰

- [9] 映像情報メディア学会 鈴木記念賞 (2002), **浜田宏一**: "AC 型 PDP を用いた立体ハイビジョン表示装置"
- [10] 映像情報メディア学会 技術振興賞 開発賞 (2002), 栗田泰市郎, **浜田宏一**, 山本久米次 (松下電器): "高画質 PDP 立体ディスプレイの開発"

講演

- [11] **浜田宏一**: "「超解像技術でテレビはこう変わる」", 日経エレクトロニクスセミナー もっと楽しいテレビ (2009)
- [12] **浜田宏一**: "高画質化に向けた薄型テレビのフレームレート変換技術", 映情学年次大シンポジウム (2007)

解説

- [13] **浜田宏一**: "超解像自由視点画像合成の高速化実装", 画像ラボ, 日本工業出版, No.24, Vol.7, pp.44-50 (2013)
- [14] **浜田宏一**: "PDP による立体表示とその画質改善", 画像ラボ, 日本工業出版, No.7, Vol.12, pp.13-17 (2001)

特許

- [15] 国立大学法人東京大学: "超解像方法及び装置", 特開 2013-250891, 2013-12-12
- [16] 日本放送協会: "立体画像の階調表示制御方法および装置", 特許第 3816673 号, 2000-2-18
- [17] 日本放送協会: "立体画像表示方法および装置", 特許第 3784967 号, 2000-2-2

シンポジウム・研究会・大会等発表

- [18] 中島 諒, 浜田宏一, 高橋桂太, 苗村 健: “超解像自由視点画像合成システム”, 画像センシングシンポジウム (SSII), DS2-09 (2013)
- [19] 浜田宏一, 中島 諒, 高橋桂太, 苗村 健: “超解像自由視点画像合成の性能評価と画質改善”, 信学技報, vol.112, no.291, pp.17-22 (2012)
- [20] 浜田宏一, 高橋桂太, 苗村 健: “超解像自由視点画像合成の高速化実装”, 画像センシングシンポジウム (SSII), IS3-02 (2012) 【ハイライト発表】
- [21] 浜田宏一, 高橋桂太, 苗村 健: “超解像自由視点画像合成における超解像演算の高速化実装”, 信学技報, vol.111, no.284, pp.1-6 (2011)
- [22] 米司健一, 浜田宏一, 影山昌広: “映像劣化モデル簡略化による超解像処理の反復数低減手法の提案”, 映情学冬季大, 6-6 (2009)
- [23] 浜田宏一, 栗田泰市郎, 高野善道, 山本敏裕: “PDP を用いた立体ハイビジョン表示装置”, NHK 技研 R&D, No.71, pp.26-35 (2002)
- [24] 浜田宏一: “PDP 立体表示装置”, 電気学会技術報告書, C 部門第 881 号 (2002)
- [25] 浜田宏一, 金澤 勝, 栗田泰市郎, 山本久米次: “AC 型 PDP を用いた立体ハイビジョン表示装置”, 2001 年映像情報メディア学会年次大会, ITE'01, pp.120-121 (2001)
- [26] 浜田宏一, 金澤 勝, 栗田泰市郎, 山本久米次: “PDP を用いた立体ハイビジョン表示装置”, 信学技報, Vol.101, No.438, pp.81-86 (2001)
- [27] 浜田宏一, 山本敏裕, 高野善道, 栗田泰市郎, 湯山一郎: “PDP 時分割 2 眼立体表示法とクロストーク改善による高画質化”, 信学技報, Vol.98, No.549, pp.119-124 (1999)
- [28] 浜田宏一, 山本敏裕, 栗田泰市郎, 高野善道, 湯山一郎: “PDP 時分割立体表示におけるクロストークキャンセラの改善”, 映報学年次大, No.12-11, pp.177-178 (1999)
- [29] 浜田宏一, 山本敏裕, 高野善道, 栗田泰市郎, 湯山一郎: “PDP 時分割 2 眼立体表示法の検討”, 映報学年次大, ITE'98, pp.262-263 (1998)

謝辞

本論文の作成に当たり、3年間の東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程において、終始温かいご指導とご教示を頂いた苗村 健 教授に心より感謝致します。研究の進め方に関して貴重なご意見を頂いた佐藤 洋一 教授ならびに上條俊介 准教授に感謝いたします。論文をまとめるにあたっては、相澤 清晴 教授、浅見 徹 教授、山崎 俊彦 准教授にもご指導いただきました。ここに深く感謝いたします。

本研究の前半部分の成果は、私が NHK(日本放送協会) に勤務していた際に行ったものであり、栗田 泰市郎 博士 (NHK) には新入社員の頃から徹底的にご指導いただきました。感謝致します。また、本研究の後半部分に関しては、社会人博士課程での成果となります。社会人博士課程への進学に関して快諾頂いた川口 敦生 部長 (当時、(株) 日立製作所 中央研究所) に深く感謝いたします。本研究の後半部分の成果は、高橋桂太准教授 (名古屋大学) ならびに中島 諒氏 (博士3年) との議論を通して生まれたものです。感謝いたします。

すべての方のお名前を上げることは出来ませんでした。苗村研究室の皆さん、事務補佐員の方々、そのほか筆者を支えてくださった方々に、この場を借りてお礼申し上げます。最後に、健康管理をしてくれた妻と元気を与えてくれた息子に感謝致します。

2013年12月13日