



電子情報

10

## 学位論文

複数画像の信号处理的統合に基づく  
焦点画像処理とその応用

平成 10 年 12 月 18 日

指導教官 相澤 清晴 助教授

東京大学大学院  
工学系研究科電子情報工学専攻

67118 児玉 和也

# 目次

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>9</b>
1.1	本論文の背景	9
1.1.1	精細な画像取得における諸課題	10
1.1.2	画像の統合に基づく映像生成の多様化	11
1.2	本論文の目的	13
1.3	本論文の構成	14
<b>2</b>	<b>画像の処理および統合に基づく精細な映像生成</b>	<b>18</b>
2.1	はじめに	18
2.2	高精細画像の取得手法	18
2.2.1	一画像からの信号处理的復元手法の問題点	18
2.2.2	撮像条件の異なる複数画像の統合に基づく映像生成	20
2.3	焦点画像処理の研究動向	21
2.3.1	信号处理的復元に基づく鮮鋭画像の再構成手法	21
2.3.2	選択的統合処理に基づく複数画像からの鮮鋭画像再構成手法	23
2.3.3	焦点ぼけを利用した距離計測における関連研究	24
2.4	高解像度画像生成の研究動向	26
2.4.1	反復的復元による超解像手法	26
2.4.2	補間的な処理に基づく複数画像の統合	28
2.4.3	モザイク処理による複数画像の統合	29
2.5	まとめ	30
<b>3</b>	<b>焦点合わせの異なる複数画像からの信号处理的統合に基づく任意焦点画像生成</b>	<b>32</b>
3.1	はじめに	32
3.2	任意焦点画像生成の原理	33
3.2.1	焦点合わせの異なる撮像画像と任意焦点画像の間に成立する位置不変の恒等式の導出	33
3.2.2	反復による任意焦点画像の再構成	35
3.3	合成画像を用いた任意焦点画像生成シミュレーション	36

3.3.1	全焦点画像の再構成 . . . . .	36
3.3.2	任意焦点画像の生成 . . . . .	39
3.3.3	より多層の奥行きをもつ対象シーンに対する任意焦点画像生成 . . . . .	43
3.4	信号处理的統合に基づく任意焦点画像生成手法の特徴に関する考察 . . . . .	45
3.4.1	領域分割に基づく選択的統合手法との比較 . . . . .	45
3.4.2	対象シーンにおいて仮定される奥行きからのずれにともなう再構成 画像への影響 . . . . .	48
3.5	まとめ . . . . .	49
4	一般的な単焦点撮像カメラを用いた焦点画像処理 . . . . .	51
4.1	はじめに . . . . .	51
4.2	画像処理を用いた推定手法に基づく任意焦点画像の生成 . . . . .	53
4.2.1	階層的処理による複数の撮像画像間のマッチング . . . . .	54
4.2.2	統計的処理による撮像画像中のぼけ関数の推定 . . . . .	57
4.2.3	実画像を用いた実験とその評価 . . . . .	60
4.3	カメラ特性の分析に基づく任意焦点画像の生成 . . . . .	65
4.3.1	カメラ特性からの撮像範囲補正およびぼけ関数決定とそのため の撮像システムの構成 . . . . .	65
4.3.2	テストチャートを用いたカメラ特性の分析 . . . . .	67
4.3.3	実画像を用いた実験とその評価 . . . . .	71
4.4	まとめ . . . . .	74
5	任意焦点画像生成のための演算手法 . . . . .	76
5.1	はじめに . . . . .	76
5.2	信号处理的統合における反復再構成の収束性 . . . . .	77
5.3	周波数領域への変換に基づく演算手法 . . . . .	81
5.3.1	反復的復元手法への適用 . . . . .	81
5.3.2	一般的な鮮鋭画像復元手法の応用 . . . . .	83
5.4	グラフィクスアクセラレータ上での高速演算の実現 . . . . .	85
5.4.1	畳み込みフィルタを用いたぼけ関数の近似生成 . . . . .	85
5.4.2	アプリケーションの作成と演算時間の比較 . . . . .	86
5.5	まとめ . . . . .	88
6	信号处理的統合手法に基づく映像生成の一般化 . . . . .	90
6.1	はじめに . . . . .	90
6.2	複数の撮像画像と所望の画像との間に成立する恒等式の一般化 . . . . .	91
6.3	領域分割を必要としない領域ごとの画像処理への応用 . . . . .	92

6.3.1	各領域の強調など様々なフィルタ処理	92
6.3.2	実験とその評価	92
6.4	動き付与に基づく視差と焦点ぼけをともに操作する映像生成	94
6.4.1	近似的な映像生成の特性の検討	96
6.4.2	実験とその評価	100
6.5	まとめ	104
<b>7</b>	<b>対話的処理との協調</b>	<b>106</b>
7.1	はじめに	106
7.2	補助的な領域指定との協調に基づくより多様な映像生成	107
7.2.1	オブジェクトごとの処理への拡張	107
7.2.2	より多数の奥行きを持つ対象シーンに対する映像生成への拡張	110
7.2.3	実験とその評価	111
7.3	選択的統合処理の拡張とこれとの協調に基づく映像生成の検討	115
7.3.1	選択的統合処理の拡張	115
7.3.2	より連続的な奥行きを持つ対象シーンに対する映像生成の検討	119
7.4	まとめ	120
<b>8</b>	<b>多焦点カメラシステムの構築とこれを用いた映像生成</b>	<b>122</b>
8.1	はじめに	122
8.2	多焦点カメラの有効性	123
8.3	多焦点カメラシステムの構築	124
8.3.1	多焦点カメラの構造	124
8.3.2	多焦点カメラを用いた撮像システム	126
8.4	多焦点カメラによる撮像画像からの映像生成実験とその評価	128
8.4.1	多焦点カメラによる複数の撮像画像からの焦点画像処理	128
8.4.2	動画像の撮像とこれを用いた映像生成	132
8.5	まとめ	139
<b>9</b>	<b>結論</b>	<b>141</b>
9.1	本論文の成果	141
9.2	今後の課題	144
9.2.1	多様な撮像条件への信号処理的統合手法の適用	144
9.2.2	撮像システムの最適化	144
9.2.3	様々なアプリケーションへの展開	145
9.2.4	解像度処理と焦点ぼけ処理などを統合した高精細映像生成処理	146
	<b>参考文献</b>	<b>151</b>



## 目次

1.1	高解像度化にともなう焦点ぼけの影響の拡大 . . . . .	11
1.2	様々な撮像画像からの多様な映像生成 . . . . .	12
1.3	本論文の構成 . . . . .	17
2.1	撮像画像からの超解像による高解像度化の問題 . . . . .	19
2.2	撮像画像からの焦点ぼけを抑制する鮮鋭化の問題 . . . . .	19
2.3	リングングを判定基準とするぼけ関数の推定 . . . . .	22
2.4	ある焦点合わせにおける対象の奥行きとぼけの程度の関係 . . . . .	22
2.5	高周波成分を基準とする手法の問題点 . . . . .	24
2.6	2つのピンホール開口を持つ多重フォーカスカメラ ( $u$ : 対象までの距離, $f$ : レンズの焦点距離, $v$ : 合焦フォーカス位置) . . . . .	25
2.7	反復による高周波成分の復元 . . . . .	27
2.8	補間処理のための複数画像の撮像条件 . . . . .	28
2.9	格子を用いたマッチングに基づく複数画像の統合 . . . . .	28
2.10	モザイク処理のための複数画像の撮像条件 . . . . .	29
2.11	モザイク処理に基づく複数画像の統合 . . . . .	29
3.1	重ね合わせによる画像取得モデル . . . . .	34
3.2	全焦点画像の再構成シミュレーション: (a) 対象シーンに想定した奥行き変化の模式図, (b) シミュレーションに利用した原画像, (c)(d) 撮像画像 $g_1, g_2$ とある水平1ラインの輝度値変化の原画像との比較, (e) 再構成された全焦点画像とある水平1ラインの輝度値変化の原画像との比較 . . . . .	37
3.3	反復による全焦点画像への収束を表す2乗平均誤差の変化 . . . . .	38
3.4	任意焦点画像の生成シミュレーション . . . . .	40
3.5	反復復元により生成された画像と撮像画像とのある水平1ラインにおけるG成分変化の比較 . . . . .	41
3.6	反復による所望の画像への収束を表す2乗平均誤差の変化 . . . . .	41
3.7	焦点合わせを変化させていくような画像の生成 . . . . .	42
3.8	対象シーンの奥行きが3層にわかれる場合における任意焦点画像生成のシミュレーション . . . . .	44

3.9	遮蔽モデルを考慮した撮像画像の合成	46
3.10	選択的統合手法および信号处理的統合手法により再構成された全焦点画像の比較	47
3.11	奥行きのはずれによる再構成画像への影響	49
4.1	各撮像画像間の撮像範囲のはずれ	52
4.2	各撮像画像中のぼけ関数の決定	52
4.3	様々な焦点画像処理手法の流れ	53
4.4	ガウシアンピラミッドの構成と階層的マッチング	55
4.5	ガウシアンフィルタによるピラミッドの構成	55
4.6	各層でのマッチング	57
4.7	焦点外れ画像の合成による鮮鋭領域の判定	58
4.8	典型的な鮮鋭判定結果	60
4.9	ぼけの程度 $R$ 推定のための 3 次関数近似	60
4.10	画像処理に基づく前処理からの任意焦点画像生成の実験：その 1	62
4.11	全焦点画像の再構成結果の比較 (a) 近景領域の左上部分 (b) 鮮鋭判定結果 (一部拡大)(c) 選択的統合手法 (一部拡大) (d) 信号处理的統合手法 (一部拡大)	63
4.12	画像処理に基づく前処理からの任意焦点画像生成の実験：その 2	64
4.13	各フォーカス値に対応する奥行きと撮像範囲	66
4.14	撮像システムの構成	67
4.15	カメラ特性の分析に用いるテストチャート	68
4.16	撮像範囲補正のための測定結果	69
4.17	ぼけの程度 ( $R$ ) 測定結果	70
4.18	カメラ特性の分析に基づく前処理からの任意焦点画像生成の実験	72
4.19	対象シーンがより複数の奥行きを持つ場合の任意焦点画像生成の実験	73
5.1	各 $v_i$ の動く範囲とその独立性	79
5.2	信号处理的統合手法における復元問題の特徴	80
5.3	周波数領域上での反復再構成に基づく生成画像	82
5.4	周波数領域上での除算に基づく生成画像	84
5.5	グラフィクスアクセラレータを用いた任意焦点画像生成のためのアプリケーション	87
5.6	演算時間測定の場合	87
5.7	グラフィクスアクセラレータを用いた高速演算による生成画像	88
6.1	領域の切り出し	93
6.2	遠景領域に対する高域強調処理	93

6.3	各奥行きに対する動きの付与	95
6.4	$h$ に対応する畳み込みフィルタ	96
6.5	撮像画像の雑音成分の影響	98
6.6	近景オブジェクト	99
6.7	遠景オブジェクト	99
6.8	ある水平 1 ラインにおける輝度値	99
6.9	再構成された全焦点画像	99
6.10	再構成画像の輝度値	99
6.11	視差画像の生成	99
6.12	遠景のぼけた視差画像の生成	99
6.13	視差を含む場合の生成画像の輝度値	99
6.14	視差を含む任意焦点画像の生成	101
6.15	実画像における視差を含む任意焦点画像の生成	103
6.16	ある水平 1 ラインにおける撮像画像の輝度値変化	104
6.17	視差を含む生成画像の輝度値変化	104
7.1	対話的処理との協調によるオブジェクトごとの処理手法	108
7.2	オブジェクトごとの焦点ぼけの調整	109
7.3	対話的処理との協調による多様な映像生成処理	109
7.4	4 層の奥行きを持つ対象シーンの補助的な領域指定による複数の 3 層から構成される領域への分割	111
7.5	実画像を用いたオブジェクトごとの焦点ぼけの調整の実験	112
7.6	実画像を用いたより多数の奥行きを持つ対象シーンに対する映像生成の実験	114
7.7	選択的統合処理に基づく任意焦点画像生成	116
7.8	選択的統合処理に基づく任意焦点画像の生成シミュレーション	117
7.9	選択的統合処理に基づく任意焦点画像生成の実験	118
7.10	信号処理的統合手法と選択的統合手法の対話的処理による協調	119
8.1	動物体を対象とする場合の撮像条件の問題	123
8.2	焦点画像処理用撮像カメラの構成図	124
8.3	焦点合わせによる撮像範囲の変化	124
8.4	多焦点カメラの外観	125
8.5	多焦点カメラシステムの構成	125
8.6	PC ベースの焦点画像処理システムの構成	127
8.7	撮像範囲のずれの補正手法	129
8.8	各撮像画像の共通領域の切り出し	129
8.9	多焦点カメラからの任意焦点画像生成	130

8.10	奥行きごとのぼけの程度の差がより大きくなった場合の生成画像 . . . . .	131
8.11	動物体に対する焦点画像処理 (その 1) . . . . .	133
8.12	動物体に対する焦点画像処理 (その 2) . . . . .	134
8.13	動物体に対する焦点画像処理 (その 3) . . . . .	135
8.14	ズームレンズの特性に起因すると思われる焦点ぼけの中心位置の移動 . . . . .	136
8.15	多焦点カメラ自身の視点の移動と任意焦点画像生成 (その 1) . . . . .	137
8.16	多焦点カメラ自身の視点の移動と任意焦点画像生成 (その 2) . . . . .	138
9.1	任意焦点画像生成に基づくオブジェクトベース強調処理を利用した動画像 符号化 . . . . .	145
9.2	焦点画像処理のパノラマ画像への適用による簡易仮想環境の構築 . . . . .	146

## 表目次

4.1	フォーカス値によるぼけ半径 $R$ の変化 . . . . .	70
5.1	任意焦点画像の生成に要する時間 . . . . .	82
5.2	任意焦点画像の生成に要する時間の比較 (単位: 秒) . . . . .	84
5.3	遠景のぼけを強調した画像の生成に要する時間の比較 . . . . .	88

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 本論文の背景

近年、マルチメディア化やインターネットの発展等により、情報伝達媒体として画像という形式はますます重要な位置を占めてきている。実際に、遠隔地における情報とのコミュニケーションを効率良く行おうとする通信分野から、書籍に代わるあるいは書籍自身に対する蓄積メディアとしての CD-ROM, DVD-ROM や、製作者の意図通りの表現を目指す映画、ビデオアートなどの映像製作まで、さまざまな分野において画像情報はより利便性の高さを求めもはやデジタル化、デジタル処理を前提としつつ頻繁に利用されている。

このような状況の中しかし、撮像装置の様々な限界から取得された画像をそのまま利用するのでは目的に対し不十分な場合が多い。例えば今日、撮像素子の小型化、高性能化に伴いある程度高解像度な画像の取得が可能となっているが、ここにおいてレンズによる焦点ぼけの問題が相対的にますます顕著となり鮮鋭、高精細な画像の取得という目的においては、対象シーン中に大きく奥行き異なる複数の物体が存在した場合など常にその画素数相当の性能が引き出せるわけではない。また、単に高解像度化という面においてもいまだ、普及しつつある大画面ディスプレイや印刷等に十分な品質レベルの画像を一般的な撮像装置のみで容易に取得することはできない。

そこで、撮像した画像に何らかの処理を施すことによって本来の所望の映像を生成、取得しようとする手法が考えられている [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]。映像表現分野におけるポストプロダクションシステムの導入や一般ユーザへのデジタルカメラ等の普及は、まさにこのような処理を可能にするものであり、デスクトップ上での様々な映像編集、映像合成処理およびその応用は大きな発展を望まれているといえる [1, 2]。

本論文ではこういった撮像画像からの映像生成という枠組の中でも特に上述したような焦点ぼけの問題を中心に据え、精細な画像の取得さらには鮮鋭さ等を多様に調整する映像生成について、また逆にそのような生成、取得のために適した撮像条件、撮像装置について詳細に論じていく。

そこで以下あらためて、精細な画像取得における諸課題の整理を行い、さらに撮像した

画像の統合に基づく映像生成の多様な広がりへの概観も述べておく。

### 1.1.1 精細な画像取得における諸課題

大画面ディスプレイ、スクリーン等を用いた臨場感通信や書籍等の蓄積メディア化を含むマルチメディア環境において、HDTV レベルを越える超高精細化の実現が期待されている。このような高精細な画像の取得に関しては、画素数を十分に増加させる高解像度化と、それに加えレンズによる焦点ぼけを抑える鮮鋭化との協調が不可欠である。

- 高解像度化

一般に画像の高解像度化はまず撮像カメラにおけるデバイス的な課題として取り組まれている。高解像度化のために画素数を増加させれば1画素あたりの面積が減少し入射光量も減少する。雑音への対策として、撮像素子の高感度化が重要である。また、画素数が増加すればその読み出しも高速撮像カメラ同様非常に難しくなってくる。多くの場合、画面を分割し複数の出力線にて出力することで対応している。さらに、発熱を抑え安定動作を保証するため低消費電力化も重要な課題である。

実際に撮像素子の小型化、高性能化にともなっている程度高解像度な画像の取得が可能となっているが、あくまで上記のような問題に取り組みながらの発展であり、目的によっては十分な解像度を得ることは困難な課題であり続けている。

- 焦点ぼけを抑えた鮮鋭化

デバイス面からのアプローチだけでは上記のような撮像素子の改良による高解像度化を実現した場合においても、撮像装置における光学系の制約により必ずしも画面全体にわたって精細な画像を取得することは困難である。例えば対象シーン中にカメラからの距離が著しく異なる複数の物体が存在する場合、撮像にレンズを用いる限りどのような焦点合わせにおいても焦点ぼけの問題は不可避である。アイリス調整により、入射する光量の減少に伴う撮像素子感度の問題を犠牲にしてある程度焦点ぼけの抑圧は可能であるものの、このような形での画質劣化はやはり望ましいものではない。

さらに言えば、この問題は画像の高解像度化に従いより顕著なものとなってくる。他の条件を同一とすれば図 1.1 に示すように光学系により生じる焦点ぼけは撮像面上において常に一定であるが、高解像度化のために画素面積を小さくした撮像素子を密に配列するほどその焦点ぼけが大きく影響を与える範囲の画素数は相対的に増大することとなる。もちろん、焦点ぼけのある映像が目的となる場合もあるが、上述したような超高精細化が求められる環境のためには、鮮鋭化された画像から焦点ぼけのある画像までの多様な画像が自由に取扱えることが重要であり期待されている。

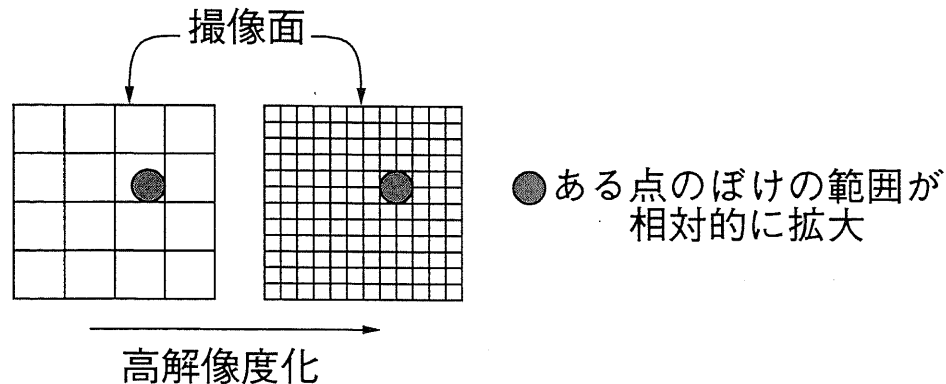


図 1.1: 高解像度化にともなう焦点ぼけの影響の拡大

このような空間方向の精細度と交差する画像品質の問題領域として動きぼけの抑圧や高フレームレート映像など時間方向の興味深い話題も多いが、本論文ではとくに上記のような空間方向の精細度の問題を対象として論じていく。

以上示したデバイスの制約や光学系による制約を考慮し、撮像装置のみでただちに所望の画像を取得しようとするのではなく、適当な条件で撮像した画像に対し何らかの処理を施すことによって本来の所望の映像を生成、取得するという手法が様々に提案されている。次項ではこういった撮像画像からの所望の画像の取得という枠組の中でも一画像からの処理手法ではなく、より多様で自由度の高い処理が可能となる複数の撮像画像からの映像生成についてその広がり の概略を述べる。

### 1.1.2 画像の統合に基づく映像生成の多様化

撮像装置の様々な制約に対応するため図 1.2 のように、一画像からの処理ではなく様々な条件で取得された画像の統合処理によりさらに多様な映像生成を行うことが考えられる。たとえば既に、デジタルカメラで撮像された複数枚の画像や、PC のキャプチャカードから取り込まれた動画像列をモザイク的に統合しパノラマ画像あるいは高解像度画像を生成するといった処理は精度の問題はあるものの実用的なソフトウェアとして一般ユーザにまで親しまれている。

多様な画像処理を担う PC との協調が、単純な一画像からの処理のみならずこのような複数の画像を用いた処理への展開を可能にしたといえるだろう。映像表現分野においてもポストプロダクションシステムの導入により撮影後の映像編集、映像合成等までを前提とした、より幅のある製作環境に急速に移行しつつある。すなわち、デスクトップ上での様々な映像編集、映像合成処理およびその応用はこれを前提とした撮像装置そのものの改良までも含みこみ大きく発展しようとしている。



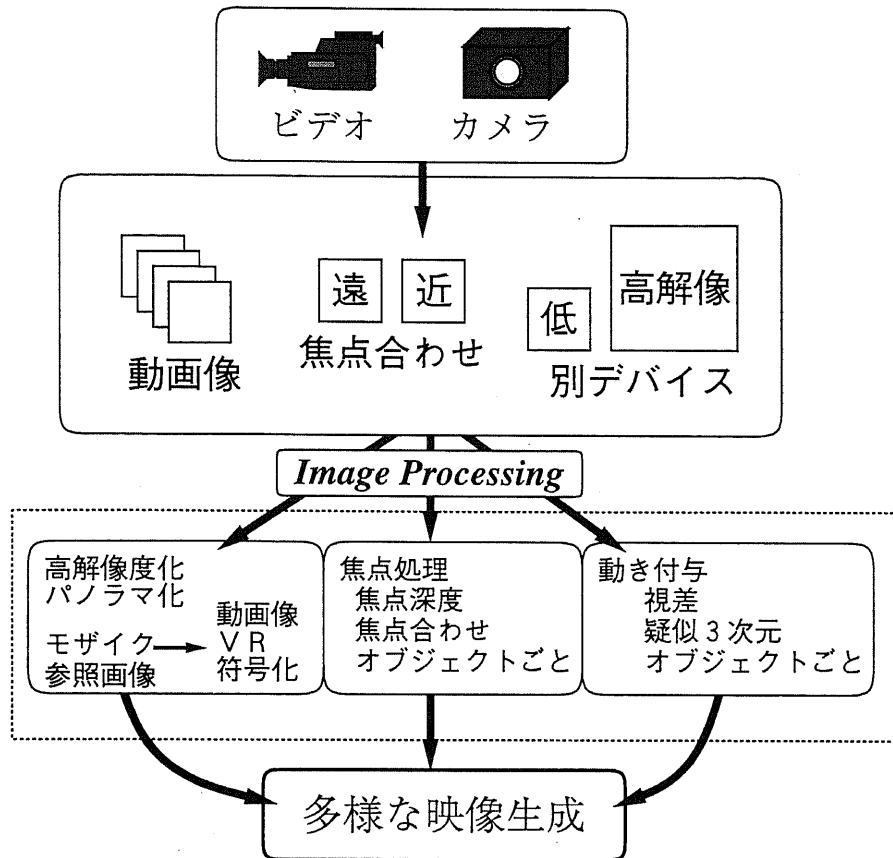


図 1.2: 様々な撮像画像からの多様な映像生成

上述のような処理のみならず複数の撮像画像からの映像生成としては、図 1.2に示した通り、高解像度の静止画像を利用したテクスチャ処理や動画画像の高解像度化，焦点合わせの異なる複数の画像からの焦点ぼけを抑圧した鮮鋭画像の取得など様々に興味深い話題がある。この中で本論文ではとくに、焦点合わせの異なる複数の画像からの映像生成処理手法について論じていく。前項において精細な画像の要件として述べたように、解像度的な課題を満たしたとしてもこのような問題は常に有意なものと思われる。

これまでこのような画像強調，画像鮮鋭化を目的とした研究としては、一画像からの劣化復元手法に関して数多くの研究が行われて来た。しかし対象シーン中に大きく奥行き異なる複数の物体が存在する場合，位置可変な焦点ぼけへの対応など一画像からの処理ではやはり非常に困難であるため，複数の焦点合わせの異なる撮像画像を利用しこれを選択的に統合することで精細な画像の再構成を行う手法が提案されている。本論文も同様にまず複数の撮像画像を用いて画面全体が鮮鋭であるような全焦点画像を再構成することから考察を始めるが，従来の選択的統合手法のないいわば単純な「切り貼り」的な手法は採

用しない。よりデジタル画像処理的な統合が可能であるという条件を生かした信号処理的な統合手法を提案する。このことにより、単に全焦点画像を再構成するのみならずより自由に鮮鋭さをわち焦点ぼけを調整する映像生成へと展開することができる。具体的には例えばぼけを抑制することによって高解像度画像の取得やマクロ撮影における焦点ぼけの抑圧を行ったり、また逆にぼけを強調することで適切な演出効果を撮像後に調整する等といったことが可能になる。このような信号処理的アプローチは、焦点深度、焦点合わせ、オブジェクトごとの鮮鋭さの調整からさらには簡易的な仮想環境、3Dテレビジョンにも利用が期待できる視差をも含んだような映像生成等まで、上述したようなポストプロダクション的な用途以外にも様々な応用へと関連していく広がりを与えるものである。これに応じて逆に、そのような映像生成、取得のためにより適した撮像条件、撮像装置の考察も必要となってくる。次節では以上述べてきた複数の撮像画像からの映像生成について本論文で対象とする範囲を整理する。

## 1.2 本論文の目的

本論文では、前節で整理したように精細な画像取得に関する諸課題への対応をふまえた画像の統合に基づく映像生成の多様な展開の中でも、とくに焦点合わせの異なる複数の画像からの鮮鋭な画像取得あるいはより自由に鮮鋭さを調整する画像生成手法やその応用を詳しく論じていく。

これまでも焦点合わせの異なる複数の画像の処理により単一の光学系では実現困難な画面全体に鮮鋭な全焦点画像を再構成する手法は検討されてきた。例えば、撮像画像中の鮮鋭領域を何らかの手法を用いて判定しこれを選択的に統合する手法等である。本論文でも同様に複数の焦点合わせの異なる撮像画像からの統合処理を前提とするが、領域分割を用いない、複数の画像から直接に所望の画像を生成するようなより信号処理的な統合手法を提案する。

具体的には、対象シーンがいくつかの奥行きにより構成されていると仮定してそれぞれの奥行きに焦点を合わせた撮像画像と所望の画像との間に成立する位置不変の恒等式を導出し、この式を解くことで焦点深度の異なるレンズで撮像したような画像や様々な焦点合わせの画像等を生成する。これまで提案されてきた手法では全焦点画像の再構成が対象であったが、本論文では任意に各奥行きのぼけの程度を抑制・強調した画像(任意焦点画像)の生成手法を、まさに複数画像からの映像生成という枠組として考察していく。本手法は、領域分割を必要とせず直接に複数の撮像画像を所望の画像へと信号処理的に統合していくため、古典的な条件である一画像からの劣化復元問題に比較してはもちろん、領域分割という非常に不安定な処理を利用せざるをえない選択的統合手法に対し、より安定で多様な生成画像を得ることができる。実際に様々な撮像画像からの生成実験を行いながらその有効性を確認する。同時に本手法の実用上の有効性を考慮しより実時間処理に近い効率的な演算手法として、周波数領域への変換に基づく手法とグラフィクスアクセラレータを用いた

手法を検討する。

任意焦点画像の生成が可能となれば、場合によっては光学的にはありえない映像の生成まで含め撮像後の映像編集、映像合成にいままでにない大きな幅を持たせることができると考えられる。またこのような信号处理的統合手法は、近似的にはあるものの奥行きごとの動きすなわち視差等を付与した映像生成を含めた様々な処理へと拡張可能である。その拡張性の及ぶ範囲をおさえながら、簡易的な仮想環境、3Dテレビジョンといった応用へ向けた考察等を行う。

さらに、前節でもあげたポストプロダクションなどの用途では複数の画像素材からの映像生成は最も基本的な作業であり、その意味で対話的処理との協調を前提とすることにより、一般には奥行きごとの処理である信号处理的統合手法を領域ごと、オブジェクトごとの処理へと拡張していくことも考えることができる。このようなユーザによる対話的処理との協調に基づく映像生成についても信号处理的統合手法の特徴を十分に利用しつつ検討する。

最終的には、以上において得られる実験結果とその評価から、信号处理的統合に基づく映像生成に適した撮像システムそのものを考察する。そして実際に、プリズムにより同時に複数の焦点合わせで対象シーンを撮像するカメラを試作し、これを用いて複数の動画像の統合処理に基づく映像生成等を行いその有効性を確認する。

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りであり、図 1.3 のように整理される。

#### 第 1 章 序論

#### 第 2 章 画像の処理および統合に基づく精細な映像生成

#### 第 3 章 焦点合わせの異なる複数画像からの信号处理的統合に基づく任意焦点画像生成

#### 第 4 章 一般的な単焦点撮像カメラを用いた焦点画像処理

#### 第 5 章 任意焦点画像生成のための演算手法

#### 第 6 章 信号处理的統合手法に基づく映像生成の一般化

#### 第 7 章 対話的処理との協調

#### 第 8 章 多焦点カメラシステムの構築とこれを用いた映像生成

#### 第 9 章 結論

以下に各章の要約を示す

第 2 章では、これまで行われてきた画像の処理あるいは統合に基づく精細な画像取得に関する研究について概要を述べる。本論文でも複数画像からの映像生成におけるあらたな提案手法においてあくまでその導入ではあるものの対象とする、焦点ぼけを抑圧する鮮鋭な画像の再構成手法の研究動向を中心にまとめていく。合わせて精細な画像取得において密接な関連研究領域となっている高解像度画像の生成処理手法も簡単に整理しておく。

第 3 章では、焦点合わせの異なる複数の画像の処理により、単一の光学系では実現困難な画面全体に鮮鋭な全焦点画像やこれを含む任意に各奥行きのはけの程度を抑制・強調した画像(任意焦点画像)を生成する手法の原理について述べる。具体的には、複数の奥行きを持った対象シーンを仮定し、それぞれの奥行きに焦点を合わせた撮像画像と所望の任意焦点画像との間に成立する位置不変の恒等式を導き、これを解くことで所望の画像の生成を行う。本手法は、従来提案されてきた複数の撮像からそれぞれのより鮮鋭な領域のみを選択的に統合して所望の画像を再構成する手法において必要となる鮮鋭領域判定のようなそれ自体精度的に非常に困難な領域分割処理を用いることなく、複数の撮像画像の信号処理的な統合に基づき直接に所望の画像を生成する手法である。この特徴により全焦点画像の安定した画像再構成が可能となるのみならず、焦点深度の異なるレンズで撮像したような画像や様々な焦点合わせの画像、さらに光学的にはありえないような画像までも生成することができる。合成画像を用いたシミュレーションにおける画像再構成結果を従来手法によるものと比較などしながら以上のような有効性を確認する。

第 4 章では、複数の撮像画像からの任意焦点画像生成のために必要となる複数画像間の撮像範囲のずれの補正と撮像画像中のぼけ関数の決定といった前処理を行うための 2 通りの手法について、実際に実画像を用いた実験を行いながら述べていく。まず、階層的なマッチングによる撮像画像間のレジストレーションと劣化予測に基づくぼけ関数の推定といった画像処理を用いた手法を示す。次に、撮像に用いるカメラ特性をあらかじめ測定しテーブル化しておくことにより、撮像画像ごとの処理によらず撮像時のカメラパラメータとこのテーブルからただちに撮像画像間のレジストレーションとぼけ関数の決定を行なう手法を示す。前者は、焦点合わせのみ変化させて撮像した複数の画像であれば適用可能であり、より一般的な条件に対応した画像処理に基づく手法といえる。逆に、後者は本手法の目的である画像取得、画像生成という観点をさらに明確にした場合の、より撮像システムそのものにまで立ち入った手法である。

第 5 章では、第 4 章に続いて任意焦点画像生成の実際の利用のために、より効率的な画像再構成の演算手法を検討する。第 4 章まででは位置不変の恒等式を解くにあたって反復的な再構成手法を用いてきたが、まずその収束性についての議論を行っておく。続いて、位置不変の恒等式を周波数領域上に変換することでより効率的な再構成が可能となることを示す。またこれとは別に、グラフィクスアクセラレータ上でぼけ関数の畳み込みを実現することにより大幅に計算時間を短縮できる手法も示す。任意焦点画像の再構成において領

域分割など複雑な処理を必要としない信号处理的統合手法の柔軟な特徴により様々な演算手法の提案が可能である。周波数ベースの手法は動画像のリアルタイム処理までを対象とするような専用チップ化の可能性を期待させるものであり、グラフィクスアクセラレータを用いる手法も既に現在のプラットフォーム上で、映像編集、映像生成という意味において実際に十分高速に所望の画像を生成することができる。

第 6 章では、以上までに論じた複数の撮像画像からの信号处理的統合を用いた映像生成において導入される位置不変の恒等式をとらえ直しより一般化することで、近似的生成も含めさらに多様な所望の画像を生成する手法を検討する。実際に、信号处理的統合手法の特徴を生かした領域分割を必要としない領域ごとのフィルタリングといった非常に有用な映像処理や、複数の焦点画像から生成された任意焦点画像にさらに領域ごとに動き、疑似的な視差を与える手法への拡張が可能となる。撮像後の映像編集、映像合成等により幅をもたせることができる以上のような信号处理的統合手法の応用をその適用範囲の考察も含め詳細に論じていく。

第 7 章では、ユーザによる対話的な処理との協調によりさらに多様な画像の生成が可能となることを示す。第 6 章までの信号处理的統合手法に基づく映像生成は奥行きごとの独立な処理に限定されていたが、対話的に簡易な領域指定を行うことにより例えば同じ奥行きに対象が 2 つある場合でもそれぞれの領域ごと、オブジェクトごとに独立にぼけや視差を調整することが可能となる。ここでも信号处理的統合手法の特徴として正確な領域分割は用いる必要がない。このような対話的な映像生成処理は実際の撮像後の映像編集、映像合成処理に非常に適合した有意なものと思われる。また同時に、従来の選択的統合手法の拡張も行い、両手法の特徴を対話的に利用するより効率的な映像生成手法も検討する。

第 8 章では、第 7 章までに得られる実験結果とその評価から、本論文で論じたような信号处理的統合に基づく映像生成に適した撮像システムそのものの条件を考察し実際に構築を行う。具体的には、プリズムと前後動する撮像面により同時に複数の焦点合わせで対象シーンを撮像することのできる多焦点カメラを試作し、これと GPI による同期録画の可能な PC ベース非圧縮ディスクレコーダ等を組み合わせて、動画像にも対応した映像取得、生成処理システムを構築する。実際に複数の動画像の統合処理に基づく映像生成を行いその有効性を確認する。

第 9 章では、本論文の研究成果をまとめ、残された課題や提示された今後の研究の方向性について整理する。本論文では焦点合わせの異なる撮像画像からの映像生成のみを扱うが、第 6 章などで論じた信号处理的統合手法の一般化においては、より多様な撮像条件からの映像生成も示唆される。また、このような複数画像からの信号处理的統合に基づく映像生成手法をより実際的な処理技術として利用する様々なアプリケーションも十分に検討可能である。例えば、領域強調処理に基づくオブジェクトベース符号化や書籍に対する精細なデジタル画像入力、あるいはパノラマ画像に視差画像生成処理を適用することによる簡易的な仮想環境の構築などが考えられる。さらに、近年急速に研究の進むモザイク統合

処理や参照画像を利用した高解像度化と本論文で論じた焦点画像処理の協調による高精細画像処理は前節までに述べたように最も基礎的で重要な画像取得に関する課題として非常に興味深く考察されるべきものであろう。本論文の成果から多様な方向性への展開が期待される。

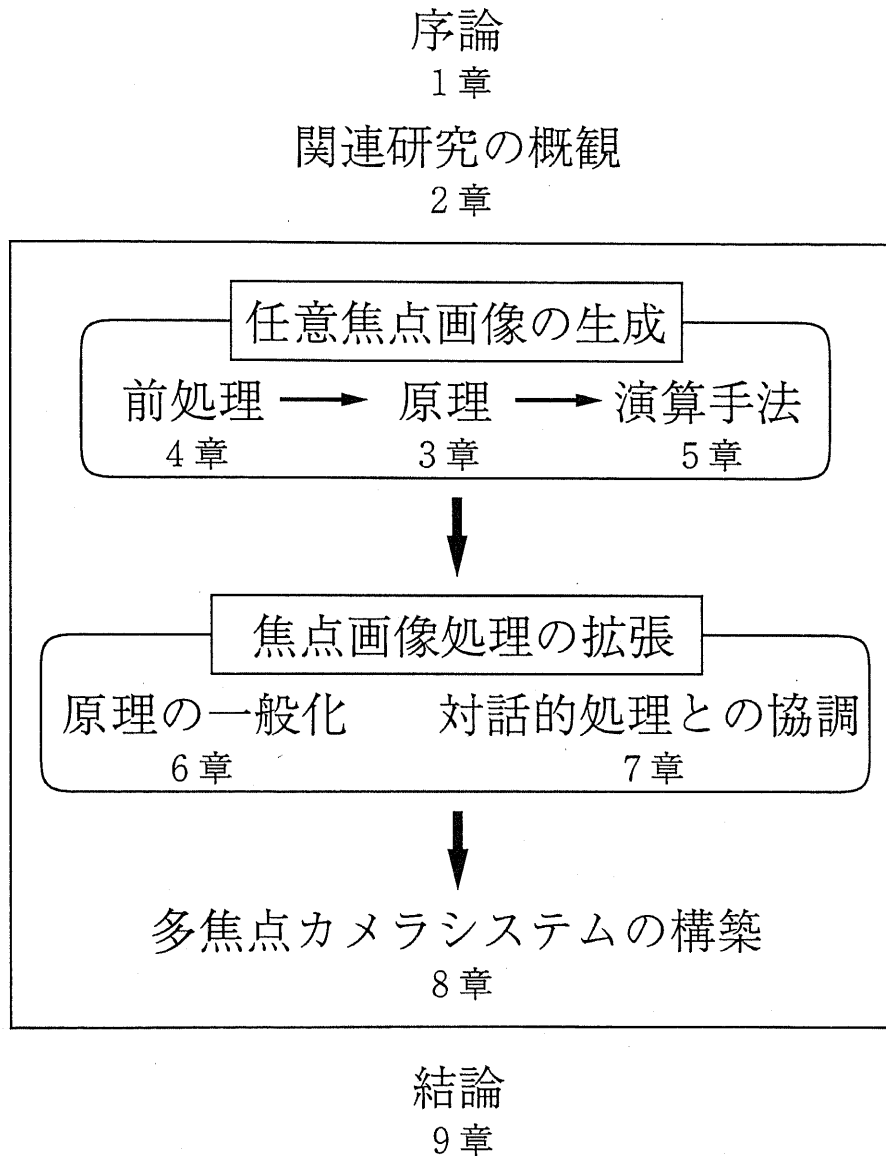


図 1.3: 本論文の構成

## 第 2 章

### 画像の処理および統合に基づく精細な映像生成

#### 2.1 はじめに

前章で述べたように本論文の背景としては、所望の画像の取得を一画像、複数画像を問わず撮像画像から何らかの画像処理を用いて生成することにより実現可能とする映像表現環境の普及があるといえる。本章ではこのような映像生成の中でもとくに、画像の精細さを調整することを目的としてこれまで行われてきた関連研究について簡単に概要を述べる。

ある撮像画像の高解像度化あるいは焦点ぼけの抑制による鮮鋭化はともいわず高周波成分の復元を行うことに他ならない。2.2節ではまず、これに対してもっとも基礎的なものとして詳しく検討されてきた一画像からの信号処理的復元手法について概説しその問題点を論じる。続いて、所望の画像の生成という目的そのものをあらためて明確にとらえなおすことにより、一画像からの復元手法の様々な問題点へに対応することが可能なものとして提案されている、撮像条件の異なる複数の画像の統合に基づく映像生成手法について簡単に述べる。

以上のような流れの中、焦点ぼけおよび解像度について具体的に行われている研究を2.3節と2.4節にそれぞれ示す。個々の提案の特徴に従い分類を行い各手法の概略を説明する。

最後に2.5節で、とくに本論文で取り扱う焦点合わせの異なる複数画像からの映像生成に関して、2.3節で述べたような研究動向をふまえ課題を整理し、第3章以下に行う提案の方向性を示しておく。

#### 2.2 高精細画像の取得手法

##### 2.2.1 一画像からの信号処理的復元手法の問題点

高精細画像の取得のためにある撮像画像に何らかの処理を施してこれを生成しようとする場合、ここで必要となる処理すなわち超解像による高解像度化あるいは焦点ぼけの抑制による鮮鋭化は、ある意味でどちらも高周波成分の復元とみなすことができる。ただし、撮

像画像  $G$  が所望の画像  $F$  から  $G = HF$  の形で  $H$  により劣化したものだと考えると、図 2.1、図 2.2 に示すようにそれぞれの高周波成分の劣化は異なる形を持っている。

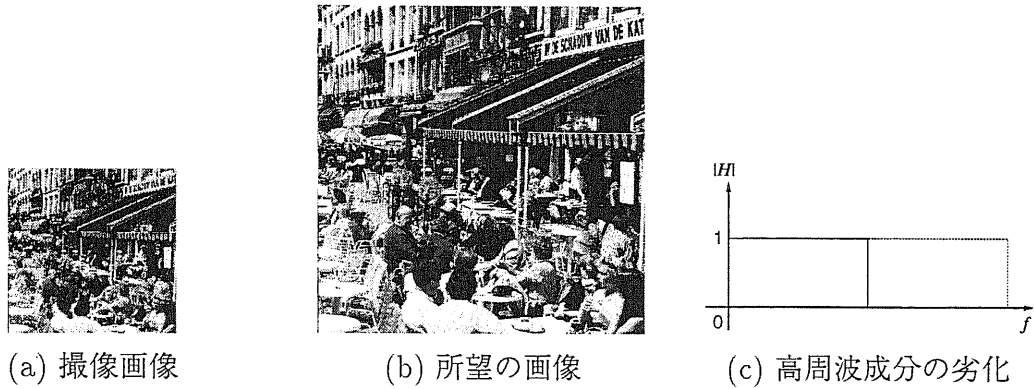


図 2.1: 撮像画像からの超解像による高解像度化の問題



図 2.2: 撮像画像からの焦点ぼけを抑制する鮮鋭化の問題

まず、超解像による高解像度化という問題においては一般に、撮像画像は所望の画像に対してその高周波成分が完全に失われていると見なされる。このような問題に対しては、2.4.1項に示す反復復元を用いる信号処理的な超解像手法のように、何らかの拘束条件を仮定、導入しこれに基づいた推定という形で復元を行わなければならない、その意味で必ずしも安定した再構成画像が得られるわけではない。

逆に、焦点ぼけによる劣化から鮮鋭な画像を復元する問題の場合には、高周波成分は劣化はあるもののまったく失われているというわけではない。  $H$  が与えられていれば理想的には所望の画像の復元が可能である。もちろん、円柱型のぼけ関数などを仮定すれば  $H$  に零点を持つことになり、また雑音や輝度値の量子化などの影響を考えれば、このような劣化復元も容易な問題とはいえない。どのような劣化が生じているか、すなわち  $H$  の推定も一



般には必要である。さらに、高精細画像の取得において重要なのは、焦点ぼけが画面一様ではなく領域ごとの奥行きにしたがって様々な程度で生じてしまうような場合である。このような  $H$  の推定まで含めた復元問題とは、つまり撮像画像に対してどの程度の鮮鋭化強調をどの領域に行うかということであるが、これに対しては 2.3.1 項に示すように、過大な強調処理により生じる輝度値の範囲を逸脱するようなリングング現象の発生を基準として適当な閾値を用い領域ごとの劣化の程度を推定し、これにより所望の画像を復元しようとする手法などが提案されている。しかし、リングング現象はある程度の指標とはなるものの、実際の劣化の程度と必ずしも一致せず精度の良い推定には十分とはいえない。いずれにせよ焦点ぼけの抑制による鮮鋭化も、その劣化の推定の問題も含め一画像からでは安定した再構成画像の取得は非常に困難である。

以上のような、いわば一画像からの信号処理的な精細画像の復元手法の様々な困難に対し、精細な画像の取得という目的を明確にし、異なる条件で撮像した複数の画像を統合して所望の画像を生成する問題として新たな提案を行っていく研究がなされている。次項ではこれらの、撮像条件の異なる複数画像の統合に基づく映像生成手法について、その従来手法に対する利点や新たに論じられるべき課題を簡単に整理する。

### 2.2.2 撮像条件の異なる複数画像の統合に基づく映像生成

精細画像の取得という目的においては一画像からの処理手法よりも撮像条件の異なる複数の画像を用いることでより多くの情報を利用することが可能となり、それらの画像の統合に基づいて効率的かつ安定に所望の画像を生成することができる。むしろその統合のためには新たな処理手法が必要となる。

例えば、対象シーンの奥行きが一様ではなく各撮像画像中で様々な程度に変化する焦点ぼけを抑制し、画面全体にわたって鮮鋭な全焦点画像を再構成しようとするならば、まず焦点合わせの異なる撮像画像を利用することが考えられる。2.3.1 項で述べる手法等では、領域ごとにその奥行きにしたがって各撮像画像においてぼけの程度が変化することに基づき、それぞれの領域におけるぼけ関数を推定する。この推定結果から領域ごとに適当な程度の鮮鋭化強調を行い所望の画像の再構成を行う。あるいは 2.3.2 項に示すように、奥行きがいくつかの層に分離されていると仮定しそれぞれの奥行きに焦点を合わせた各撮像画像において鮮鋭な領域を判定することでその領域の選択的な統合を行い全焦点画像を再構成する手法も多く提案されている。また、このような問題設定は 2.3.3 項の通り、対象の 3 次元構造推定とも関連してくる。

撮像装置の解像度以上の画像の取得においても、複数の撮像画像を利用することは有効である。もっとも一般的な手法では 2.4.2 項のように、対象をカメラを動かしながら複数枚撮像しそれらのフレーム間で少数画素精度のレジストレーション推定を行いこれに従い複数の撮像画像を互いに補間的に統合することで高解像度な画像を生成する。これと少し異なる立場として 2.4.3 項に示すような、モザイク的に複数の撮像画像を統合することで画素

数の多いすなわち高解像度の画像を再構成する手法も提案されている。この場合においても各撮像画像間のレジストレーション処理が課題となる。

以上のように、複数の撮像画像からの精細画像の生成という問題においては様々に新たな処理手法が要求される。次節から、焦点ぼけの抑制、高解像度化にわけてそれぞれ具体的にその研究動向を分類説明しその特徴や問題点を概説していく。

## 2.3 焦点画像処理の研究動向

### 2.3.1 信号处理的復元に基づく鮮鋭画像の再構成手法

焦点ぼけによる劣化からの鮮鋭画像の復元として最も基本的なものは、一様なぼけを持つ一画像からの復元である。すなわち、撮像画像  $g$  と所望の画像  $f$  の関係がぼけ関数  $h$  の畳み込みを用いて、

$$g = h * f + n \quad (2.1)$$

と表されるとき  $g$  から  $f$  を復元する問題である。ただしここで  $n$  は雑音を表す。この問題に対する解法としては周波数領域において

$$F = \frac{G|H|^2}{H(|H|^2 + \Gamma)} \quad (2.2)$$

を用いることが多い (Wiener Filter)[15]。もちろん  $H$  は何らかの形で知られていなければならず、また一般に  $\Gamma$  は経験的に決定する必要があるパラメータである。ところで、精細画像の取得などより実際的な問題として対象シーンが様々な奥行きを持つ場合には画面一様のぼけとはならず、撮像画像中で領域ごとにはぼけの程度は変化することとなる。すなわち、(2.2) 式を用いた復元を行うとしても領域ごとに  $H$  等を調整せねばならない。この領域ごとの  $H$  すなわちぼけ関数の推定を行う手法として、以下に示すようにいくつかの手法が提案されている。

まず、一画像から位置変化するぼけ関数を推定する手法として、鮮鋭化強調によるリングング現象を利用するものがある。例えば、ぼけ関数がガウス関数により近似されとした場合、その分散  $\sigma^2$  を様々に変化させたガウス関数によるぼけを仮定して (2.2) 式等で実際に鮮鋭化復元を行った画像を複数生成する。ある程度以上に過大な鮮鋭化強調が施された場合、その領域には輝度値の負となる画素を生じる。このようなリングング現象は図 2.3 に示すように、本来のぼけの程度  $\sigma$  以上で復元を行ったときにその画素数の急激な増加を伴うことが知られている。そこで領域中に生じるこのような画素数の割合に適当に閾値を与えることで本来の  $\sigma$  を推定し、これを用いて鮮鋭な所望の画像を再構成する。この手法の問題点としては、ある程度まとまった領域ごとにしかぼけ関数の推定を行うことができず遠近の奥行き境界などは適切な処理が困難であるということ、リングング現象は実際には

あくまで上限を抑える指標でしかないため  $\sigma$  の推定の精度もやはりそれほど安定したものとはいえないということがある。

焦点合わせの異なる複数の撮像画像から各領域におけるその焦点ぼけの変化を利用しぼけ関数を推定する手法も提案されている [26]. ある領域で鮮鋭な所望の画像  $f$  が空間位置の 3 次関数で表され, またぼけ関数が方向によらず対称性を持つとれば撮像画像との間に  $h$  の分散を用いて以下のような関係を導くことが可能である. すなわち

$$f = g - \frac{\sigma^2}{4} \nabla^2 g. \quad (2.3)$$

よって, 2 枚の焦点合わせの異なる撮像画像  $g_1, g_2$  があれば

$$f = g_1 - \frac{\sigma_1^2}{4} \nabla^2 g_1 = g_2 - \frac{\sigma_2^2}{4} \nabla^2 g_2 \quad (2.4)$$

となる. また, 幾何光学的な拘束として対象の奥行き深さを  $d$  とすれば,

$$\frac{1}{d} = \frac{\sigma_1 - C_1}{m_1} = \frac{\sigma_2 - C_2}{m_2} \quad (2.5)$$

の関係がある. ここで  $C_i, m_i$  はあらかじめ測定しておく等の必要はあるものの, 対象の深さによらず焦点合わせのパラメータのみから定まる値である. ある焦点合わせにおけるこの関係を図 2.4 として示す. 以上の (2.4) 式, (2.5) 式から  $\sigma_1, \sigma_2$  を求め, これを (2.4) 式に適用することで所望の画像の再構成を行う. 本手法は複数の撮像画像から画像中で位置変化するぼけ関数を推定する手法として, 問題を周波数領域へと展開せず演算量を抑えながら (2.3) 式のような S-Transform (Spatial Domain Transform) の範囲で処理を行うことの可能な興味深いものではあるが, 3 次関数による近似の仮定から大きくはずれる領域で再構成が不安定になるという問題点を持つ.

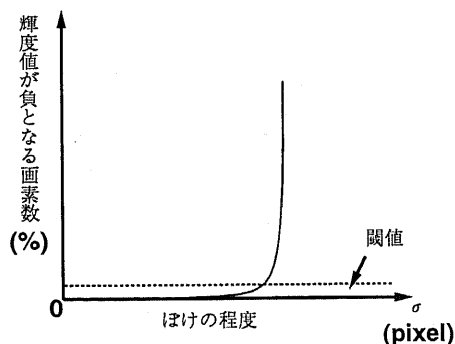


図 2.3: リンギングを判定基準とするぼけ関数の推定

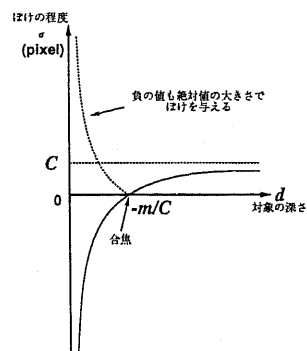


図 2.4: ある焦点合わせにおける対象の奥行きとぼけの程度の関係

以上までのような手法では問題の仮定上多くの場合、ぼけによる劣化を生じた領域を復元する処理が必要であり、ぼけ関数の推定が精度よく行われたとしても雑音の問題まで含めれば所望の画像の安定かつ良好な再構成には必ずしも十分なものとはいえないと考えられる。

### 2.3.2 選択的統合処理に基づく複数画像からの鮮鋭画像再構成手法

前項の手法は、何らかの処理によりぼけによる劣化を信号处理的に復元しようとするものであった。これとは異なるアプローチとして、対象シーンがいくつか奥行きから構成されていることを仮定して、それぞれに焦点を合わせた画像を撮像しそれらの中から鮮鋭な領域のみ統合していくことで画面全体に鮮鋭な全焦点画像を再構成しようとする手法が提案されている [18]。

このような選択的統合手法 [19, 22, 24] はまったく信号处理的な復元問題をともなわないため、鮮鋭領域の安定した判定さえ可能ならば、非常に良好に再構成画像を生成することができる。前項の手法と比較すれば、撮像画像の枚数をいわば増やすことで問題を単純化していることになるが、精細な画像取得という目的を最も明確にした有効な手法と考えられる。

選択的統合手法において再構成画像の品質を決定するのは鮮鋭領域の判定の精度にはかならない。一般にぼけている画像では鮮鋭な画像と比較して高周波成分が劣化しているものと考えられるので、これをガウシアンピラミッド等の画像階層化や wavelet を用いて分析し鮮鋭領域判定を行う手法が多く提案されてきた [20, 21, 23]。

しかし実際には、このような高周波成分を基準とする手法では輝度値エッジの周辺で判定が不安定になるという問題がある。例として図 2.5(a) (焦点の合っている画像) と図 2.5(b) (焦点の合っていない画像) から、鮮鋭な部分を選択的に統合し全焦点画像を再構成する場合を考える。所望の画像の再構成のためには全て焦点の合っている画像 (a) のみが選択されるべきであるが、高周波成分を判定基準とする限りエッジ自体は正しく選択されるもののエッジから少し離れたところでは焦点の合っていない画像 (b) が選択されてしまい、(c) のようにエッジ周辺の良好な再構成は困難となる。

このような問題に対して、劣化予測に基づく鮮鋭領域判定手法が提案されている [30]。この手法は本論文の第 4 章においても提案の一部として用いることとなるものでありそこで詳しく説明するが、簡単にその考え方を述べておく。すなわち、図 2.5 で言えば鮮鋭な画像 (a) に様々なぼけの程度のぼけ関数を畳み込むことにより劣化した画像 (b) を良好に近似することは可能であるが、逆に画像 (b) にぼけ関数を畳み込んだとしても (a) を近似することはできない。注目画素に対してある程度の大きさを持った領域でこの近似の精度の最小値を求めこれを判定基準とすればエッジ周辺においてもより良好な鮮鋭判定が可能になると考えられる。実際にこのような劣化予測に基づく鮮鋭領域判定手法は、どちらの画像も劣化により変化の生じていない輝度値の一樣な領域や、判定領域内に鮮鋭領域とぼけ

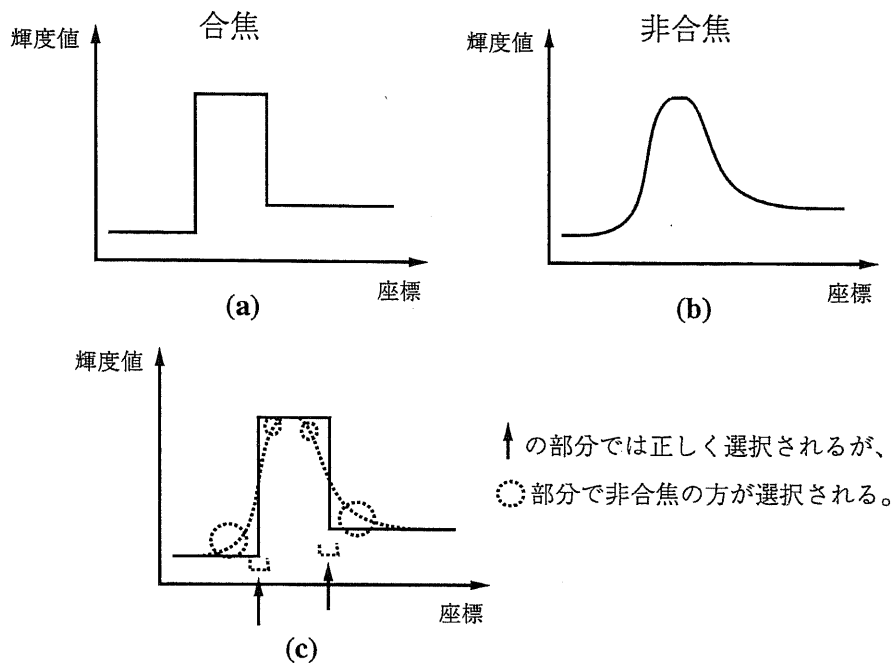


図 2.5: 高周波成分を基準とする手法の問題点

領域を同時に含んでしまう遠近の境界領域などを除き、非常に安定した判定が行える。

以上述べたような選択的統合による鮮鋭画像の再構成手法は、対象シーン中の複数の奥行きそれぞれに焦点を合わせた撮像画像を利用するという点で、鮮鋭な画像取得の目的に非常に特化した手法として評価できる。しかし、この手法をもとに例えば近景と遠景で独立に焦点ぼけの抑制、強調を行うことを考えたとしても、鮮鋭領域判定は上述したように必ずしも完全な領域分割ではないため単純にはそのような処理へと拡張することはできない。ここにおいて、何らかの不安定な領域分割を用いるざるを得ない選択的統合とは異なる新たな統合手法を提案する必要性が生じてくる。これは本論文の最も中心的な課題として次章から論じるものとなる。

### 2.3.3 焦点ぼけを利用した距離計測における関連研究

前項までとはやや目的が異なるものの関連する研究領域に、焦点合わせの異なる複数の撮像画像からの奥行き距離認識という問題がある。

このような目的に非常に特化したものとして瞳形状を構造化することにより距離計測と全焦点画像復元を同時に行なう手法が提案されている [40]。複数個のピンホールを持つ開口マスクを用いた構造化瞳により生じたぼけは、一般の円形のぼけと比較して高周波成分がそれほど劣化せず、非常にその解析に適している。以下その概略を示す。

まず、絞りを絞り込み中心光束のみを通過したときに得られるぼけを含まない画像を  $s(x, y)$  とし、瞳形状を  $a(x, y)$ , 得られる画像を  $i_m(x, y)$  とするとそれらの関係は以下の式で表される. すなわち

$$i_m(x, y) = \frac{1}{k_m^2} a\left(\frac{1}{k_m}, \frac{1}{k_m}\right) * s(x, y). \quad (2.6)$$

ここで,  $k_m$  はぼけカーネルと瞳形状と相似比であり, 図 2.6 とガウスの結像公式から

$$k_m = \frac{v - w_m}{f} \quad (2.7)$$

のように表すことができる.

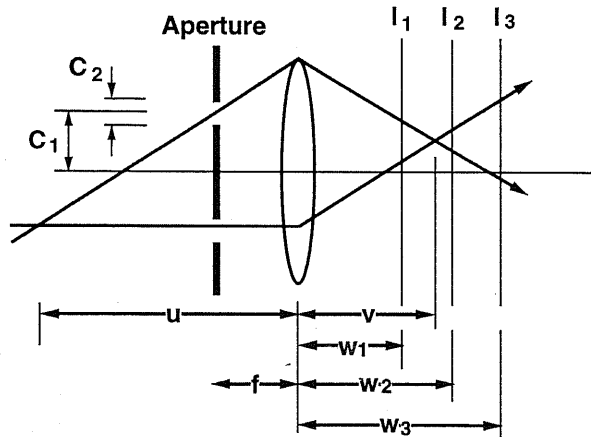


図 2.6: 2つのピンホール開口を持つ多重フォーカスカメラ ( $u$ : 対象までの距離,  $f$ : レンズの焦点距離,  $v$ : 合焦フォーカス位置)

図 2.6 に示すような 2つのピンホール開口を持つ瞳形状を用いた場合,

$$a(x, y) = \frac{1}{2}(\delta(x - c_1, y) + \delta(x + c_1, y)) \quad (2.8)$$

であるから, これを (2.6) 式に代入し,  $x$  軸方向に 1次元フーリエ変換を行うと

$$\begin{aligned} I_m(s, y) &= \frac{1}{2}(e^{2\pi j c_1 k_m s} + e^{-2\pi j c_1 k_m s}) \cdot S(s, y) \\ &= A_m(s, v) \cdot S(s, y) \end{aligned} \quad (2.9)$$

となる. ここで,  $s$  は空間周波数を表し, フィルタ  $A_m(s, v)$  は

$$A_m(s, v) = \cos\left(2\pi c_1 \frac{v - w_m}{f} s\right) \quad (2.10)$$

となる。ピンホールの開口面積は零ではなく有限の値であるからこの効果を考慮して sinc 関数を乗じ

$$\tilde{A}_m(s, v) = A_m(s, v) \cdot \text{sinc}\left(c_2 \frac{v - w_m}{f} s\right) \quad (2.11)$$

を実際の画像のスペクトル応答としている。

以上の導出に従い例えば 3 枚の焦点合わせの異なる撮像画像の  $x$  に関する 1 次元フーリエ変換をそれぞれ  $I_m(s, v)$  ( $m = 1, 2, 3$ ) とすると,

$$I_m(s, y) = \tilde{A}_m(s, v) \cdot S(s, y) \quad (2.12)$$

のように表される。これから

$$r(y, v) = \sum_{(m,n) \in P_3} \sum_s \left| \frac{I_m(s, y)}{I_n(s, y)} - \frac{\tilde{A}_m(s, v)}{\tilde{A}_n(s, v)} \right| \quad (2.13)$$

を最小にする  $v$  を求める。  $P_3$  はすべての撮像画像の組み合わせを表す。全焦点画像を復元するためには、全ての撮像画像と求められた  $v$  を用いて

$$S(s, y) = \sum_{m=1}^3 W_m \cdot \frac{I_m(s, y)}{\tilde{A}_m(s, v)} \quad (2.14)$$

としそのフーリエ逆変換を行えばよい。ここで  $W_m$  はぼけモデルから計算した重みであり、3 枚の画像のうちどの画像により十分な情報が残存しているかを反映するものである。これによりある画像のぼけの周波数応答に零点が含まれる場合にも全焦点画像が良好に復元される。

以上の手法も距離計測という目的に非常に特化されており評価されるものである。しかし、本論文の目的である鮮鋭さを調整する映像生成において距離計測結果に基づく生成を行おうとすれば、前項の手法における鮮鋭領域判定と同様、その測定に非常に高い精度が要求されることとなる。遮蔽を生じる遠近の境界領域におけるモデルからのずれや、輝度値一様な領域の問題、雑音の影響等からそのような測定処理は実際には困難である。すなわち本節において検討した範囲では、前項に示した対象シーンに対する仮定と撮像条件が本論文の目的に対してもっとも適切なものと考えられる。

## 2.4 高解像度画像生成の研究動向

### 2.4.1 反復的復元による超解像手法

2.2.1項で述べたように一画像からより高解像度な画像を復元しようとするならば、何らかの拘束条件を導入する必要がある。その代表的なものとして Gerchberg-Papoulis の反復復元手法 [46] を概説する。

図 2.7 のように拘束条件として, (a) の原画像  $f(x)$  は領域制限された画像であり, (d) の  $G(f)$  の形に理想的な LPF が施された形で撮像されるものとする. まず (d) を逆変換し (c) を得る. これを領域制限の仮定から (e) へと限定する. (e) を再び周波数領域に変換し (f) を得る. この (f) と既知情報 (d) を統合し (h) とする. (d-c-e-f-h) を 1 回の処理として以下これを反復することで高周波成分まで含んだ原信号 (a) を復元することができる.

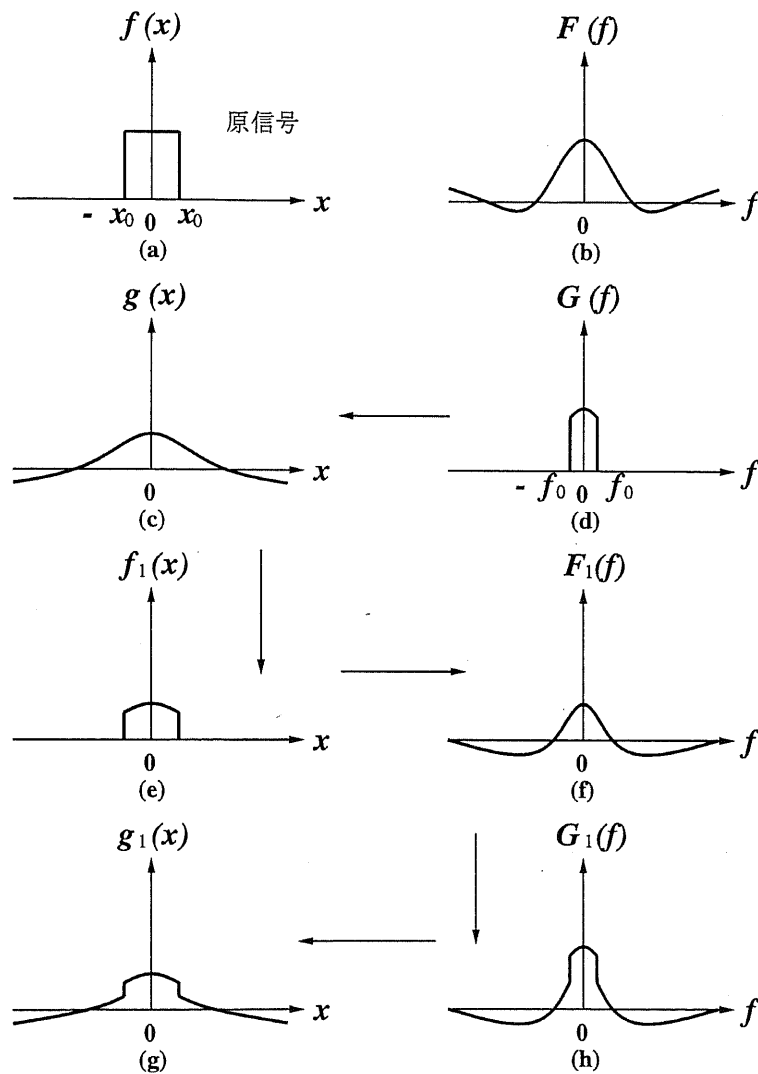


図 2.7: 反復による高周波成分の復元

なお実際は撮像画像そのものも (c) とは異なる形であり, Gerchberg-Papoulis の手法を画像の高解像度化に適用するには様々な工夫が必要となる. また, もちろん拘束条件の妥当性にも問題があり, 高解像度画像の取得という目的が明確な場合は次項以降に示すように撮像条件の異なる複数画像の統合に基づく再構成手法が多く提案されている.



### 2.4.2 補間的な処理に基づく複数画像の統合

複数画像からの高解像度画像の再構成としてはまず、図 2.8 のようにカメラを動かしながら対象を撮像しこれを補間的に統合する手法がある。このためには少数画素レベルでレジストレーションを行わなければならないが、これには例えば図 2.9 のように格子を用いた勾配法によるマッチング等が提案されている [47, 48]。

このようなレジストレーションに基づき、ある基準となる高解像度化したい画像に対し他の複数の参照画像から輝度値を補間的に統合していく。ただし、統合された高解像度画像において参照画像に対応する画素が存在しない場合は、周辺画素からさらに補間処理が必要となる。

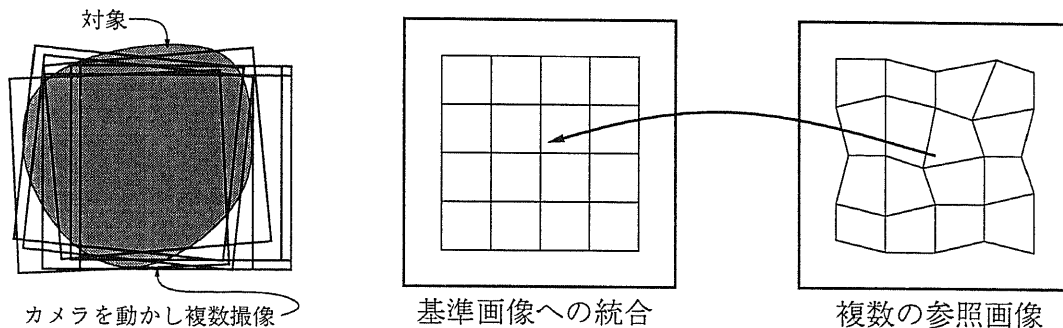


図 2.8: 補間処理のための複数画像の撮像条件  
図 2.9: 格子を用いたマッチングに基づく複数画像の統合

以上のような処理においては、まず少数画素レベルでの精度の良いマッチング処理は非常に困難であるという問題がある。本来この問題において高周波成分は失われているのであり、少数画素レベルでのマッチング処理とは前項と同様ある拘束条件を仮定していることに他ならない。その意味で妥当な再構成画像を得るための手法といえる。また、それぞれの撮像画像において画素の輝度値はインパルス応答ではなくある程度の面積を持った積分的な値であるため、撮像画像に対して再構成可能な統合画像の解像度は限定される。

整理すれば本手法には、拘束条件を仮定せざるを得ないもともと情報の不足している補間処理の問題と、画素自身の持つ輝度値への積分的効果による高解像度化処理の限界があり、ある対象シーンの高解像度画像の取得という目的においては撮像条件まで含めて見た場合それほど良好なアプローチとは考えられない。そこで、同じく複数画像からの統合に基づく高解像度画像の再構成手法でありながら、以上のようないわばサブピクセルレベルの処理によらず、モザイク的に整数画素レベルで統合を行っていく手法が提案されている。これを次項に示す。

### 2.4.3 モザイク処理による複数画像の統合

前項のように実際には精度の問題から非常に困難ともいえる画素の解像度未満の処理によらず、より整数画素レベルでの統合を行うモザイク処理に基づく高解像度画像の再構成手法 [49, 50, 51, 52] を以下に概説する。

まず、図 2.10 のように適当に互いに重なりあう部分を持たせながらカメラを動かし対象を撮像していく。この重複部分をもとにマッチングを行いこれに基づき図 2.11 の形でモザイク処理を用いた高解像度画像への統合を行う。複数の画像が重複する部分は平均値を取るなどの処理を行えば良い。

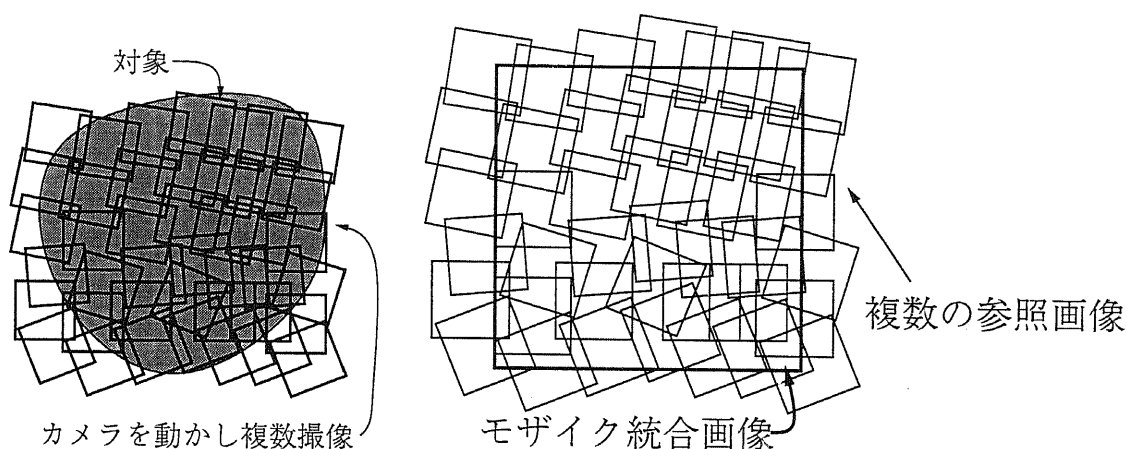


図 2.10: モザイク処理のための複数画像の撮像条件

図 2.11: モザイク処理に基づく複数画像の統合

再構成された統合画像の重複部分の画質はマッチングの精度に影響されるが、撮像画像の解像度に比して大幅に劣化することはない。なお、統合画像において若干の歪みを生じるため、同領域に対する低解像度の参照画像を用いるなど何らかの補正処理が実際には必要である。しかし、概ね解像度の問題としては非常に精度よく再構成画像を得ることができる。

以上のようなモザイク処理に基づく複数画像からの高解像度画像再構成手法は、適切な撮像条件を利用することにより対象の高解像度画像の取得という目的を良好に実現している。前節、本節に共通して言えることであるが、撮像条件を適切に選択しこれを十分に利用することが所望の画像の再構成のためには非常に重要である。本論文で論ずる焦点画像処理においても常にこれに従い提案を行っていく。

## 2.5 まとめ

撮像後のデジタル処理を前提とするような映像製作環境の普及に伴い、画像の精細さを調整するような映像生成処理の可能性がひろがり実際にその発展が期待されている。本章ではこのような何らかの画像処理あるいは画像統合に基づく高精細な画像の生成取得手法について、焦点ぼけの鮮鋭化、高解像度化の順にそれぞれ大まかな分類を行いながら概要を述べた。

焦点ぼけの鮮鋭化および高解像度化に関する様々な手法の整理により確認されたことは、目的に対してどのような撮像条件、すなわちどのような撮像画像を利用することが最も適切であるかまでを十分にふまえて映像生成手法の提案を行うことの重要性である。すなわち、高精細画像の生成取得が明確な目的としてあるならば、撮像画像において直接に高精細な画像が取得不可能だとしても、いかにして高精細画像を生成するために可能な限り十分な情報を含む形で撮像画像を得ておくかが、全焦点画像や高解像度画像の良好な再構成を行うにあたって処理手法そのものと同様に考察の対象となるべきである。

本論文は、解像度に関するデバイス的な制約である撮像素子の改善が行われたとしても残る、あるいはむしろ顕著となる撮像装置の光学的な問題、すなわち焦点ぼけの鮮鋭化あるいはその調整について論ずるが、これに関して本章では以下に示す手法を概説、整理した。

- 1) 一画像からの焦点ぼけ鮮鋭化処理と位置可変のぼけへの対応手法
- 2) 対象シーンに複数の奥行きを仮定しそれぞれに焦点を合わせた撮像画像の鮮鋭領域を選択的に統合する全焦点画像再構成
- 3) 焦点合わせの異なる複数画像からの構造推定と全焦点画像再構成

これらの手法はそれぞれの目的において有意な結果を得ているといえるが、上述したような観点から考察すれば、ほとんどの領域において鮮鋭な撮像結果がいずれかの撮像画像に含まれている 2) は対象シーンの鮮鋭な画像取得という目的においてやはり最も適切な撮像条件、十分な情報を含んだ撮像画像を用いている手法といえる。すなわち 2) の提案は鮮鋭画像生成のために、撮像条件において明らかに優位にある。

本論文の主要な目的である、全焦点画像のみならず鮮鋭さを調整するような任意焦点画像生成にもこのような撮像条件は非常に有効であると考えられるが、ここで問題となるのは、2) の選択的統合手法は 1) あるいは 3) と異なり直接に所望の画像を生成しようとする信号処理的な手法ではなく、鮮鋭領域判定に基づいていわば間接的に再構成処理を行う手法であるということである。領域分割というそれ自体非常に困難な処理に伴う判定誤りの影響が再構成画像に劣化をもたらす。とくに奥行きごとに任意に焦点ぼけを調整する映像生成処理への展開には、選択的処理をそのまま利用することは難しい。2) のような撮像条件で得られる複数の撮像画像の統合においても、1) や 3) のような信号処理的な手法を導入し直接に所望の画像を生成することができれば、より画面全体にわたって安定した再構成

画像を得ることが可能になると考えられる。従来の選択的統合手法に対していえば、複数の撮像画像の信号处理的統合手法に基づく映像生成ということである。

次章から具体的に、2)と同様の撮像条件に対して信号处理的統合に基づく新たな映像生成手法を提案していく。まず3章ではその原理について詳しく述べ、いくつかのシミュレーションおよび補助的実験によって原理の確認と本手法の特徴の検討を行う。

## 第 3 章

# 焦点合わせの異なる複数画像からの信号処理的統合に基づく任意焦点画像生成

### 3.1 はじめに

前章での考察をもとに、本論文ではまず任意焦点画像の生成を目的とした場合もっとも容易かつ適切な問題設定と考えられる、全焦点画像の選択的統合に基づく再構成手法と同様の撮像条件を採用する。すなわち対象シーンがいくつかの奥行きに分離されていると仮定しそれぞれの奥行きごとに焦点を合わせた複数の撮像画像を得ておくものとする。ただし、所望の画像の生成においては、複数画像によって得られている情報を十分に利用しながらも、選択的統合手法のように鮮鋭領域判定に基づいて各領域を合成するという手法はとらない。劣化の少ない安定した任意焦点画像の生成を行うために十分な程度の精度の良い領域分割すなわち鮮鋭領域判定は非常に困難だからである。これに対し本論文では、撮像画像を画面一様の信号処理によって直接に所望の画像へと統合する手法を提案する。

本提案手法は異なるぼけの数とその程度のみを用い、空間的にどこがどのようにぼけているかという位置情報は不要という特徴がある。これにより領域分割によらぬ複数画像からの新しい信号処理的復元手法が実現される。本手法によれば、複数画像からの映像生成とくに全焦点画像復元の目的においてはこれまで一般的であった鮮鋭領域判定に基づく選択的統合手法と異なり、画面全体に鮮鋭な全焦点画像の再構成のみならずその自然な拡張として重要なものと考えられる、任意に各奥行きのぼけの程度を抑制・強調した画像(任意焦点画像)を生成することが可能となる。具体的には上述の通り複数の奥行きを持った対象シーンを仮定し、それぞれの奥行きに焦点を合わせた撮像画像と所望の任意焦点画像との間に成立する位置不変の恒等式を導く。この恒等式は前章で最初に述べた最も基礎的な1枚のぼけ画像からの復元理論の拡張として捉えることもできる整理された形と条件をもっており、その位置不変という特徴から領域分割を用いることなく反復的に解くことが可能である。すなわち所望の任意焦点画像を直接に信号処理的に生成することが可能となる。

実際に、ユーザがパラメータを調整しさまざまな任意焦点画像を生成することにより、

焦点深度の異なるレンズで撮像したような画像や、様々な焦点合わせの画像等あるいはまた 3 層の奥行きを持つ場合などではさらに光学的にはありえないような画像までを生成することができる。このように多様な任意焦点画像の生成が可能になれば、例えば撮像後の映像編集、映像合成に、より幅をもたせることができると考えられる。また、本手法の信号处理的アプローチは第 6 章、第 7 章でみるように焦点ぼけの調整のみならず様々な映像生成へと、領域分割を用いないという非常に有効な特徴を利用しながら拡張することが可能である。

以下本章では、提案手法の原理を示したのち、いくつかのシミュレーションによってその原理の確認と本手法の特徴の検討を行う。まず 3.2 節で新しく提案する、撮像画像と所望の任意焦点画像との間に成立する位置不変の恒等式の導出とこれに基づく反復復元の原理を 2 層の奥行きを持つ対象シーンを例として述べる。続いて 3.3 節で全焦点画像あるいは任意焦点画像が原理通り再構成されることを合成画像を用いたシミュレーションにより確認し、また、3 層以上などより多数の奥行きをもつ対象シーンにおける任意焦点画像生成への本手法の拡張性を検討する。3.4 節ではさらに補助的なシミュレーションにより従来手法との比較や、撮像条件における仮定からのずれの生成画像への影響などの検討を行い、本手法の特徴を詳しく論じる。

## 3.2 任意焦点画像生成の原理

撮像条件として対象シーンの奥行きは段差状に変化しているものと仮定する。以下、まず簡単のために、本節では A, B 2 つの異なる奥行きを持った領域がシーン中に存在するとして議論を進める。3.3 節で検討するように、対象シーンがより複数層、すなわち 3 層以上の奥行きを持つ場合においても同様の議論が可能である。

### 3.2.1 焦点合わせの異なる撮像画像と任意焦点画像の間に成立する位置不変の恒等式の導出

対象シーンが奥行き  $d(\vec{x}) = d_1$  or  $d_2$  (それぞれ A, B に対応) を持つとして、その全焦点画像を  $f_{all}(\vec{x})$  とする。なお、 $\vec{x}$  は画面内での座標  $(x, y)$  を示すが以下適宜省略する。このとき、いわば A, B 各層のみの画像を

$$\begin{aligned} f_1(\vec{x}) &\triangleq \begin{cases} f_{all}(\vec{x}) & (d(\vec{x}) = d_1) \\ 0 & (d(\vec{x}) = d_2) \end{cases}, \\ f_2(\vec{x}) &\triangleq \begin{cases} 0 & (d(\vec{x}) = d_1) \\ f_{all}(\vec{x}) & (d(\vec{x}) = d_2) \end{cases} \end{aligned} \quad (3.1)$$

と定義し、各層に焦点を合わせた撮像画像  $g_1, g_2$  および所望の任意焦点画像  $f$  を、ぼけ関数  $h_{ij}, h_a, h_b$  の画像全体への畳み込みを用いて 図 3.1 に示すように 2 層の重ね合わせで表す。すなわち

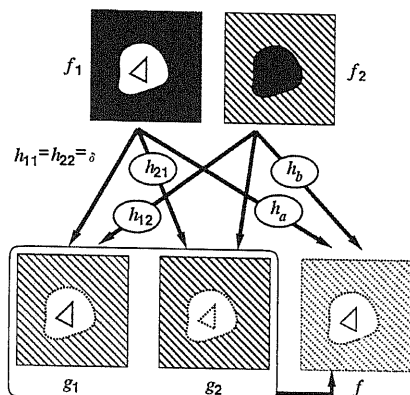


図 3.1: 重ね合わせによる画像取得モデル

$$\begin{cases} g_1 = h_{11} * f_1 + h_{12} * f_2 \\ g_2 = h_{21} * f_1 + h_{22} * f_2, \end{cases} \quad (3.2)$$

$$f = h_a * f_1 + h_b * f_2. \quad (3.3)$$

ここで,  $h_{ij}$  は撮像時に決まるパラメータであるが,  $h_a, h_b$  はユーザが指定するパラメータであり, 各ぼけはガウス関数による畳込みで表されるとする [26]. 畳込みの可換性により, (3.2) 式, (3.3) 式から  $f_1, f_2$  を消去して,

$$\begin{aligned} (h_b * h_{21} - h_a * h_{22}) * g_1 + (h_a * h_{12} - h_b * h_{11}) * g_2 \\ = (h_{21} * h_{12} - h_{22} * h_{11}) * f \end{aligned} \quad (3.4)$$

を導くことができる. (3.5) 式は前述の仮定の下で, 撮像画像と目的とする任意焦点画像とぼけ関数の間になりたつ位置不変の恒等式となる. まず撮像の条件である  $h_{11} = h_{22} = \delta(\vec{x})$  により

$$\begin{aligned} (h_b * h_{21} - h_a) * g_1 + (h_a * h_{12} - h_b) * g_2 \\ = (h_{21} * h_{12} - \delta) * f \end{aligned} \quad (3.5)$$

と整理できるが, さらに

$$\begin{cases} g = (\text{左辺}) \\ h = h_{21} * h_{12} - \delta \end{cases} \quad (3.6)$$

とすれば

$$g = h * f \quad (3.7)$$

と書くことができる.  $h_{21}, h_{12}$  は, 4.2 節で示すように統計処理を用いて求めたり, または 4.3 節で示すようにカメラ特性と撮影時のカメラパラメータから求めることが可能である. したがって, 与えられた  $g$  及び  $h$  から  $f$  を求めるという基礎的な位置不変のぼけ復元問題

と同様の式と条件が得られ次節で示す反復手法により  $f$  を実際に再構成することができる。以上の定式化から明らかなように、本手法では原理的に領域分割を必要としない。

(3.2) 式, (3.3) 式のような重ね合わせによるモデル化は, Nguyen らも Depth from Focus [25, 36, 37] の解析に用いているが [38], 近景が遠景を隠す遮蔽領域付近では厳密には成立しないことが確認されている [39]. しかしながら本論文の範囲では, 重ね合わせモデルに従えば画面のほぼ全体にわたって位置不変の恒等式を導くことができ, 後に示す各種の実験からみてとれるように, 任意焦点画像の生成という目的において十分な効果が得られることから上記のモデルを採用する. また本論文では RGB 成分それぞれのぼけ関数の違いは考慮せずその推定等も全て輝度値を用いて行う. これも映像生成という目的においてはほぼ十分に無視できることによる.

(3.3) 式における  $h_a, h_b$  は任意に設定でき, 任意焦点画像とは, 撮像時とは全く異なる任意のぼけの度合をそれぞれの奥行きに独立に与えたものである. このため例えば,  $h_a = \delta$  として  $h_b$  を調整することで  $g_1$  にて焦点の合っている領域は保持したまま, ぼけていた領域のみ鮮鋭化したり, ぼけの強調を行った画像を生成できる. これは  $g_1$  と同じ焦点合わせのまま焦点深度の異なるレンズで撮像したような画像を生成していることに相当する. もちろん逆に  $h_b = \delta$  として  $h_a$  を調整した画像も同様に生成できる. また, 全焦点画像は  $h_a = h_b = \delta$  とした場合に相当する. さらに,  $h_a, h_b$  でともにぼけを与えることにより焦点合わせ位置を変更したような画像や, 対象シーンがより多層の場合においては光学的にはありえない画像までも任意焦点画像のひとつとして表される. すなわち例えば後に 3.3 節でみるように, 対象シーンが 3 層の場合においては, それぞれの奥行きに焦点を合わせた 3 枚の撮像画像を図 3.1 の画像取得モデルの拡張として 3 層の重ね合わせで表し, 同様の処理により 3 層独立にぼけを調整することが可能であり, 近景, 遠景は合焦したまま, 中景のみぼけを強調したような画像も生成することができる.

なお本論文では, ぼけ関数  $h_{ij}, h_a, h_b$  はガウス関数で表されるものとし, ガウス関数の  $\sigma$  については, 幾何光学的ぼけ半径を  $R$  としたときの

$$\sigma = \frac{R}{\sqrt{2}} \quad (3.8)$$

なる関係を用いる [26]. ただし, 実際に幾何光学モデルを検討することはしないので, 以下とくに断りのない場合は, 例えば  $R_{ij}$  は単に  $h_{ij}$  のぼけの強さに対応するパラメータと考えておいて差し支えない.

### 3.2.2 反復による任意焦点画像の再構成

連立方程式である (3.7) 式を解くことにより任意焦点画像が求められる. ここでは次の反復式を用いて撮像画像  $g_1, g_2$  から任意焦点画像  $f$  を再構成する. すなわち

$$\begin{aligned} \hat{f}_{n+1} &= -(g - h * \hat{f}_n) + \hat{f}_n \\ &= (h + \delta) * \hat{f}_n - g. \end{aligned} \quad (3.9)$$



ここで  $\hat{f}_n$  は  $n$  回目反復による任意焦点画像  $f$  の再構成である。(3.9) 式は (3.6) 式により

$$\hat{f}_{n+1} = (h_{21} * h_{12}) * \hat{f}_n - g \quad (3.10)$$

と書くことができ、さらに

$$g - h * \hat{f}_{n+1} = (h_{21} * h_{12}) * (g - h * \hat{f}_n) \quad (3.11)$$

と変形できる。ぼけ関数である  $h_{21}$  および  $h_{12}$  を繰り返し畳込むことにより  $g - h * \hat{f}_n$  が  $n \rightarrow \infty$  で恒常的に 0 へ近付くため、 $g = h * f$  をみたく  $f$  を、充分な反復後の  $\hat{f}_n$  として求めることができる。この収束性については第 5 章で詳しく検討する。

なお (3.7) 式においては  $f = (\text{定数})$  が零元となっており、(3.9) 式の反復ではこの直流成分を復元することはできない。そこで、初期値として  $f$  と直流成分が等しい撮像画像  $f_1$  あるいは  $f_2$  を用いる。これにより、直流成分まで含んだ形で任意焦点画像を再構成することができる。

次節ではまず以上の議論通り、全焦点画像あるいは任意焦点画像が撮像画像から再構成できることを合成画像を用いたシミュレーションにより確認する。そののち続いて、本節では 2 層の場合を例として説明したが、対象シーンが 3 層以上のより多数の奥行きをもつ場合にも同様の原理によって任意焦点画像が生成できることを示す。

### 3.3 合成画像を用いた任意焦点画像生成シミュレーション

本節ではまず、位置不変の恒等式の導出とこれに基づく所望の画像の反復復元の原理そのものをシミュレーションにより確認する。具体的には、実画像から実際に任意焦点画像を生成しようとする場合、次章で論じるように何らかの方法で決定しなければならない撮像画像中のぼけ関数  $h_{ij}$  をあらかじめ与え複数の撮像画像を合成し、これを用いて全焦点画像あるいは任意焦点画像の生成シミュレーションを行う。

なお本節では、図 3.1 に示した重ね合わせモデルに従い撮像画像を合成するものとする。奥行き境界付近の遮蔽領域では厳密には撮像画像はこのモデルから外れることとなるが、前節の原理の確認において輝度値や収束性の分析が繁雑になることを避けるため、これについてはここでは考慮せず、次節であらためて検討を行う。

本節のシミュレーションの目的は、上述した位置不変の恒等式の導出という信号処理的アプローチおよび反復復元により実際に、まず全焦点画像が良好に再構成できることに加えさらに、何らかの領域分割に基づく選択的統合手法では困難と考えられる任意焦点画像の生成が可能となることの確認である。

#### 3.3.1 全焦点画像の再構成

全焦点画像の再構成シミュレーションでは図 3.2(b) に示した  $128 \times 128$  のサイズの画像に対して、図 3.2(a) の矩形で示すような段差により画像の水平方向にのみ奥行きが変化

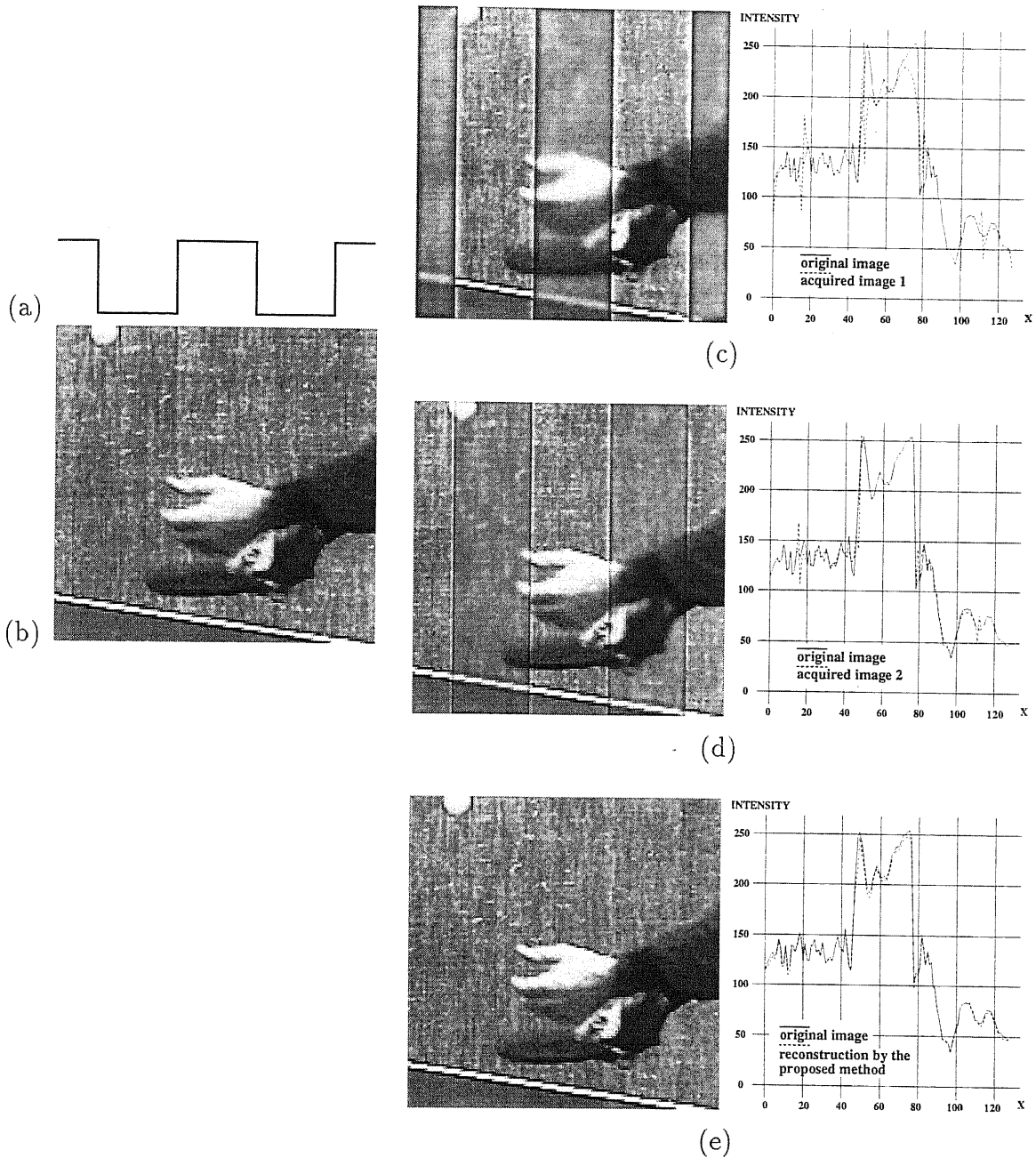


図 3.2: 全焦点画像の再構成シミュレーション: (a) 対象シーンに想定した奥行き変化の模式図, (b) シミュレーションに利用した原画像, (c)(d) 撮像画像  $g_1, g_2$  とある水平 1 ラインの輝度値変化の原画像との比較, (e) 再構成された全焦点画像とある水平 1 ラインの輝度値変化の原画像との比較

するものとして 2 層の奥行きを見つけ  $h_{21}, h_{12}$  をあらかじめ与え、重ね合わせモデルに従い焦点の異なる撮像画像  $g_1, g_2$  をまず作成した。これらの撮像画像を図 3.2(c)(d) に示す。  $h_{21}, h_{12}$  に対応するぼけのパラメータはそれぞれ  $R_{21} = 1.0, R_{12} = 2.0$  とした。単位は pixel である。このうち  $g_1$  を初期値 ( $\hat{f}_0$ ) として反復復元を行う。  $h_{ij}, h_a, h_b, g_1, g_2$  から  $h_a = h_b = \delta$  すなわち  $R_a = R_b = 0$  の条件のもと求めた  $g, h$  を用い、3 回の反復によって復元された全焦点画像を図 3.2(e) に示す。画面全体にわたってほぼ完全にぼけの除去された鮮鋭な画像が再構成されているのが見てとれる。また、これらの画像に対してそのある水平 1 ライン (画像の上端を  $y = 0$  として  $y = 64$  のライン) における原画像との輝度値変化の比較を図の右側に示した。さきに述べた、(3.7) 式で直流成分が零元となっているということに関連して、わずかな定数的誤差が収束の遅い領域として残っているところもみられるが、その領域も含め視覚的には非常に良好な再構成結果が得られているといえる。

また反復復元による全焦点画像すなわちこの場合、原画像図 3.2(b) への収束の様子を図 3.3 に画像全体の 2 乗平均誤差として示した。画像サイズの範囲すなわち有限の範囲で演算を行うことにより周辺部では反復復元による誤差が大きくなってしまうため、実際には上下左右画像の端より 8 画素分を除いて評価している。

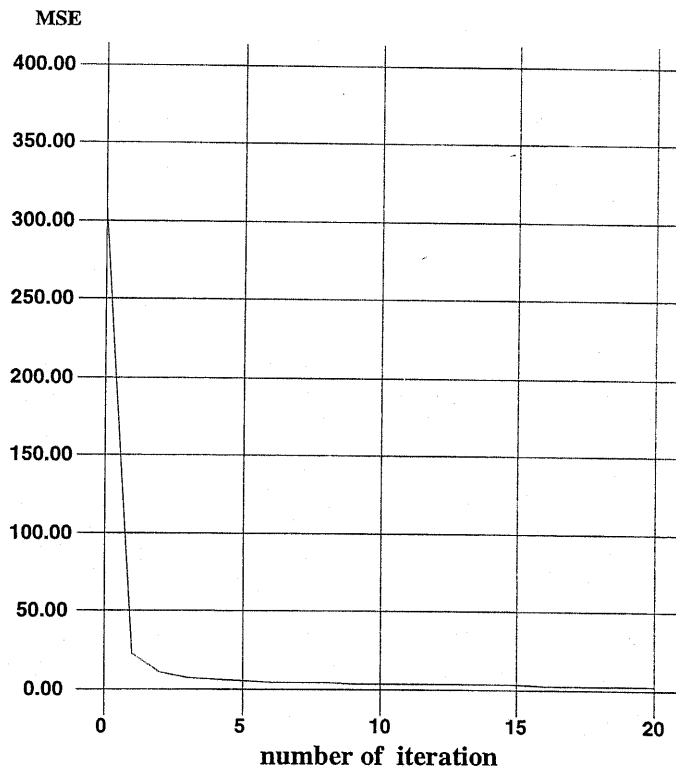


図 3.3: 反復による全焦点画像への収束を表す 2 乗平均誤差の変化

### 3.3.2 任意焦点画像の生成

任意焦点画像の生成シミュレーションとして、まず図 3.4(a) に示す “foreman” と “flower garden” を合成した画像サイズ  $240 \times 240$  の原画像 (遠景, 近景ともに鮮鋭なもの) にその合成マスクと同様の領域にわかれる 2 種類の奥行きをつけ,  $h_{21}, h_{12}$  をぼけのパラメータ  $R_{21} = 3.0, R_{12} = 2.0$  (単位 pixel) であらかじめ与え, 重ね合わせモデルに従い焦点合わせの異なる撮像画像  $g_1, g_2$  を図 3.4(b) のように作成した. このうち  $g_1$  を初期値 ( $\hat{f}_0$ ) に用いて反復演算を行う.

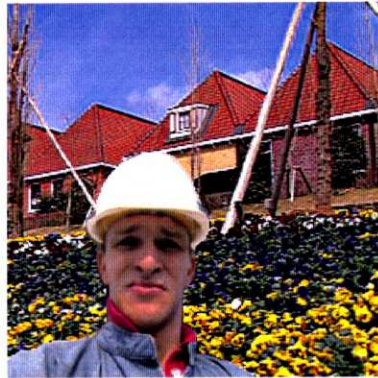
図 3.4(c) に任意焦点画像生成の例を示す. 反復回数は各々 3 回であり, それぞれの色成分で独立に演算を行う. (c) の各画像は,  $g_1, g_2$  のみから再構成されており, 左からそれぞれ, 全焦点画像 ( $R_a = R_b = 0.0$ ),  $g_1$  の遠景のぼけを強調した画像 ( $R_a = 0.0, R_b = 4.0$ ),  $g_2$  の近景のぼけを抑制した画像 ( $R_a = 1.5, R_b = 0.0$ ) である.

これらの再構成画像は  $g_1, g_2$  の撮像画像に対して焦点合わせは同じであるが焦点深度の異なるレンズで撮像したような効果を持った画像である. (c) 左の全焦点画像はいわば無限の焦点深度の場合, 他の 2 つの再構成画像 ((c) 中, 右) はそれぞれ焦点深度を浅くした場合と深くした場合に対応する. 再構成された (c) 左の全焦点画像では, 本シミュレーションの原画像となっている (a) が良好に復元されている. (c) 中央の再構成画像では近景領域は撮像画像  $g_1$  と同様でありながら, 遠景のぼけが撮像画像  $g_1$  に比較してより強調されている. (c) 右の再構成画像では遠景領域は全焦点画像や撮像画像  $g_2$  と同様でありながら, 近景のぼけが全焦点画像と撮像画像  $g_2$  の中間程度に鮮鋭化されている.

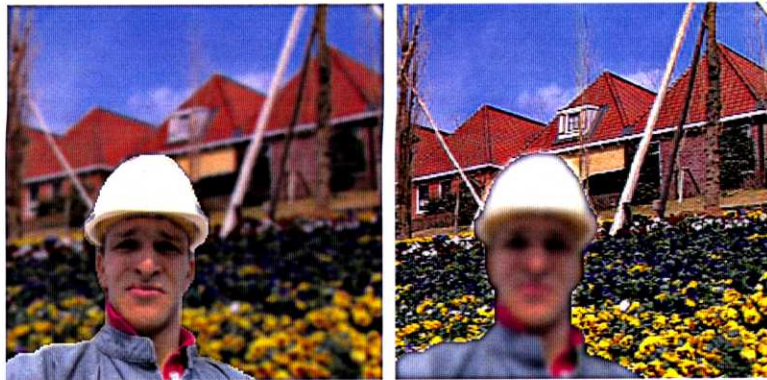
図 3.5(a) は  $g_1$  と  $g_1$  の遠景のぼけを強調した画像  $f_e$  (図 3.4(c) 中央) のある水平 1 ライン (画像の上端を  $y = 0$  として  $y = 150$  のライン) における RGB のうち G 成分の比較である. 同様に図 3.5(b) は  $g_2$  と  $g_2$  の近景のぼけを抑制した画像  $f_s$  (図 3.4(c) 右) のある水平 1 ラインにおける G 成分の比較である. このシミュレーションでは, グラフで示した水平 1 ラインにおいては  $52 \leq x \leq 126$  の領域とそれ以外で奥行きが異なっているものとしているが, それぞれの領域で独立にぼけが強調・抑制されているのが判別できる.

さらに  $f_e$  の収束の様子を調べるため,  $f_e$  と同様の条件で奥行きごとのぼけを与えた  $f_e$  の再構成結果となるべき画像を直接作成し, これと反復再構成画像との画像全体での 2 乗平均誤差を反復回数ごとに求め図 3.6(a) に示す. また  $f_s$  の収束の様子についても同様に図 3.6(b) に示す. どちらも初期画像には  $g_1$  を用いた. ともにそれぞれの画像が良好に収束しているのを確認できる. なおここでも, さきに述べた全焦点画像再構成のシミュレーションと同様に画像の上下左右の端より 8 画素分を除いて 2 乗平均誤差を求めている. 以下, 本論文では様々な撮像画像等に対して任意焦点画像の生成を行うが, 経験的には 3 回ほどの反復で充分良好に所望の画像の再構成が可能である. 詳しい収束性やより効率的な演算手法についての議論は第 5 章に譲る.

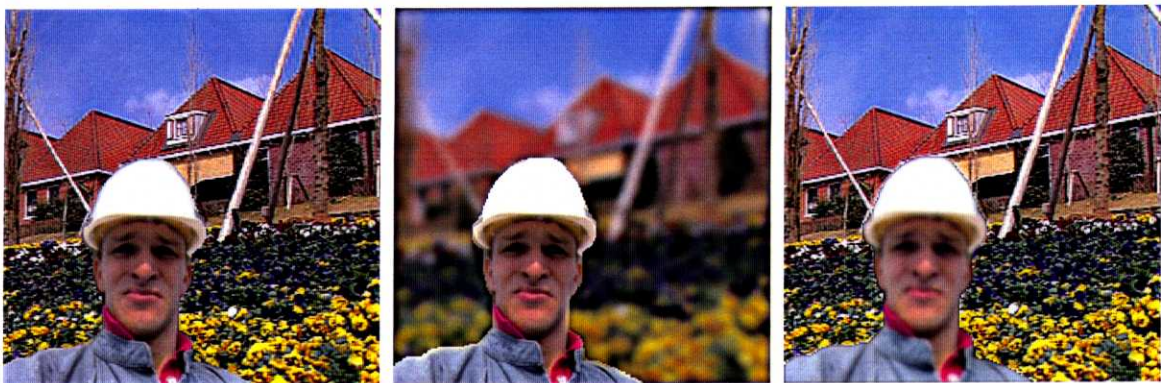
図 3.4(c) のにおいてはレンズの焦点深度を変化させたような画像を生成しているが,  $h_a, h_b$  のぼけのパラメータ ( $R_a, R_b$ ) を (1.0, 4.0), (0.0, 3.0), (1.0, 2.0), (2.0, 1.0), (3.0, 0.0), (4.0, 1.0)



(a) シミュレーションに使用した原画像



(b) 作成した撮像画像  $g_1, g_2$



(c)  $g_1, g_2$  のみから生成された任意焦点画像

図 3.4: 任意焦点画像の生成シミュレーション

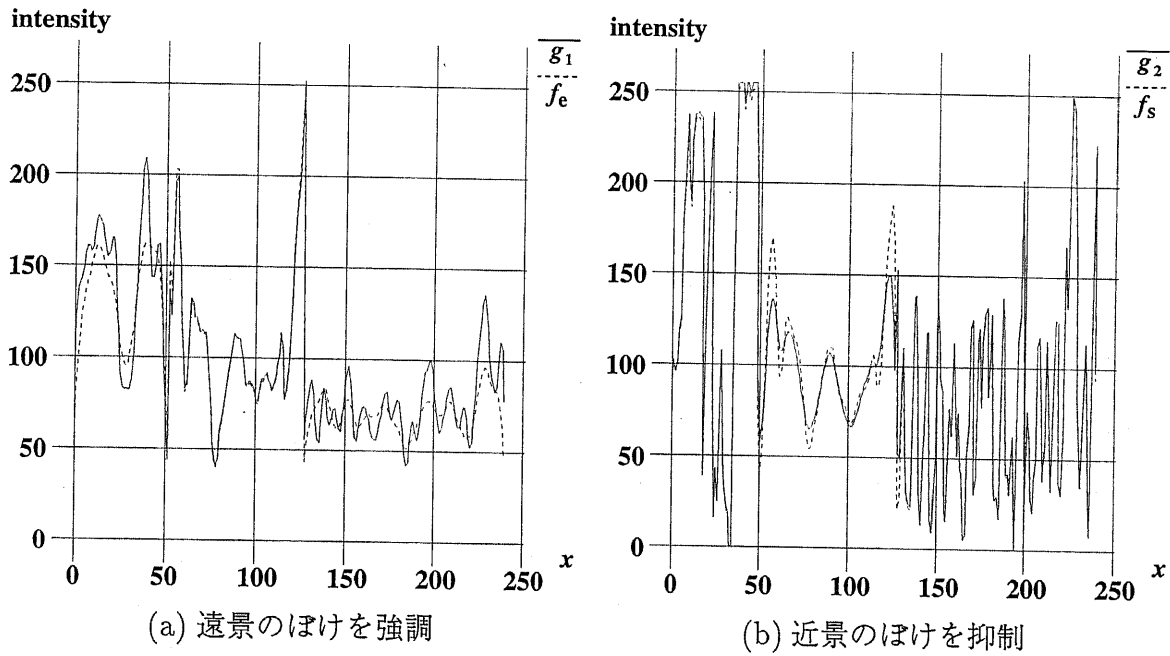


図 3.5: 反復復元により生成された画像と撮像画像とのある水平 1 ラインにおける G 成分変化の比較

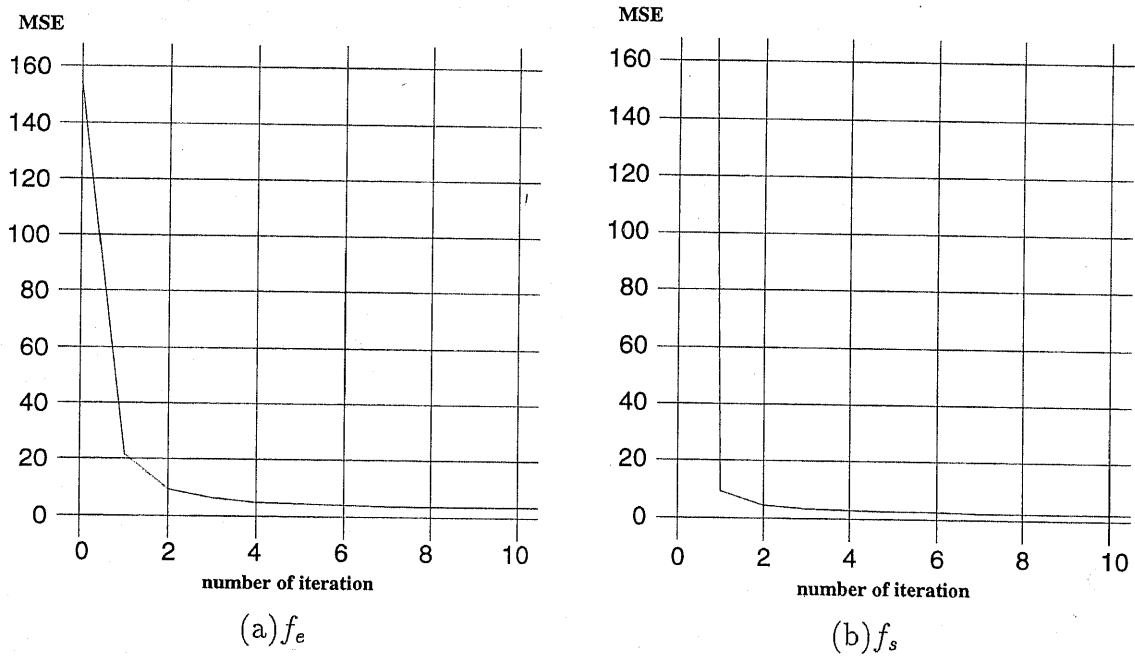


図 3.6: 反復による所望の画像への収束を表す 2 乗平均誤差の変化



などと与えていくことにより焦点合わせまでも変化させたような画像を様々に生成することができる。これを図 3.7 に左から右、さらに上段から下段の順に示す。(b) が近景に焦点の合っている画像、(e) が遠景に焦点の合っている画像であり、(a) から (f) へと近景のやや手前から遠景のやや奥まで焦点合わせが変化していくような画像となっている。

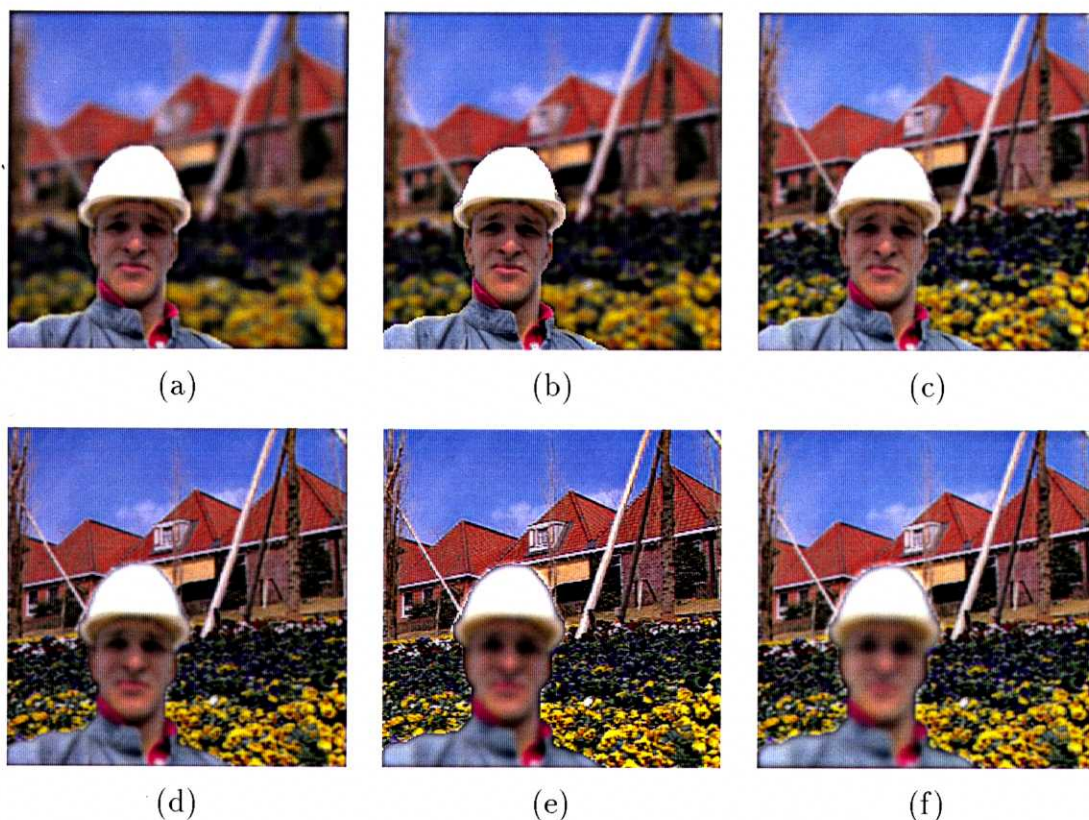


図 3.7: 焦点合わせを変化させていくような画像の生成

以上のシミュレーションから確認されるように、位置不変の恒等式を解くことにより複数画像に対し直接に信号处理的統合を行う本提案手法においては、ぼけ関数  $h_{21}, h_{12}$  さえ何らかの方法で得られていれば、非常に高い精度が必要とされる領域分割に基づくことなく容易にそれぞれの奥行き領域で独立にぼけを強調・抑制することが可能となる。

### 3.3.3 より多層の奥行きをもつ対象シーンに対する任意焦点画像生成

対象シーンがより複数の奥行きをもつ場合にも、同様に位置不変の恒等式の導出を行うことができる。例えば3層の奥行きをもつ対象シーンに対しては、まず所望の任意焦点画像  $f$  およびそれぞれの奥行きに焦点を合わせた撮像画像  $g_1, g_2, g_3$  を図 3.1 の画像取得モデルの拡張として以下のように  $f_1, f_2, f_3$  の3層の重ね合わせで表す。すなわち

$$f = h_a * f_1 + h_b * f_2 + h_c * f_3, \quad (3.12)$$

$$\begin{cases} g_1 = h_{11} * f_1 + h_{12} * f_2 + h_{13} * f_3 \\ g_2 = h_{21} * f_1 + h_{22} * f_2 + h_{23} * f_3 \\ g_3 = h_{31} * f_1 + h_{32} * f_2 + h_{33} * f_3 \end{cases} \quad (3.13)$$

ここから  $f_1, f_2, f_3$  を消去し  $h_{11} = h_{22} = h_{33} = \delta$  の条件を代入することで

$$\begin{aligned} & (h_a * (h_{23} * h_{32} - \delta) + h_b * (h_{21} - h_{23} * h_{31}) + h_c * (h_{31} - h_{32} * h_{21})) * g_1 \\ & + (h_a * (h_{12} - h_{13} * h_{32}) + h_b * (h_{31} * h_{13} - \delta) + h_c * (h_{23} - h_{21} * h_{13})) * g_2 \\ & + (h_a * (h_{13} - h_{12} * h_{23}) + h_b * (h_{23} - h_{21} * h_{13}) + h_c * (h_{12} * h_{21} - \delta)) * g_3 \\ & = (h_{12} * h_{21} + h_{23} * h_{32} + h_{31} * h_{13} \\ & \quad - (h_{12} * h_{23}) * h_{31} - (h_{13} * h_{32}) * h_{21} - \delta) * f \end{aligned} \quad (3.14)$$

が得られる。ぼけ関数の形作る部分は複雑化しているものの (3.14) 式は、奥行きが2層の場合と同様に撮像画像と所望の画像およびぼけ関数の間になりたつ位置不変の恒等式であり、

$$\begin{cases} g = (\text{左辺}) \\ h = h_{12} * h_{21} + h_{23} * h_{32} + h_{31} * h_{13} \\ \quad - (h_{12} * h_{23}) * h_{31} - (h_{13} * h_{32}) * h_{21} - \delta \end{cases} \quad (3.15)$$

とすればやはり式全体として

$$g = h * f \quad (3.16)$$

の形に整理可能である。ここで各ぼけ関数  $h_{ij}$  さえ知ることができれば  $g$  および  $h$  は決定されるので、まったく同様の反復式

$$\hat{f}_{n+1} = (h + \delta) * \hat{f}_n - g \quad (3.17)$$

により所望の画像を再構成することが考えられる。これまでの議論はさらに4層以上でも形式的にはまったく同様に展開することが可能である。

シミュレーションとして、まずある原画像(サイズは  $275 \times 200$ ) に対して実際とは異なる3段の段差状のぼけの変化を与え、重ね合わせにより図 3.8(a)(b)(c) に示すような画像を合成し、これを3層それぞれに焦点を合わせた撮像画像とみなす。具体的には、(a) は中景を  $R_{12} = 2.21$ , 遠景を  $R_{13} = 4.42$ , (b) は近景を  $R_{21} = 2.21$ , 遠景を  $R_{23} = 2.19$ , (c) は近景を  $R_{31} = 4.42$ , 中景を  $R_{32} = 2.19$  でぼかした画像である(単位 pixel)。 (3.11)



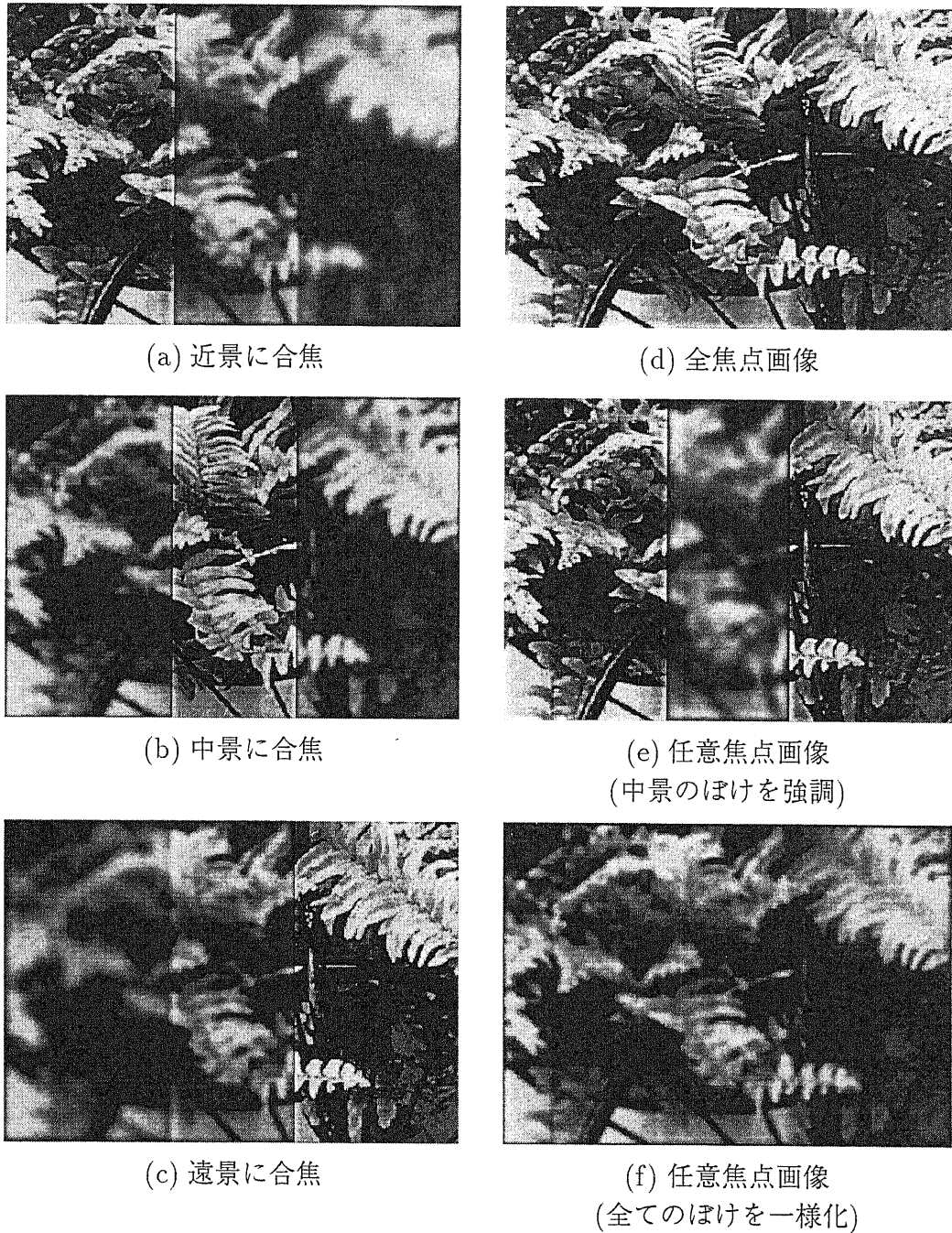


図 3.8: 対象シーンの奥行きが 3 層にわかれる場合における任意焦点画像生成のシミュレーション

式に従い 3 回の反復を行うことで、図 3.8(d)(e)(f) に示すような任意焦点画像を再構成した。再構成された画像はそれぞれ (d) は  $R_a = R_b = R_c = 0.0$  とした全焦点画像、(e) は  $R_a = 0.0, R_b = 5.0, R_c = 0.0$  とした中景のみ非合焦の画像、(f) は各層を一様に  $R_a = R_b = R_c = 2.0$  でぼかした画像である。

以上のように対象シーンの奥行きが 3 層以上にわかれる場合においてもそれぞれに焦点を合わせた画像を撮像することにより、位置不変の恒等式から複数の画像を信号処理的に統合し各層独立にぼけを調整した画像の生成が可能となると考えられる。次章においては実画像を用いた実験でこのことを確認する。

対象シーンの奥行きがより多数層になる場合の任意焦点画像生成の特徴としては、奥行きが 2 層の場合のシミュレーションでとくに詳しく述べたレンズの焦点深度を変化させたような画像あるいは焦点合わせを変化させたような画像のみならず、上記のシミュレーションにおける図 3.8(e) のように近景、遠景は合焦したまま中景のみぼけを強調した、といった光学的にはありえない様々な画像の表現が可能となっていることがある。

### 3.4 信号処理的統合に基づく任意焦点画像生成手法の特徴に関する考察

前節まで、信号処理的統合に基づく任意焦点画像生成の原理をシミュレーションにより確認したが、さらに本提案手法の特徴について簡単に、ここでもシミュレーションを用いて考察しておく。具体的には、選択的統合手法との比較、および撮像条件における仮定となっている奥行きからの実際の対象シーンのずれが生成画像に与える影響について述べる。次章ではこの考察に基づき、実画像を用いてより詳細な検討を行なう。

#### 3.4.1 領域分割に基づく選択的統合手法との比較

領域分割に基づく選択的統合手法と本論文の提案する位置不変の恒等式の導出による信号処理的統合手法について、その再構成画像を中心に比較検討を行なう。再構成画像としては従来の選択的統合手法でもそのまま生成できる全焦点画像を用いる。なお、ここでは画質の比較などに厳密をきするため、撮像画像の取得モデルとして遮蔽も考慮する。すなわち、まず図 3.9(a) に示すような遠景、近景をまずそれぞれ画面全体にぼけ関数  $h_{ij}$  で畳み込んだのち遠景の側から (a) 右のマスクで黒の領域を切り出しその上に近景の輝度値を直接加算する。これは近景がぼけている場合は遠景の側のにじみこむが、遠景がぼけている場合は遮蔽により近景の側のにじみこまないことに相当する。また、近景により遮蔽されている領域もぼけによりわずかながら近景領域近傍の遠景領域に影響を与えることとなる。なお、前節のシミュレーションと同様  $h_{21}, h_{12}$  のぼけのパラメータは  $R_{21} = 3.0, R_{12} = 2.0$  としている。以上のようにして得られた図 3.9(c) からみてとれるように、実際には遮蔽領域の周辺部を除けば重ね合わせモデルに基づいた場合とまったく同様の画像が合成されているといつてよい。

このようにして合成した撮像画像を用いて選択的統合手法および提案する信号処理的



(a) 撮像画像合成のための遠景, 近景の原画像とマスク



(b) 遮蔽モデルを考慮して合成された撮像画像

図 3.9: 遮蔽モデルを考慮した撮像画像の合成

統合手法による全焦点画像の再構成を行ないその画質の比較を行なう。選択的統合手法としては、2章で述べたうち最も画質的に良好な結果を得ることができる、劣化予測による鮮鋭領域判定に基づく再構成手法を利用するものとする。

全焦点画像の再構成シミュレーションのまえに手法的な特徴を比較しておく、選択的統合手法は信号处理的統合手法と異なり画素ごとの鮮鋭判定を行なわなければならないもののぼけ関数そのものは知る必要がない。また、対象シーンの奥行きがより多数層となる場合においても撮像された複数の画像のうちある2枚の画像についてまず選択的統合を行なうことから始めて、得られている合成画像に対して別の撮像画像との選択的統合を繰り返して行くことにより最終的な統合画像を得るという拡張が考えられ、位置不変の恒等式における畳み込みの部分 $n^2$ に比例して非常に複雑化する信号处理的手法に比較すれば演算量の増大は $n$ 程度で抑えられるという特徴がある。

しかし、次章で見るようにぼけ関数については、画像取得の目的ということを考え撮像条件をあらかじめ整えカメラ特性を知っておけばカメラパラメータによりただちに決定することができる。また、画像再構成のための演算量についても、信号处理的手法は第5章で示すように周波数領域上へ変換することにより大幅にその増大を抑えることが可能であるため、総合的な観点からすれば多くの場合、以上のような特徴よりも再構成画像の画質そのものが重要な比較点となるといえる。



図 3.10に、選択的統合手法および信号处理的統合手法それぞれを用いて図 3.9で合成された撮像画像から全焦点画像を再構成した結果を示す。まず、(a) が劣化予測に基づく鮮鋭領域判定結果である。これをもとに選択的統合を行なった画像 (b) と、このような領域分割結果を用いず直接に撮像画像から信号处理的手法によって全焦点画像を再構成した画像 (c) をそれぞれ (e)(f) に一部 (近景の人物の右肩周辺) 拡大して示す。なお信号处理的統合手法では 3 回の反復により再構成を行なった。(d) は図 3.9の撮像画像と同様に原画像から直接に合成した全焦点画像である。

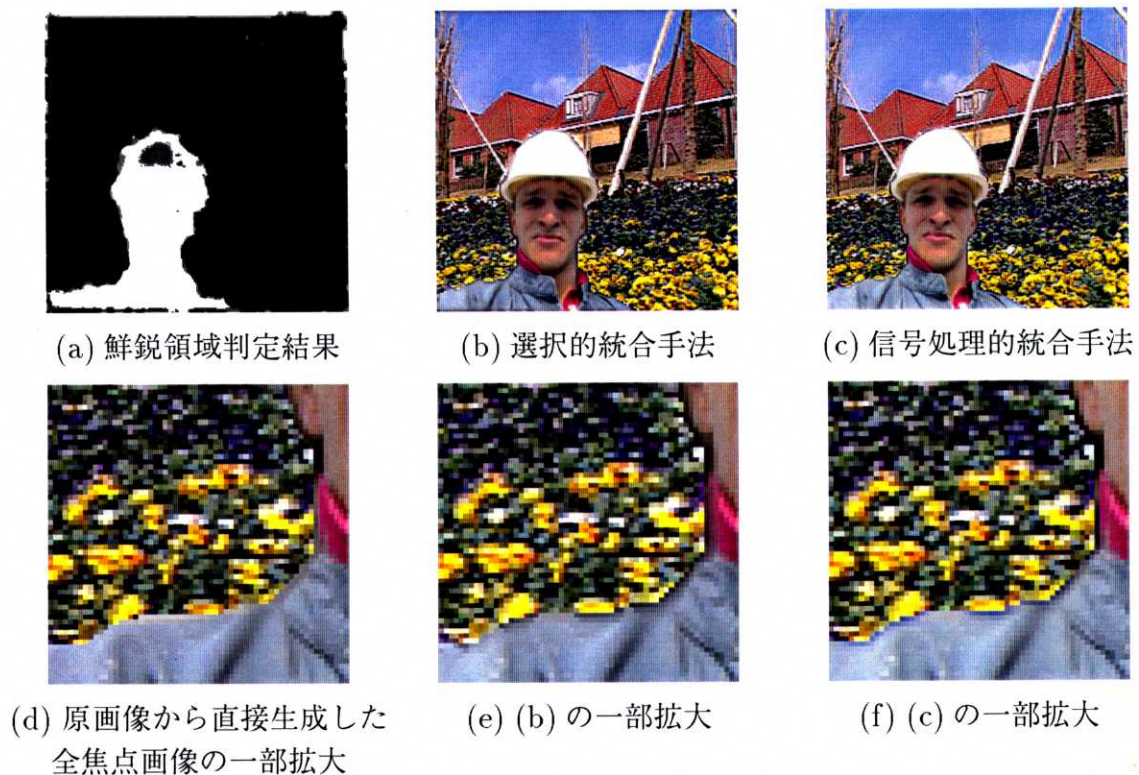


図 3.10: 選択的統合手法および信号处理的統合手法により再構成された全焦点画像の比較

鮮鋭領域判定においては、前章で述べかつ (a) でもみてとれるように、輝度値が一樣の領域や近景遠景の境界付近での誤判定、判定保留が生じやすい。輝度値一樣の領域では、どちらの撮像画像も同様の輝度値をとっているため選択統合による画質の劣化は見受けられない。しかし、遠近の境界付近では (b) および (e) で確認されるように統合が選択的であるため原理的に、(a) における鮮鋭判定の誤判定、いわば空間方向での不安定性がそのまま反映され近景遠景が乱雑に入り組んだような視覚的にやや大きな画質劣化が生じている。

領域分割に基づく選択的統合手法を補助的に利用するための検討として任意焦点画像の生成も可能となるように拡張する議論を後の第 7 章に示すが、やはりあくまで領域ごとの処理であるため境界領域が強調され、そこにおいてはより顕著に同様の特徴、画質劣化が

みられる。このような画質劣化は、十分な精度を得ることが非常に困難である領域分割を利用する選択的統合手法の持つ原理的な問題といえる。

これに対し (c) および (f) に示すように、信号处理的統合手法を用いた再構成画像では、もちろん同領域は重ね合わせモデルから外れるため正確な全焦点画像が復元されてはおらず (d) に対して境界部に若干の干渉が確認されるものの比較的大きな画質劣化は生じていない。選択的統合と異なり画面一様の演算に基づく処理の効果であると考えられる。この画質劣化の特徴については、第 6 章で検討する焦点画像処理の一般化の問題においてまとめて詳細に論じる。

次章では実際に実画像を用いた実験を行なうが、以上検討した両手法の特徴が同様に確認される。

### 3.4.2 対象シーンにおいて仮定される奥行きからのずれにともなう再構成画像への影響

本提案手法では対象シーンの奥行きが複数の層にわかれていると仮定しているが、実際には仮定された奥行きからのずれが多少あった場合でも、その位置におけるぼけの変化は十分に小さく、必ずしもただちにそれほど大きな画質劣化を再構成画像に及ぼすことはないと考えられる。とくに一様な領域では複数の撮像画像がほぼ同じ輝度値をとっているため再構成画像への影響は小さく、大きな画質劣化を生じるのは輝度エッジなどを含むテクスチャのはっきりしている領域である。

そこで焦点を合わせた奥行きからの対象シーンのずれによって再構成画像に生じる影響を、対象シーンが 2 層の場合について、適当なレンズパラメータを設定しシミュレーションにより検討する [26]。すなわち、焦点を合わせた奥行きは  $2m$ ,  $6m$  であるが、実際にはそれ以外の奥行きに図 3.11(a) のような 4 画素を周期とする模様を対象がある場合における、提案手法により再構成される全焦点画像と、本来復元したい所望の原画像である図 3.11(a) との SDR(信号対歪み率) は図 3.11(b) で与えられる。

この結果から、焦点を合わせた奥行きからのずれはただちに顕著な画質劣化をもたらすのではなく、その大きさに対応して再構成画像に影響するということが確認できる。またさらにこのグラフは、遠景は近景に比べより広い範囲の奥行きに対象シーンが分布していても充分良好な再構成を得ることができることを示している。これは奥行きによるぼけ関数の変化が遠景ほど小さいためと考えられる。

以上のような特徴についても、次章では実画像を用いた実験により実際に確認することができる。

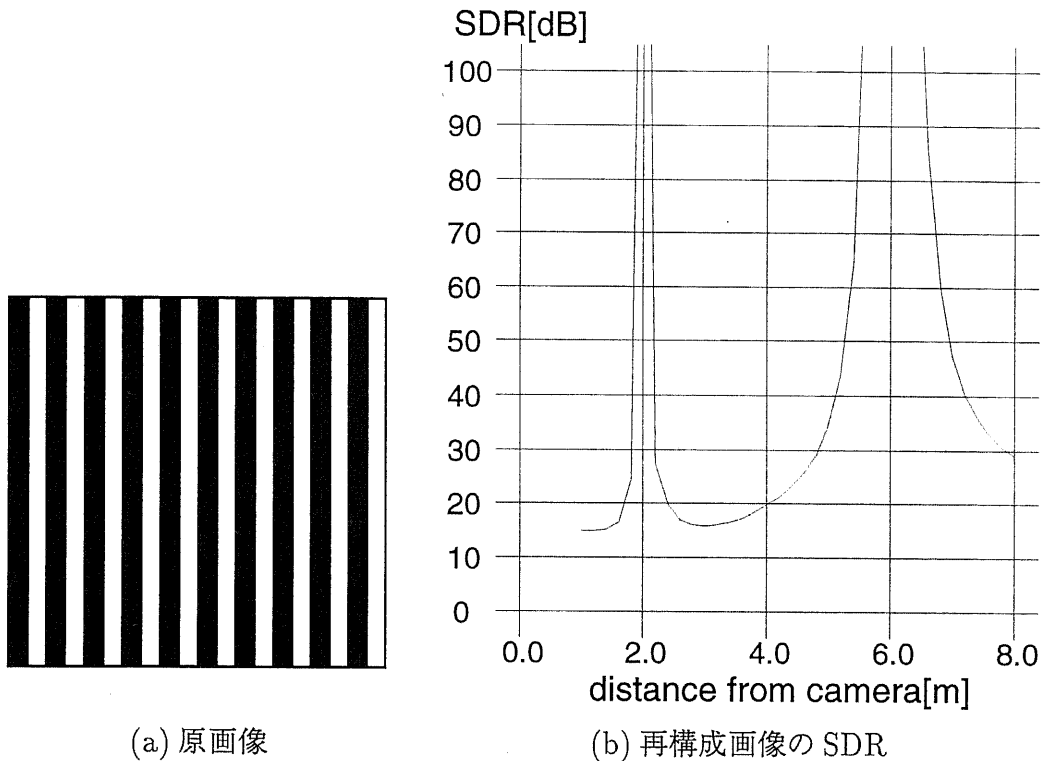


図 3.11: 奥行きずれによる再構成画像への影響

### 3.5 まとめ

本章ではまず、複数画像からの信号处理的統合に基づく任意焦点画像生成の原理について述べ、これを合成画像を用いたシミュレーションにより確認した。信号处理的統合手法においては、ぼけ関数  $h_{ij}$  さえ得られていれば、位置不変の恒等式を解くことにより、領域分割を用いることなくそれぞれの領域で独立にぼけを強調・抑制することが可能である。また、次章からの実際の実画像を用いた実験に先んじて従来の選択的統合手法との比較やその特徴についての予備的な考察をシミュレーションにより行なった。

さらに、本提案手法では対象シーンの奥行きが複数にわかれているものと仮定しているが、単純な 2 層のみならず 3 層以上より多数の場合での任意焦点画像生成手法や、仮定された奥行きからの実際の対象シーンのずれが再構成画像に及ぼす影響など、その適用範囲についての検討を行なった。これについても次章では実画像を用いた実験により確認することができる。

ところで、実際に一般的なカメラにより撮像した焦点合わせの異なる複数画像を用いて任意焦点画像生成を行なうためには、上述したようなぼけ関数  $h_{ij}$  の推定のみならず、それらの前処理として、従来の選択的統合手法と同様に複数画像間での画像サイズや中心位置のずれ等の補正をあらかじめ行なっておかなければならない。

次章では、このような撮像画像間でのレジストレーションとその撮像画像中のぼけ関数  $h_{ij}$  の決定を行なうための2通りの手法とそれに基づく任意焦点画像生成について、本章で検討した信号処理的統合手法の特徴などの確認とともに、具体的に実画像を用いた実験結果を示しながら述べていく。

すなわち、まず第1の手法では、階層的マッチングに基づいて撮像画像間に生じているサイズや位置ずれ等の補正を行ない、続いて統計的処理によりその補正画像中のぼけ関数を推定する。

第2の手法では、撮像に用いるカメラの特性をあらかじめ分析しテーブル化しておくことにより第1の手法のような撮像画像ごとの処理によらずカメラパラメータのみからただちに撮像画像間のレジストレーションとぼけ関数の決定を行なう。

前者は、焦点合わせのみ変化させて撮像した複数の画像であれば適用可能であり、より一般的な条件に対応した画像処理に基づく手法といえる。逆に、後者は本手法の目的である画像取得という観点をさらに明確にした場合の、より撮像システムそのものにまで立ち入った手法である。後者の手法では、撮像画像からの任意焦点画像生成のための画像処理を大幅に効率的なものにすることができ、対象シーンがより多数層となった場合でも容易に適用が可能である。これら2手法の前処理に基づいて、それぞれ任意焦点画像の生成実験を行なう。

前章での考察で述べた通り、本論文では目的を明確にすることでより提案手法や提案システムの拡張と効率化を行なっていく。次章の実験でも用いる、従来の一般的な単焦点すなわち同時にひとつの焦点合わせでしか撮像できないカメラでは対象シーンを動画像として撮像することができない。本論文後半の中心となる第8章では、以上のようなシステム化の効果についての考察に基づきさらに撮像システムの中でもカメラ自身の構造への新たな提案を行ない、動画像に対しても任意焦点画像を生成することが可能となる多焦点カメラ撮像システムを構築する。

## 第 4 章

### 一般的な単焦点撮像カメラを用いた焦点画像処理

#### 4.1 はじめに

前章で確認した任意焦点画像生成の原理を実際に、テレセントリック系のような特殊なものでない一般的なカメラにより撮像した焦点合わせの異なる複数の画像に適用しようとするならば、撮像画像中のぼけ関数  $h_{ij}$  の推定のみならず、従来の選択的統合手法と同様にそれらの前処理として、撮像系における焦点合わせ部の動作に伴う複数画像間での撮像範囲のずれの補正をあらかじめ行なっておかなければならない。

焦点合わせの異なる複数の画像間では撮像系の特性に従い倍率の変化が生じる。すなわち図 4.1 に示すように近景と遠景それぞれ焦点を合わせ 2 枚の画像を撮像した場合、遠景に焦点を合わせた画像のほうが近景に焦点を合わせた画像よりも撮像されている範囲が広くその意味で倍率が小さくなっているといえる。また、この場合の撮像範囲変化の中心は必ずしも画像の中心座標と一致しない。これは、ズーム系そのものによる倍率変化に関する問題としても同様の報告がなされているが [45]、カメラ光学系において撮像面の中心位置と光軸が必ずしも一致しないことによる。

以上のような中心位置のずれまで含みこんだ形での倍率変化の補正を行うために複数の撮像画像間でのレジストレーションが必要である。このレジストレーションに基づいて、より遠景に焦点を合わせて撮像した画像の対応部分を拡大しもっとも近景に焦点を合わせて撮像した画像へと全撮像画像のサイズおよび撮影範囲を揃えるものとする。これにより、複数画像の撮像時の焦点合わせのパラメータによらず、補正後の画像サイズを一定かつ最大のものにすることができる。

そののち、図 4.2 に示すような補正画像中のぼけ関数  $h_{ij}$  の決定を行うことで、焦点合わせの異なる複数の画像から全焦点画像さらには任意焦点画像の生成が可能となる。

本章では、この図 4.1 および図 4.2 に対応する 2 つの前処理を行うための 2 通りの手法を、それぞれ 4.2 節と 4.3 節で詳しく述べていく。すなわち本章における各焦点画像処理の流れは図 4.3 のように整理される。まず 4.2 節では、階層的マッチングに基づいて複数画像間に生じている倍率変化をその中心位置のずれまで考慮して補正を行ない (b1)、その補正



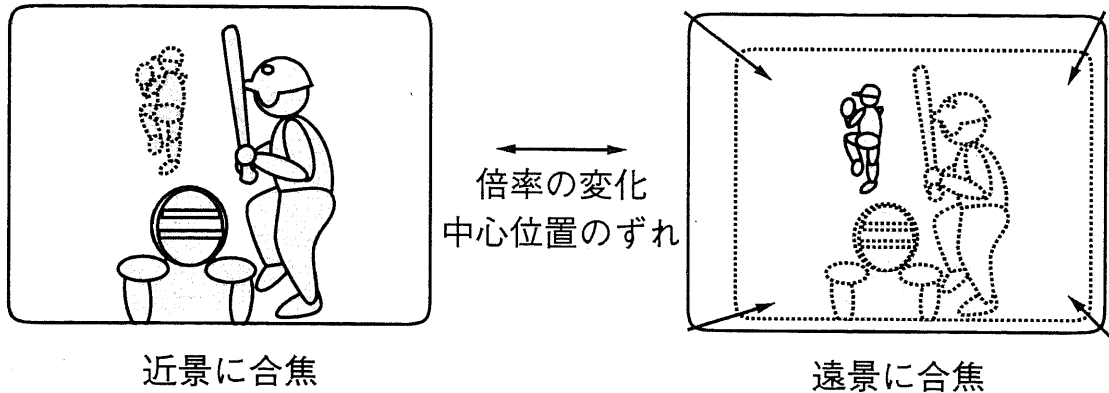


図 4.1: 各撮像画像間の撮像範囲のずれ

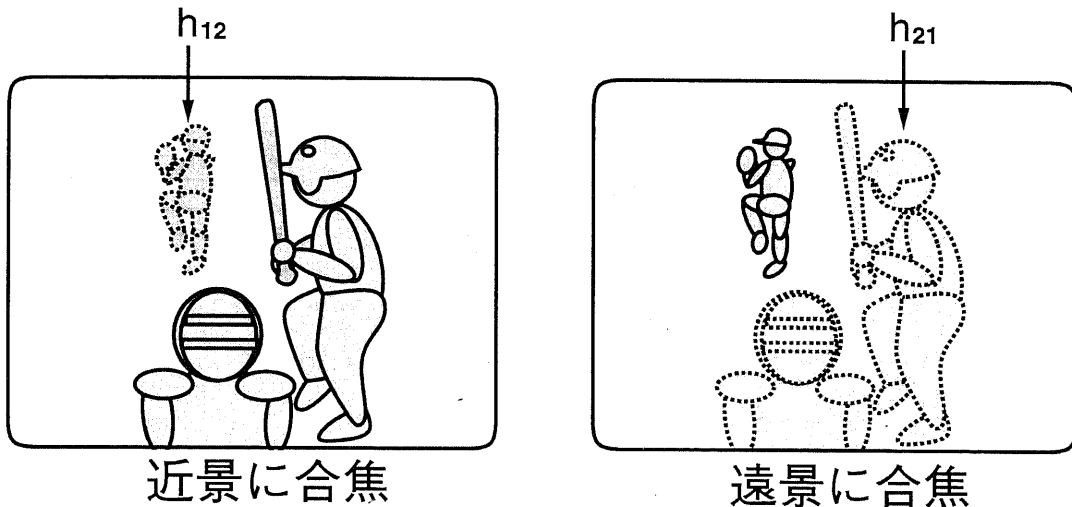


図 4.2: 各撮像画像中のぼけ関数の決定

後の撮像画像中のぼけ関数を統計的処理を用いて推定する (d1-e). 4.3節では, 撮像に用いるカメラの特性をあらかじめ分析しテーブル化しておくことにより (c), 4.2節におけるような撮像画像ごとの処理によらず, カメラパラメータのみからただちに撮像画像間の倍率変化等の補正 (b2) と撮像画像中のぼけ関数の決定 (d2) を行なう.

具体的に実画像を用い, これらの前処理に基づいた任意焦点画像生成までの実験結果を示しながら, 前章で論じた信号処理的統合手法の特徴等も確認する. 4.2節で述べる手法には, 図 4.3からも分かるように従来の選択的統合手法と共通に必要な処理も多い. 信号処理的統合手法と選択的統合手法との詳しい比較検討は 4.2節を中心に行っていく.

4.2節における前処理は, 焦点合わせのみ変化させて撮像した複数の画像であれば適用可能であり, より一般的な条件に対応した画像処理に基づく手法といえる. 逆に, 4.3節で

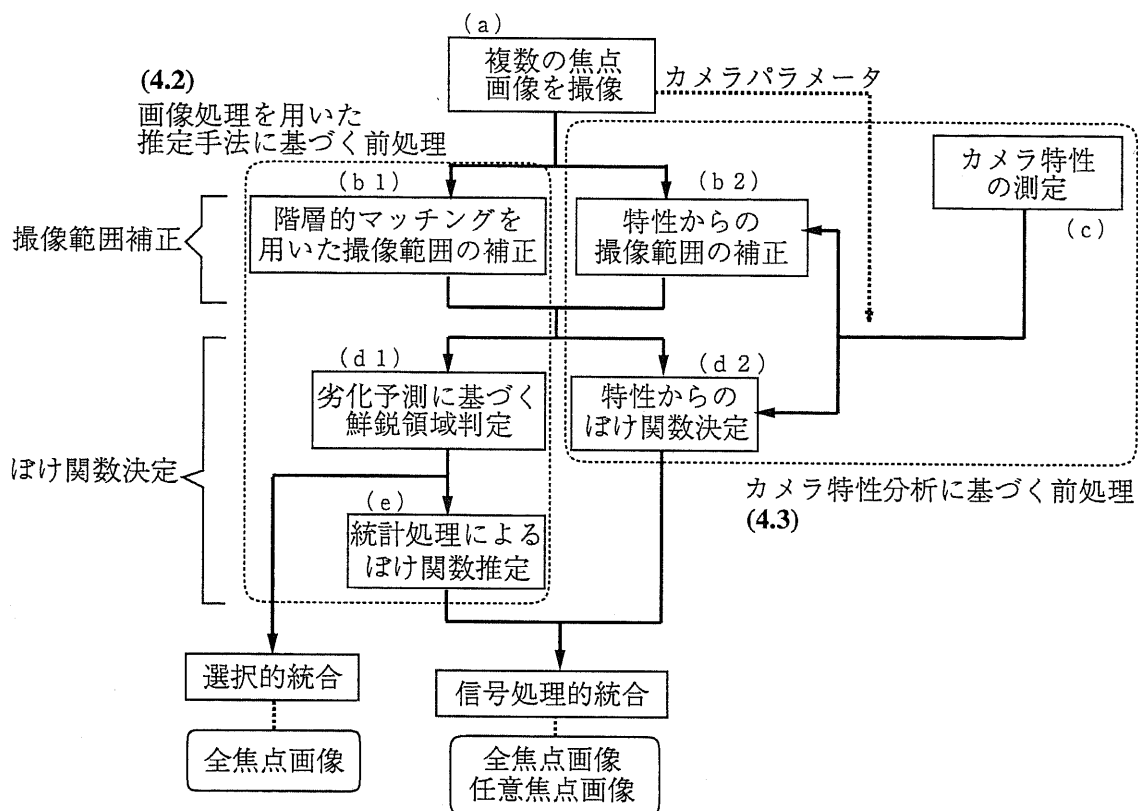


図 4.3: 様々な焦点画像処理手法の流れ

述べるものは本論文の目的である画像取得および生成という観点をさらに明確にした場合の、より撮像システムにまで踏み込んだ任意焦点画像生成手法の枠組であり、以降第 8 章においてはその実験結果から、システムのみならずさらに撮像カメラの構造そのものに対して行われる提案へとつながる重要な考察が得られる。

なお、4.2 節は主に久保田による [34]。

## 4.2 画像処理を用いた推定手法に基づく任意焦点画像の生成

本節では、画像処理を用いた推定手法により前節で示した任意焦点画像生成のために必要となる 2 つの前処理を行う。まず、第 1 の前処理として、複数画像間に生じている撮像範囲のずれに対して階層的マッチングに基づいてレジストレーションを行いその中心位置のずれまでを考慮した形で倍率変化を補正する手法を述べる。続いて第 2 の前処理として、その補正された撮像画像中のぼけ関数を、領域分割に基づき統計的処理を用いて推定する手法を述べる。

本節で示す任意焦点画像生成の前処理のための各手法は、選択的統合手法とほぼ共通す

る手順であり、領域分割後さらに具体的な各撮像画像中のぼけ関数の推定が必要となるという意味では処理量が増えることとなるが、これにより信号处理的統合手法の適用が可能となる。実際に本節の最後に示す上記の前処理手法を用いた実験により確認されるように、信号处理的手法を用いれば、良好な全焦点画像やさらには任意焦点画像の生成を容易に行うことができる。

次節で述べるカメラ特性をあらかじめ分析しておく手法と比較して言えば、本節で論じる任意焦点画像生成の前処理のための手法は焦点合わせのみ変化させて撮像した複数の画像でさえあれば適用可能であり、撮像画像のみを用いるというより一般的な条件に対応した手法といえる。

#### 4.2.1 階層的処理による複数の撮像画像間のマッチング

図4.1のような撮像画像間の倍率変化を中心位置のずれまで考慮して補正しようとする場合、より遠景に焦点を合わせて撮像された画像のうちどの領域が近景に焦点を合わせた場合の画像の撮像範囲に対応しているのかを特定しなければならない。このレジストレーションはいわば画像全体でのマッチング問題といえるが、平行移動のみならず拡大の要素を伴っており一般的なマッチングではそのまま対応することができないため、これまでそのレジストレーションはほとんど手動で行われ、その適切なマッチング手法については詳しく検討されて来なかった [27, 28, 29, 30]。

本節では、この撮像画像間のマッチング問題に対し、図4.4に示すような各撮像画像から階層化されたガウシアンピラミッド [43] の構成に基づく平行移動と拡大まで含めた形での階層的マッチング手法を提案する。階層的マッチング [41, 42, 44] とは一般に、探索範囲が非常に広いような、すなわち大きな演算量の必要となる解像度の高い原画像間ではじめからマッチングを行うのではなく、まずある程度まで解像度を落した画像間で粗いマッチングを実行しておき、そのマッチング結果をもとにマッチングの探索範囲を限定して順次より解像度の高い画像間でのマッチングを行っていく手法である。本節で議論するような平行移動と拡大まで含めた形でのマッチングが必要となる問題に対しては、その演算量の軽減という面から非常に有効な手法といえる。

ここでは画像の階層化手法としては、平均値フィルタに比べより急峻な特性を持ち低解像度の画像でのエイリアジングの発生を抑えることができる、図4.5に示すようなガウシアンフィルタによる近傍の加重平均値を用いたガウシアンピラミッドを採用する。

これを具体的な式で表せば、(4.1)式に基づいて原画像  $I_0$  から順次解像度  $1/2$  の画像  $I_1, I_2, \dots, I_l$  を作成していくことに相当する。すなわち

$$I_k(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) I_{k-1}(2i+m, 2j+n), \quad (4.1)$$

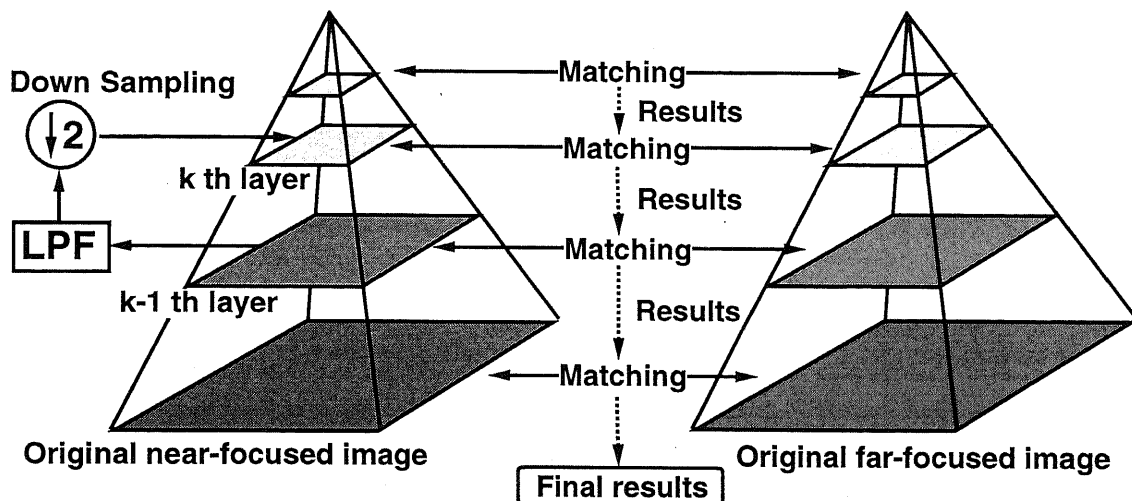


図 4.4: ガウシアンピラミッドの構成と階層的マッチング

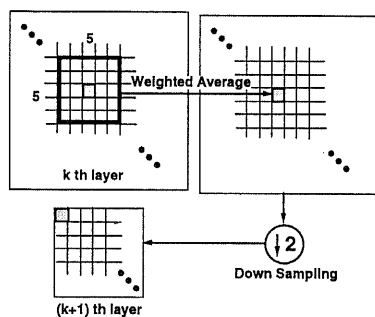


図 4.5: ガウシアンフィルタによるピラミッドの構成

ただし,

$$w = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 8 & 5 & 1 \\ 5 & 25 & 40 & 25 & 5 \\ 8 & 40 & 64 & 40 & 8 \\ 5 & 25 & 40 & 25 & 5 \\ 1 & 5 & 8 & 5 & 1 \end{pmatrix} \frac{1}{400}. \quad (4.2)$$

最終的にガウシアンピラミッドとして  $l+1$  層の画像階層化データが生成される. (4.2) 式は分散が 1 である 2 次元ガウス関数を近似した行列である. ガウシアンピラミッドではいわずに以上のような低域通過フィルタを施しながらダウンサンプリングの処理が行われることとなる.

なお, 2 枚以上より複数の撮像画像間でレジストレーションを行う場合においても, もっ

とも近景に焦点を合わせた場合の画像に撮像範囲を合わせそれ以外の各撮像画像それぞれに拡大補正を行うのであるから、結局は近景に焦点を合わせて撮像された画像と遠景に焦点を合わせて撮像された画像 2 枚の間でのレジストレーションすなわちマッチング手法を考えればよい。

近景、遠景に焦点を合わせた撮像画像  $I_0^{near}, I_0^{far}$  (以下、それぞれ近景合焦画像、遠景合焦画像と呼ぶ) からそれぞれ、 $\{I_0^{near}, I_1^{near}, \dots, I_l^{near}\}$  および  $\{I_0^{far}, I_1^{far}, \dots, I_l^{far}\}$  なるガウシアンピラミッドが構成されるものとする。ただし、 $l$  層のガウシアンピラミッドを構成するためには各辺が  $2^l$  の倍数でなければならない。各撮像画像とも各辺  $2^l$  の倍数となる大きさでかつ最大のサイズに切り出すことであらかじめ補正しておく。このようにして生成された各撮像画像の階層化データを用い撮像画像間の階層的マッチングを行っていく。求めなければならないのは、遠景合焦画像のうちどの領域が近景合焦画像の撮像範囲に対応するかであった。ここでは、近景合焦画像の撮像範囲の全体は遠景合焦画像中に含まれており、遠景合焦画像中のその領域は各辺同士が撮像画像自身と互いに平行な長方形になっているものとする。

まず最も解像度の粗い最上層 ( $l$  層) からこの対応を求めていく (図 4.6(a)). すなわち画像  $I_l^{near}$  と  $I_l^{far}$  の間でのマッチングを行う。  $I_l^{far}$  の一部が  $I_l^{near}$  に対応することから  $I_l^{far}$  中の左上点が  $(x_l, y_l)$  でありサイズ  $(m_l \times n_l)$  の長方形を切り出し撮像画像サイズに拡大した画像 ( $I_l^{far}$  と表す) と  $I_l^{near}$  の残差を求めた場合の値が最小となる  $x_l, y_l, m_l, n_l$  を求めればよい。

撮像画像サイズを  $M_0 \times N_0$  とすると  $M_l = M_0/2^l$  と  $N_l = N_0/2^l$  の関係があるが、ただし、閾値として  $I_0^{far}$  に対する  $I_0^{near}$  の倍率の最大値  $S_{max} (> 1)$  と、長方形領域縦横各辺の撮像画像からの倍率変化の比の範囲を  $1/D_{max} (< 1)$  から  $D_{max} (> 1)$  として設定しておく、この範囲で可能な切り出し領域全てについて  $x_l, y_l, m_l, n_l$  を変化させながらマッチングをとる。これはすなわち

$$0 \leq x_l \leq M_l(1 - 1/S_{max}) \quad (4.3)$$

$$0 \leq y_l \leq N_l(1 - 1/S_{max}) \quad (4.4)$$

$$(4.5)$$

と左上点を移動させながら

$$\begin{aligned} M_l/S_{max} \leq m_l \leq M_l - x_l \\ \max(N_l/S_{max}, \frac{m_l N_l}{M_l D_{max}}) \leq n_l \leq \min(N_l - y_l, \frac{m_l N_l D_{max}}{M_l}) \end{aligned} \quad (4.6)$$

の範囲で長方形のサイズを変化させ、その領域を拡大補正した画像と近景合焦画像との残差を求めることとなる。その残差  $J$  は  $x_l, y_l, m_l, n_l$  の関数となり

$$J(x_l, y_l, m_l, n_l) = \sum_{i=0}^{M_l-1} \sum_{j=0}^{N_l-1} |I_l^{near}(i, j) - I_l^{far}(i, j)| \quad (4.7)$$

と表される。この残差が最小となる  $x_l, y_l, m_l, n_l$  を利用して  $l-1$  層のマッチングを行う。以下  $k-1$  層では  $k$  層のマッチング結果をおのおの利用する。図 4.6(b) に  $l-1$  層以下のマッチングの方法を示す。  $k$  層でのマッチング結果である  $I_k^{far}$  中の長方形領域の左上点  $(x_k, y_k)$  とサイズ  $(m_k \times n_k)$  はその下の  $k-1$  層の  $I_{k-1}^{far}$  では左上点  $(2x_k, 2y_k)$  とサイズ  $(2m_k \times 2n_k)$  の長方形領域に対応する。すなわち、  $k$  層の結果に基づく限りでは、  $k-1$  層では左上点  $(2x_k, 2y_k)$  とサイズ  $(2m_k \times 2n_k)$  をそれぞれ  $\pm 2$  pixel の範囲でのみ変化させて残差が最小となる場合の長方形領域を求めればよい。このようにして順次階層を下げながらマッチングを行うことにより最下層すなわち撮像画像である  $I_0^{far}$  内のある長方形領域が最終的に  $I_0^{near}$  の撮像範囲への対応領域として得られる。この領域を撮像画像のサイズに拡大することで、撮像画像間の中心位置のずれまで考慮した形での倍率変化の補正を行うことができる。なお、以上の各拡大処理には双一次内挿を用いるものとする。

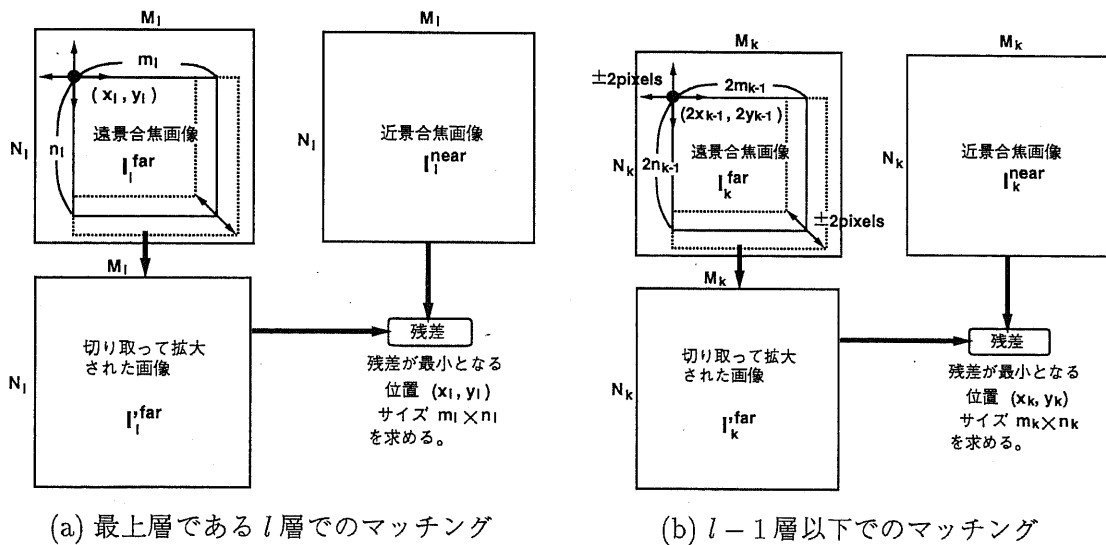


図 4.6: 各層でのマッチング

### 4.2.2 統計的処理による撮像画像中のぼけ関数の推定

本論文で提案する信号処理的統合手法では複数画像間の倍率と位置ずれの補正後の画像でさらに、図 4.2 で示したように撮像画像中のぼけ関数  $h_{ij}$  を推定しなければならない。

本論文では、ぼけ関数  $h(x, y)$  は

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.8)$$

なるガウス関数で近似できるものとしているが [16], 幾何光学的なぼけ半径を  $R$  とすると

きのガウス関数の  $\sigma$  との関係

$$\sigma = \frac{R}{\sqrt{2}} \quad (4.9)$$

に従い実際のパラメータとしては  $R$  を用いる [26]. すなわち、ぼけ関数を推定することは  $R$  を推定することである. 以下に、2.3.2 節でも概略を述べた焦点外れ画像の合成 (劣化予測) を用いて各  $h_{ij}$  に対応する  $R_{ij}$  の推定を行う手法について述べる.

倍率補正後の焦点の合わせの異なるある 2 つの撮像画像  $A, B$  に対して、まず一方の画像  $A$  に繰り返しガウス関数を畳み込むことでぼけの度合の異なる複数の画像を合成しそれらを他方の撮像画像  $B$  と比較する. この時十分良好に近似が成立する領域では、画像  $A$  がより鮮鋭であったと判断することができる. これを逆の組合せについても行う. 図 4.7 にこのような焦点外れ画像の合成による鮮鋭領域の判定手法の概念図を示す.

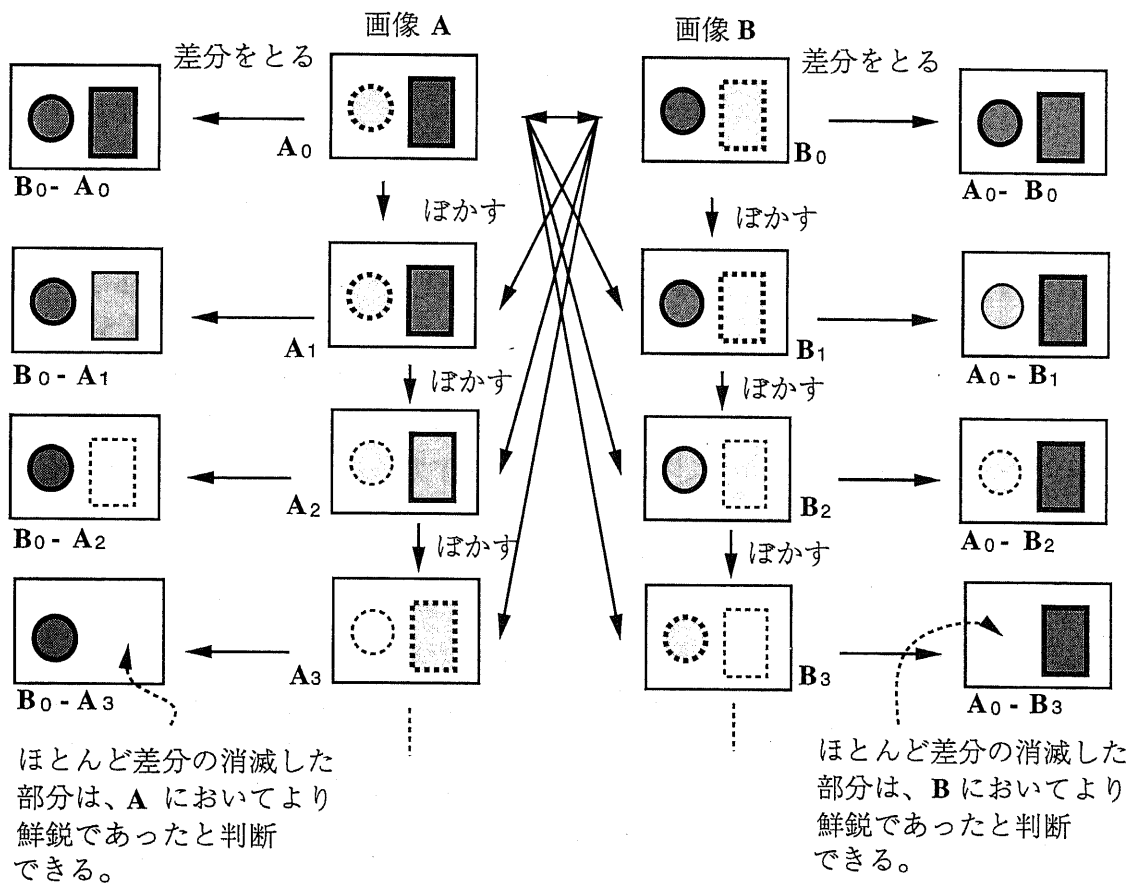


図 4.7: 焦点外れ画像の合成による鮮鋭領域の判定

具体的な焦点外れ画像の合成手法としては、 $A, B$  にガウス関数を繰り返し畳み込んだ

画像を (4.10) 式, (4.11) 式により  $n$  段階まで合成する.

$$A_k(x, y) = \sum_{i=-2}^2 \sum_{j=-2}^2 w(i, j) A_{k-1}(x+i, y+j) \quad (4.10)$$

$$B_k(x, y) = \sum_{i=-2}^2 \sum_{j=-2}^2 w(i, j) B_{k-1}(x+i, y+j) \quad (4.11)$$

$A_0 = A, B_0 = B$  であり, 画像  $A_k, B_k$  は  $A, B$  にガウス関数を  $k$  回畳み込んだ画像を表す. ここではガウス関数を表す  $w$  は分散が 1 に相当する (4.2) 式を再び用いた.

次に,  $A_1 \sim A_n$  と  $B$  の比較,  $B_1 \sim B_n$  と  $A$  との比較を画素毎に行なう. その際判定しようとする近似の度合の評価関数は, 以下のような注目画素を中心とした  $r \times r$  画素の領域  $S$  における 2 乗誤差の比を用いる. 単純に  $r = 1$  としないのは, 輝度値の比較ではなくあくまでぼけの度合の比較のためだからである.

$$d_A(k) = \frac{\sum_{(x,y) \in S} (A_k - B)^2}{\sum_{(x,y) \in S} (A - B)^2}$$

$$d_B(k) = \frac{\sum_{(x,y) \in S} (B_k - A)^2}{\sum_{(x,y) \in S} (B - A)^2}$$

すなわち,  $d_A(k)$  があるしきい値  $Th$  よりも小さくなれば, その画素において  $A$  はより鮮鋭であったと判定する. 逆に,  $d_B(k)$  があるしきい値  $Th$  よりも小さくなれば, その画素において  $B$  がより鮮鋭であったと判定する. 実際にはともに閾値を下回った場合や閾値以下とならない場合があり, これらの画素については判定保留とする. 以上のようにして画素ごとにどちらの撮像画像でより鮮鋭であったかを判定し図 4.8 に模式的に示すような結果を得る.

ここであらためて, より鮮鋭と判定された画素について  $Th$  を下回る  $d_A(k)$  あるいは  $d_B(k)$  をグラフをプロットしてみると, 図 4.9 のような結果が得られ, このグラフの最小値を与える  $k = k_m$  がその画素におけるぼけの程度といえる. 離散化されたグラフに対して最小値および 2 番目に小さい値の近傍の 4 つの値から 3 次関数近似により最小値を与える  $k_m$  を推定する.

これを基準として, 各撮像画像中のぼけの程度の統計的推定を行う. すなわち, まず図 4.8 で撮像画像  $A$  でより鮮鋭と判定された領域  $S(A)$  に対して,  $d_B(k)$  の最小値を与える  $k_m$  の重み付け平均を

$$\hat{k}_A = \frac{\sum_{S(A)} k_m (1 - w/Th)}{\sum_{S(A)} (1 - w/Th)} \quad (4.12)$$

により求める. ここで,  $w = d(k_m)$  であり  $Th$  と比較して推定がどの程度良好に行われているかを各  $k_m$  の重みとしている. これは, 撮像画像  $A$  の領域  $S(A)$  にガウス関数を  $\hat{k}_A$  回畳



み込めば  $B$  における同領域のぼけを良好に近似できることを意味する。分散が  $\sigma^2$  のガウス関数を  $\hat{k}$  回畳み込むことは分散が  $(\sqrt{\hat{k}} \sigma)^2$  のガウス関数を 1 回畳み込むことと同等である。よって (4.9) 式より  $A$  でより鮮鋭であった領域の  $B$  におけるぼけの程度を表す  $R$  を

$$R = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\hat{k}_A} \sigma \quad (4.13)$$

により得ることができる。これを撮像画像  $B$  でより鮮鋭と判定された領域  $S(B)$  についても求めれば、信号処理的統合手法において必要であるぼけ関数  $h_{ij}$  の推定が行えたこととなる。

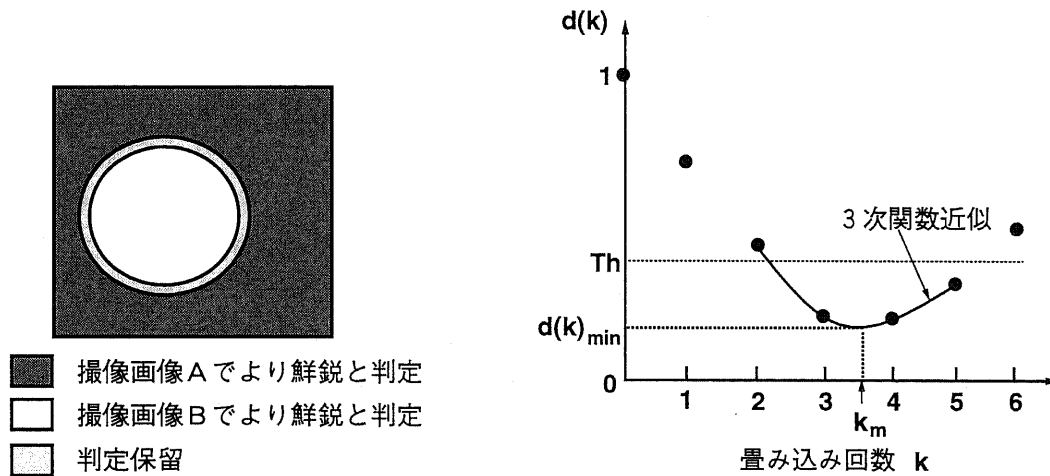


図 4.8: 典型的な鮮鋭判定結果

図 4.9: ぼけの程度  $R$  推定のための 3 次関数近似

以上のように、信号処理的統合手法では選択的統合手法のための処理に加えて、複数の撮像画像中のぼけ関数の推定を行う必要がある。ただし、実際の演算量の中心は、図 4.9 のようなぼけ関数推定やその統計的処理ではなく、焦点外れ画像合成のための畳み込みでありこれは両手法とも共通のものである。また、信号処理的手法ではこのようにして求められたぼけ関数のみを用いて複数画像からの位置不変の再構成が可能のため、個々の画素で独立に鮮鋭領域を判定した結果をそのまま用いる選択的統合手法に比べ誤判定領域や判定保留領域の影響による画質劣化が非常に生じにくく、領域ごとの焦点ぼけを調整する処理である任意焦点画像の生成も良好に行うことができる。

### 4.2.3 実画像を用いた実験とその評価

本節でこれまでに提案した画像処理による前処理を実際にいくつかの実画像に対して適用し、推定された撮像画像中のぼけ関数を用いて補正後の複数の撮像画像を信号処理的に統合し様々な任意焦点画像の生成を行う。以下、信号処理的手法の特徴を確認しながらその結果を示していく。

まず、図4.10の(a),(b)のように遠景にポスターを近景にパネルを置きそれぞれに焦点を合わせた撮像画像を用いて実験を行う。これらの画像は既に、5層の階層的マッチングを行うために外周を適当に切り取ってそのサイズを $640 \times 480$ へと補正した後のものである。近景合焦画像(a)は遠景合焦画像(b)よりも倍率が大きくなっていることが確認される。これらの画像に対して本節で示した階層的マッチングを用いることにより、遠景合焦画像中の左上点(31,21)、サイズ $579 \times 436$ の長方形が近景合焦画像の撮像範囲に対応すると推定された。これに従い遠景合焦画像に拡大補正をほどこした画像を(c)に示す。近景合焦画像(a)と補正された遠景合焦画像(c)の間で撮像範囲が良好に対応していることがみてとれる。この2つの画像から、鮮鋭領域判定に基づいて統計的処理を行いぼけ関数を推定した。ここでは、畳み込み回数は $n = 20$ 、2乗誤差計算のためのブロックサイズ $r = 5[\text{pixels}]$ 、鮮鋭領域判定に用いたしきい値は $Th = 0.1$ とした。この推定結果として $R_{21} = 4.2$ 、 $R_{12} = 4.0$ が得られた。

この推定されたぼけ半径 $R$ に対応するぼけ関数を用いて、近景合焦画像と補正された遠景合焦画像を前章で示した原理に従い信号处理的に統合することにより任意焦点画像を生成した結果を同図(d-f)に示す。全焦点画像では全体にわたり鮮鋭な画像が得られており、倍率補正等が精度よく行われていたことが確認できる。(e)では(a)に比較し $R_b = 6.0$ で遠景のみぼけを強調した画像、(f)では(c)に比較し $R_a = 2.0$ で近景のみぼけを抑制した画像を生成した。前章で示したシミュレーションと同様、撮像レンズの焦点深度のみを変更したような画像を自在に生成できていることがみてとれる。

従来を選択的統合手法との比較のため、全焦点画像の再構成結果(d)をさらに詳しく検討する。図4.11(a)に示すように近景領域の左上部に注目する。鮮鋭判定結果(b)は白が近景、黒が遠景、灰色が判定保留に相当するが、実際の近景領域よりもやや大きな範囲で判定されている。このため、この結果に基づいて選択的統合手法を適用した結果(c)では近景左上周辺の遠景領域で黒線がぼけてしまっている。これに比較して(d)の信号处理的統合に基づく再構成結果では、同領域でも黒線部分の画質劣化は抑えられている。これも前章のシミュレーションと同様の結果であり、信号処理的手法ではぼけ関数のみを用いて画面一様の処理を行うため誤判定や判定保留の多い遠近境界周辺でも安定した再構成が可能となっていることが確認される。

続いて、図4.12(a)(b)のサイズ $640 \times 480$ の画像で同様の実験を行った結果を示す。5層の階層的マッチングにより遠景合焦画像中の左上点(1,1)、サイズ $639 \times 478$ の長方形が近景合焦画像の撮像範囲に対応すると推定された。これに従い遠景合焦画像に拡大補正をほどこした画像を(c)に示す。この2つの画像から、鮮鋭領域判定に基づいて統計的処理を行いぼけ関数を推定した結果 $R_{21} = 3.5$ 、 $R_{12} = 3.7$ が得られた。これらに対応するぼけ関数を用いて、任意焦点画像を生成した結果を同図(d-f)に示す。(d)は全焦点画像、(e)では(a)に比較して $R_b = 2.0$ で遠景のぼけを抑制した画像、(f)では(c)に比較して $R_a = 6.0$ で近景のぼけを強調した画像となっている。



(a) 近景合焦画像



(d) 全焦点画像



(b) 遠景合焦画像



(e) 遠景のぼけを強調



(c) 撮像範囲補正後の遠景合焦画像



(f) 近景のぼけを抑制

図 4.10: 画像処理に基づく前処理からの任意焦点画像生成の実験: その 1

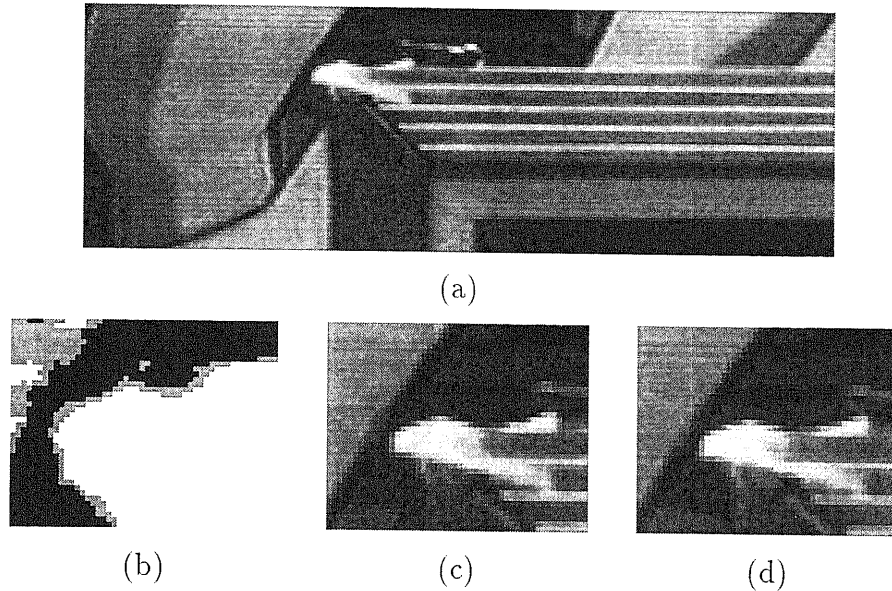


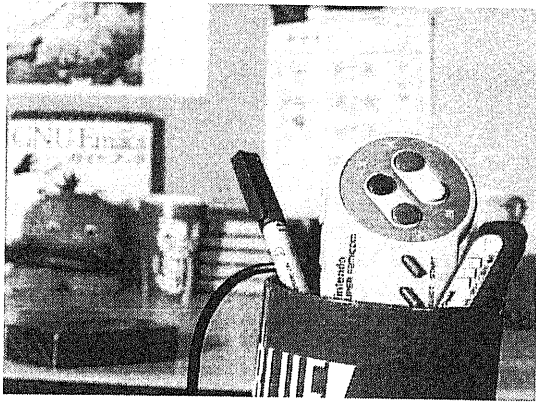
図 4.11: 全焦点画像の再構成結果の比較 (a) 近景領域の左上部分 (b) 鮮鋭判定結果 (一部拡大)(c) 選択的統合手法 (一部拡大) (d) 信号処理的統合手法 (一部拡大)

この実験においては対象シーンは仮定された奥行きに対して多少のずれを含んでいるが、前章で確認したこのずれに対する本手法の特徴通り、とくにそのずれが比較的広い範囲にわたっている遠景も良好に再構成されていることを確認することができる。

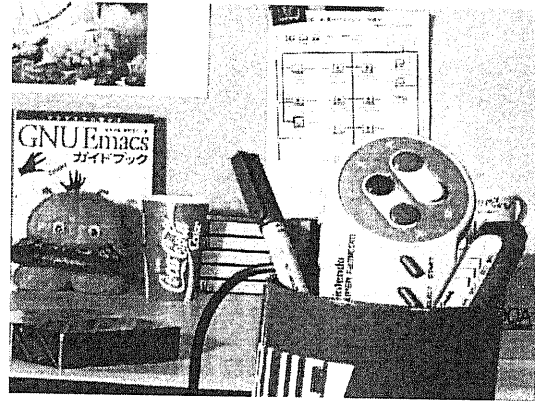
以上、本論文で提案する信号処理的手法の従来的手法に対する優位性やその特徴について実験結果から確認することができた。

ところで、本節で示した前処理のための手法を、対象シーンがより複数の奥行きをもっていた場合、すなわち撮像画像がより複数枚ある場合に拡張しようとするならば、例えば  $n$  枚の撮像画像の間で互いに鮮鋭判定を行い判定保留の領域も含め  $n + 1$  の領域に分割された図 4.8 のような判定結果をまず求め、その各領域につきそれに対応する鮮鋭領域をもつ撮像画像とその他の  $n - 1$  枚の画像で図 4.9 のような推定および統計処理を行っていくことで  $n(n - 1)$  のぼけ関数を求める、という方針が考えられる。これは実際、十分可能な手法と考えられるがその処理の複雑化にともない演算量の増大は避けられない。

次節では撮像システムを整えあらかじめ撮像に用いるカメラ特性の分析を行っておくことにより、本節で示したような撮像画像ごとの処理によらず、また対象シーンの奥行きがより複数層となるような場合でも容易に、撮像時のカメラパラメータのみから倍率変化等の補正とぼけ関数の決定という前処理が可能となる手法を述べる。



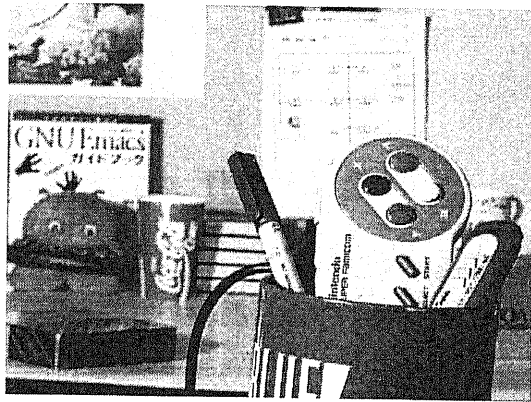
(a) 近景合焦画像



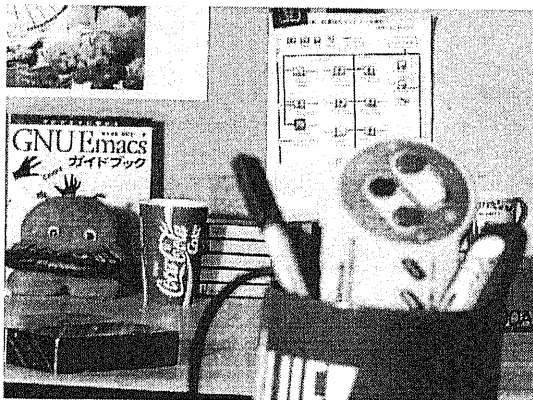
(d) 全焦点画像



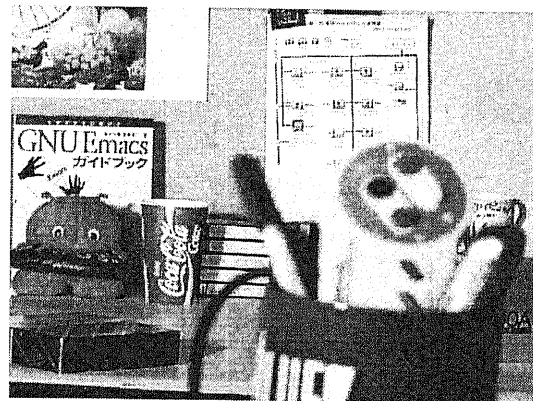
(b) 遠景合焦画像



(e) 遠景のぼけを抑制



(c) 撮像範囲補正後の遠景合焦画像



(f) 近景のぼけを強調

図 4.12: 画像処理に基づく前処理からの任意焦点画像生成の実験: その 2

### 4.3 カメラ特性の分析に基づく任意焦点画像の生成

本節では、本論文の目的である画像取得および生成という観点をより明確にした場合として、撮像に用いるシステムを整えあらかじめそのカメラの特性の分析を行っておくことにより、撮像画像ごとの処理によらず、撮像範囲のずれの補正とぼけ関数の決定という任意焦点画像生成のための前処理が可能となる手法を述べる。

撮像範囲のずれや各撮像画像中のぼけ関数は実際には対象シーンすなわち撮像画像によらずすべて撮像に用いるカメラの特性と撮像時のカメラパラメータ、具体的には焦点合わせのパラメータから決定される。そこで、容易に分析可能なテストチャートを用いて様々な焦点合わせのパラメータで撮像した画像からその撮像範囲のずれおよび各撮像画像中のぼけ関数をあらかじめテーブル化等しておけば、任意焦点画像生成のための前処理が撮像画像ごとの処理によらず可能となる。

前節で示した前処理のための各推定手法を対象シーンがより複数の奥行きをもっていた場合、すなわち撮像画像がより複数枚ある場合に拡張しようとするならば、その処理の複雑化にともなう演算量の増大は避けられない。しかし、本節で示す手法によれば複数画像の撮像時の焦点合わせパラメータの組み合わせのみからただちに任意の撮像画像間のずれの補正および各撮像画像中のぼけ関数の決定が可能であり、撮像画像が多数枚となっても容易に信号处理的統合手法へと適用することができる。

以上のように、本節では対象シーンがより複数の奥行きをもっていた場合、すなわちより複数の撮像画像に対する信号处理的統合手法の適用についても、その実験結果までを示していく。本節で論じる手法は撮像システムにまで踏み込むことでさらに容易に多様な任意焦点画像の生成を可能とするものであるが、後の第 8 章においては本手法に基づく実験の結果からの考察に基づきより最適な画像取得および生成システムのために撮像カメラの構造そのものに対しても提案を行うこととなる。

#### 4.3.1 カメラ特性からの撮像範囲補正およびぼけ関数決定とそのための撮像システムの構成

前節では、任意焦点画像生成のために必要となる、撮像範囲補正のためのレジストレーションと撮像画像中のぼけ関数を撮像画像そのものから求めていた。しかし実際にはこれらはカメラ特性と複数画像の撮像時における焦点合わせのパラメータ（以下フォーカス値と称する）の組み合わせから決まるものである。例えば、図 4.13 に示すように、複数画像の撮像時のフォーカス値がそれぞれ  $f_f, f_n$  であるとすればそれはそれぞれ焦点を合わせた近景、遠景の奥行き  $d_f, d_n$  に対応している。ところでまず、 $f_f, f_n$  における撮像範囲はそのカメラ自身の特性であり、従って遠景の撮像範囲のどの領域が近景の撮像範囲に対応するかは  $f_f, f_n$  により決定されるはずである。さらにまた、フォーカス値  $f_n$  で焦点の合っていた奥行き  $d_n$  が  $f_f$  のフォーカス値において生じるぼけ関数、フォーカス値  $f_f$  で焦点の合っ



ていた奥行き  $d_f$  が  $f_n$  のフォーカス値において生じるぼけ関数についても同様である。つまり  $(f_f, f_n)$  と  $h_{ij}$  との対応はそのカメラの特性である。以上のように、撮像に用いるカメラの特性さえ分かっているならば、撮像範囲のずれや各撮像画像中のぼけ関数は対象シーンすなわち撮像画像によらずすべて複数画像の撮像時のフォーカス値の組み合わせから決定することができる。

そこで、容易に分析可能なテストチャートを用いて様々な焦点合わせのパラメータで撮像した画像からその撮像範囲のずれおよび各撮像画像中のぼけ関数についてあらかじめテーブル化などしておくことを考える。このようにして得られたカメラ特性は 3.3.3 項で検討したような対象シーンがより複数の奥行きとなる場合、すなわちより複数の撮像画像を対象とする場合においても、問題なくそのまま利用して必要な前処理を行うことができる。撮像画像ごとの処理によらない本節で論じる手法の特徴と合わせて、後に示す実験からもわかるように非常に容易に複数画像に対する任意焦点画像生成が可能となる。

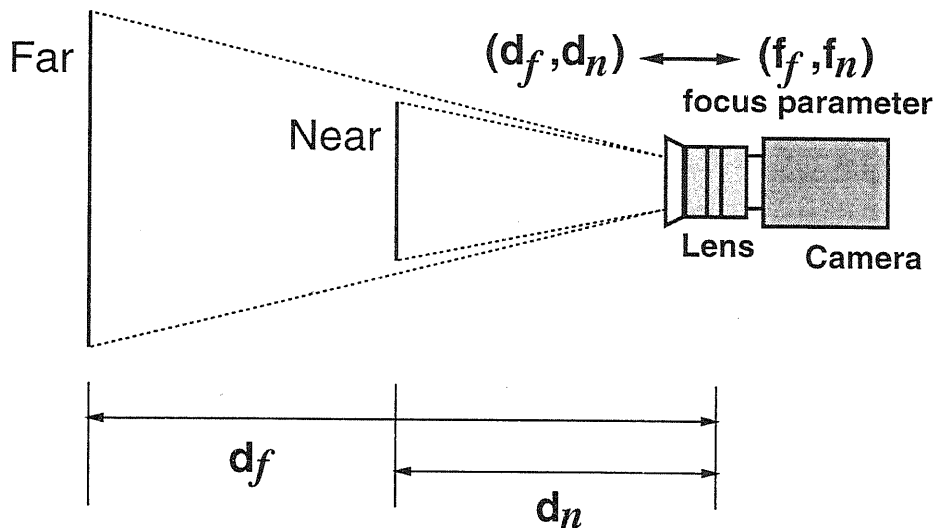


図 4.13: 各フォーカス値に対応する奥行きと撮像範囲

カメラ特性の分析およびこれに基づく任意焦点画像生成のために実際に作成した撮像システムの構成を図 4.14 に示す。CCD カメラレンズは電動サーボモータを装備し、ズーム、フォーカス、アイリス各操作ともにコントロールボックスによるフルサーボ方式となっている。ズームとフォーカスについては、コントロールボックスに RS-232C 接続した制御用 PC からの 12bit 精度の位置指令 (0 - 4095, フォーカスについては近景から遠景へと焦点合わせが移動) に追従して動作する。逆に現在のズーム位置情報、フォーカス位置情報を PC へと読み出すこともできる。CCD カメラによる撮像画像は A/D 変換されワークステーションへと蓄積される。

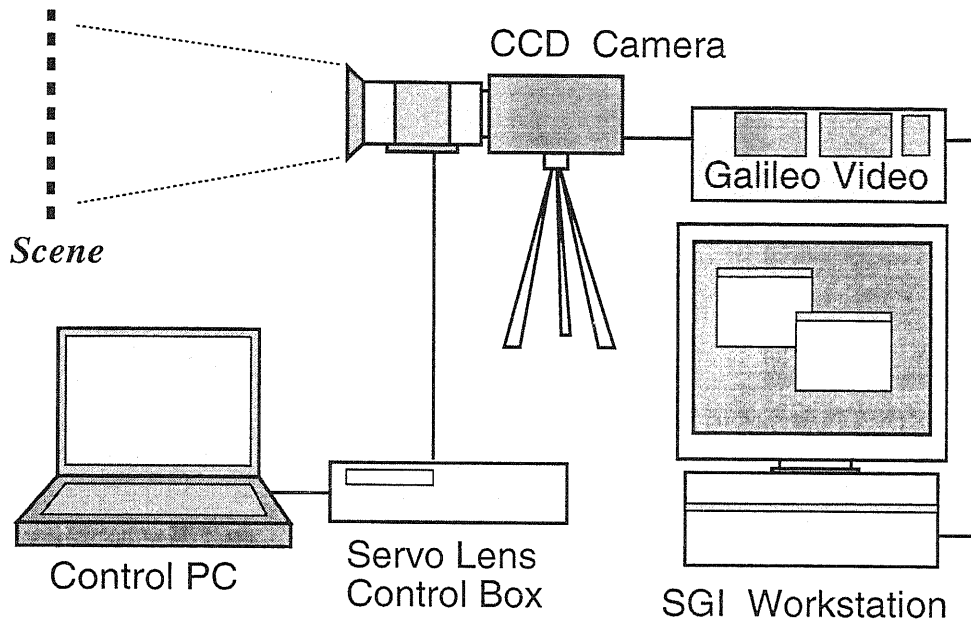


図 4.14: 撮像システムの構成

ところで、以下に詳しく述べるようなカメラ特性からの前処理および任意焦点画像生成のためには、ズームとアイリスは常に固定という条件が必要である。ただしもちろん、ズーム、アイリスを変化させながらそれぞれにつき同様の分析を行っておくことにより、複数の撮像画像の間でのみズーム、アイリスが固定でさえあれば、それに対応するカメラ特性の分析結果を用いることで様々なズームおよびアイリスに対する任意焦点画像の生成が可能である。

#### 4.3.2 テストチャートを用いたカメラ特性の分析

カメラ特性の分析に基づく任意焦点画像生成のための前処理として、具体的に本節ではアイリスおよびズームを固定としフォーカス値を変数として、

- 図 4.15(a) を用い撮像範囲変化の測定
- 図 4.15(b) を用い撮像画像中のぼけ関数の測定

を行い、必要となる特性を分析する。測定結果はテーブル化して利用する。実際の対象シーン撮像時にそれぞれの奥行きに焦点を合わせた際のフォーカス値の組み合わせにしたがいこのテーブルを読みとることにより、撮像範囲の補正および撮像画像中のぼけ関数の決定を容易に行うことができる。



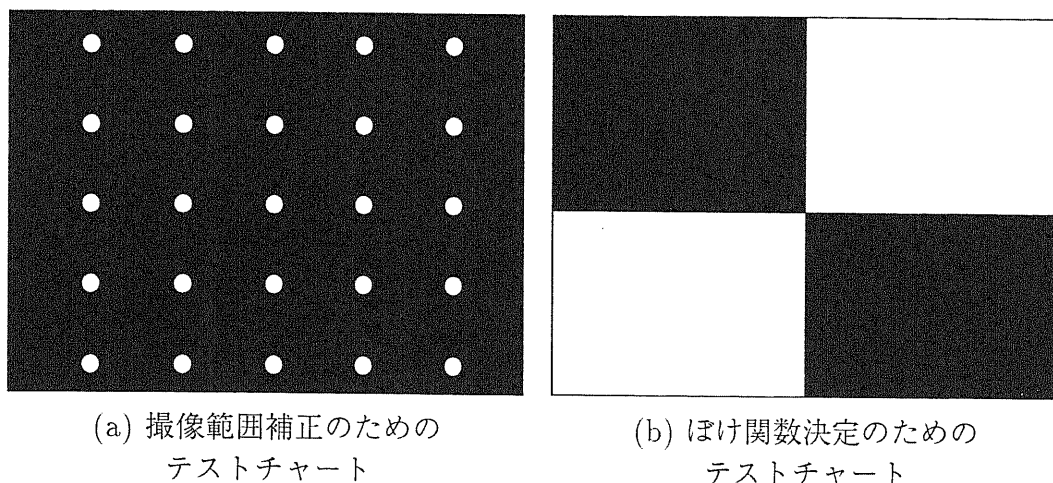


図 4.15: カメラ特性の分析に用いるテストチャート

まず、撮像範囲補正のための測定として、図 4.15(a) に示すテストチャートを各フォーカス値にて撮影し  $5 \times 5$  の白点の座標情報を蓄える。実際には各フォーカス値によって白い円形領域は様々にぼけるため、各点の座標は円形領域の周りに適当な正方領域を指定し、その領域中の輝度値の重心として求める。このうち例えば、ある 2 点間 (左上点と右下点) の距離はフォーカス値にしたがって図 4.16 のグラフのように変化する。この特性に合わせてより遠景に焦点を合わせた撮像画像に拡大補正を施すことで全撮像画像を同じサイズにそろえることができる。ただし前述のように、カメラ光学系において画像の中心座標は光軸と必ずしも一致しないため、ここでは実際の補正には  $5 \times 5$  点の座標を基準とした双 1 次内挿による拡大を用いる。測定結果によれば実際、一般にこの拡大はほぼ画像の中心付近のある座標を中心とした相似拡大となっている。

続いて、撮像画像中のぼけ関数決定のための測定として、輝度がステップ変化するテストチャート (図 4.15(b)) を各奥行き、各フォーカス値にて撮像し、LSF (Line Spread Function) を得る。具体的には各撮像画像に対して輝度エッジをその垂直方向に 100 ラインほど平均することで LSF とする。本論文ではぼけ関数 (PSF) はガウス関数で表されるものとしておりかつ PSF のぼけの程度を  $R = \sqrt{2}\sigma$  の値で表現しているが、完全に焦点を合わせた場合のエッジに対し様々にぼけ関数の畳み込み演算を施して合成した LSF と実際の撮像 LSF との 2 乗誤差が最小となる  $R$  としてぼけ関数 (PSF) を求める。

図 4.17 はそれぞれフォーカス値が 2176 と 3072 において合焦する奥行きにある対象がその他のフォーカス値でどれほどぼけているかを測定した結果である。例えば、この 2 つの奥行きに対象が存在しているとすると、フォーカス値を 2176 として近景に焦点を合わせれば 3072 で合焦していた領域は  $R = 3.3$  でぼけ、フォーカス値を 3072 として遠景に焦点を合わせれば 2176 で合焦していた領域は  $R = 3.4$  でぼけることがわかる。なお、フォーカ

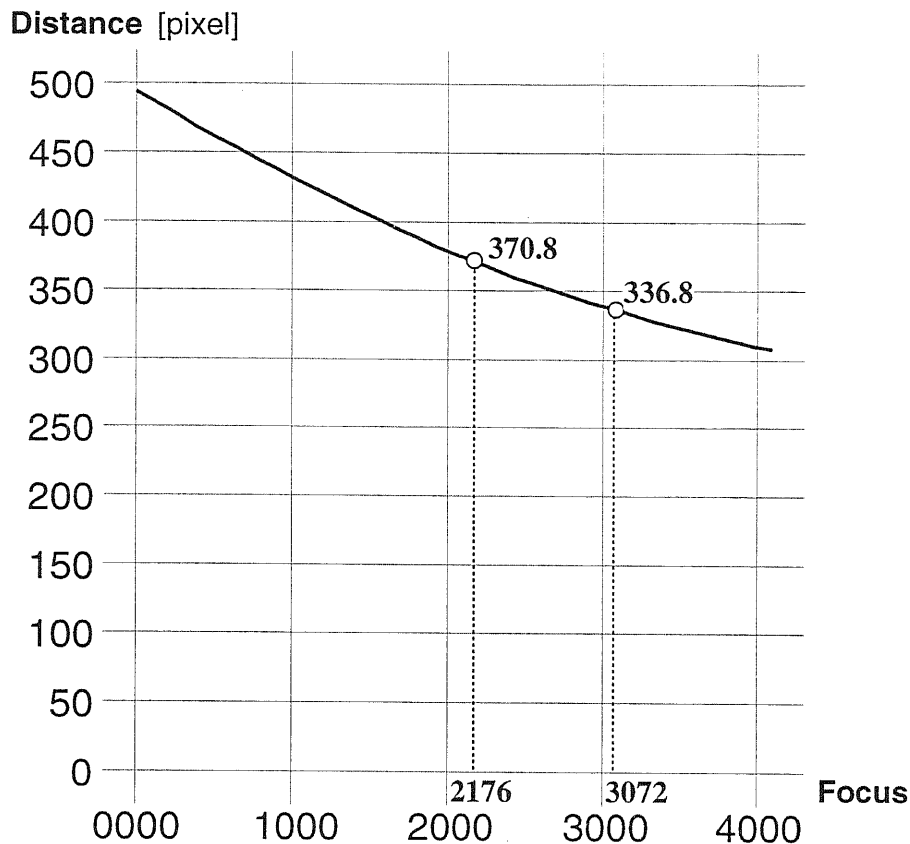


図 4.16: 撮像範囲補正のための測定結果

ス値の表現精度は 12bit であるが、測定は 7bit おきに行っている。

以上のように、あるフォーカス値において焦点の合う奥行きにある対象が、それ以外のフォーカス値においてどの程度のぼけを生じるかをテストチャートを用いることによってあらかじめ測定しておけば、最終的に表 4.1 に示すようなぼけ関数とフォーカス値の関係がテーブル化して得られる。この表中で撮像時のフォーカス値に対応する部分を読むことにより、撮像画像中のぼけ関数  $h_{ij}$  を決定することができる。図 4.17 のグラフとの関係でいえば、それぞれのグラフが表 4.1 における縦 1 列に対応する。

なお、実際には撮像範囲補正のための拡大によって撮像画像中のぼけ関数へ影響が生じるため、 $R$  に対し図 4.16 から得られる補正に応じた拡大率を乗じることで、信号処理的統合手法において利用するぼけ関数には補正を行う。

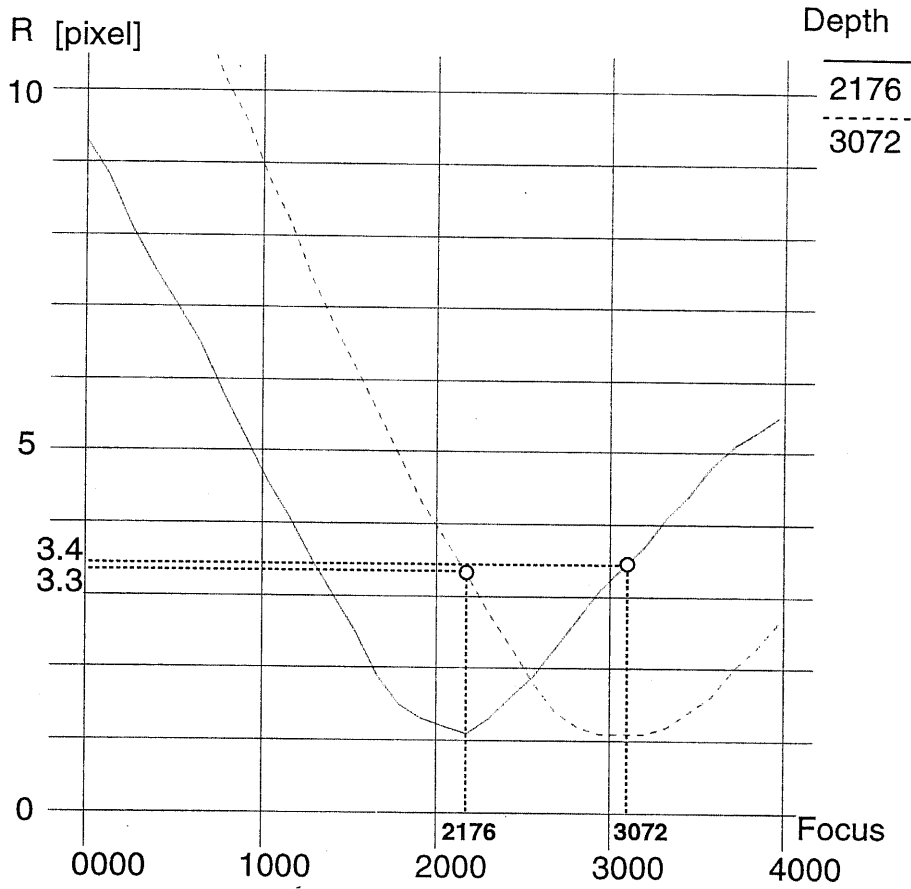


図 4.17: ぼけの程度 ( $R$ ) 測定結果

表 4.1: フォーカス値によるぼけ半径  $R$  の変化

		奥行き*					
		...	2176	...	2816	...	3328
フォーカス値	:						
	2176		合焦		2.2		4.8
	:						
	2816		2.7		合焦		2.0
	:						
	3328		4.1		2.1		合焦
:							

\*この場合シーンの奥行きは合焦するフォーカス値を意味している。

### 4.3.3 実画像を用いた実験とその評価

以上のような手法により特性を分析されたカメラを用いて撮像された画像から任意焦点画像生成の実験を行う。

まずある2層の奥行きからなる対象シーンにおいて、それぞれの奥行きに焦点を合わせた場合のフォーカス値は2176, 3072であった。図4.18(a)が前者の近景に焦点を合わせた撮像画像であり、図4.18(b)が後者の遠景に焦点を合わせた撮像画像を4.3.2項で分析された測定結果をもとに近景に焦点を合わせた撮像画像に撮像範囲および画像サイズが一致するよう拡大補正した画像である。サイズはそれぞれ $140 \times 100$ となっている。これら2枚の撮像画像中のぼけ関数として、表4.1からフォーカス値2176, 3072に対応するぼけ関数 $h_{ij}$ の $R$ を読みとる。ただし、撮像範囲補正による拡大の影響も考慮し、フォーカス値3072における撮像画像の近景領域のぼけの程度 $R = 3.4$ には図4.13から得られる拡大率1.10を乗じ $R_{21} = 3.7$ とする。フォーカス値2176とした撮像画像(a)における遠景のぼけの程度はそのまま $R_{12} = 3.3$ となる。以上に基づき信号処理的統合手法を適用することにより、図4.18(c)-(f)に示すような様々な任意焦点画像を生成できる。図4.18(c)は全焦点画像( $R_a = R_b = 0.0$ )、(d)は $R_a = 2.0, R_b = 0.0$ とすることにより(b)に比べ近景のみぼけを抑制したような画像、(e)は $R_a = 0.0, R_b = 5.0$ とすることにより(a)に比べ遠景のみぼけを強調したような画像、(f)は $R_a = 4.0, R_b = 6.0$ で近景、遠景をとともにぼかした生成画像である。すべて3回の反復により再構成された。以上の $R$ の値はすべてサイズ補正後の画像におけるものである。

本節で論じたカメラ特性の分析に基づく任意焦点画像生成のための前処理手法は、3.3.3項で検討したような対象シーンがより複数の奥行きとなる場合、すなわちより複数の撮像画像を対象とする場合においても、問題なくそのまま適用することができる。実際に実験として対象シーンが3層の奥行きを持つ場合に対して任意焦点画像生成の実験を行う。まず、それぞれの奥行きにフォーカス値2176, 2816, 3328で焦点を合わせた3枚の撮像画像を、それらの撮像範囲および画像サイズが一致するように、もっとも近景に焦点を合わせた撮像画像、すなわち2176で焦点を合わせた撮像画像を基準として、4.3.2項で分析された測定結果をもとに適宜拡大補正を行い、図4.19(a)(b)(c)に示す画像を得る。サイズはそれぞれ $275 \times 200$ となっている。さらに表4.1からフォーカス値2176, 2816, 3328に対応するぼけ関数 $h_{ij}$ の $R$ を読みとる。前述の実験と同様、撮像範囲補正のための拡大処理の影響も考慮してそれぞれ図4.13から得られる拡大率を乗じれば(a)では中程の層が $R_{12} = 2.2$ 、もっとも奥の層が $R_{13} = 4.8$ 、(b)では手前の層が $R_{21} = 2.9$ 、もっとも奥の層が $R_{23} = 2.1$ 、(c)では手前の層が $R_{31} = 4.6$ 、中程の層が $R_{32} = 2.4$ でぼけているものと決定される。このようにして得られたぼけ関数を用いて前章の3.3.3項に示した所望の画像と複数の撮像画像間に成立する位置不変の恒等式が表される。この信号処理的に統合された式を反復的に解くことで図4.19(d)(e)(f)のような様々な任意焦点画像が生成できる。それぞれ(d)は $R_a = R_b = R_c = 0.0$ とした全焦点画像、(e)は $R_b = 1.0, R_c = 2.0$ として(a)のぼけを抑

制したような画像, (f) は  $R_c = 4.0$  を与え遠景のみ非合焦とした画像である. 前章 3.3.3 項でも指摘したが, 実際に本実験に示すとおり任意焦点画像の生成においては, (e) のようにレンズの焦点深度を変化させたような画像のみならず, (f) のように光学的にはありえない様々な画像の合成も可能となる.

以上, 本節で論じた任意焦点画像生成のためのカメラ特性の分析に基づく前処理手法では, 撮像画像ごとの処理によらずただちに信号処理的統合が行えるのみならず, 非常に容易により複数の奥行きを持つ対象シーンに対して, すなわちより複数の撮像画像に対して任意焦点画像の生成が可能となる特徴がある.



(a) 近景に焦点を合わせた撮像画像  
(2176 で合焦)



(b) 遠景に焦点を合わせた撮像画像  
(3072 で合焦)



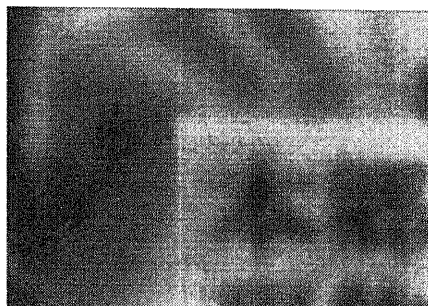
(c) 全焦点画像



(d) (b) の近景ぼけを抑制



(e) (a) の遠景ぼけを強調



(f) 近景, 遠景ともにぼけを強調

図 4.18: カメラ特性の分析に基づく前処理からの任意焦点画像生成の実験



(a) 手前の層に合焦



(d) 全焦点画像



(b) 中程の層に合焦



(e) (a) のぼけを抑制



(c) もっとも奥の層に合焦



(f) もっとも奥の層のみ非合焦

図 4.19: 対象シーンがより複数の奥行きを持つ場合の任意焦点画像生成の実験

#### 4.4 まとめ

本章では信号处理的統合に基づく任意焦点画像の生成のために必要となる前処理, すなわち複数の撮像画像間の撮像範囲のずれの補正と各撮像画像中のぼけ関数決定のための2通りの手法を提案した. これらの手法に基づくことにより, 実際に一般的なカメラを用いて撮像した焦点合わせの異なる複数の画像から任意焦点画像を生成する実験を行い, 良好に所望の画像の再構成が可能であることを確認した.

前処理ための手法としてまず4.2節では階層的マッチングに基づく撮像範囲のずれの補正と劣化予測を用いた領域分割に基づくぼけ関数の統計的推定を論じた. 本論文で提案する信号处理的統合手法では以上のように, 選択的統合手法と共通の処理に加えさらにぼけ関数の推定が必要となるが, これにより全焦点画像のみならず容易に各奥行きを独立かつ任意に調整した任意焦点画像の生成が可能となる. また, 実際に撮像された画像を用いて, 全焦点画像の再構成における選択的統合手法との実験結果の比較を行ったところ, 前章3.4.1項での考察通り信号处理的統合手法によればより良好な画質の生成画像が得られることが確認された. また, 同様に前章3.4.2項における考察通り, 対象シーンにおいて仮定される奥行きからの実際の対象シーンのずれがその奥行き距離に対して十分小さければ比較的良好に任意焦点画像の生成が可能であることも確認した.

4.3節では撮像システムを整えあらかじめ撮像に用いるカメラ特性を分析, テーブル化しておくことにより, 複数画像の撮像時の焦点合わせのパラメータの組み合わせのみからこのテーブルに基づき, 複数の撮像画像間の撮像範囲のずれの補正と各撮像画像中のぼけ関数決定をただちに行う手法を述べた. 本手法は4.2節の手法と異なり撮像画像ごとの処理によらずまた, 前章3.3.3項で検討したような対象シーンがより複数の奥行きとなる場合, すなわちより複数の撮像画像を対象とする場合においてもそのまま同様の分析結果を容易に適用し多様な任意焦点画像の生成が可能となるという特徴がある. なお, 本章ではズームとアイリスは常に固定という条件で各実験を行ったが, もちろん, ズーム, アイリスを変化させながらそれぞれにつき同様の分析を行っておくことにより, 複数の撮像画像の間でのみズーム, アイリスが固定でさえあれば, それに対応するカメラ特性の分析結果を用いることで様々なズームおよびアイリスに対する任意焦点画像の生成が可能である.

4.2節で論じた手法は焦点合わせのみ変化させて撮像した複数の画像であれば適用可能であり, より一般的な条件に対応した画像処理に基づく手法といえる. これに対し4.3節で述べた手法は本手法の目的である画像取得および生成という観点をさらに明確にした場合の, より撮像システムそのものにまで立ち入った手法である. 後者の手法では, 撮像に用いるカメラ特性の分析さえあらかじめ行っておけば, 複数の撮像画像からの任意焦点画像生成のための前処理を大幅に単純化, 簡略化することができ, 対象シーンがより多数層となった場合でも容易に適用が可能である. 第2章の考察で述べた通り, 本論文では目的を明確にすることでより提案手法や提案システムの拡張, 最適化を行なっていくことを考える. 本章で用いた従来の一般的な単焦点すなわち同時にひとつの焦点合わせでしか撮像できない



カメラでは対象シーンを動画像として撮像することは原理的に不可能である。本論文後半の中心となる第8章では、4.3節のようなシステム化の効果についての考察に基づきさらに撮像システムの中でもカメラ自身の構造への新たな提案を行ない、動画像に対しても任意焦点画像の生成が可能となる多焦点カメラ撮像システムを構築する。

さて、本章では信号处理的統合手法のための前処理について詳しく論じ、実際に複数の撮像画像からの任意焦点画像の生成が可能となったが、次章では信号处理的統合手法そのものの演算に注目し、これをより詳細に検討していく。具体的にはまず、本章までで用いてきた、信号处理的統合手法の基礎となる位置不変の恒等式における反復的再構成の収束性について議論する。その反復再構成の演算においても単純に畳み込みを行うのではなく、これを周波数領域上に変換することで効率的な反復演算を可能とする手法を提案する。また、周波数領域上への変換により、2.3.1項で述べたような一画像からの劣化復元と同様の除算の基づく所望の画像の再構成手法も提案することができる。さらに、以上とはまた別の手法として、単純な畳み込みを用いてもこれをグラフィクスアクセラレータ上で実現することにより大幅に計算時間を短縮できることを示す。本手法によれば映像編集、映像生成という意味では実際に十分高速に所望の画像を得ることができる。前者の周波数ベースの手法も専用チップ化の可能性を期待させるものであり、将来的には動画像を対象としたリアルタイム処理への適用も考えられる。以上のような各手法の提案および実験により、任意焦点画像の再構成において領域分割など複雑な処理を必要としないという信号处理的統合手法の柔軟な特徴が次章でさらに確認される。



## 第 5 章

### 任意焦点画像生成のための演算手法

#### 5.1 はじめに

前章までで、複数の撮像画像の信号处理的統合に基づく任意焦点画像の生成について、ひとつおりの前処理から実際の所望の画像の再構成までの手法を具体的に示し、様々な撮象画像に対して実験を行なうことでその有効性を確認した。

ところで前章までに提案した手法では再構成のために、画像に対してぼけ関数で構成されるフィルタの畳み込みの反復演算を行なう必要がある。本章ではこのような信号处理的統合手法そのものの演算に注目し、その収束性あるいは高速な演算手法について詳しく検討する。

具体的にはまず 5.2 節で、信号处理的統合手法の基礎となる位置不変の恒等式を解くための反復的再構成演算の収束性について述べておく。従来の 1 枚の画像からの一般的鮮鋭画像復元手法と異なり本手法は視覚的に非常に良好な収束性を持っている。

続いて 5.3 節で、反復再構成の演算において単純に画像へのフィルタの畳み込みを行うのではなく、位置不変の恒等式を周波数領域上に変換することにより効率的な反復演算を可能とする手法を提案する。さらに、周波数領域上へ変換を行えば 1 枚の画像からの一般的鮮鋭画像復元手法と同様に、周波数領域における単純な除算に基づいても所望の画像の再構成ができることを示す。それぞれの手法の特徴を比較検討する。

以上とはまた別の手法として 5.4 節において、グラフィクスアクセラレータ上で畳み込み演算を実現することにより大幅に計算時間を短縮できることを示す。本手法では周波数領域上への変換等によらず画像への単純な畳み込み演算を用いるが、使用するグラフィクスアクセラレータの性能によっては映像編集、映像生成という意味では実際に十分高速に所望の画像を得ることができる。

信号处理的統合手法は領域分割など複雑な処理を必要とせず任意焦点画像を容易に再構成することが可能であるが、本章においてもその特徴に基づいて柔軟に様々な手法を提案することができる。

## 5.2 信号处理的統合における反復再構成の収束性

前章まででは、信号处理的に統合された位置不変の恒等式を反復的手法を用いて解くことにより所望の画像の再構成を行なっていた。本節ではこの反復再構成の収束性について詳しく検討する。そのためにまず、問題を周波数領域上へと変換する。すなわち、(3.7) 式は

$$G = HF \quad (5.1)$$

に変換され反復再構成のための (3.9) 式も

$$\hat{F}_{n+1} = (H + 1)\hat{F}_n - G \quad (5.2)$$

と書くことができる。以下の都合のため  $\tilde{G} = -G$ ,  $\tilde{H} = -H$  と置き直せば、これは

$$\tilde{G} = \tilde{H}F \quad (5.3)$$

の  $F$  を

$$\hat{F}_{n+1} = (1 - \tilde{H})\hat{F}_n + \tilde{G} \quad (5.4)$$

により再構成することに等しい。ところで一般に (5.3) の形をした式の反復的再構成として

$$\hat{F}_{n+1} = (1 - \tau\tilde{H})\hat{F}_n + \tau\tilde{G} \quad (5.5)$$

は

$$0 < \tau < \frac{2}{K} \quad (5.6)$$

の条件を満たせば所望の値  $F$  に収束することが知られている [17]。ただしここで、 $K$  は  $\tilde{H}$  の最大値である。なお、ぼけはガウス関数で表されるものとしているので、ここでは  $\tilde{H}$  は常に実数である。(5.4) 式との対応をとれば  $\tau = 1$  であるから、上記 (5.2) 式の反復再構成は

$$0 < \tilde{H} < 2 \quad (5.7)$$

の場合、所望の画像に収束するといえる。

まず簡単のために対象シーンが 2 層の奥行きを持つ場合について (5.7) の条件式が成立することを示す。実際には画像は 2 次元であるが、本論文ではぼけ関数はガウス関数と仮定しており周波数領域上への変換も含めそれぞれの軸に分離可能であるから 1 次元として議論を行なってもさしつかえない。さて対象シーンが 2 層の奥行きを持つ場合、それらの奥行きに焦点を合わせた 2 枚の撮象画像中のぼけ関数を用いて

$$\tilde{H} = 1 - H_{21}H_{12} \quad (5.8)$$

となっている。この値は 3.2 節での誘導からも明らかなように、撮象画像  $G_1, G_2$  を各層のみの画像  $F_1, F_2$  の重ね合わせにより表した

$$\begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & H_{12} \\ H_{21} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} \quad (5.9)$$

における

$$\begin{pmatrix} 1 & H_{12} \\ H_{21} & 1 \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

の行列式に他ならない。ここでは関数  $h_{ij}$  を周波数領域へと変換した  $H_{ij}$  は周波数  $\omega$  に対して  $e^{-\frac{\sigma^2 \omega^2}{2}}$  で表され、 $\omega = 0$  すなわち直流成分に対して  $H_{ij} = 1$ 、より高周波の成分すなわち  $\omega \rightarrow \infty$  に対して  $H_{ij} \rightarrow 0$  となる。その範囲は  $0 < H_{ij} \leq 1$  として抑えられる。よって、(5.10) 式の各列をそれぞれ  $v_1, v_2$  と定義すれば図 5.1(a) のように  $v_1$  は AB 上のみ、 $v_2$  は BC 上のみを動き互いに独立である。これはすなわち (5.10) 式に対応する行列式  $\tilde{H}$  が 0 とはならないことを表す。ただし  $H_{21} = H_{12} = 1$ 、すなわち周波数  $\omega = 0$  に対してのみ  $v_1 = v_2$  となり  $\tilde{H} = 0$  となる。以上のことは (5.1) 式において直流成分のみが零元となっていることに対応している。

さて、周波数  $\omega \geq 0$  に対する  $\tilde{H}$  の変化をあらためて整理すると、 $0 < H_{ij} \leq 1$  からまず  $0 \leq \tilde{H}(\omega) < 1$  である。等号は  $\omega = 0$  においてのみ成立する。さらに、上述のように  $\omega > 0$  において  $\tilde{H}_{ij}$  は単調減少であるから  $\tilde{H}(\omega)$  は  $0(\omega = 0)$  から  $1(\omega \rightarrow \infty)$  へと単調増加を示す。したがって、(5.4) 式の反復再構成は  $1 - \tilde{H}$  の変化からわかるように高周波ほど収束性が良いといえる。これは復元において視覚的に非常に良好な特徴である。以上、明らかに  $\omega = 0$  を除き対象シーンが 2 層の場合の反復再構成は (5.7) 式の条件をみたすこととなりその収束が保証される。どちらかの撮象画像を初期画像  $\hat{F}_0$  とすることで  $\omega = 0$  すなわち直流成分は与えられるので所望の画像が再構成できる。またこれにより比較的収束の遅い零点近辺の低周波成分もあらかじめ補われることになるため、上述の高周波成分の良好な復元の特徴と合わせ少ない反復回数でも所望の画像が再構成可能となる。

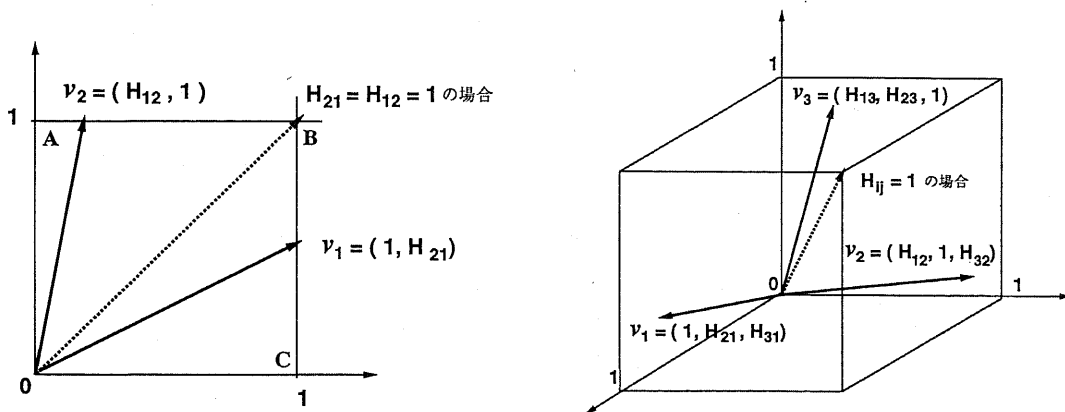
対象シーンが 3 層の奥行きを持つ場合については別の議論を行う必要がある。まず  $\tilde{H}$  は撮象画像を 3 層の重ね合わせによりモデル化した式、

$$\begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & 1 & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

における  $3 \times 3$  の行列に対応する行列式に他ならない。そして、 $0 < H_{ij}(\omega) \leq 1$  かつ  $H_{ij} \rightarrow 0(\omega \rightarrow \infty)$  であることから  $\tilde{H}(0) = 0$  また  $\omega \rightarrow \infty$  で  $\tilde{H}(\omega) \rightarrow 1$  となることは奥行きが 2 層の場合と同様である。しかし、上記の  $3 \times 3$  の行列に対し各列  $v_1, v_2, v_3$  と定めた場合、図 5.1(b) のようにそれぞれは立方体の各面上を動くが、必ずしも単純にそれらの独立性を言うことはできない。実際には、カメラ特性が理想的である場合は、 $H_{ij} = H_{ji}$  かつ  $H_{12} > H_{13}, H_{23} > H_{13}$  であることにより、(5.7) 式の条件をみたす  $0 \leq \tilde{H}(\omega) < 1$  を導

くことが可能である. 等号も同様に  $\omega = 0$  においてのみ成立する. ところが,  $H_{ij} = H_{ji}$  といった理想的なカメラ特性は必ずしも満たされず, この場合 (5.7) 式の範囲には収まらなくなる可能性がある. ただし, ここで  $\tilde{H} > 0$  の部分については結局 (5.6) 式を満たすように改めて  $\tau$  を定義し反復式を設定しなおせば問題にはならない. 実際, 本論文の範囲ではほとんど  $0 \leq \tilde{H}(\omega) < 1$  の周辺で十分に (5.7) 式を満たしており, 反復式は最初の設定通り  $\tau = 1$  に統一している. さらに,  $\omega$  に伴う各  $v_i$  の動きからも推測されるように,  $\tilde{H}(0) = 0$  また  $\omega \rightarrow \infty$  で  $\tilde{H}(\omega) \rightarrow 1$  となることは零点およびその近辺がある程度, 低周波成分にあることを示している. よって, 多くの場合, 撮象画像のうちいずれかを初期画像  $\hat{F}_0$  とすればそのような低周波成分まで補われた形で良好に所望の画像を再構成することが可能と考えられる.

以上の議論や図 5.1 から明らかなように対象シーンが何層の奥行きを持っている場合でも位置不変の恒等式 (5.3) および反復再構成 (5.4) 式における  $\tilde{H}$  は比較的低周波の成分を除き (5.6) 式の条件をみたすことが可能であり, また,  $\tilde{H} = 0$  およびその近辺となる低周波成分でも撮象画像を初期画像とすることである程度補うことができる. したがって, より複数の奥行きを持つ対象シーンについてもほぼ良好な所望の画像が再構成できることとなる. もちろん,  $\tilde{H} < 0$  となる領域があれば, 反復回数をそれほど増加させることはできない. このことを考慮し, 零点周辺, 低周波成分の処理に対してより撮象画像そのものをそのまま利用する手法も次節の後半で提案する. これは一般的な鮮鋭画像復元とより近い  $F = \tilde{G}/\tilde{H}$  なる除算に基づく手法である.



(a) 対象シーンが 2 層の奥行きを持つ場合 (b) 対象シーンが 3 層の奥行きを持つ場合

図 5.1: 各  $v_i$  の動く範囲とその独立性

以上までの議論において, 本信号处理的統合手法の重要な特徴はすなわち, 図 5.2 に示すようにその  $H$  の特性から高周波成分ほど精度の良い復元が可能であり, かつ低周波成分も初期画像として補うことができるという点である. 一般的な鮮鋭画像復元問題とは, 高周波成分の劣化した画像から高周波成分を復元しようとする問題であり, その意味で, これ

と比較して本手法は非常に良好な復元が可能となる。反復再構成においても、例えば 3 回といった大幅に少ない反復回数で所望の画像が良好に生成できる。一般に、撮象画像中のぼけの程度が大きい程より小さな  $\omega$  で  $\widetilde{H}(\omega) \rightarrow 1$  となり、反復再構成の収束が速くなるという特徴もある。

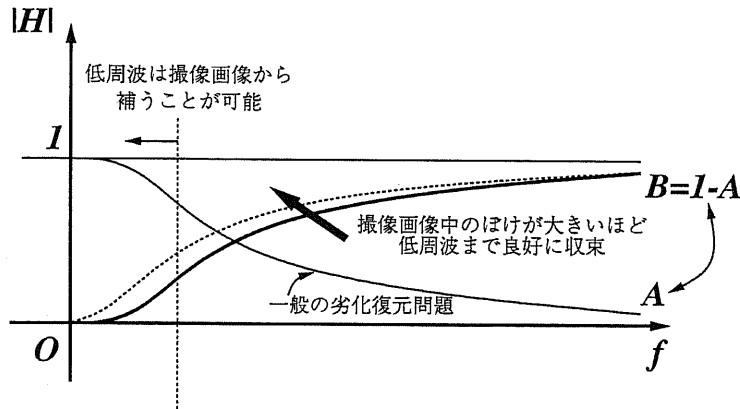


図 5.2: 信号处理的統合手法における復元問題の特徴

またこれと関連してかりに、 $h_{ii} \neq \delta$  すなわち  $H_{ii} < 1$  とすれば例えば 2 層の場合においても、 $H = H_{12}H_{21} - H_{11}H_{22}$  は

$$G = (H_{\alpha} - 1)(H_{\beta}F) \quad (5.12)$$

といった形に分離され、原理的には本手法に基づく  $H_{\alpha} - 1$  部分の再構成に加え、 $H_{\beta}$  に対する一般的な鮮鋭画像復元処理が必要となり、その意味で最終的な再構成画像の画質は本論文で仮定している条件に比較してより劣ることは避けられない。これは 3 層以上でも同様である。さらに、後に第 6 章で述べるように複数画像からの信号处理的等号手法は撮象画像中の雑音成分をほぼ保存する程度であり、一般的な鮮鋭画像復元処理のようにそれを強調してしまうことがないので、このような  $h_{ii} = \delta$  なる撮象の条件は画質的に非常に優位であるといえる。

以上、本節では、本論文で仮定している複数の奥行きにそれぞれ焦点を合わせた画像を撮象するという条件やそれに対して提案する信号处理的統合手法の特徴を、とくにその反復による所望の画像の再構成に注目して詳しく検討した。各奥行きに焦点を合わせた複数画像からの信号处理的統合手法では一般的な鮮鋭画像復元処理に比較してその反復再構成において非常に収束の速い再構成が可能であり、またより複数の奥行きを持つ対象シーンの撮象画像からの反復再構成の収束性もほとんどの場合、良好に保証される。画質的にも高周波成分で正確に復元することが可能であるため視覚的に非常にすぐれた生成画像が得られる。これは後の第 6 章で述べるが一般的な鮮鋭画像復元処理に比較して雑音の影響も

小さい。任意焦点画像など所望の画像の再構成のためには複数の奥行きそれぞれに焦点を合わせた画像を撮象するという条件が非常に有効であるということがよく確認されたといえる。

次節からは本節で行なった周波数領域上への変換などに関する考察に基づき、実際により効率的な所望の画像の再構成手法について考察していく。

### 5.3 周波数領域への変換に基づく演算手法

前節までで論じたように、信号处理的統合に基づく位置不変の恒等式からの所望の画像の再構成の問題は、(5.1)式の形で周波数領域上へと変換することができる。本節ではこれを利用し、より効率的に任意焦点画像の再構成を実現しうる2つの手法を議論する。

5.3.1節では第1の手法として(5.2)式を用いて前章までと同様に反復による再構成を行なう。5.3.2節では第2の手法として一般的な鮮鋭画像復元問題と同様に周波数領域における除算に基づいて所望の画像を再構成する。それぞれの手法を用いた任意焦点画像生成の実験結果を示し、その演算に要した時間について、前章までで用いてきた単純な画像への畳み込みの反復演算による手法との比較検討を行なう。

#### 5.3.1 反復的復元手法への適用

信号处理的統合に基づく位置不変の恒等式を周波数領域上に変換した  $G = HF$  に対し、これまで論じた反復的復元手法にそのまま対応する

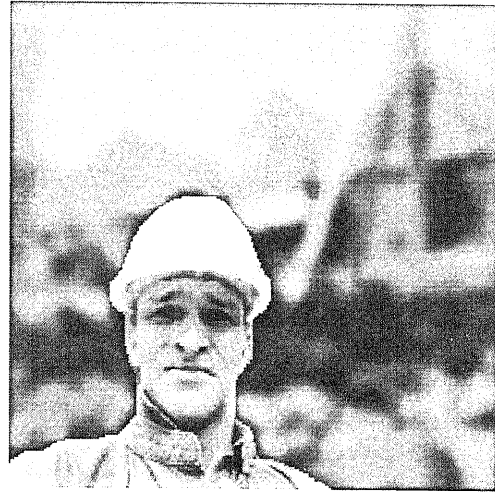
$$\hat{F}_{n+1} = (H + 1)\hat{F}_n - G \quad (\hat{F}_0 = G_1) \quad (5.13)$$

なる反復式を用いて所望の任意焦点画像  $F$  すなわち  $f$  を再構成するものとする。なおここで、 $G_1$  は撮像画像  $g_1$  を周波数領域に変換したものである。直流成分など  $G = HF$  における零点近辺の問題については初期画像  $G_1$  により補われる。反復演算のみならず  $G, H$  も畳み込み演算を必要とする  $g, h$  を介することなく、 $h_{ij}, g_1, g_2, \dots$  等それぞれを周波数領域上に変換したのから直接に計算する。

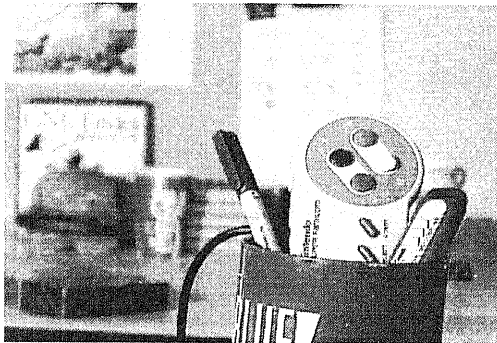
以上のような手法を用いれば所望の画像の反復再構成そのものは加減算と乗算のみで実現され、単純な画像への畳み込み演算に比較して大幅に計算量を削減することが可能である。また、ぼけの程度によらず演算量が一定という特徴もある。

図5.3に前章までの実験におけるいくつかの撮象画像を用いた任意焦点画像の生成実験結果を示す。全て遠景のみ  $R = 6.0$  でぼけを強調した画像である。周波数領域上に変換するにあたっては各辺が  $2^n$  になるように、原画像に対しその平均輝度値を周辺に加えてから処理している。再構成後の画像からもととの画像領域のみを切り出すことで図5.3の最終的な生成画像を得る。どれも問題なく所望の画像が再構成されているのが確認できる。

表5.1がそれぞれの画像の再構成に要した時間である。周波数領域上へ問題を変換することにより、単純な畳み込み演算に基づく反復再構成に比較してほぼ1/10程度に演算時間



(a) 2 枚の実画像からの再構成 ( $140 \times 100$ ) (b) 2 枚の合成画像からの再構成 ( $240 \times 240$ )



(c) 2 枚の実画像からの再構成 ( $680 \times 480$ ) (d) 3 枚の実画像からの再構成 ( $250 \times 200$ )

図 5.3: 周波数領域上での反復再構成に基づく生成画像

表 5.1: 任意焦点画像の生成に要する時間

画像	サイズと奥行き	反復回数	畳み込み演算 (秒)	周波数領域での演算 (秒)
(a)	$140 \times 100$ 2層	3	20.5	2.2
(b)	$240 \times 240$ 2層	3	69.9	5.6
(c)	$680 \times 480$ 2層	3	550.3	79.3
-	$250 \times 200$ 3層	3	135.5	12.7
(d)	$250 \times 200$ 3層	10	276.8	12.8

が抑えられていることがみてとれる。前節の考察でも指摘したように対象シーンが 3 層の奥行きをもつ場合の任意焦点画像生成においては比較的高周波でも収束が遅い場合があり、良好な再構成のためには経験的に (d) のように 10 回ほどの反復演算が望まれる。表 5.1 の (d) とその 1 段上の行を比較すると、周波数領域上での演算法はほとんど反復の回数によらずその生成に要する時間が変化していない。これは周波数領域上においては畳み込み演算が単純な複素数の乗算によって実現されることに対応する。

以上のように、周波数領域上へと問題を変換することは、その演算時間の意味から大変有効な手法であり、またとくに対象シーンがより複数となる場合など反復再構成の収束が比較的遅くなるような条件に対しても効率の良い演算を可能にする。次節で述べるグラフィクスアクセラレータによる、対話的な映像処理にも十分に対応可能な非常に高速な畳み込み演算法に比べてもほぼ数倍以内の短時間で任意焦点画像が再構成できている。

### 5.3.2 一般的な鮮鋭画像復元手法の応用

(5.1) 式のように信号处理的統合により導かれた位置不変の恒等式を周波数領域上へ変換した場合、一般的な鮮鋭画像復元手法と同様に  $F = G/H$  の形に基づいて任意焦点画像  $F$  すなわち  $f$  を再構成する手法も考えられる。ただし、低周波成分など零点近辺の問題を考慮する必要がある。

ここでは、上述の手法と同様に各辺が  $2^n$  になるように、補正した撮像画像  $g_i$  にまず以下のように窓関数を施す。すなわちサイズ  $N_x \times N_y$  の画像上の座標  $(i, j)$  に対し

$$\hat{g}_i(i, j) = w_x(i)w_y(j)g_i(i, j). \quad (5.14)$$

ただし

$$w_x(i) \triangleq \begin{cases} \frac{1 - \cos(\pi i / M)}{2} & (i < M) \\ 1 & (M \leq i \leq N_x - M) \\ \frac{1 - \cos(\pi(N_x - i) / M)}{2} & (i > N_x - M) \end{cases}, \quad (5.15)$$

$$w_y(j) \triangleq \begin{cases} \frac{1 - \cos(\pi j / M)}{2} & (j < M) \\ 1 & (M \leq j \leq N_y - M) \\ \frac{1 - \cos(\pi(N_y - j) / M)}{2} & (j > N_y - M) \end{cases}.$$

画像の周辺部の 8 画素分が窓関数の対象となるように  $M = 8$  とした。

零点近辺を閾値  $th = 0.01$  によって  $|H| \leq th$  と定義し、この領域においては撮像画像  $G_1$  の対応する成分をそのまま  $F$  に用いるものとする。前節での考察通り、一般に零点はある程度、低周波成分に存在するのでこれを  $G_1$  によって補うことができると考えられる。それ以外の領域では  $F = G/H$  により  $F$  を定める。

以上のようにして再構成された任意焦点画像を図 5.4 に示す。用いた画像、条件は全て図 5.3 と同様である。ここでも、それぞれ問題なく良好に所望の画像が再構成されていることが確認される。表 5.2 がそれぞれの画像の再構成に要した時間である。比較のために前述





図 5.4: 周波数領域上での除算に基づく生成画像

表 5.2: 任意焦点画像の生成に要する時間の比較 (単位: 秒)

画像	サイズと奥行き	反復法を用いた演算 (反復回数)	除算に基づく演算
(a)	140 × 100 2層	2.2(3)	2.5
(b)	240 × 240 2層	5.6(3)	5.9
(c)	680 × 480 2層	79.3(3)	85.1
(d)	250 × 200 3層	12.8(10)	12.6

の周波数領域における反復再構成手法の演算時間も示した。表 5.1 の、単純な画像への畳み込み演算を用いた反復再構成手法に要する時間に比べれば十分演算時間が抑えられているが、周波数領域における反復再構成手法と比較した場合むしろやや遅くなってしまっている。これは窓関数の適用あるいは  $|H| < th$  を用いた条件分岐により演算時間が増加してしまったためと考えられる。

前節での考察通り信号処理的統合に基づく位置不変の恒等式の反復再構成は、一般的な 1 枚の画像からの鮮鋭画像復元問題に比べ大変収束性が良く、実際、周波数領域における反復再構成手法は反復演算そのものよりも周波数領域上への各画像などの変換が演算時間のほとんどを占める。したがって、対象シーンが 3 層の奥行きをもつ場合の任意焦点画像生成など大きめの反復回数が必要となる場合では若干このような除算に基づく手法の優位性が認められるものの、その演算時間に大きな差が生じることはない。ただし、本論文の範囲では必要とはならなかったが、前節で  $\tilde{H} < 0$  となる場合の収束性の問題を指摘したように、低周波成分のより安定かつ正確な復元のためには、このような除算に基づく手法が有効である。

なお、以上ではもっとも基礎的な検討として  $H$  に対する閾値処理により復元処理と撮像画像の統合を行ったが、 $|H|$  の大きさにしたがった重み付けを与えるなどして、反復的復元処理と同様のより滑らかに両者の統合を行う手法へと容易に展開することも可能である。

## 5.4 グラフィクスアクセラレータ上での高速演算の実現

本節では現在急速に発展普及しつつある CG 用高性能グラフィクスアクセラレータを応用することで前節までのように CPU の演算能力のみを用いた場合に比べ大幅に任意焦点画像の生成を高速化できることを示す。

### 5.4.1 畳み込みフィルタを用いたぼけ関数の近似生成

(3.10) 式の反復式は  $g$  を含め、画像の加減算とぼけ関数の画像への畳み込みで実現される。前節でも見たように演算量的にはこのうち畳み込みのしめる割合が非常に大きい。これに対して一般に CG のために用いられているグラフィクスアクセラレータを応用することで高速な再構成を可能にすることができる。Silicon Graphics 社の Onyx Infinite Reality, Indigo2 Maximum Impact 等には  $7 \times 7$  行列までの大きさのフィルタの画像への畳み込みがハードウェア的に実装されており、SGI 独自の OpenGL 拡張関数によりこれを利用することができる。ただし、本手法で必要となる任意サイズのぼけ関数には行列の大きさの制限のためそのままではこれを用いることができない。そこで、 $5 \times 5$  行列の複数回の畳み込みとして任意サイズのぼけ関数を表現することでグラフィクスアクセラレータによるぼけ関数の画像への畳み込みを実現する。ぼけ関数はガウス関数で近似できるものとしている

ので、所望のぼけ関数の  $\sigma$  に対して

$$\sigma_n = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5.16)$$

と定義し、 $\sigma_n$  を用いて生成される  $5 \times 5$  の畳み込み行列の  $(0, 0)$  成分が  $1/256$  以下になる最小の  $n$  を求め、このときの  $5 \times 5$  行列の  $n$  回の畳み込みで所望のぼけ変換を近似する。なお、RGB それぞれ別のフィルタを定義し並列に動作させることができる。ここでは同一のフィルタにより並列処理を行なうこととする。

ところで、畳み込みフィルタのサイズに制限があるため、例えば対象シーンの奥行きが 3 層となる場合に必要となる畳み込みフィルタ  $h + \delta = h_{12}h_{21} + h_{23}h_{32} + h_{31}h_{31} - h_{12}h_{23}h_{31} - h_{13}h_{32}h_{21}$  を同様の方法で実現しようとするれば、それぞれがガウス関数である各 5 項分の処理を独立に行わねばならずそのままでは 2 層の場合に比べそれほど効果が得られなくなってしまう。ただし、以下見るようにこのような演算手法は 2 層においては、映像編集、映像生成という目的でも実際に十分高速に利用しうるものを提供することが可能であり、さらにその意味でまた、後の第 7 章に示す対話的処理との協調に基づく多数層の処理への適用に非常に有効なものであるといえる。

#### 5.4.2 アプリケーションの作成と演算時間の比較

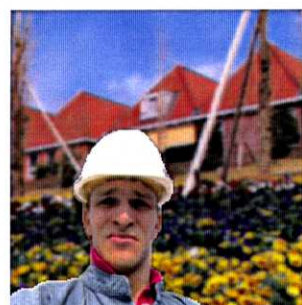
上述のような OpenGL 関数を用い、Motif ライブラリベースの GUI と組み合わせることで図 5.5 に示すようなアプリケーションを作成した。

一番上のエリアにおいて所望の画像の再構成が行われる。その下の 2 つのバーを操作することで、生成画像に与えるぼけの程度  $R$  を調整する。上下のバーがそれぞれ近景、遠景のぼけに対応している。もっとも下段のボタンを押すことで所望の画像の再構成が開始される。図 5.6 に示す程度のサイズの画像ならば 1 ~ 2 秒程度で再構成が終了する。すなわち、ディスプレイ上でその都度生成結果を確認しながらぼけの調整を行うことが十分に可能となっている。なお、ディスプレイ上の表示範囲内であれば任意の画像サイズに対応することができる。

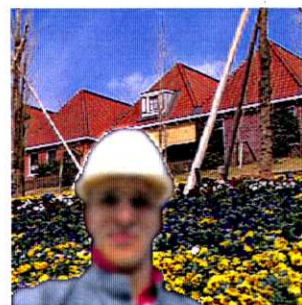
図 5.6(a)(b) に示す合成画像 ( $R_{21} = 3.0, R_{12} = 2.0$ ) から図 5.6(c) のような  $R_a = 0.0, R_b = 4.0$  で遠景のぼけを強調した任意焦点画像を 3 回の反復を用いて再構成した場合の演算時間の比較を表 5.3 に示す。表の上 2 行は CPU の演算能力のみを用いているが、これに対し下 2 行では畳み込み用のハードウェアを利用することにより再構成に要する時間を大幅に短縮することができる。なお表の 3 行目は参考としてグラフィクスアクセラレータといういわば高速のメモリを用いることそのものによる演算速度向上を示しているが、これに比べても畳み込みハードウェアの利用の有無が演算時間に非常に大きな影響を与えていることが確認される。



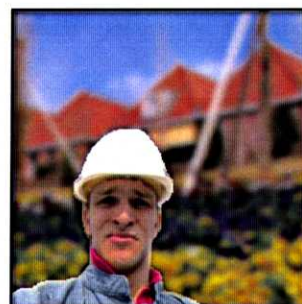
図 5.5: グラフィクスアクセラレータを用いた任意焦点画像生成のためのアプリケーション



(a) 撮像画像 1



(b) 撮像画像 2



(c) 再構成画像

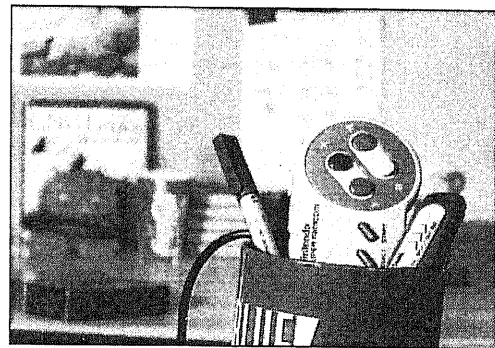
図 5.6: 演算時間測定のための条件 (画像サイズは 240 × 240)

表 5.3: 遠景のぼけを強調した画像の生成に要する時間の比較

A	B	C	D	演算時間 (秒)
Indigo2(R4400 200MHz) XZ	×	×	×	261
Indigo2(R4400 200MHz) XZ	○	×	×	143
Indigo2(R4400 200MHz) XZ	○	○	×	56
Indigo2(R4400 250MHz) + Max. Impact	○	○	○	4
Onyx(R10000 195MHz) + Inf. Reality	○	○	○	2

A: 使用機種, B:  $5 \times 5$  行列の複数回畳み込みによる近似,  
 C: グラフィクスアクセラレータの利用, D: 畳み込み用ハードウェアの有無

上述の実験では合成画像を用いたが、もちろん図 5.7 に示すように実際に撮像された画像からでも良好な再構成画像が得ることができる。用いた画像は前節の図 5.3 等と同様のものである。このように、畳み込みの近似による再構成画像への影響は十分に小さい。演算時間はそれぞれ (a) が 1 秒程度、(b) が 8 秒程度であった。



(a) 2 枚の実画像からの再構成 ( $140 \times 100$ ) (b) 2 枚の実画像からの再構成 ( $680 \times 480$ )

図 5.7: グラフィクスアクセラレータを用いた高速演算による生成画像

なお、本節で用いた OpenGL の関数は現在の仕様では拡張関数とされているが、次期バージョンでは標準ではないものそれに準じるものとして定義されており、将来的には非常に多くのプラットフォームで利用可能になるものと期待される。

## 5.5 まとめ

本章では、まず信号处理的統合に基づく位置不変の恒等式に対する反復再構成について、特にその収束性について詳しく検討した。本手法の特徴は、視覚的に非常に重要な高周波成分を精度良く復元できることである。

続いて、それに伴い、周波数領域上へと問題を変換することで、反復回数による演算量の増加を大幅に抑える手法を提案した。これは、対象シーンがより複数の層となりさらに反復演算が必要となった場合などに有効である。また、零点周辺の問題を考慮したより汎用的な手法として、周波数領域上での除算に基づく手法も示した。この手法は、やや実質的な演算量が増えるものの、低周波成分を撮象画像そのもので直接に補うため、反復再構成手法のような収束性の保証を問題にする必要がないという特徴がある。以上のような周波数ベースの手法は、その単純さから専用チップ化の可能性を十分に期待させるものである。演算時間の評価結果からも将来的には動画像を対象としたリアルタイム処理への適用や、さらには、後の第 8 章に明らかになるような領域強調に基づく動画像符号化等への展開も考えられる。

最後に対象シーンの奥行きが 2 層の場合に限定したものであるが、グラフィクスアクセラレータを用いた畳み込みの近似に基づく手法を実際にアプリケーションとして作成し、対話的処理を十分に実現することができた。

以上、本章でも、領域分割などの複雑な処理を必要としない信号处理的統合手法の特徴から、所望の画像の再構成そのものの演算についても柔軟に様々な手法を提案することができた。



## 第 6 章

### 信号处理的統合手法に基づく映像生成の一般化

#### 6.1 はじめに

前章まででは、複数の奥行きを持つ対象シーンに対してそれぞれの奥行きに焦点を合わせた撮像画像から領域ごと、すなわち奥行きごとの焦点ぼけを独立に強調、抑制する映像生成について詳しく論じてきた。具体的にはまず、このような焦点画像処理のために、撮像画像の信号处理的統合に基づく所望の画像の再構成手法を提案した。撮像画像と所望の画像との間に位置不変の恒等式を導くことで、大きな特徴として領域分割を用いることなく所望の画像の生成が可能となる。さらに、この特徴を十分に考慮しつつ、信号处理的統合手法に基づく映像生成において実際に必要となる前処理から、良好な再構成のための効率的な演算方法まで、様々な検討を行った。

本章および次章では、あらためて本論文の目的である映像生成そのものについての議論を行う。本章では、前章までに論じた焦点合わせの異なる複数の撮像画像からの信号处理的統合を用いた映像生成について、その基礎となる位置不変の恒等式をより一般化することで、近似的生成も含めさらに多様な所望の画像を生成する手法を検討する。

まず、6.2節で複数の撮像画像と所望の画像との間に成立する恒等式の一般化の提案を行い、その適用範囲やこの恒等式に基づく映像生成の可能性を論じる。続いて、この一般化された恒等式に基づき6.3節で、ある領域のみを切り出したような画像の生成や領域ごとのフィルタリングについて実際に実験を行いながら検討する。信号处理的統合の特徴としてここでも領域分割を必要としない領域ごとの処理という非常に有用な映像処理が可能となる。さらに、6.4節では本章で論じる一般化のなかでもとくに領域ごとの動き付与に注目し、近似的な視差と焦点ぼけを同時に様々に調整する映像生成について詳しく論じる。また、このような近似的映像生成の妥当性についてみるために、撮像画像中の雑音や画像取得および生成モデルからの実際のずれ等の生成画像への影響など、信号处理的統合手法そのものの特性についても合わせて詳細に検討する。なお、このような視差と焦点ぼけを同時に与える処理は、単一視点の撮像画像からの簡易的な仮想環境の構築などへの応用も考えることができる。

以上のように本章では、位置不変の恒等式の一般化により、領域分割を必要としない領域ごとの処理に基づくさらに多様な映像を生成する手法を、実際に実験を行いながら検討していく。

## 6.2 複数の撮像画像と所望の画像との間に成立する恒等式の一般化

前章までは、複数の撮像画像  $g_i$  と所望の画像  $f$  との間にそれらの画像中のぼけ関数  $h_{ij}$ ,  $h_a, h_b, \dots$  を用いて位置不変の恒等式を導き、これに基づいて  $f$  の再構成を行って来た。例えば対象シーンが 2 層の奥行きを持つ場合、その恒等式は

$$\begin{aligned} (h_b * h_{21} - h_a) * g_1 + (h_a * h_{12} - h_b) * g_2 \\ = (h_{21} * h_{12} - \delta) * f \end{aligned} \quad (6.1)$$

という形となる。ところで、この位置不変の恒等式 (6.1) における  $h_{ij}, h_a, h_b, \dots$  は 3.2 節での導出からわかるように、互いに可換でさえあれば必ずしもぼけ関数に限定されることはない。すなわち、所望の画像

$$f = h_a * f_1 + h_b * f_2. \quad (6.2)$$

において、例えば  $h_a, h_b$  が高域強調フィルタや  $0, \delta(\vec{x} - \vec{a})$  等そのもの、あるいはその組合せとなる場合も同様の恒等式の導出が可能ということである。なお、 $\vec{a}$  は定ベクトルであり、 $\delta(\vec{x} - \vec{a})$  は平行移動を表すフィルタである。このような恒等式に基づけば、(6.2) 式からわかるように、ある領域のみを切り出したような画像の生成や領域ごとのフィルタリング、近似的な視差と焦点ぼけを同時に様々に調整する映像生成といった処理が、前章までに論じて来た信号处理的統合手法と同じ枠組で可能になると考えられる。これは、対象シーンの奥行きが 3 層以上となる場合についても同様である。

もちろん、所望の画像の再構成のためには、零点近辺となる低周波成分を補うための撮像画像の利用手法や、画像取得、画像生成のモデルからのずれ等の問題を新たに考慮せねばならず、また、近似そのものの妥当性などについてもより厳密な議論を行う必要がある。このような問題も含め、実際に次節以降、シミュレーションや実画像を用いた生成実験により、信号处理的統合手法に基づく映像生成の一般化を詳細に論じていく。

ところで、以上のように本章では生成画像における畳み込みフィルタ  $h_a, h_b, \dots$  の一般化の検討を行うが、逆に例えば撮像画像

$$\begin{cases} g_1 = h_{11} * f_1 + h_{12} * f_2 \\ g_2 = h_{21} * f_1 + h_{22} * f_2 \end{cases} \quad (6.3)$$

における畳み込みフィルタ  $h_{ij}$  を一般化することにより、視差画像や動きぼけのある画像からの映像生成という問題も考えることができる。これらについては撮像の条件が異なるため本論文の範囲では扱わなかったが、同様に興味深い話題と思われる。



### 6.3 領域分割を必要としない領域ごとの画像処理への応用

#### 6.3.1 各領域の強調など様々なフィルタ処理

前節で論じたように所望の画像を表すパラメータ  $h_a, h_b$  を前章までのような焦点ぼけを表す関数以外に様々に変更することで、領域分割を用いることのない領域ごとの処理という非常に有用な応用が可能となり、さらに多様な画像が生成できる。

本節ではとくに領域ごとのフィルタ処理、強調処理について詳しく検討する。対象シーンが 2 層の奥行きを持つ場合について具体的に言えば、例えば  $h_a = \delta, h_b = 0$  とすることにより遠景を抑圧し、近景のみ切り出したような画像を生成することができる。また、 $h_a = \delta$  として、 $h_b$  を

$$\begin{pmatrix} 0 & -c/4 & 0 \\ -c/4 & 1+c & -c/4 \\ 0 & -c/4 & 0 \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

の形の高域強調フィルタとすることにより、近景領域はそのままに遠景のみ高域強調処理を施した画像の生成が可能である。

従来一般に近景、遠景の境界の形状によっては、以上のような領域ごとの処理のために、まず非常に複雑なその領域分割を手動で行わなければならなかった。しかし、信号処理的統合に基づく位置不変の恒等式からの映像生成の特徴により、前節で論じた通り  $h_a, h_b$  の可換性さえ保たれていれば全くそのような領域分割を必要とせず、ただちに所望の領域ごとの処理を施した画像の生成が可能となる。

#### 6.3.2 実験とその評価

まず、 $h_a = \delta, h_b = 0$  とすることで、図 6.1(a)(b) に示す前章までの実験でも用いた対象シーンの奥行きが 2 層の場合の撮像画像から反復再構成を行い図 6.1(c) のように遠景を抑圧し近景領域のみを切り出したような画像を生成した。初期画像としてはこれまでと同様に撮像画像のうち (a) を用いた。生成される画像は  $h_b = 0$  そのまま、すなわち遠景の輝度値 0 で近景のみの画像ということにはならず、直流成分が撮像画像から補われる影響で遠景のテクスチャを抑圧した形の画像となる。また、これはいわば遠景のぼけの程度を  $\infty$  にした場合とも考えることができる生成画像である。撮像画像に対し低周波成分まで良好に抑圧するため、図 6.1(c) は再構成には 30 回の反復を行ったが、演算時間はやはりこれまでと同様に 10 秒以内であった。

次に、これも前章までのシミュレーションで用いてきた図 6.2 上段の合成された撮像画像から、 $h_b$  を上述の高域強調フィルタとすることにより図 6.2 下段のように遠景にのみ高域強調処理を施した画像が再構成できる。左から右の順により強く高域を強調している。初期画像としては近景合焦画像を用い、再構成は 3 回の反復により行った。近景は良好に維持されたまま、遠景の領域にのみフィルタ処理が施されているのがみてとれる。まさに

領域分割を用いることのない領域ごとの処理が可能となっている。

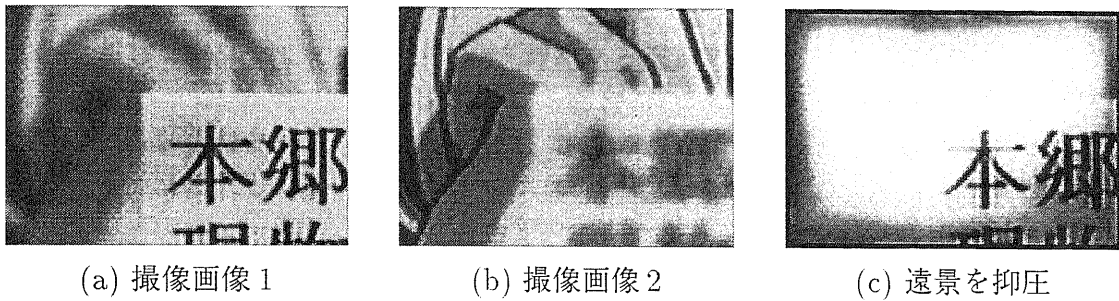


図 6.1: 領域の切り出し



図 6.2: 遠景領域に対する高域強調処理

以上のように本節では、 $h_a, h_b$  の一般化の中でもとくに 0 や高域強調フィルタを用いた場合に関して検討を行い、良好な結果を得た。信号处理的統合手法の特徴に基づく領域分割を必要としない領域ごとの処理のより広い応用可能性が確認されたといえる。

## 6.4 動き付与に基づく視差と焦点ぼけをともに操作する映像生成

前節では本章で論じる信号処理的統合からの映像生成の一般化の中でもとくに領域分割を必要としない領域ごとの処理という側面から議論を行ったが、本節ではこれに対し、 $h_a, h_b$  に  $\delta(\vec{x} - \vec{a})$  を用いて動きを付与した場合、さらにそこに焦点ぼけを組み合わる場合について詳細に議論する。この映像生成によれば、視差と焦点ぼけを同時に調整したような画像を近似的にはあるが単一視点の撮像画像から合成することが可能となる。これは仮想環境の簡易構築などに非常に有用であると考えられる。本節ではこのような処理の可能性へ向けた一般化について検討を行う。

以下で、信号処理的統合に基づく映像生成や、動き付与における近似の妥当性などについてもより厳密な議論を行うため、ここであらためて位置不変の恒等式および所望の画像の再構成のための式の導出、整理を行っておく。

まず、対象シーンの奥行きが2層の場合、本節で生成しようとする画像  $f$  は、

$$f(\vec{x}) = h_a * f(\vec{x}) + h_b * g(\vec{x}) \quad (6.5)$$

において、

$$\begin{cases} h_a = \hat{h}_a * \delta(\vec{x} - \vec{t}_1) \\ h_b = \hat{h}_b * \delta(\vec{x} - \vec{t}_2) \end{cases} \quad (6.6)$$

となるようなものである。ここで  $\hat{h}_a, \hat{h}_b$  はぼけを表すガウス関数、 $\delta(\vec{x} - \vec{t}_1), \delta(\vec{x} - \vec{t}_2)$  は動きを表す関数であり、それぞれ近景、遠景に対応している。すなわち、 $t_1, t_2$  は図 6.3 のようにそれぞれ、どれだけ近景、遠景を平行移動させるか、視差を付与するかという量であり、ぼけ関数  $\hat{h}_a, \hat{h}_b$  と同様、ユーザが指定することのできるパラメータである。これらから動きを含む場合の任意焦点画像  $f$  は

$$f(\vec{x}) = \hat{h}_a * f(\vec{x} - \vec{t}_1) + \hat{h}_b * g(\vec{x} - \vec{t}_2) \quad (6.7)$$

のように書き直せる。さらに、ぼけを表すガウス関数の畳込みの可換性を用いて位置不変の恒等式を導けば、

$$\begin{aligned} & \hat{h}_b * h_{21} * g_1(\vec{x} - \vec{t}_2) - \hat{h}_a * g_1(\vec{x} - \vec{t}_1) \\ & + \hat{h}_a * h_{12} * g_2(\vec{x} - \vec{t}_1) - \hat{h}_b * g_2(\vec{x} - \vec{t}_2) \\ & = (h_{21} * h_{12} - 1) * f(\vec{x}) \end{aligned} \quad (6.8)$$

となる。この式を

$$\begin{cases} g = (\text{左辺}) \\ h = h_{21} * h_{12} - 1 \end{cases} \quad (6.9)$$

としてまとめれば、

$$g = h * f \quad (6.10)$$

と書くことができる. (6.10) 式は, 前章までの任意焦点画像生成手法で用いられた式とまったく同形であり,  $g, h$  から同様の再構成手法により  $f$  を求めることができる. すなわち所望の画像の再構成には周波数領域上における

$$\hat{F}_{n+1} = (H + 1)\hat{F}_n - G \quad (6.11)$$

なる反復式を用いる. ただし, その初期画像としては動きの付与を考慮した,

$$\hat{f}_0 = (g_1(\vec{x} - \vec{t}_1) + g_2(\vec{x} - \vec{t}_2))/2 \quad (6.12)$$

を用いることとする. このような信号处理的統合を用いた位置不変の恒等式からの所望の画像の再構成においては領域分割は必要とされない.

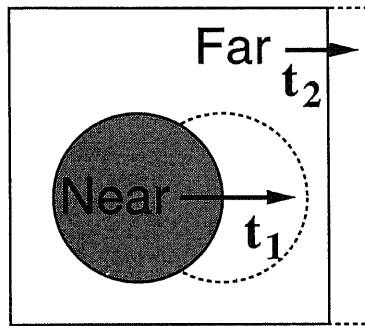


図 6.3: 各奥行きに対する動きの付与

(6.7) 式におけるぼけ関数  $\hat{h}_a, \hat{h}_b$  により, 撮像時と全く異なる任意のぼけの度合をそれぞれの奥行きに独立に与えた任意焦点画像を生成することができる.  $\hat{h}_a, \hat{h}_b$  をともに  $\delta(\vec{x})$  とすれば近景, 遠景ともに焦点の合った画像が生成できる. これに図 6.3 のような動きの付与を合わせれば, 視点を移動しながら焦点合わせも変化させるような画像列の合成が可能となる.

以下ではとくに本節の目的であるこのような視差と焦点ぼけを同時に与える映像生成, それも 2 層の場合に限定してシミュレーションや実画像を用いた実験を行っていくが, 対象シーンの奥行きが 3 層以上となる場合についても原理的に同様の処理が可能である.

なお, 視差の付与という意味で (6.7) 式は, 本来の生成したい画像における, 近景が遠景を遮蔽する領域および新たに現れる遠景領域について考慮されていない. さらに図 3.1 のような重ね合わせモデルにおいては, もともと近景が遠景を隠す遮蔽領域周辺では厳密には正しくないという問題もある. しかしながら, 図 3.1, 図 6.3 のような重ね合わせモデルに従えば画面のほぼ全体にわたって位置不変の恒等式を導くことができ, 後に示す実験からわかるように, 視差も含めた任意焦点画像の生成という目的においては, 上述したように

煩雑な領域分割に基づくことなく、おおよそ所望の効果が得られる。これは、信号処理的統合手法に基づく映像生成の一般化として非常に有用なものと考えられる。

以上のような近似による影響、あるいはその適用条件については、信号処理的統合手法そのものの特性と合わせ 6.4.1 項で検討し、6.4.2 項の実験結果を用いて詳しく考察を行う。

### 6.4.1 近似的な映像生成の特性の検討

具体的な実験に入る前に本手法の特性を検討しておく。まず第 1 に、一般のぼけ復元問題において (6.10) 式の  $h$  は、そのままぼけ関数  $h$  であるが、本手法においては、 $h - \delta$  の形となっている。この  $-\delta$  の部分は、ぼけにより劣化した画像しか与えられない一般のぼけ復元問題と異なり、近景、遠景ともに、 $g_1, g_2$  のどちらかで焦点の合った画像が得られていることに相当する。

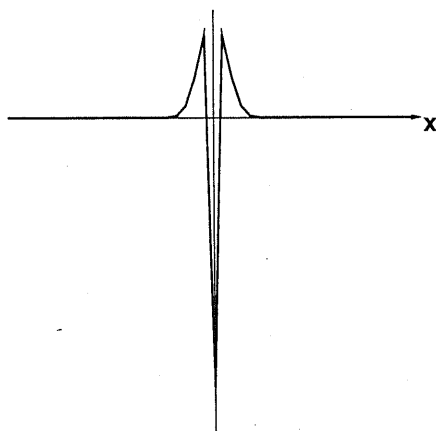


図 6.4:  $h$  に対応する畳み込みフィルタ

画素は離散的に存在するので、具体的にはこの関数の畳み込みは図 6.4 のように点拡がり関数の中心が窪んだフィルタを画像全体にほどこす変換となる。図 6.4 は 1 次元の場合であるが、実際にはこれを縦軸まわりに回転したような 2 次元のフィルタである。この  $-\delta$  があるために、所望の  $f$  の情報は、一般のぼけ復元問題と比較して、ぼけ変換  $h$  が非常に大きいぼけを与える場合でも  $g$  に保存されており、輝度値の量子化に埋もれてしまうことなく、精度の良い復元が可能となっている。また、反復回数も 3 回程度で充分良好な画像を復元することができる。

なお、 $f = (\text{定数})$  が (6.10) 式の零元となっていることからわかるように、画像中のある領域についていえば、 $g$  では、その領域周辺の全体的な明るさの情報は失われており、輝度変化成分、すなわちテクスチャと呼ぶべきものが強く保存されていると考えられる。これは、図 6.4 のフィルタが、2 次微分と関連付けられるラプラシアンに似通った形をしてい

ることからも理解されうる。この特性は、ぼけ、鮮鋭さの調整という目的に対して非常に有効なものである。

第 2 に、重ね合わせのモデルからずれる部分として、撮像画像に含まれる雑音成分が復元画像に与える影響について検討する。本手法ではすべて線形の処理を行っているので、雑音成分のみを考えればよい。(6.11) 式をさらに

$$\begin{aligned} \hat{F}_n = & (H_{21}H_{12})^n \hat{F}_0 - (1 + H_{21}H_{12} + (H_{21}H_{12})^2 \\ & + \dots + (H_{21}H_{12})^{n-1})G \end{aligned} \quad (6.13)$$

と展開すれば、視覚的には雑音成分の影響は、何度もぼけ変換をほどこされた  $(H_{21}H_{12})^n \hat{F}_0$  よりもそれ以下の項に強く現れると考えられる。すなわち、 $(1 + H_{21}H_{12} + \dots)G$  の部分であり、 $g$  に含まれる雑音成分がそのままの位置で復元画像に影響するといえる。しかし実際には、撮像画像に含まれる雑音成分は、 $h_{21}, h_{12}, \hat{h}_a, \hat{h}_b, \vec{t}_1, \vec{t}_2$  によって (6.8) 式の左辺、すなわち  $g$  に複雑に影響する。例えば  $g_2$  における雑音成分が視覚的に大きく影響するのは (6.8) 式の左辺第 4 項において、 $\hat{h}_b$  であまり大きいぼけを与えない場合であり、復元画像にその影響する位置はもとの雑音成分の位置に対して  $\vec{t}_2$  により決定される。第 3 項ではあらかじめ、 $h_{12}$  によりぼけ変換がほどこされているので、 $\hat{h}_a$  によらず、視覚的にはそれほど影響がない。

以上にくわえ、最も基本的な例として、視差を与えず、 $\hat{h}_a, \hat{h}_b$  がともに  $\delta$  で恒等変換を与える簡単な場合についての雑音成分の影響を検討する。図 6.5 は画像中の雑音成分の中心を通るある水平 1 ラインの輝度値信号のグラフである。仮りに、図 6.5(a) のような雑音成分が  $g_2$  に含まれていた場合、 $g$  には図 6.5(b) に示す形で影響が加わる。これを反復再構成すると図 6.5(c) が得られる。これが再構成画像に影響する雑音である。ここで  $h_{21}, h_{12}$  に対応する  $R$  はともに 2.0 としており、反復復元の回数は 3 回である。このように単純な全焦点画像を復元する場合には、ほぼ同様の形の雑音成分が再構成画像に残ることとなる。上述の通り、 $\hat{h}_a, \hat{h}_b, \vec{t}_1, \vec{t}_2$  等の変化に従い、より複雑な影響が生じる。

続いて第 3 に、重ね合わせモデルからずれる部分の特別な場合として、近景が遠景を遮蔽する境界領域の影響について検討する。ここでも簡単のために、図 6.6、図 6.7 に示すような単純な輝度値 (図 6.8(a)) を持つ近景、遠景について全焦点画像を再構成する場合を考える。図 6.6 においては輝度値 0 の部分以外が近景オブジェクトであり、図 6.7 の遠景を遮蔽しているものとする。遮蔽を考慮した撮像モデルを用いた場合の近景、遠景に合焦した画像、すなわち、撮像画像  $g_1, g_2$  のある水平 1 ラインにおける輝度値を図 6.8(b)、図 6.8(c) に示す。近景がぼける  $g_2$ 、図 6.8(c) においては重ね合わせモデル通りの画像が得られている。逆に、遠景がぼける  $g_1$ 、図 6.8(b) では、重ね合わせモデルが物体境界で正しくない。すなわち、図 6.8(b) では、遠景のぼけが近景ににじみこまず、また、近景に遮蔽されている境界周辺の遠景自身のぼけが遠景側にもれこんでいる。ここでは、 $R_{21} = R_{12} = 4.0$  としている。

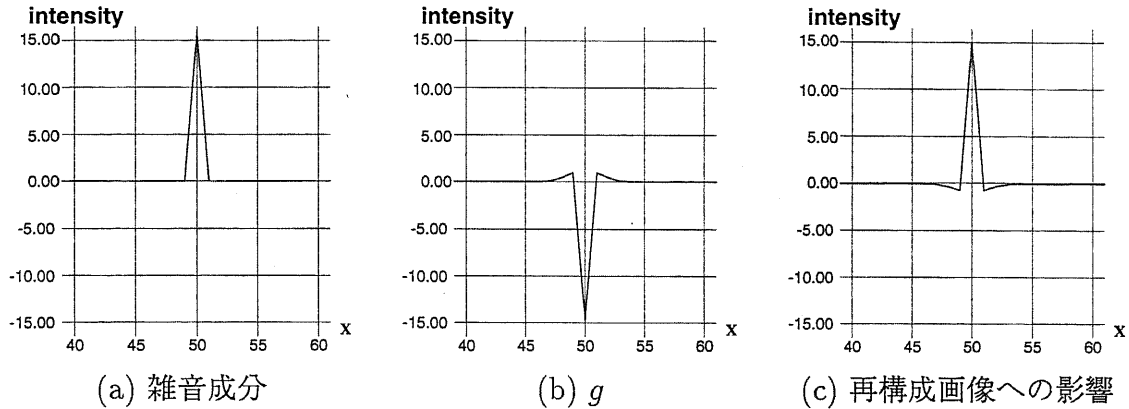


図 6.5: 撮像画像の雑音成分の影響

近景合焦画像におけるこのモデルからのずれを雑音成分として考えれば、境界周辺において、遠景側は輝度値が正の方向にずれており、近景側では負の方向にずれているといえる。またそのずれ領域の大きさは  $h_{12}$  の与えるぼけの大きさと対応づけられる。すなわち、 $h_{12}$  の与えるぼけの範囲だけ雑音成分が生じることとなる。第 2 点で考察したように、これが再構成画像にほぼ同じ形で影響し図 6.9 のような画像が再構成されることとなる。全体的な輝度値変化としては、図 6.10 のグラフが得られるのだが、仮りに、近景にテクスチャがあった場合、これは正確に再現され、 $\hat{h}_a$  によるぼけ変換を経た形で図 6.10 のグラフに上乘せされる。近景と遠景を分離して考えれば、近景についてはモデル通りの撮像画像が得られているからである。ただし、境界周辺の遠景のテクスチャはモデルからはずれる形でしか撮像されないため、正確には再現されず、また全体的な輝度値変化と同様、境界周辺の近景領域の劣化にもつながる。

第 4 として、本節で中心的に議論する視差付与による影響について検討する。問題を簡単化するため第 3 点として考察した遮蔽の問題はないものとする。すなわち  $g_1, g_2$  が重ね合わせモデル通りに撮像されている場合を考える。このとき、近景にのみ視差を +5 画素ほど与えた全焦点画像を再構成すると、図 6.11 の画像が得られる。そのある水平 1 ラインにおける輝度値は図 6.13(a) のような形となる。実際に生成したい画像と比較して、(6.7) 式のモデル化からすれば当然の結果ではあるが、視差を与えることで生じた近景と遠景の重なり部分は輝度値が過度に強調され、新たに現れた遠景部分は情報を持たないため低い輝度値となっている。しかし、 $\hat{h}_b$  が視差と同程度の範囲にぼけを与える変換となる場合、すなわち例えば遠景に  $R_b = 4.0$  でぼけを与えて再構成した場合、図 6.12 のように、遠景領域のエッジ成分に起因する劣化が抑圧されることにより、図 6.11 に比較して視覚的には自然な画像が得られる。近景領域中に残存してしまっていた  $x = 63 \sim 64$  における遠景領域のエッジ成分が抑圧され、撮像画像中に情報のない  $x = 32 \sim 36$  の領域も  $x = \sim 31$  の遠景領

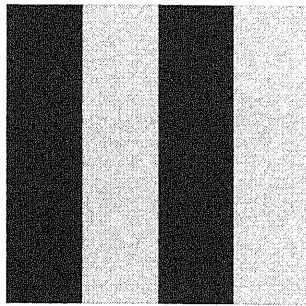


図 6.6: 近景オブジェクト

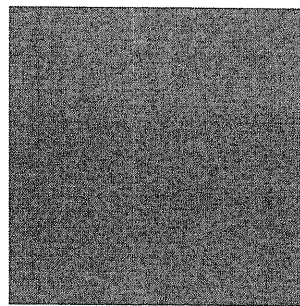
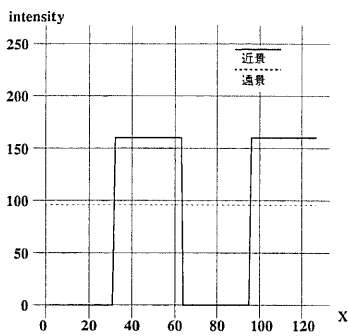
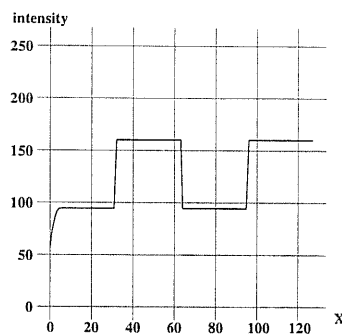


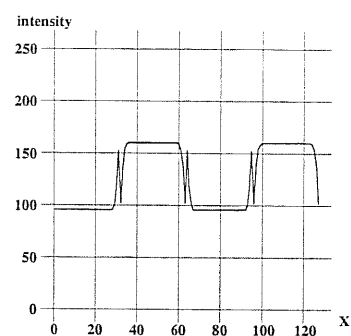
図 6.7: 遠景オブジェクト



(a) 近景, 遠景



(b) 近景合焦画像



(c) 遠景合焦画像

図 6.8: ある水平 1 ラインにおける輝度値

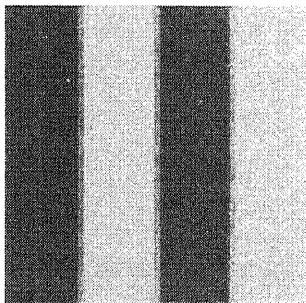


図 6.9: 再構成された全焦点画像

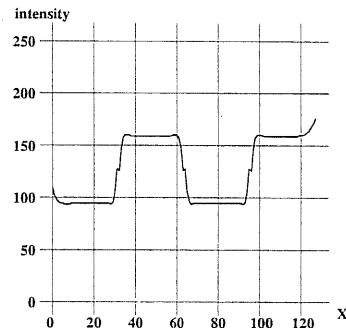


図 6.10: 再構成画像の輝度値

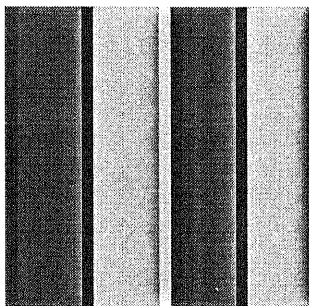


図 6.11: 視差画像の生成

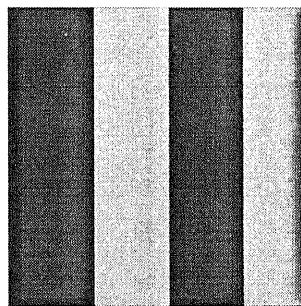


図 6.12: 遠景のぼけた視差画像の生成

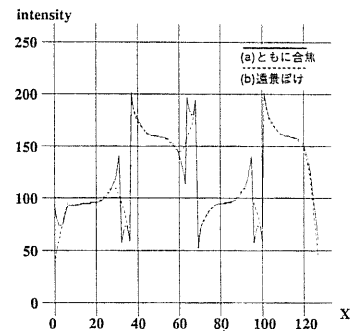


図 6.13: 視差を含む場合の生成画像の輝度値



域からのにじみこみで劣化がそれほど目立たなくなっていることが、図 6.13(b) で見てとれる。

テクスチャについては、近景と遠景の重なり部分では両方の成分が合成されることとなる。ただしここでも、 $\hat{h}_b$  が遠景のテクスチャを充分ぼかす場合には、この劣化は視覚的には軽減される。また、もともとの撮像画像で不可視の部分については、もちろん生成画像でテクスチャは生じない。

以上、視差の付与においては、輝度値の強調される重なり領域、撮像画像中に情報を持たない新たに現れる遠景領域が大きく劣化することとなるが、これらの領域については、視差に対して、遠景領域に同程度のぼけを与える場合には、視覚的な劣化が軽減され、比較的良好な再構成画像が得られる。

次節の実験においては、その結果に対して特に以上の特性に基づいて考察をくわえる。遮蔽や視差付与に関わる第 3 点と第 4 点の特性はシミュレーションでは確認されるが、実画像では、撮像系における LPF、輪郭補償回路の影響などにより、撮像画像そのものが上述のようなモデルとも異なるため、必ずしもこれらの特性に従わない再構成画像が得られることとなる。この点については、実験に用いた画像に即して考察を行うこととする。第 1 点や第 2 点で示したような本手法の最も本質的なテクスチャ再現性に関してはどちらの実験でも確認することができる。

#### 6.4.2 実験とその評価

まず、シミュレーションとして、遮蔽も考慮して合成した図 6.14 の (a) に示すような焦点合わせの異なる撮像画像  $g_1$  (遠景のぼけ  $R_{12} = 2.0$  pixels),  $g_2$  (近景のぼけ  $R_{21} = 3.0$  pixels) を用いた。画像サイズは  $240 \times 240$  である。これらから初期画像 ( $\hat{f}_0$ ) を (6.12) 式に従い求め、図 6.14(b)(c)(d) のような任意焦点画像が生成できる。すべて、 $g_1, g_2$  のみから再構成されており、反復回数は各々 3 回である。(b) は遠近ともに合焦した画像 ( $R_a = R_b = 0.0$  pixels) に水平方向の視差を与えたものである。上から、それぞれ撮像画像に対し近景、遠景の移動量が水平方向に、(近景 0.0 pixels, 遠景 0.0 pixels) の画像、(近景 4.0 pixels, 遠景 2.0 pixels) の画像、(近景 8.0 pixels, 遠景 4.0 pixels) の画像である。これは視点位置を左へ水平に移動した場合の効果を生成することになる。さらに (c) では、 $g_1$  の遠景のぼけを強調した画像 ( $R_a = 0.0, R_b = 4.0$  pixels) に同様の視差を与えたものである。(d) は上から同様の視差を与えながら、遠景に合焦した画像 ( $R_a = 4.0, R_b = 0.0$  pixels) から近景に合焦した画像 ( $R_a = 0.0, R_b = 4.0$  pixels) へと変化していく画像である。すなわち中段の画像は遠近の中程に焦点が合ったような画像となっている。

画面全体にわたってほぼ良好な画像が得られていることがわかる。ただし、6.4.1 項の第 4 点として検討したように、(b) で特に顕著であるが、視差の付与による近景と遠景の重なり領域は過度に強調された輝度値となっており、新たに現われた遠景領域は撮像画像に情報を持たないため低い輝度値となっている。これと比較して、遠景のぼけを強調した (c) で

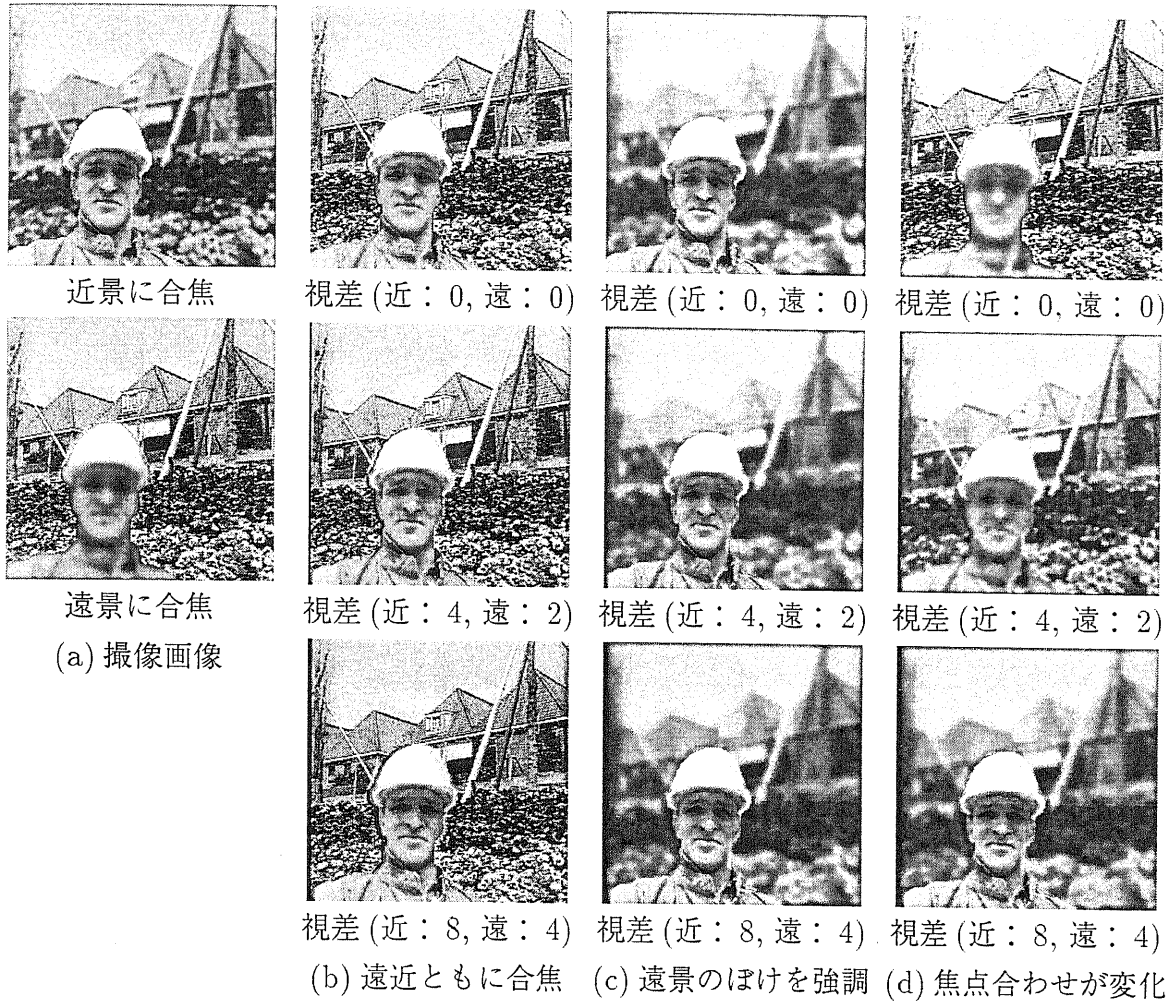


図 6.14: 視差を含む任意焦点画像の生成

は、より視覚的に良好な画像が生成されていることも、前述の検討の通りである。テクスチャについても、人物の左耳周辺で特に明らかなように、(b) では遠景のテクスチャが強く混ざり込んでいるのに比較して、(c) ではこの劣化の影響はかなり軽減されている。6.4.1項の第3点で検討した遮蔽による復元画像の劣化も、(a) の近景に合焦した画像と (b) の視差を与えていない画像の人物の右肩の部分などの領域におけるエッジ強度の違いに確認される。

次に実際に、前章までと同様の図 6.15(a) の実画像を用いて視差を与える任意焦点画像生成の実験を行った。図 6.15(b)(c)(d) のような様々な視差を含む任意焦点画像が生成できる。

図 6.15にて、(b) は遠近ともに合焦した画像に ( $R_a = 0.0, R_b = 0.0$  pixels) 水平方向の視差を与えたものである。上から、それぞれ、(近景 -10.0 pixels, 遠景 -5.0 pixels), (近景

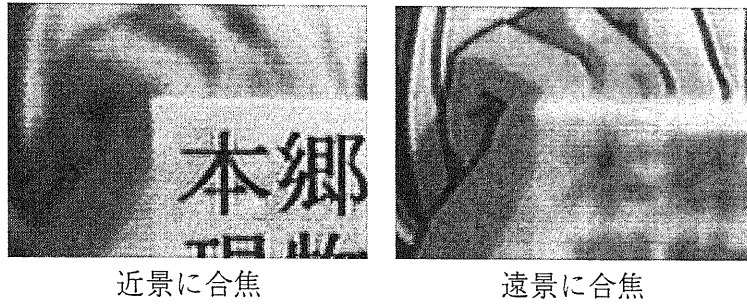
0.0 pixels, 遠景 0.0 pixels), (近景 10.0 pixels, 遠景 5.0 pixels) 水平に移動させた画像である。いわば視点を左に動かしていくような画像列になっており, 遠景のポスターの指を表す線と, 近景の文字の相対的な位置関係が変化していくのがみてとれる。(c) は近景のみ合焦するようパラメータを選び ( $R_a = 0.0, R_b = 5.0$  pixels) 同様の視差を与えたものである。(d) は上から同様の視差を与えながら, 近景に合焦した画像 ( $R_a = 0.0, R_b = 5.0$  pixels) から遠景に合焦した画像 ( $R_a = 5.0, R_b = 0.0$  pixels) へと変化していく画像である。すなわち中段の画像は遠近の中程に焦点が合ったような画像となっている。この場合は視点を右から左に動かしながらかつ近景から遠景へと焦点合わせを移していくような画像列になっている。

(a) の近景に焦点を合わせた撮像画像では, 遠景領域の画面左部分および近景対象物の左エッジにおいて編目状の雑音を確認される。これが6.4.1項の第2点で検討したように,  $t_1$  に従った位置を中心として (b) 等の生成画像に劣化を与えている。また, この雑音は  $\hat{h}_b$  ではなく,  $\hat{h}_a$  の影響を受けるため, (c) の画像に比して, (d) の最下段の画像の方がより画面左部分などの劣化が抑制されている。これも同検討で指摘した通りの結果である。

本実験ではシミュレーションに比較して, 視差付与による画質劣化がそれほど顕著ではない。これについて考察する。図6.16は撮像画像(a)のちょうど中央の水平1ラインにおける輝度値変化の一部を表す。グラフの中央右側の激しく輝度値の変化する領域が遠景と近景の境界部分である。このグラフからわかるように, 6.4.1項で検討した撮像画像とは異なる波形となっている。遠景に焦点を合わせた画像は, 近景に焦点を合わせた場合の画像をそのままぼかしたような波形である。これはすなわち, この境界領域は近景に属するものとして処理, 復元されるということにほかならない。実際に, 視差を付与することによっても, この境界エッジは近景の移動とともに, 図6.17のように復元される。これが生成画像の自然さの原因となっている。ただし, (b) の上段, 下段の画像など, この水平1ラインの少し下にある近景に隣接して遠景がテクスチャを持つ領域では, やや劣化が顕著になっていることが確認できる。

以上のように, 本手法によれば, 領域分割を用いることなく, 近景と遠景のぼけを独立に強調あるいは抑制しつつ, 近似的に各奥行きごとに視差を与えたような画像の生成が可能である。

本節では, 信号处理的統合に基づく任意焦点画像の生成手法をその位置不変の恒等式において一般化することで, 近景と遠景のぼけを独立に強調あるいは抑制しつつ同時に各奥行きごとに視差(移動量)を与えた画像を近似的に合成する手法を検討した。本手法は, 領域分割を用いることなく, すなわち奥行き分布の推定を行うことなく, 所望の画像を再構成できるという特徴がある。大きな視差を与えるほどに, 近景と遠景の境界領域における劣化が増大するという欠点はあるものの, 移動量が少なければ, むろん劣化が0となるわけではないが, 画面全体にわたって視覚的にほぼ良好な画像が再構成できる。とくに遠景にぼけを与える場合は, かなり自然な画像を生成することが可能である。単一視点の画像か



(a) 撮像画像

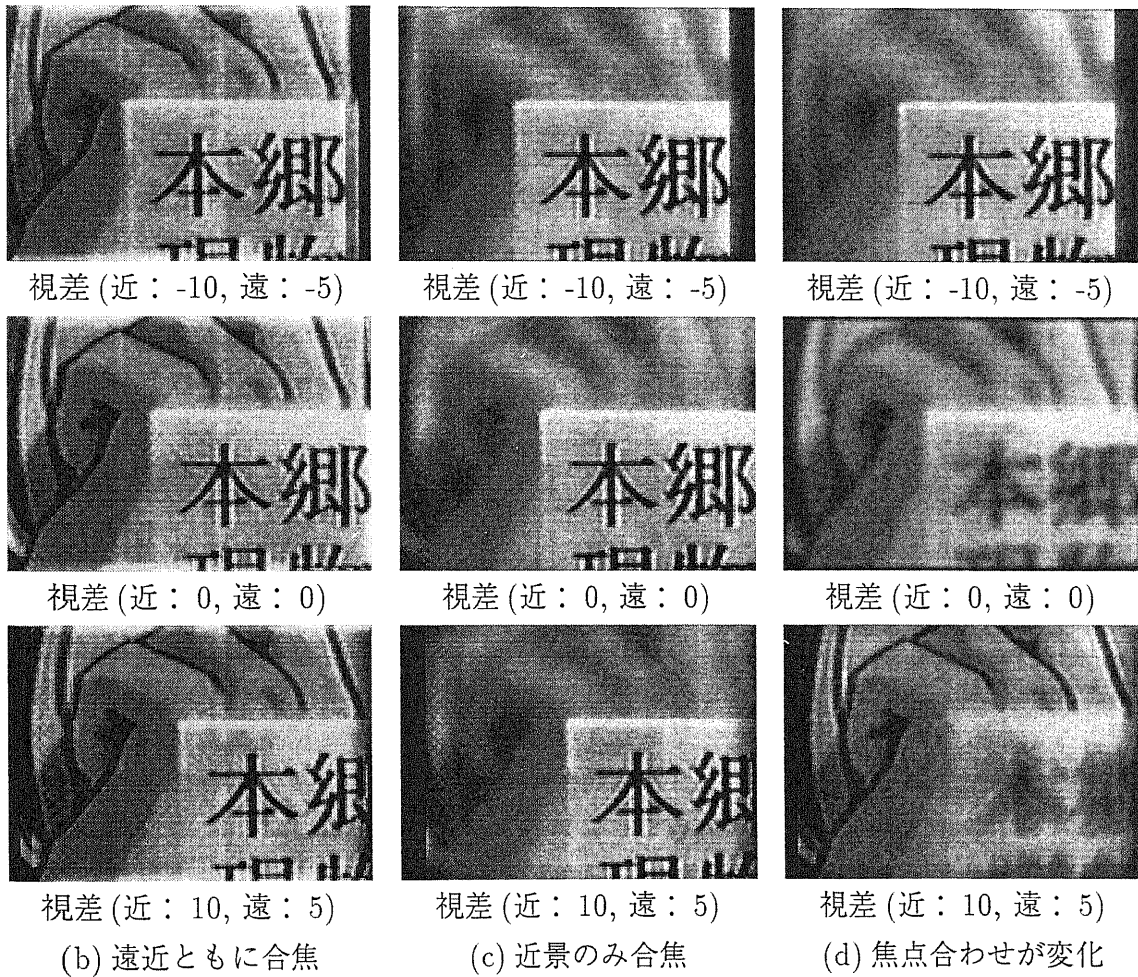


図 6.15: 実画像における視差を含む任意焦点画像の生成

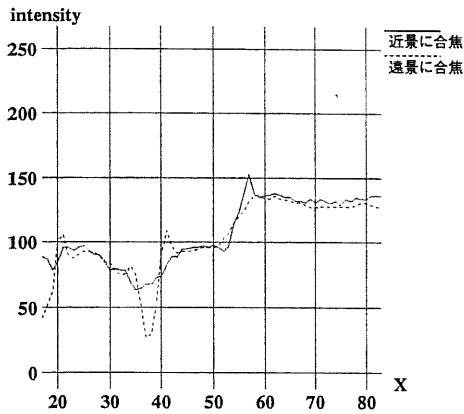


図 6.16: ある水平 1 ラインにおける撮像画像の輝度値変化

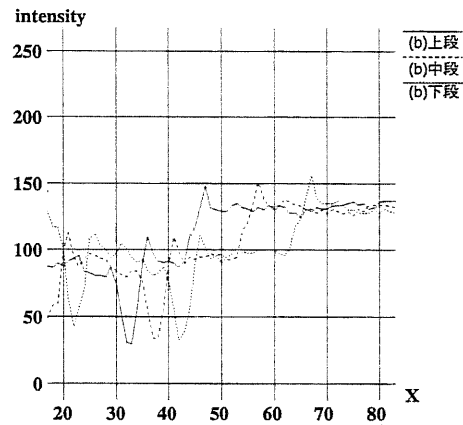


図 6.17: 視差を含む生成画像の輝度値変化

らの様々なステレオ画像の生成等への応用も考えられる。

本節では対象シーンの奥行きが段差状に変化するものと仮定し重ね合わせモデルを採用しているが、第 3 章の考察の通り各奥行きそれぞれが多少の幅を持っていても充分良好な画像を生成することが可能である。このような場合、視差の付与についていえば、各層内で生じる視差の変化が充分視覚的に無視できるという条件が必要である。

## 6.5 まとめ

本章では、前章までに論じた焦点合わせの異なる複数の撮像画像からの信号处理的統合を用いた映像生成の基礎となる位置不変の恒等式をより一般化することで、近似的生成も含めさらに多様な所望の画像を生成する手法を示した。

具体的には、所望の画像に対する畳み込みに用いるフィルタの可換性を条件として様々な映像生成が可能となる。まず、6.3 節においては領域分割を必要としない領域ごとの処理という本論文で提案する信号处理的統合手法の非常に有用な側面に着目してその展開を考察した。例えば、ある領域のみを切り出したような画像の生成や領域ごとのフィルタリングといった処理について検討を行った。続いて、6.4 節では領域ごとに動きを付与する処理について論じた。とくに近似的な視差と焦点ぼけを同時に様々に調整する映像生成への展開を詳しく検討した。このような処理に基づけば、単一視点の撮像画像からの簡易的な仮想環境の構築などへの応用が期待できる。合わせて、信号处理的統合に基づく近似的映像生成手法の妥当性について詳細に議論した。遠景にぼけを与える場合は近似的映像生成においても比較的良く所望の画像が再構成できることが確認された。

なお、撮像画像と所望の画像との間に導かれる位置不変の恒等式の一般化においては、本章で詳しく論じたような所望の画像に対する畳み込みフィルタのみならず、撮像画像に

仮定される畳み込みフィルタもその可換性を条件として様々に変更することが可能である。すなわち、視差画像や動きぼけのある画像からの様々な映像生成という枠組も考えることができる。本論文では撮像の条件が異なるため扱うことはしないが、このような問題への展開も非常に興味深い話題と思われる。

また、本章では全て対象シーンの奥行きが2層にわかれる場合について議論を行ったが、さらに複数の奥行きを持つ対象シーンについても原理的に同様の映像生成を行うことが可能である。

以上、本章では、本論文の目的である多様な映像生成に関して、信号処理的統合手法そのものの再検討、すなわちその基本となる位置不変の恒等式を一般化することにより、様々な応用を期待させるより自由度のある画像生成、画像処理への展開を実際に実験を行いながら論じた。

これに対し次章では、以上のような処理に加え、ユーザによる対話的な処理との協調により、さらに多様な画像の生成を行う手法を示す。これまで提案した信号処理的統合手法に基づく映像生成では奥行きごとの独立な処理に限定されていたが、対話的に簡単な領域指定を行うことにより、例えば同じ奥行きに対象が2つある場合でも、それぞれの領域ごとに独立にぼけや視差を調整することが可能となる。同時に選択的統合手法の拡張も行い、両手法の特徴を対話的に利用するなどしてより効率的に映像生成を行う手法も検討する。

## 第 7 章

### 対話的処理との協調

#### 7.1 はじめに

前章では、信号处理的統合手法の再検討を行い、複数の撮像画像と所望の画像の間に導かれる位置不変の恒等式を一般化することにより、より多様な映像生成が可能となることを示した。本手法の特徴である領域分割を必要としない領域ごとのフィルタ処理や、視差と焦点ぼけを同時に調整する映像生成などは様々な応用への展開が期待される。

本章では引き続き、対象シーンによってはユーザによる対話的な処理を加えることでさらに多様で自由度の高いあるいは効率的な映像生成が可能となることを示す。まず 7.2 節では、奥行きごとの処理に限定されてきた本論文における信号处理的統合に基づく映像生成を対話的に簡単な領域指定を行うことにより、領域あるいはオブジェクトごとの処理へと拡張する手法を提案する。このような対話的処理との協調により、例えば同じ奥行きに対象が 2 つある場合でもそれぞれの領域ごとに独立にぼけや視差を調整することが可能となる。またこれとは別に、さらに多数の奥行きを持つ対象シーンについても対話的処理と協調することによりより少ない奥行きに対する処理の組み合わせで効率的に所望の画像の生成が可能となることを示す。続いて、7.3 節ではこれまで単純には全焦点画像の再構成のみに限られていた選択的統合手法について、任意焦点画像生成など信号处理的統合手法と同様の処理が可能となるように拡張を行う。その特徴を信号处理的統合手法と比較し、これらにさらに対話的な処理を加え両手法を適宜利用したより効率的な映像生成の可能性を検討する。

対話的な処理との協調により、本論文の提案する複数画像からの信号处理的統合に基づく映像生成手法がさらに多様な所望の画像の再構成を可能とすることを、実際に様々な画像を用いながら実験を行い確認していく。とくに 7.2 節における、非常に簡易な対話的操作である領域指定のみによる、奥行きごとの処理に比較して大幅に自由度の高いオブジェクトごとの処理の実現においては、本手法の領域分割を必要としない映像生成という特徴が再び有効に利用される。

撮像画像素材からの映像生成という枠組においては実際には、あらかじめユーザの与え



る対話的処理との協調が前提である。したがって、このような対話的処理との協調による映像生成を考察することは本論文の提案する映像生成手法の実用的な有効性を検討する上で非常に重要と考えられる。

## 7.2 補助的な領域指定との協調に基づくより多様な映像生成

### 7.2.1 オブジェクトごとの処理への拡張

前章までで論じてきた信号处理的統合に基づく複数画像からの映像生成では、領域分割を用いることなく様々な領域ごとの処理を行うことが可能となるものの、例えば同じ奥行きに2つのオブジェクトがあった場合、それらに同一の処理しか加えることができない。これは本手法が撮像画像における奥行きごとの焦点ぼけの違いを利用していることからの制限である。

本項ではこれに対し、ユーザによって対話的に簡単な領域指定を加えることにより、対象シーンによっては前章までの制限を受けることなくオブジェクトごとの処理を行うことができることを示す。本論文で提案する信号处理的統合手法の映像生成は領域分割を用いる必要がないという特徴に基づき、処理の対象としたいオブジェクトを被覆する形でその周辺部を領域指定すれば、オブジェクトの境界そのものを細かい手作業により切り出すことなくオブジェクトごとの独立の処理が可能となる。

例えば、まず図7.1のようなある背景を背に人物Aと人物Bが同じ奥行きに位置するような対象シーンに対し、人物と背景それぞれに焦点を合わせて2枚の撮像画像を得たとする。撮像範囲のずれは既に補正されているものとする。これに対しそのまま前章までのような信号处理的統合に基づく映像生成手法を用いるなら、人物Aと人物Bに異なる処理を加えることは出来ない。しかし、ユーザが人物Bの周りに実線に示したような領域指定を行うことにより以下の手順で2人の人物、同じ奥行きに存在するオブジェクトに対し独立に処理を行うことが可能となる。すなわち

(1) まずこれまで通り画像全体を信号处理的統合に基づき処理

— 例えば近景の人物に  $R = 0.0$ 、背景に  $R = 4.0$  で焦点ぼけを与える。

(2) 次に実線領域を被覆する点線領域(画像全体でも良い)内のみ

再び別に信号处理的統合に基づく処理

— 例えば近景の人物に  $R = 2.0$ 、背景に  $R = 4.0$  で焦点ぼけを与える。

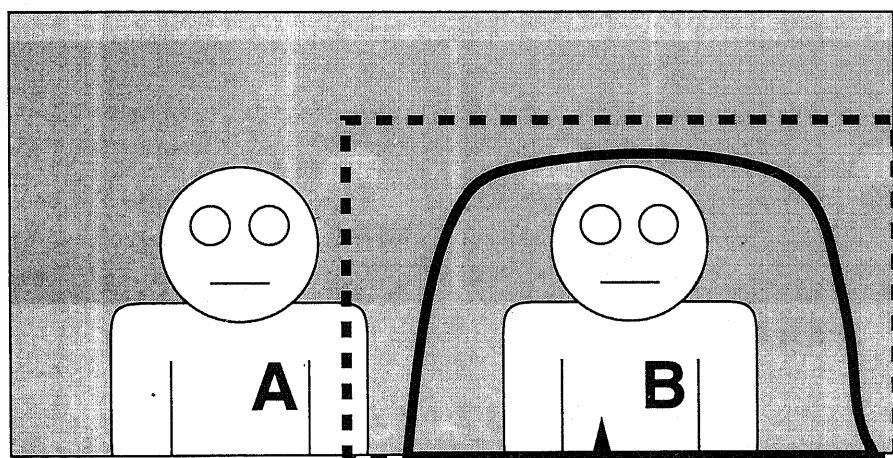
(3) 実線で指定された領域のみ前者の生成画像に後者の生成画像を上書きする。

図7.1のように同じ奥行きを持つオブジェクト領域が比較的簡単に分離できる場合、必ずしも奥行きに拘束されない多様な映像生成処理を行うことができるわけである。実際のユーザとの対話的処理としては、



- ユーザによりパラメータを設定し (1) を行う. 結果を表示.
- ユーザによる領域指定操作.
- ユーザによりパラメータを設定し (2) を行う. (3) も同時に行い結果を表示.

と, 撮像画像素材からの映像生成という枠組においては非常に適切な形と思われる. なお, 図 7.1 の実線のようなユーザによる領域指定を被覆する点線領域はもとの実線領域に対し十分に大きくとらなければならない. 信号处理的統合に基づく映像生成においてその処理領域の周辺境界部では, その境界部の外を利用できないことに起因する有限の範囲での演算により正確な再構成が行われぬ. この影響を避けるために, 前章で考察したように撮像画像中のぼけや生成画像として与える処理の及ぶ範囲を十分に含んだ大きさの被覆領域で (2) の処理を行う必要がある. よって, 同じ奥行きオブジェクトが近接しているほど良好で自由度の高い映像生成は困難となる. 逆に図 7.1 のような対象シーンの場合には問題なくオブジェクトごとの処理が可能となる.



**A, B** は同じ奥行き 指定領域でのみ  
任意焦点画像処理

図 7.1: 対話的処理との協調によるオブジェクトごとの処理手法

シミュレーションとして, 図 7.2(a)(b) のような 2 人の人物と背景により構成される近景と遠景それぞれに焦点を合わせた画像を合成し, これを撮像画像とみなして上記の手順に基づきオブジェクトごとに焦点ぼけを与える映像生成を行う. なお, これらの画像サイズは  $480 \times 240$  であり撮像範囲のずれは補正済のものともみなせる. まず  $R_a = 0.0, R_b = 4.0$  および  $R_a = 2.0, R_b = 4.0$  とした画像 (c)(d) を生成する. 続いて, (d) のうち (e) のみ

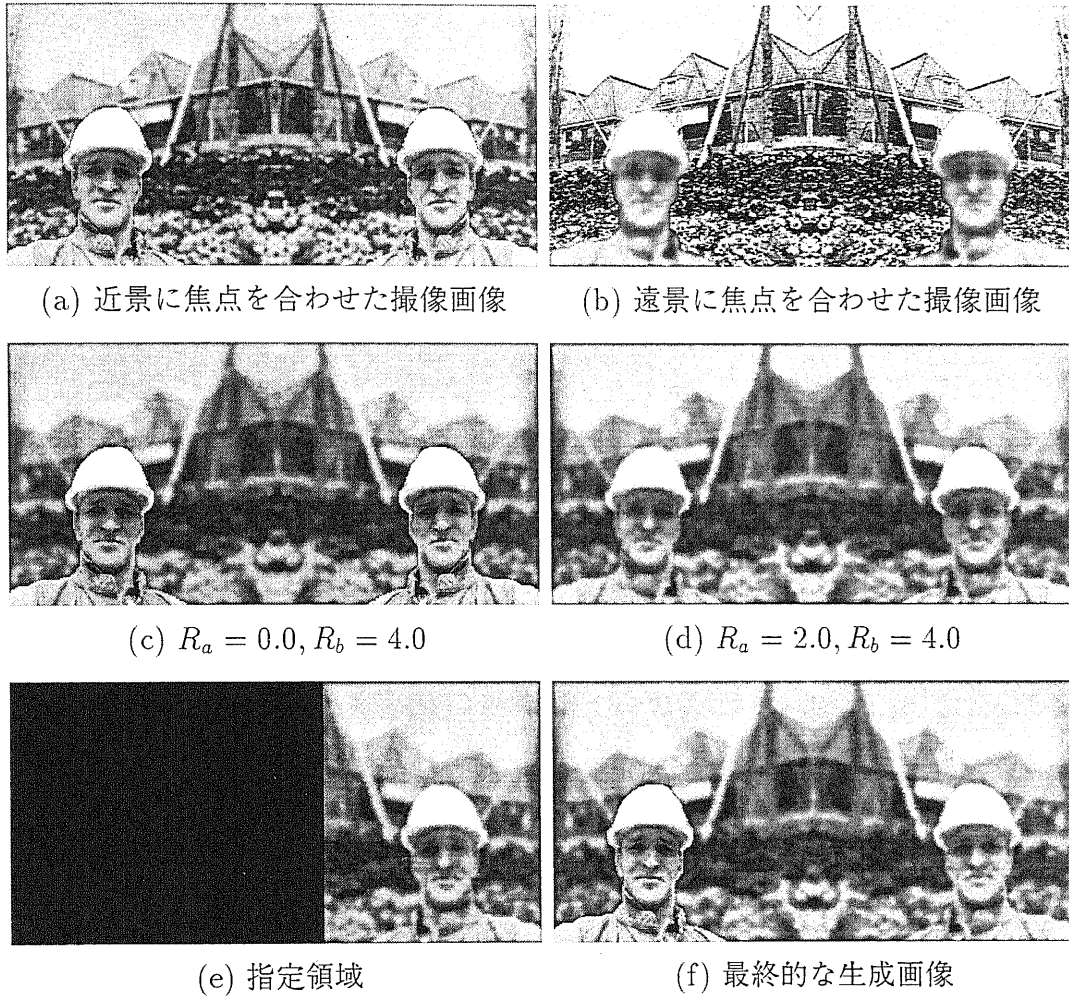


図 7.2: オブジェクトごとの焦点ぼけの調整

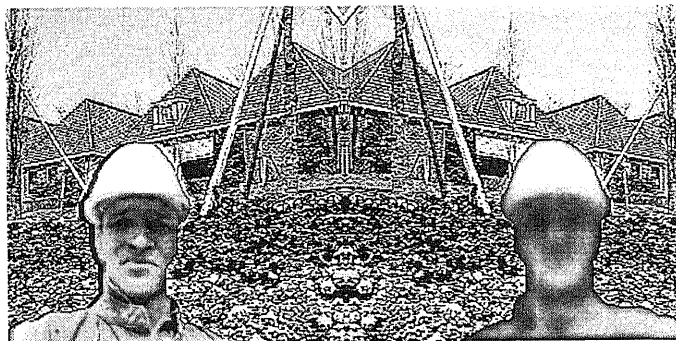


図 7.3: 対話的処理との協調による多様な映像生成処理

を指定領域として(c)に上書きする。このようにして生成された(f)は、近景の左の人物が  $R = 0.0$ 、右の人物が  $R = 2.0$ 、背景が  $R = 4.0$  でぼけを与えられた画像となる。指定領域の周辺である境界線も滑らかに接続されていることがみてとれる。

図7.3は以上のような対話的処理を前章に示した一般化された信号処理的統合に基づく映像生成に適用した場合の生成画像である。前章でのパラメータでいえば遠景に  $c = 4.0$  で高域強調処理、近景の左の人物に水平方向に4.0 pixels分の動き、近景の右の人物に  $h_a = 0$  で抑圧の処理を施した画像となっている。

ここでは領域指定の境界線は直線となっているが、上述の通り同じ奥行きものを分割できさえすればどのような任意の曲線でも利用することができる。また、対象シーンの奥行きがより複数の層から構成される場合でもまったく同様の処理が可能である。このように撮像画像素材からの対話的な映像生成という環境において領域指定を補助的に与えることができる場合は、奥行きごとの処理という条件に制約されることなく様々なオブジェクトごとに独立にぼけや視差を調整する処理を行い、前章で示した信号処理的統合に基づく映像生成の一般化に加えさらに多様で自由度の高い映像生成が可能になる。後の7.2.3項で実画像を用いて実験を行う。

## 7.2.2 より多数の奥行きを持つ対象シーンに対する映像生成への拡張

第5章において考察したように信号処理的統合に基づく映像生成では、対象シーンがより複数の奥行きを持つ場合ほど、零点や低周波成分の問題も含め良好かつ効率的な所望の画像の再構成は困難になるのであった。

これに対しここでは7.2.1項と同様ユーザの補助的な領域指定との協調により、対象シーンによっては例えば図7.4のように4層の奥行きを持つ場合でも、それ以下の少数の層から構成される複数の領域へと分割しそれぞれを独立に処理することで良好かつ効率的な再構成が可能となることを示す。

図7.4に則して言えば具体的には、各撮像画像の撮像範囲のずれを補正した後、ユーザの与える簡易な領域指定によりまず、4層で構成される対象シーンをそれぞれの含む奥行きが3層以下となるように分割する。ここではそれぞれ領域が(1-3-4),(1-2-3),(2-3-4)の奥行きを含むように分割されている。この分割に従いそれぞれの領域に対し所望の処理を施しこれらを合成して最終的な生成画像とする。なお7.2.1項同様、各分割領域への処理は各領域を十分に被覆する領域あるいは画像全体で行う必要がある。また、所望の処理を与える際その分割領域がどの奥行きを含むかを指定しておかなければならない。すなわち(1-3-4)の奥行きから構成される分割領域は(1-3-4)に対応するぼけ関数の組を用いることで所望の処理が可能となる。実際には

- ユーザによる各奥行き領域に対する処理のためのパラメータの設定。
- ユーザによる領域指定操作と各分割領域の含む奥行きの指定。

- 各分割領域を独立に処理し、結果を表示。

と、一般的な信号処理的統合に基づく映像生成や7.2.1項と比較してもそれほど複雑な手順にはならない。

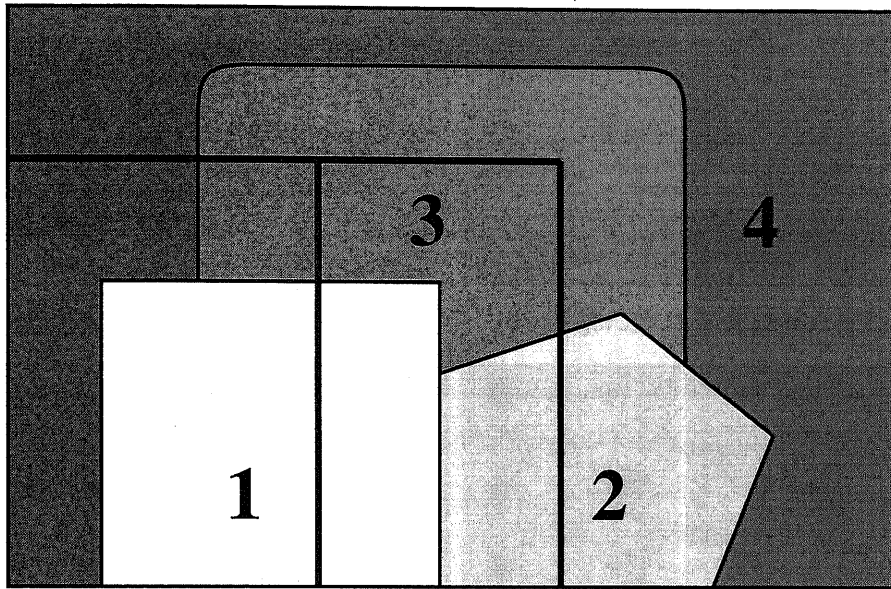


図 7.4: 4層の奥行きを持つ対象シーンの補助的な領域指定による複数の3層から構成される領域への分割

なお多数の奥行き、例えば4層以上の奥行きが集中する領域が対象シーン中に存在する場合、その領域についてはこのような処理を行うことはできない。4層そのものとして信号処理的統合に基づく映像生成を行うかあるいは次節に述べるような拡張された選択的統合処理を適用する必要がある。ただし、それ以外の領域についてはここで示したような効率的な分割独立処理を行うことが可能である。

以上のように、ユーザによる対話的処理との協調を前提とすれば、より多数の奥行きを持つ対象シーンに対しても多くの場合、領域指定とその分割領域それぞれがどの奥行きを含むかを指定する必要があるものの、比較的容易に良好かつ効率的な所望の画像の再構成が可能となる。以下、実際の実画像を用いた実験によりこのことを確認する。

### 7.2.3 実験とその評価

前項までに論じた対話的処理との協調による映像生成について、実画像を用いて実験を行う。

まず、7.2.2項に述べた手法の実験として図7.5(a)(b)に示す撮像画像を用い、領域ごとに焦点ぼけを調整した映像を生成する。これらは後の第8章で構築を行う多焦点カメラに

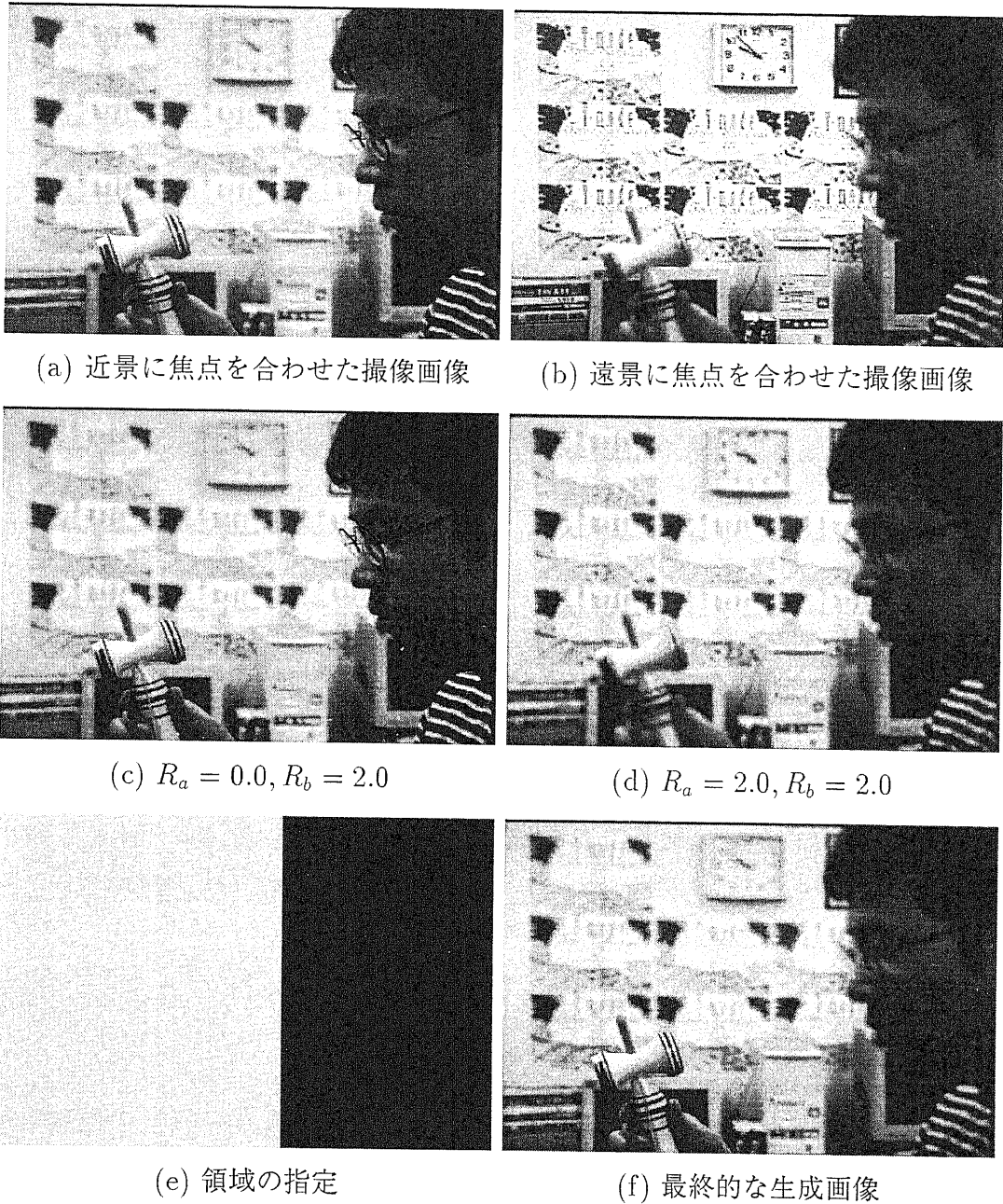


図 7.5: 実画像を用いたオブジェクトごとの焦点ぼけの調整の実験

より対象シーンに対し同時にそれぞれ近景と遠景に焦点を合わせて撮像した画像である。4.2節で示した手法に基づき画像サイズは  $352 \times 240$  へと補正済であり、また (a) における遠景のぼけは  $R_{12} = 2.6$ , (b) における近景のぼけは  $R_{21} = 2.0$  と推定される。近景の人物は頭部と剣玉を持つ手の部分とに領域が分れているが、奥行きはほぼ同じである。また背景となっている遠景部分の奥行きは若干の幅を持っている。

これらの画像の信号処理的統合により  $R_a = 0.0, R_b = 2.0$  および  $R_a = 2.0, R_b = 2.0$  とした画像 (c)(d) を生成する。続いて、(c) のうち (e) の灰色部分に対応する領域を (d) に上書きする。このようにして生成された画像 (f) は近景の剣玉とこれを持つ人物の手周辺のみが  $R = 0.0$  で鮮鋭化され、それ以外の領域で  $R = 2.0$  のぼけを与えられた画像となる。(e) における境界線に対応する領域でも (f) は滑らかに生成されていることがみてとれる。また、奥行きに多少の幅を持つ遠景についても、撮像画像におけるぼけはほぼ一様であることから特に大きな劣化もなく良好な再構成結果が得られている。以上から確認されるように、同じ奥行きに複数のオブジェクトが存在する場合においても適切な対話的処理との協調を導入することができれば、領域ごと、オブジェクトごとの処理が可能となり、注目したい領域のみを強調するような処理を容易に行うことができる。

続いて7.2.2項に述べた手法の実験として、図7.6(a)～(d)に示した4層の奥行きそれぞれに焦点を合わせた撮像画像に対し領域を適当に指定することにより3層ごとの処理の組み合わせとして所望の画像の生成を行う。上述の実験と同様4.2節で示した手法に基づき画像サイズは  $288 \times 240$  へと補正済である。撮像画像中のぼけ関数に対応するパラメータ  $R_{ij}$  は、4.2節の最後で論じたような拡張によっても推定は可能であるが、ここでは対話的処理が利用できることが前提としてあるので煩雑さを避けるため、それぞれの奥行きに対し適当に領域を指定しもっとも焦点の合っている画像とそれ以外の画像との比較からこれらのパラメータを推定するものとする。これは鮮鋭な領域の指定(全体ではなく文字部分など)を手動により行ったことに対応する。なお、 $R_{ij}$  の推定手法そのものは4.2節で示した通りである。実際には、

$$R = \begin{pmatrix} 0.0 & 1.2 & 3.0 & 4.4 \\ 1.2 & 0.0 & 2.0 & 3.1 \\ 3.1 & 1.9 & 0.0 & 1.4 \\ 4.5 & 3.2 & 1.5 & 0.0 \end{pmatrix} \quad (7.1)$$

と推定された。ここでは  $R$  は  $R_{ij}$  を要素とする行列である。

このパラメータを利用し、まず (a)(b)(c) および (a)(c)(d) それぞれ3枚の画像から、手前より1, 2, 3層および1, 3, 4層に焦点の合った画像を信号処理的統合に基づき生成する。(e) の領域指定に従い前者の黒色領域に対応する部分と後者の灰色領域に対応する部分を合成し、最終的な生成画像である全焦点画像 (f) を得る。これも上述のオブジェクトごとの処理の実験と同様に (e) の境界線に対応する領域周辺でも (f) は滑らかに生成されていることが確認される。





(a) 最も手前に合焦

(b) 手前から 2 番目の層に合焦



(c) 手前から 3 番目の層に合焦

(d) 手前から 4 番目の層に合焦



(e) 領域の指定

(f) 最終的に生成された全焦点画像

図 7.6: 実画像を用いたより多数の奥行きを持つ対象シーンに対する映像生成の実験

このようにユーザによる対話的処理との協調を利用することにより、さらに多数の奥行きを持つ対象シーンに対しても比較的容易に効率的な所望の画像の再構成が可能となる。

以上、本節では信号处理的統合に基づく映像生成の対話的処理との協調手法についてその有効性を確認した。本節で示した実験における領域指定は非常に単純なものであるが、既に述べた通り明らかにどのような境界形状でも適切な領域指定さえできれば所望の画像を生成することができる。またこれに関して言えば、上述の実験において例えば画像の左側領域と右側領域それぞれで別の画像を撮像し生成処理を行い、その後所望の画像を合成するということが可能ではあるが、画像の持つ光学的な歪みなどにより実際にはこのような合成処理は境界部の自然な接合に非常に困難がともなう。これに対し対話的処理との協調を用いた本手法は、このような問題を生じることなく良好に所望の画像を生成することができるという特徴があり、こういった映像生成処理において大きな有意性を持つといえる。

### 7.3 選択的統合処理の拡張とこれとの協調に基づく映像生成の検討

前節ではより複数の奥行きを持つ対象シーンに対する映像生成を対話的処理との協調により行う手法を検討したが、さらに連続的な奥行きを持つ対象シーンなど、信号处理的統合に基づく映像生成ではやはり対処が困難になる場合も考えられる。

これに対し本節ではまず、複数の焦点合わせの異なる撮像画像からの劣化予測に基づく領域分割を利用した選択的統合による全焦点画像の再構成手法を、信号处理的統合に基づく映像生成と同様の処理が可能となるように拡張する方法を考察する。一般に選択的統合手法では対象シーンがより複数の奥行きで構成されている場合でも、領域分割処理は必要となりまた第3章で確認したように再構成画像にやや不安定なところがあるものの、生成のための演算処理はそれほど複雑化することがなく、連続的な奥行きを持つ対象シーンなどに対しては適切な手法となる可能性がある。7.3.1項では具体的な選択的統合処理の拡張手法を示したのち、このような特徴などに関し信号处理的統合手法と互いに比較検討を行う。

7.3.2項ではこの両手法の比較結果に基づき、安定かつ良好な再構成が可能となる信号处理的統合手法と、対象シーンがより複数あるいは連続的な奥行きを持つ場合でも効率的な再構成が行える選択的統合手法を、前節同様、対話的な処理により領域ごとに適宜それぞれ利用する、安定かつ効率的な映像生成の可能性を検討する。

#### 7.3.1 選択的統合処理の拡張

まず、これまでは複数の焦点合わせの異なる撮像画像からの全焦点画像の再構成を目的として用いられて来た選択的統合処理の、より多様な映像生成手法への拡張を考察する。例として図7.7に選択的統合に基づく任意焦点画像生成の処理手順を示す。まず、それぞれに焦点の合っている2枚の画像(a)(b)から焦点外れ予測による鮮鋭領域判定(c)を行う。第



3章などで論じたように、この(c)の結果には少なくない判定誤りや判定保留領域を含むため単純にはこれに基づいて領域を取り出しそれぞれ独立に処理する、という方法とはとることができない。そこで、(a)(b)に対しあらかじめそれぞれ所望の $h_a, h_b$ を与えて画面全体にぼけ関数の畳み込みを行う。このようにして処理された2枚の画像(d)(e)を、全焦点画像の再構成手法の場合と同様に、(c)の領域判定結果に基づき選択的に統合することで任意焦点画像(f)が生成される。この(f)においては、(c)で生じている判定誤り、判定保留の多くの部分を占める撮像画像中で輝度値が一様な領域についても、(d)(e)のどちらでも全焦点画像の再構成の場合と同様にほぼ同じ所望通りの輝度値が合成されているので、問題無く再構成が行われる。

ただし、以下の実験でも確認されるように、近景、遠景の境界周辺領域の判定誤り、判定保留の影響に関しては、第3章で示した全焦点画像の再構成結果よりさらに顕著に同領域に画質の劣化が生じることとなる。これは何らかの誤りを含まざるを得ない領域分割を直接利用する生成手法の原理的な問題である。しかしある程度適切な領域分割さえ行うことができれば、このような選択的統合処理に基づく映像生成は対象シーンがより複数あるいは連続的な奥行きを持つ場合でもそれほど演算量が増大することがないため、比較的効率良く所望の画像の再構成を行うことが可能である。プレビューなどそれほど良好な生成画像を必要としない場合などに有効な手法であるとも考えられる。

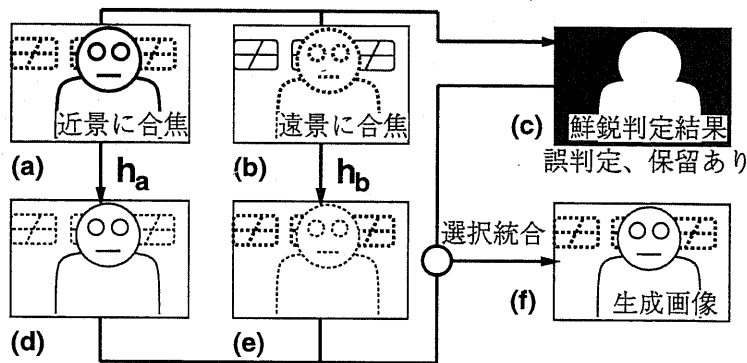


図 7.7: 選択的統合処理に基づく任意焦点画像生成

なお、本節では以下の実験とも、本論文の中心である任意焦点画像生成とそのための両手法の協調に関する考察に留めるが、(d)(e)の合成処理における $h_a, h_b$ を変更することにより前章で論じたような様々な映像生成への可能性も考えることができる。ただしこの場合、選択的統合処理にも適宜何らかの工夫が必要である。これも大変興味深い話題と思われる。

さて、上記のような手法のシミュレーションとして、再び図 7.8(a)(b)のような各層に独立のぼけを与えて合成した画像を用い実験を行う。 $R_{21} = 3.0, R_{12} = 2.0$ であり画像サイ

ズは  $240 \times 240$ , 撮像範囲のずれは補正済とみなすことができる。また, これらの画像においては, 近景遠景間で生じるオクルージョンも考慮している。(c)が(a)(b)に対する劣化予測に基づく鮮鋭判定結果である。推定のためのパラメータは第3章で用いたものと同様である。白が近景, 黒が遠景と判定された領域であり灰色は判定保留の領域である。この結果をもとに上述の手順で  $R_a = 0.0, R_b = 4.0$  として選択的統合により生成した画像が(d)である。遠景のみぼけを強調した画像である。

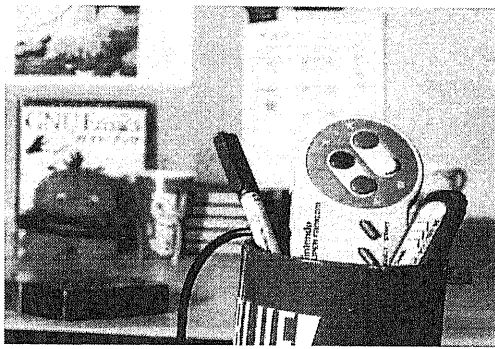


図 7.8: 選択的統合処理に基づく任意焦点画像の生成シミュレーション

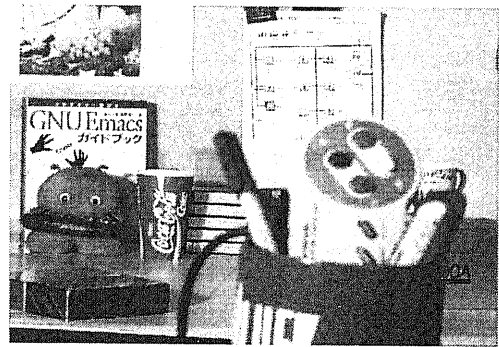
(c)の結果からもわかるように鮮鋭領域判定においては, 輝度値が一様の領域や近景遠景の境界付近での誤判定, 判定保留が生じやすい。しかし, 輝度値一様の領域では図 7.7(d)(e)でどちらも同様の値が合成されているため, 図 7.8(d)において選択統合に基づく生成による画質の劣化は見受けられない。ただし, 近景遠景の境界付近ではやはり生成画像の左下部を拡大した(e)のように, 信号处理的統合に基づく生成画像(f)に比べ, 誤判定によって近景遠景が入り組んだような不自然さが生じている。これは第3章で確認された全焦点画像再構成における画質の劣化よりもさらに顕著なものであるが, その原因はそれぞれの奥行き領域が独立に処理を施されることで, 遠近の境界周辺における誤判定の影響がより強調されたためと考えられる。3章で信号处理的統合手法を新たに検討する必要性を指摘した

ときの考察通りである。

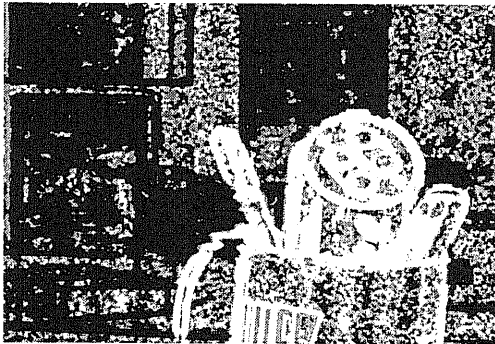
図 7.9は実画像を用いた同様の実験である。撮像範囲のずれを補正した画像サイズ  $680 \times 480$  の撮像画像 (a)(b) からの劣化予測に基づく鮮鋭判定結果 (c) に従い、 $R_a = 6.0, R_b = 0.0$  で近景のみぼけを強調した画像 (d) が生成できる。シミュレーションと同様に画像のほぼ全体にわたって良好な生成画像が得られているが、近景のパッドの上端付近の拡大図 (e) において信号处理的統合による生成画像 (f) と比較して近景遠景の奥行き境界付近で劣化が生じていることが見てとれる。



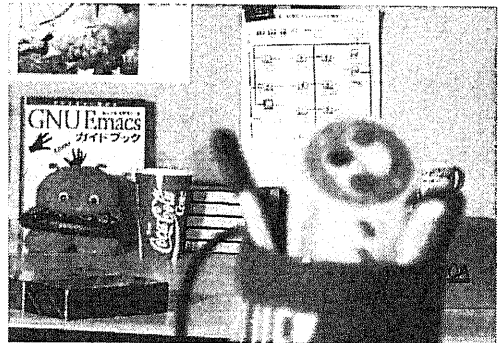
(a) 近景に合焦



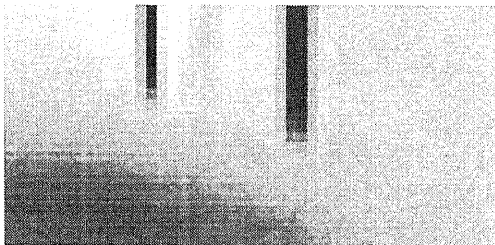
(b) 遠景に合焦



(c) 鮮鋭判定結果



(d) 生成画像



(e) 選択的統合 (拡大)



(f) 信号处理的統合 (拡大)

図 7.9: 選択的統合処理に基づく任意焦点画像生成の実験

実際により複数あるいは連続的な奥行きを持つ対象シーンに対して複数の撮像画像が

ら選択的統合に基づいて任意焦点画像を生成しようとする場合、図 7.7(d)(e) のような画像を撮像枚数分合成しておき、これを鮮鋭判定結果を利用して統合すれば良い。しかし、そのためにはより複数の焦点合わせの異なる撮像画像に対する煩雑な鮮鋭判定手法が必要となる。また対象シーンが複数の奥行きにより構成されそれぞれに焦点を合わせた画像を撮像するという本論文の仮定する条件そのものからも外れるため、続く 7.3.2 項では具体的な実験等を行わず、以上で考察したそれぞれの特徴を生かして、対話的な処理により信号処理的統合と選択的統合を適宜協調して利用する映像生成手法についてその可能性を検討するものとする。

### 7.3.2 より連続的な奥行きを持つ対象シーンに対する映像生成の検討

前項では、選択的統合手法の拡張を行うとともに、このような焦点合わせの異なる複数の撮像画像からの映像生成における信号処理的統合手法と選択的統合手法の特徴の比較を行った。信号処理的統合手法に対し、選択的統合手法は再構成画像の品質では劣るものの、より複数の奥行きを持つ対象シーンに対しては効率的に所望の画像を生成することができると考えられる。

この両手法を対話的な処理により適宜領域ごとに利用し、これを統合することで安定かつ効率的な映像生成を実現することを検討する。すなわち、簡単な例として図 7.10 のような対象シーンを考える。まず近景の人物とその背景となっている壁を遠景として撮像し、これに信号処理的統合手法を適用し映像の生成を行う。これとは別にさらに遠景に焦点を合わせた画像を複数撮像し選択的統合を行い画面右側で所望の結果が得られるような画像の生成を行う。後者の生成画像をユーザの指定した点線部分のみ、前者の生成画像に統合することにより最終的な所望の画像の生成を行う。

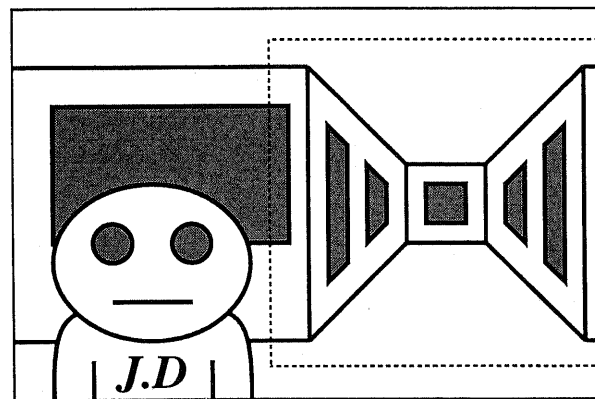


図 7.10: 信号処理的統合手法と選択的統合手法の対話的処理による協調

このような手法によれば、所望の画像の良好な再構成とその効率的な処理を比較的容易



に実現することができる。前節に述べたような対話的処理に基づくオブジェクトごとの処理などと同様、例えば点線領域の内外でそれぞれ別に撮像および処理を行っておいて合成するという手法はここでも非常に困難である。これに対し、対話的処理による両手法の統合においてはその境界線でも原理的には顕著な画質劣化を生じない。その意味で、以上のような処理手法は十分に有意なものといえる。ただし、選択的統合手法をこのように利用しようとするれば、対象シーンの持つ複数の奥行きそれぞれに焦点を合わせた画像を撮像するという本論文で仮定する条件から外れてしまうため、上述のような検討のみにとどめるものとするが、非常に興味深い話題であると思われる。

#### 7.4 まとめ

本章では前章に引続き、より多様で自由度の高いあるいは効率的な映像生成を行う手法として、ユーザによる対話的処理との協調を検討した。

7.2節ではユーザによる簡易な領域指定との組み合わせで映像生成を行う手法を提案した。具体的にはまず7.2.1項で、前章まで奥行きごとの処理に限定されてきた信号処理的統合に基づく映像生成をオブジェクトごとの処理へと拡張する手法を論じた。合わせて7.2.2項で、より複数の奥行きを持つ対象シーンに対しても場合によっては同様の領域指定により、それ以下の奥行きで構成される対象シーンに対する処理をその領域ごとに適用することで、より効率的に所望の画像の映像生成が可能であることを示した。以上について7.2.3項で実際に実画像を用いて実験を行いその有効性を確認した。具体的には、2層の奥行きにそれぞれ焦点を合わせた撮像画像から、近景のオブジェクトのうちある領域のみを鮮鋭化しそれ以外にぼけを与えた画像を生成した。このようなオブジェクトごとの処理は、奥行きごとの処理に比較して大幅に自由度の高い映像生成といえる。また、4層の奥行きを持つ対象シーンを撮像した4枚の画像から、簡易な領域指定と3層の奥行きに対する処理の統合に基づいて全焦点画像の生成を行った。煩雑な処理の導入を必要とせず効率的な映像生成が実現されることを確認した。

以上のような対話的処理との協調においては本論文で提案する信号処理的統合手法の領域分割を必要としない映像生成という特徴が有意に生かされており、自由度の高い多様な映像生成を実現しながらも実際に必要となる処理は正確な領域分割のような複雑なものではなく簡易な領域指定のみとなっている。これは最終的な映像生成のための統合アプリケーションといったものを想定した場合、それがその実用性、利便性において非常に優れたものになることを期待させるものである。

続いて、7.3節では従来の複数の焦点合わせの異なる撮像画像からの選択的統合に基づく映像生成を、全焦点画像の再構成のみならず任意焦点画像の生成等も可能となるように拡張する手法の検討を行った。信号処理的統合手法と比較した場合には画質に劣化が見られるものの、より連続的な奥行きを持つ対象シーンなどには有効な手法と考えられる。本論文で仮定している、対象シーンの持つ複数の奥行きそれぞれに焦点を合わせるという撮

像条件から外れるため詳しくは論じなかったが、これも対話的な処理との協調で、両手法を適宜利用したより効率的な映像生成が可能になると期待される。

次章では、本章までに検討した信号処理的統合に基づく映像生成手法のために、一般的なカメラと比較してより適切な撮像画像を取得することのできるシステムを提案し、実際にその構築を行う。プリズムを用いた多焦点カメラと、同期して動画像の蓄積が可能なPCベースのディスクレコーダ等から構成される撮像システムにより、焦点合わせの異なる複数の動画像を撮像することが可能となる。光学系も本論文で仮定する画像取得モデルとより対応した構成となる。様々な撮像画像を取得して映像生成を行い、信号処理的統合に基づく焦点画像処理という枠組をシステムとして具体的に実現することで、本論文の提案の最終的なまとめとする。

## 第 8 章

### 多焦点カメラシステムの構築とこれを用いた映像生成

#### 8.1 はじめに

前章まででは、対象シーンが複数の奥行きにより構成されることを仮定し、そのそれぞれの奥行きに焦点を合わせた複数の撮像画像を信号处理的に統合することで様々な画像の生成を行う手法を検討してきた。本章ではこのような映像生成処理手法の具体的な実現のために、一般的なカメラと比較してより焦点画像処理に適切な撮像画像を取得することが可能となる多焦点カメラとこれを用いた撮像システムの提案を行う。

まず 8.3 節で、プリズムにより対象シーンから入力される光を 3 方向に配分することで同時に複数の焦点合わせで撮像することのできる多焦点カメラの試作を行った。この多焦点カメラは仮に対象シーン中において物体が動いていたとしてもまったく同時に焦点合わせの異なる 3 枚の画像の撮像が可能であるため、この対象シーンを動画像として取得することができる。合わせて、静止した対象シーンに対しても照明条件の変化等を問題とすることなくより適切かつ効率的な撮像が可能となる。さらに、光学系も本論文で仮定する画像取得モデルとより対応した構成となる。

さて、多焦点カメラにより複数の動画像の撮像を行おうとした場合、それぞれが同期してタイムコードを記録しつつ動画像を蓄積することのできる複数の VTR 等の装置が必要となる。この蓄積システムを PC ベースのディスクレコーダにより構成すれば、将来的にはリアルタイムの動画像処理も期待することができよう。8.4 節では実際にこのような多焦点カメラシステムを構築し、複数の焦点合わせの異なる動画像の取得の実験を行う。

以上のようにして多焦点カメラにより撮像された画像に、本論文でこれまでに論じてきた信号处理的統合手法を適用し様々な映像を生成することで、このような撮像系に基づく焦点画像処理手法の有効性を確認する。多焦点カメラによる動画像への対応とより高精度な映像生成の実現は、本論文の提案する信号处理的統合に基づく焦点画像処理という枠組のいわば最終的なまとめとなるものといえる。合わせて、この撮像系で新たに明らかとなる課題の整理も行っておく。

なお、本章の検討は久保田との共同で行った [34]。

## 8.2 多焦点カメラの有効性

本論文で提案を行ってきた信号处理的統合による映像生成に適用可能な撮像画像を取得しようとするならばまず例えば、対象シーンが3層の奥行きから構成される場合、同じ視点からそれぞれに焦点を合わせて3枚の画像を撮像する必要がある。しかし、従来の一般的な単焦点カメラを用いてこのような焦点合わせの異なる複数の画像を撮像しようとするならば、焦点合わせを調整して撮像するという手順を撮像画像の枚数分繰り返さなければならない。すなわち、図 8.1 のようにこの手順を行う間に対象シーン中に動きが生じる場合には本手法は実際には適用可能な撮像画像を得ることができない。これに対応するためには、光学的に単一の視点から異なる焦点合わせで全く同時に複数の撮像画像を取得する撮像系の構築が不可欠といえる。

## A が動物体である場合

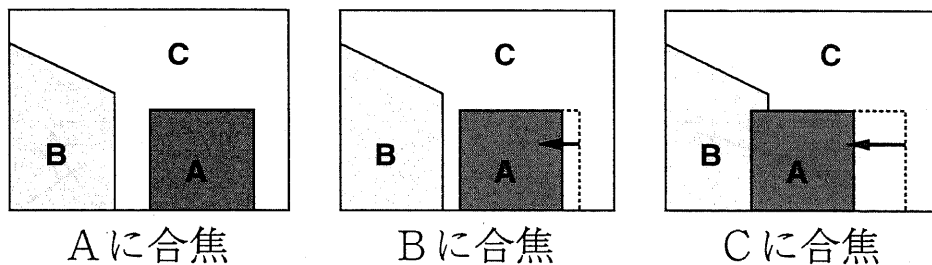


図 8.1: 動物体を対象とする場合の撮像条件の問題

このような撮像系としては、ハーフミラー等を用いて対象シーンからカメラへと入力される光をそれぞれの撮像面へと等分配する形式が考えられる。次節に詳しく示すが実際には、図 8.2 のような入射光を3方向に分配するプリズムを用いることができる。一般に3CCDのカラーカメラに用いられるプリズムは、RGBの色成分を分離しそれぞれのCCDの撮像面へと入射光を分配するが、このプリズムはハーフミラーと同様に光のパワーを1/3ずつに分配することが可能である。異なる焦点合わせは前面のレンズ群の調整では行えないので、この分配された光が入射されるそれぞれの小型カメラを前後に移動させることで行う。すなわち、これらの小型カメラにはレンズを装備せず、直接にプリズムへ向かって配置し前後する撮像面として構成する。この複数のカメラを同期させて撮像することにより、同時に複数の焦点合わせで撮像することが可能になると考えられる。図 8.1 のような動物体などを含む対象シーンに対してもまったく同時に焦点合わせの異なる3枚の画像の撮像が可能であるため、これまでのような静止画像のみならず動画像にも対応することができる。また、静止画像の撮像についても微小な照明条件の変化等の影響を受けることがなく、より適切な撮像画像が得られることとなる。問題として3つのCCD撮像面ごとの特性の



ばらつき等が考えられるが、これはある程度カメラコントロールユニット側で補正可能である。次節では、実際にこのような原理の多焦点カメラの構築を行う。

ところで、上述のように小型カメラすなわち撮像面を前後させることで焦点合わせを行うことにより、焦点ぼけの光学系も本論文で仮定する画像取得モデルとより対応した構成となる。通常の撮像カメラは撮像面の移動ではなく図 8.3 のようにレンズ側の移動により焦点合わせを実現している。このような構成では、とくにズームを大きくかけた場合等、遠景の拡大率  $OB/OA$  と近景の拡大率  $OC/OA$  が等しくならず、第 4 章で詳しく論じたような撮像範囲のずれの補正を精度良く行うことは困難になることが確認されている [32]。これに対し、図 8.2 のような撮像面側が前後することで焦点合わせを変化させる光学系においては、近景、遠景ともに拡大率が  $OA'/OA$  と等しくなるため、より精度の良い補正が可能になると考えられる。

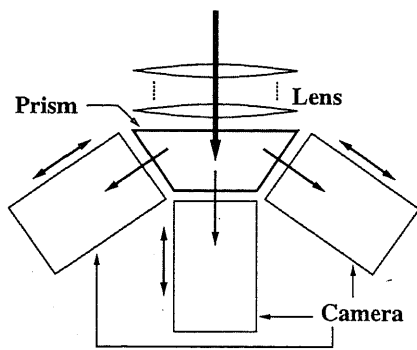


図 8.2: 焦点画像処理用撮像カメラの構成図

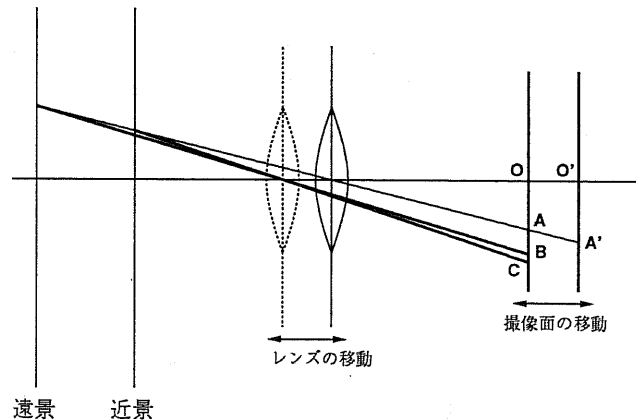


図 8.3: 焦点合わせによる撮像範囲の変化

以上述べたように、

- 対象シーンからの入射光のプリズムによる分配に基づく動画撮像への対応
- より撮像モデルに適した光学系の構成

の 2 点を目的とし、次節では具体的に多焦点カメラシステムを構築していく。

### 8.3 多焦点カメラシステムの構築

#### 8.3.1 多焦点カメラの構造

前節で論じた仕様を満たす多焦点カメラを FUJINON に依頼し実際に試作を行った。この多焦点カメラの外観を図 8.5 に示す。図 8.5 は後段の画像蓄積部も含めたシステムの構

成図である。

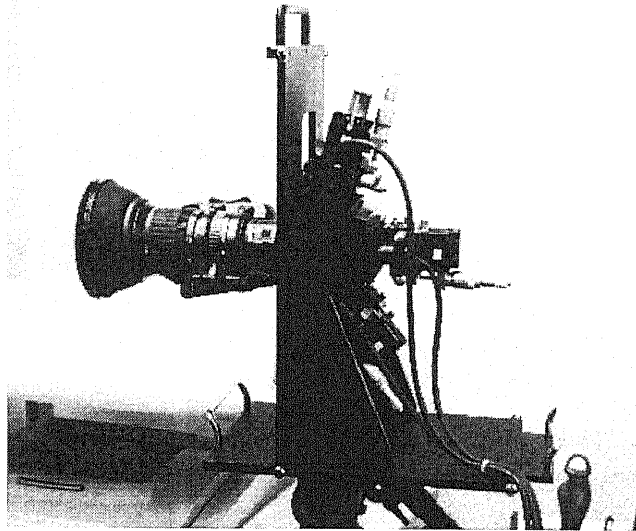


図 8.4: 多焦点カメラの外観

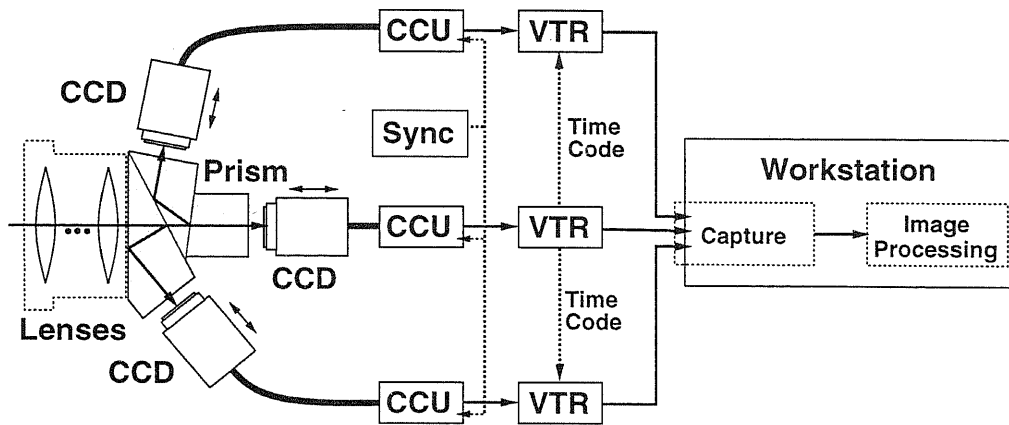


図 8.5: 多焦点カメラシステムの構成

多焦点カメラは大きく分けてレンズ系、プリズム、3つの CCD から構成される。前段のレンズ系は通常のパラマウントのズームレンズであり、ズーム、アイリスの調整等はこちらで行うことができる。フォーカスの調整も可能であるが実際の焦点合わせは後段の CCD の前後動で行うため、次節の実験ではフォーカスは無限遠に固定して利用している。このレンズから入射する光がプリズムにより3つの撮像 CCD へと分配される。ここで用いられているプリズムは撮像に関連する波長範囲では、ほぼ十分正確に1/3ずつ入射光を分配する特性を持っている。図 8.5の光路に示したように、この分配はハーフミラーと反射面の

組み合わせと同様の原理によるものである。分配された入射光はプリズムに接合された 3 つの CCD 部で直接に撮像される。それぞれの撮像 CCD 部は有効画素数  $850 \times 984$  の単板カラー CCD を撮像面とする小型のカメラ部と、これを前後動させることのできるマイクロメータで構成されている。具体的には図 8.4 のように上下方向に 3 つの撮像 CCD 部が並ぶ。それぞれのマイクロメータの調整に従い各撮像面が前後動し、3 つの撮像部で独立に異なる焦点合わせを実現することが可能となる。すなわち、前節で論じたような通常のカメラを用いた場合の焦点合わせの変化に伴う奥行きごとの拡大率のずれは原理的に生じ得ない。また、撮像時のマイクロメータの値をフォーカス値として読みとることにより 4.3 節で論じたようなカメラ特性の分析に基づく映像生成も実現可能となっている。なお、各撮像面間では水平あるいは垂直方向のずれはあるものの、回転等の補正困難なずれは精度良く調整されている。したがって、第 4 章で論じたような撮像画像間の撮像範囲のずれの補正手法は、場合によっては最も近景に焦点を合わせた画像の撮像範囲から他の画像の撮像範囲が若干はみ出てしまうことがある、という新たな条件の付加以外はそのまま適用することが可能である。この条件の具体的な付加手法は次節の実験において示す。前節でも述べた通り 3 つの CCD の間の撮像特性のばらつきについては後段の CCU 側である程度補正することが可能である。以上の光学系は全て密閉されており、レンズより入射される以外の外界からの光の影響は通常のカメラと同様に無視することができる。

ところで、第 2 章で概説した焦点ぼけを利用した距離測定手法に関連して同様な多焦点カメラ [40] が提案されているが、このカメラは距離測定が目的であるため各撮像面はある焦点合わせに対応した状態で固定されており調整はできない仕様となっている。これに対し本論文の提案する多焦点カメラは、様々な映像生成が目的であるため各撮像面は独立かつ自由な調整が可能である。

次項では続いて、この多焦点カメラを用い実際に焦点合わせの異なる複数の画像を同期して撮像するための、図 8.5 における CCU 以下後段の画像蓄積部の構成について述べる。

### 8.3.2 多焦点カメラを用いた撮像システム

前項で述べた多焦点カメラを用いて実際に焦点合わせの異なる複数の画像を同期して撮像するためには、図 8.5 における後段の画像蓄積部にも様々な課題がある。

図 8.5 のように VTR を用いる場合には、カメラコントロールユニット (CCU) 部、VTR 部、ワークステーションから構成される画像蓄積部を構成しなければならない。まず、CCU 部では 3 台の CCU に同一の同期信号を入力することによって、多焦点カメラの 3 つの CCD による撮像を同時に行わせる。この時、各 CCD ごとの撮像特性のばらつきも CCU で補正しておく。これを VTR 部でそれぞれ蓄積するわけであるが、単純に動画像などを 3 つ独立に記録したのでは、さらに後段のワークステーションへの転送において、取得された 3 つの動画像シーケンス間であるシーケンスのどのフレームと別のシーケンスのどのフレームが対応しているのかを確定することが非常に困難となる。そこで、VTR にはタイムコー

ドを 3 台の間で互いに同期を取りながら撮像と同時に記録できるものを使用することとした。VTR からワークステーションへの動画像の転送を、タイムコードを基準として開始および終了することで、取得された 3 つの動画像シーケンスの間でフレームごとの対応をとることが可能となる。このようにして取得された動画像を用いれば、信号処理的統合に基づく映像生成を行うことができる。

ところで、近年の PC 技術の急速な発展にともない、図 8.5 における VTR 以下の画像蓄積部は、図 8.6 のようにキャプチャボードと高速なハードディスク (HD) を搭載した PC 機で十分に代替可能となっている。この場合、LAN 等を通じてただちに各動画像シーケンスをやりとりし効率的に映像生成処理が可能となり、ポストプロダクション (プロセッシング) にはより理想的な環境を構築することができる。また、将来的には図 8.6 における点線で示したように HD を利用せず直接にキャプチャボードからメモリを経て各 PC 間で撮像データをやりとりしリアルタイム処理へと展開していくことも考えられる。

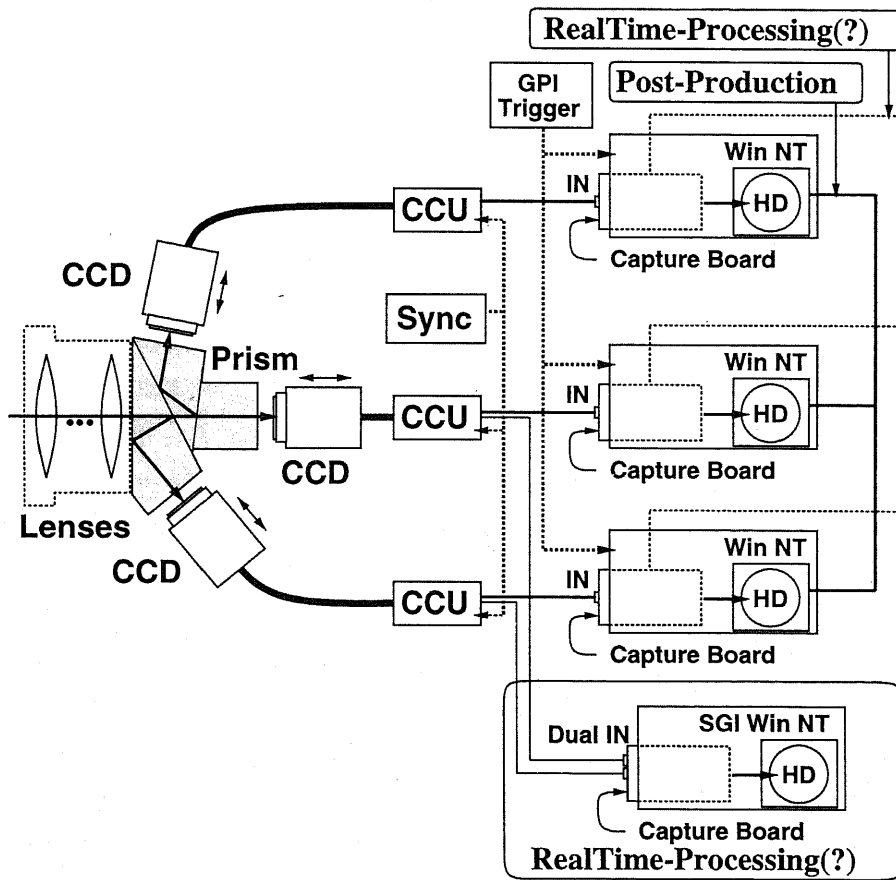


図 8.6: PC ベースの焦点画像処理システムの構成

さらに最近では、Silicon Graphics 社が内部バスを大幅に拡張した PC を開発しており、

これに合わせ図 8.6 下部の囲みに示したような形で同時に 2 入力可能なキャプチャボードも発表している。すなわち、対象シーンが 2 つの奥行きから構成されると仮定される場合には、このような 1 台の PC を用いることにより実際にリアルタイム処理の可能性を十分に期待できるようになってきたといえる。第 1 章に述べたことと関連するが、処理機能を持たない VTR ベースのシステムから、こういったシステムへの移行により今後ますますリアルタイム処理への展開が現実のものとなると思われる。実際に次節では一部の実験で PC ベースのシステムを利用した。

なお、図 8.6 のように複数の PC で画像蓄積を行う場合には、VTR ベースのシステムにおけるタイムコードの利用と同様に、各取得動画像シーケンスのフレームごとの対応を取るため、GPI 信号を用いて各 PC の画像蓄積開始のタイミングを揃えるものとする。

## 8.4 多焦点カメラによる撮像画像からの映像生成実験とその評価

### 8.4.1 多焦点カメラによる複数の撮像画像からの焦点画像処理

本節では実際に、多焦点カメラにより焦点合わせの異なる複数の画像を撮像し、これを用いて信号処理的統合に基づく映像生成を行う。マイクロメータの値を利用したカメラ特性の分析に基づく前処理からの映像生成も可能であるが、ここでは簡単のため画像処理に基づく前処理からの映像生成手法を用いる。ただし前節で既に指摘したように、複数の CCD 撮像面の間では水平および垂直方向のずれが生じているため、場合によっては第 4 章で論じた画像処理に基づく撮像範囲のずれの補正における仮定と異なり、必ずしも最も近景に合焦した画像の撮像範囲がより遠景に合焦した画像内に含まれるわけではない。そこで、4.2 節における撮像範囲のずれの補正手法を以下のように変更する。すなわち補正のためにこれまでは、遠景合焦画像から様々なマッチング候補を切り出しこれを拡大して近景合焦画像と比較しその残差を評価値とすることで撮像範囲の対応を求めて来たが、まずこのマッチング候補の探索範囲を図 8.7 のように画像サイズに対して上下左右の周辺に 1 割ずつひろげる。そして、マッチング候補領域のうち遠景合焦画像からはみ出す部分を除いた平均残差を評価値として 2 つの画像の撮像範囲の対応関係を決定する。

こうして決定された各撮像画像の撮像範囲の対応関係は、図 8.8 に示すように水平および垂直のずれを持つ形となる。このうち共通する部分のみを補正画像として映像生成処理へと適用するものとする。補正された撮像画像に対する各画像中の焦点ぼけ関数の推定は 4.2 節で述べた手法をそのまま用いることができる。ただし、以下の実験で対象シーンが 3 層の奥行きから構成される場合の 3 枚の撮像画像からの焦点ぼけ関数の推定は、これも簡単のため 7.2.2 項で論じたように適宜、鮮鋭領域の一部を手動で指定することにより行った。

なお、多焦点カメラに用いた CCD はカラーで撮像可能であるが、以上述べた撮像範囲のずれ補正および焦点ぼけ関数の推定は、輝度値に変換することで RGB 成分を一括して

処理している。すなわち、信号处理的統合においては RGB それぞれ独立に生成処理を行うが、用いるぼけのパラメータ等は同一のものとする。また、インターレースの影響を考慮し撮像画像はあらかじめ 1 ピクセルおきにサンプリングし縦横ともに半分の解像度に落している。

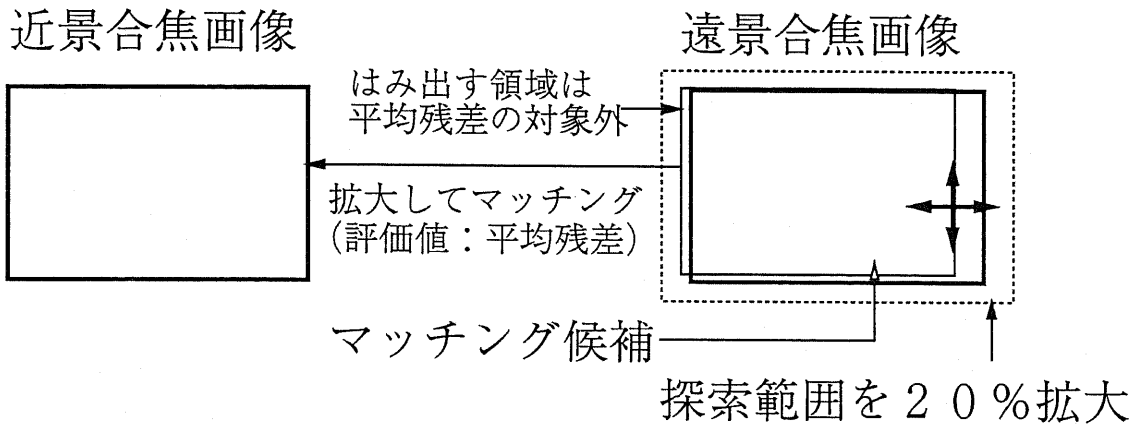


図 8.7: 撮像範囲のずれの補正手法

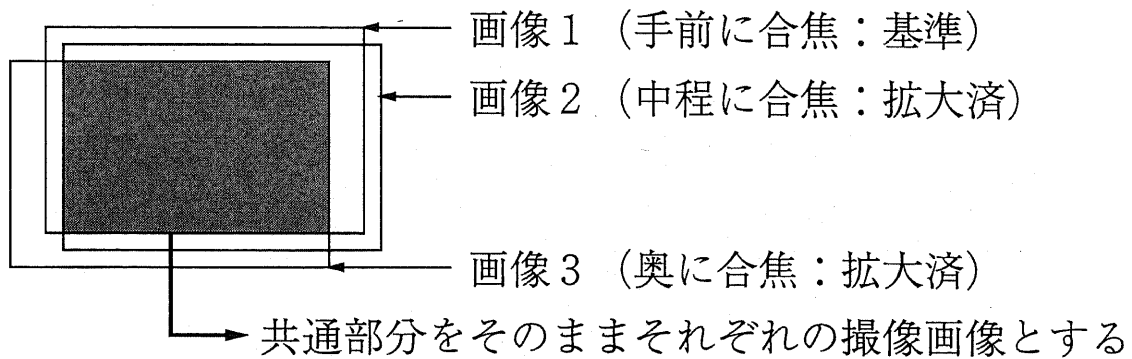


図 8.8: 各撮像画像の共通領域の切り出し

さて、以上のような手法に従い、本節ではまず焦点合わせの異なる複数の静止画を撮像し、これから任意焦点画像の生成の実験を行う。画像蓄積部には PC ベースのものを用いた。図 8.9(a)(b)(c) が 3 層の奥行きから構成される対象シーンの撮像画像である。(a) が最も手前に焦点の合った画像、(b) が中程に焦点の合った画像、(c) が最も奥に焦点の合った画像であり、それぞれ既に撮像範囲のずれは補正され  $240 \times 180$  の画像サイズとなっている。



(a) 最も手前に合焦した撮像画像



(d) 全焦点画像



(b) 中程に合焦した撮像画像



(e) 中程の層のみ焦点ぼけを与えた画像



(c) 最も奥に合焦した撮像画像



(f) 全層に一樣の焦点ぼけを与えた画像

図 8.9: 多焦点カメラからの任意焦点画像生成



る. 各撮像画像中のそれぞれの奥行き焦点ぼけの程度  $R_{ij}$  は,

$$\begin{pmatrix} 0.0 & 2.9 & 3.6 \\ 2.1 & 0.0 & 1.4 \\ 3.7 & 1.9 & 0.0 \end{pmatrix} \quad (8.1)$$

と推定された.

この 3 枚の撮像画像を以上のぼけパラメータに従い信号処理的に統合することで, (d)(e)(f) に示したような様々な焦点ぼけを与えた画像が生成できる. (d) は画面全体が鮮鋭化された全焦点画像, (e) は中程の層のみ  $R_b = 2.0$  で焦点ぼけを与えた画像, (f) は画面全体に  $R_a = R_b = R_c = 2.0$  で一様なぼけを与えた画像である. 全て反復復元の回数は 10 回とし初期画像には (a) を用いた. 良好に所望の画像が再構成されていることがみてとれる.

図 8.10 に  $R_a = 4.0, R_b = R_c = 0.0$  として, 奥行きごとのぼけの程度の差をより大きくした場合の生成画像を示す. 最も手前にある雑誌の絵柄の部分では良好な再構成が行われているが, 図 8.9 の画像 (f) と比較してタイトル部等では 6.4.1 項で論じたものと同様の雑音が残存したような多少の劣化が確認される. すなわち, (3.14) 式において,  $h_b$  や  $h_c$  がぼけを与える関数となる図 8.9 の画像 (f) では抑制されていた撮像画像中の雑音成分 (画像取得モデルからのずれ) がそのまま残存したものと考えることができる. なお, 図 8.9 の画像 (d)(e) においてはもともとこの領域は鮮鋭化されているため雑音成分がそれほど顕著にならない. 以上のように一般に, 奥行きごとのぼけの程度の差が大きいほど, このような雑音の影響が生成画像に生じるといえる.



図 8.10: 奥行きごとのぼけの程度の差がより大きくなった場合の生成画像

図 8.10 における雑音の原因としては, 図 8.9 の撮像画像 (a) においてタイトル部は実際には半ばテストチャート的な水玉状のテクスチャを持っているが CCU 内部のエッジ強調回路の影響により画像の取得モデルからすれば正確な撮像画像が得られていない, ということなどが考えられる. したがってこのようなエッジ周辺等でも精度の良く多様な生成画



像を得ようとするれば、これは画像処理一般において言えることでもあるが、より画像取得モデルに適した撮像条件となるように CCU 内部の画像補正機能まで含め各撮像装置のさらなる再検討が望まれる。

#### 8.4.2 動画像の撮像とこれを用いた映像生成

本項では VTR ベースの画像蓄積部を利用することにより実際に多焦点カメラ構築の目的である動画像に対する焦点画像処理の実験を行う。

まず、背景に張られたポスターの前を動物体が左右するシーケンス、図 8.11～図 8.13(a)(b) を近景と遠景それぞれに焦点を合わせて撮像する。VTR に蓄積されたこれらのシーケンスを記録されたタイムコードに合わせて各フレームの対応を取りながら、ワークステーションへと 136 枚(約 4.5 秒) ずつ取り込みを行った。

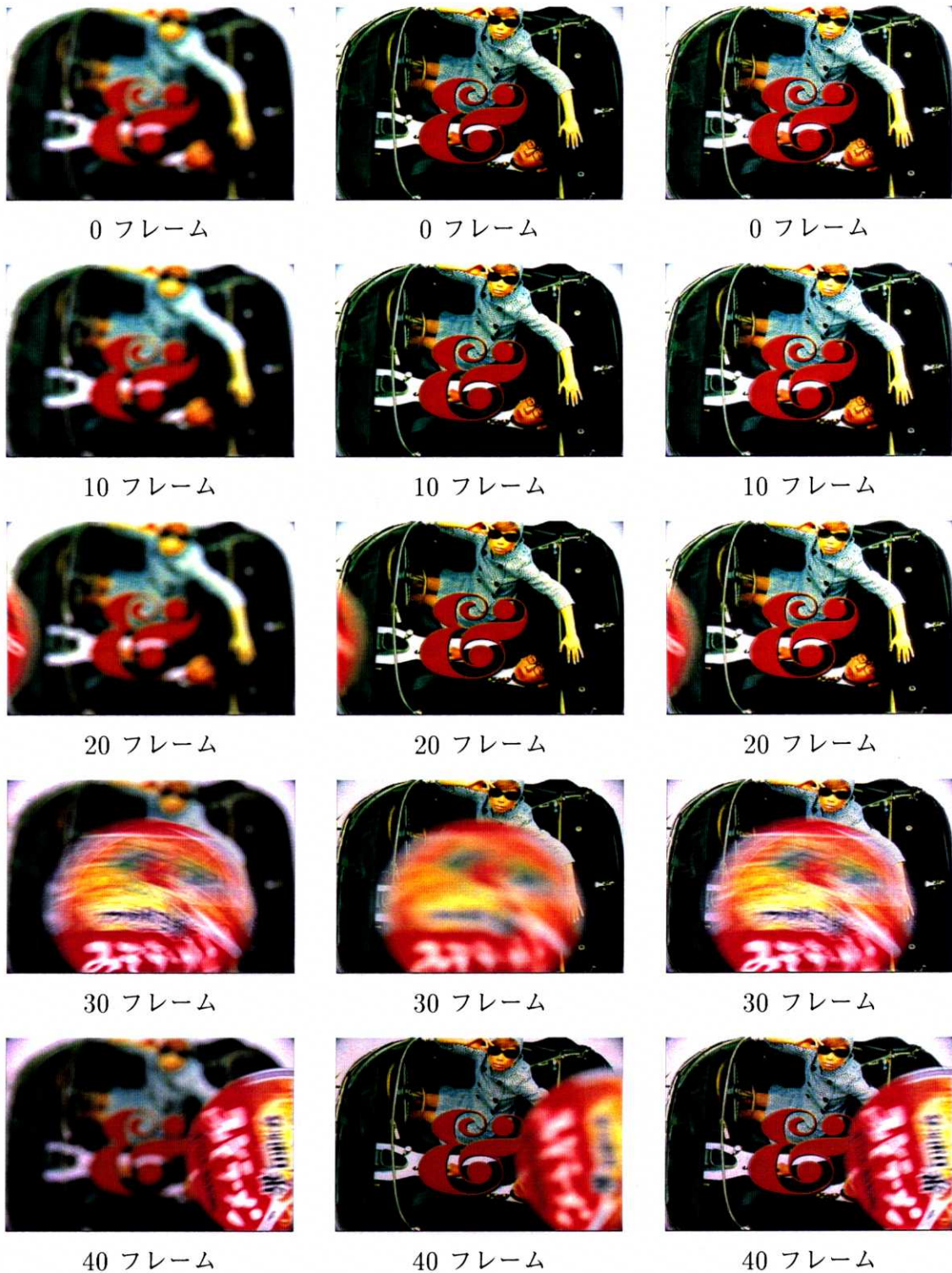
前方の物体は回転しつつ振子のように左から右へ向かいやがて左に戻りはじめ、最後は画面中央で停止する運動をしている。このため上記の運動に伴う動きぼけがどちらのシーケンスにも生じており、これまでの静止画での実験とは異なったやや複雑なぼけを見ることができる。近景合焦画像と遠景合焦画像を比較すれば、前者には動きぼけが、後者にはその上にさらに焦点ぼけが加わっているような劣化がよく確認できるだろう。

なお、図 8.11～図 8.13(a)(b) は最終フレームにおける撮像範囲のずれの推定結果に従い、全てのフレームに同じ補正処理をかけることで  $352 \times 240$  の画像サイズに統一されている。焦点ぼけの程度も最終フレームにおける推定結果、 $R_{21} = 5.5, R_{12} = 5.8$  を全フレームに適用するものとする。実際に近景、遠景それぞれに焦点を合わせたシーケンスから、この推定されたぼけパラメータに基づいて図 8.11～図 8.13(c) に示す全焦点画像のシーケンスを生成することができる。各フレームそれぞれ 3 回の反復復元で全焦点画像の再構成を行った。

動きぼけの影響は原理的には時間積分でありすなわち線形であるから、焦点ぼけのみの劣化を鮮鋭化した形で全焦点画像が再構成できている。近景合焦画像あるいは遠景合焦画像における動物体と、生成された全焦点画像における動物体の劣化を確認すれば、動きの向きや速さ等によらず近景合焦画像の動きぼけのみが全焦点画像中に良好に保存されていることがみてとれる。

以上のように、動画像の撮像およびこれからの信号处理的統合に基づく映像生成においても、動きぼけとは分離した形で自由に焦点画像処理を行うことが可能である。多焦点カメラにより実際にこのような動画像処理を行えることが確認された。

さて、より詳細に近景、遠景それぞれに焦点を合わせた撮像画像を比較すると、近景の動物体の上部と背景の人物の首のあたりの間の距離がやや異なっていることがみてとれる。さらに言えば、近景合焦画像における焦点ぼけの生じた遠景は遠景合焦画像における遠景に比べて、遠景合焦画像における焦点ぼけの生じた近景は近景合焦画像における近景に比べて、それぞれやや下へ向かってずれている。これに従って上記のような距離の変化が生



(a) 近景合焦画像

(b) 遠景合焦画像

(c) 全焦点画像

図 8.11: 動物体に対する焦点画像処理 (その 1)



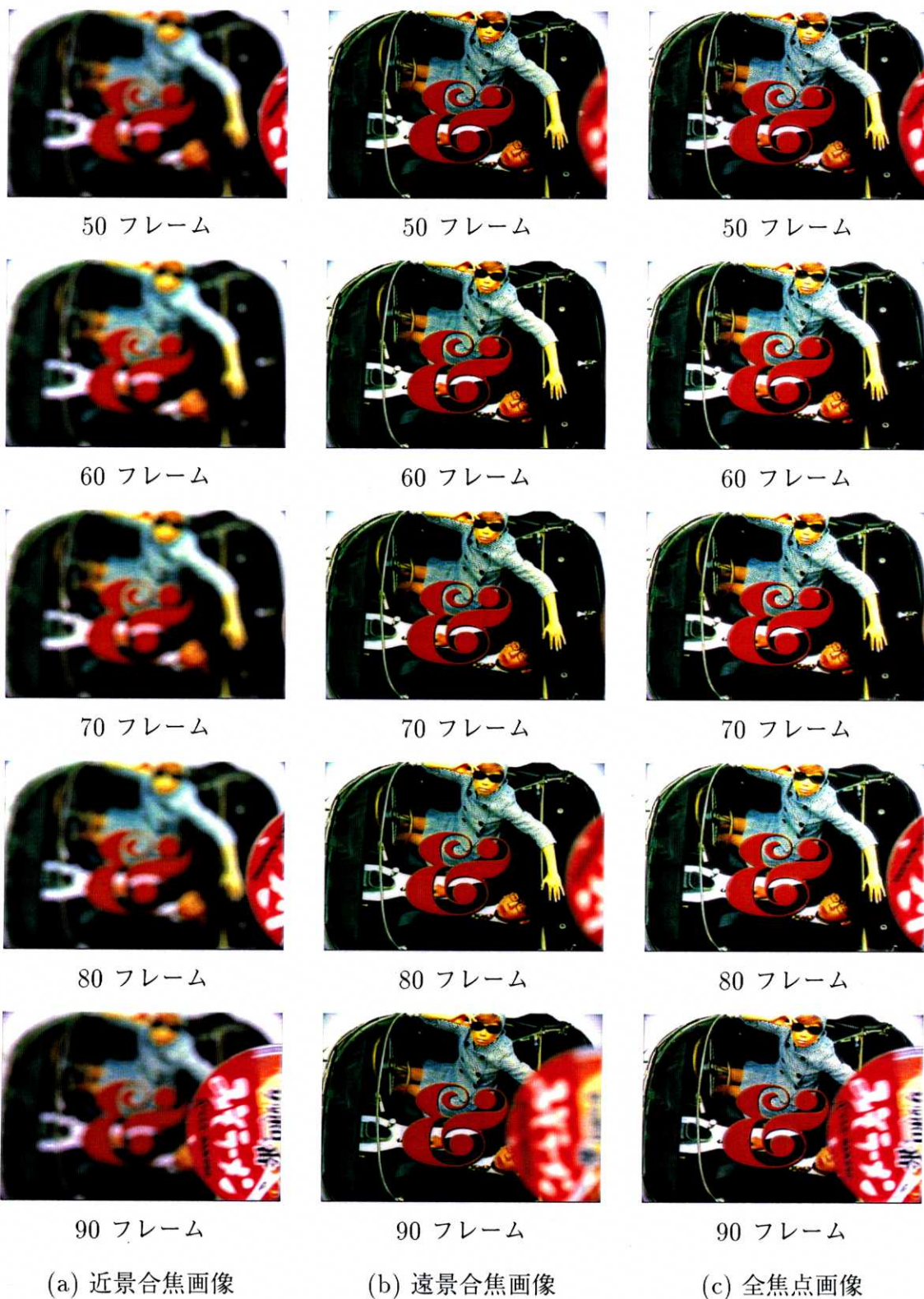


図 8.12: 動物体に対する焦点画像処理 (その 2)

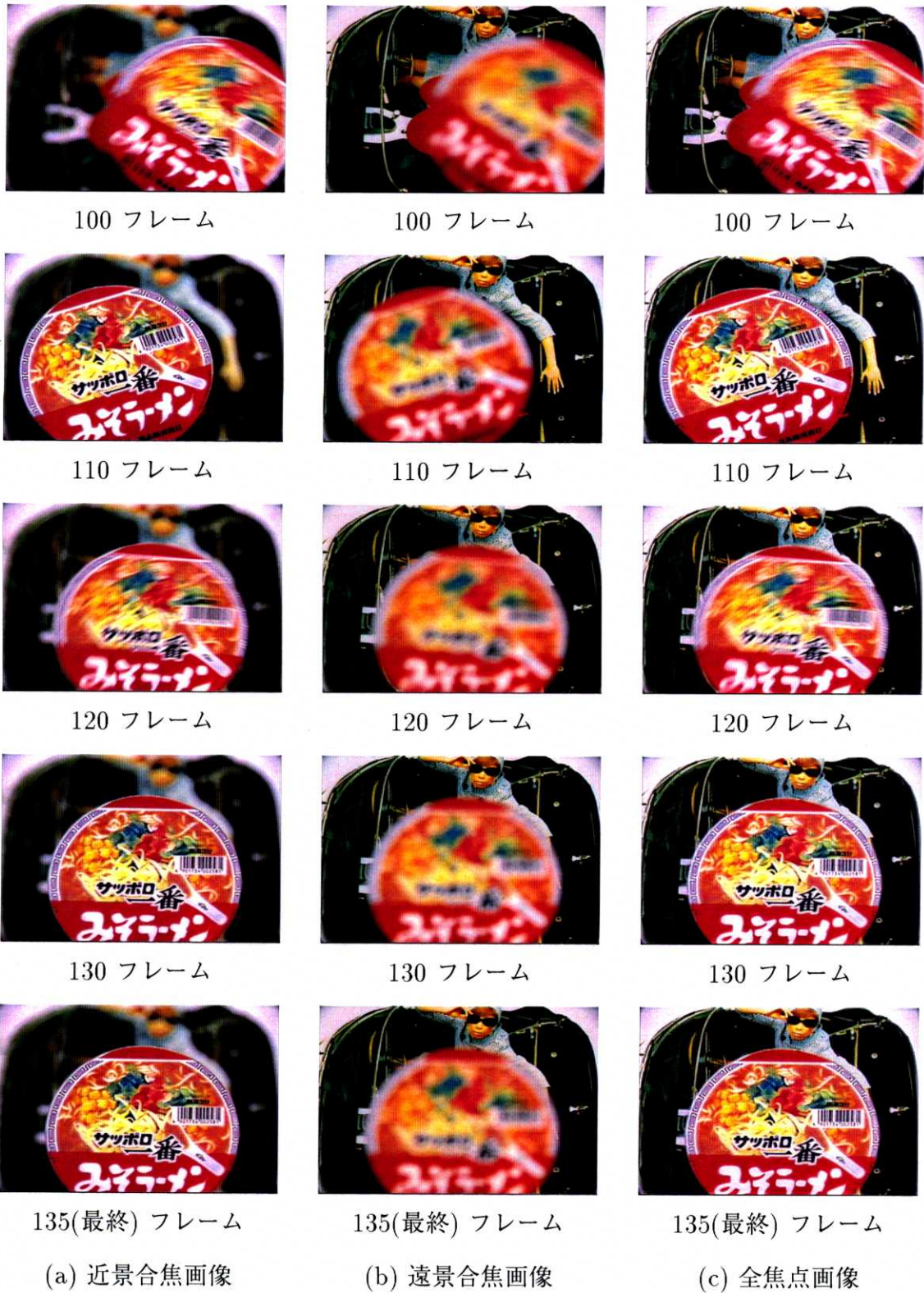


図 8.13: 動物体に対する焦点画像処理 (その 3)



じているといえる。この現象は遠景、近景が焦点合わせの変化にともなって反対方向に動くようなものであり、マッチングの推定誤りとは異なる。また原理的に、本章のはじめで論じた通常のカメラの光学系におけるレンズの動きに起因する奥行きによる拡大率の相違でもない。さらに、この現象はひとつの撮像 CCD においても焦点合わせを変化させることにより確認できるため、3つの撮像 CCD 間での光学系のずれとも考えられない。これはおそらく、多焦点カメラにおける前段のズームレンズとそれぞれの撮像面がなす光学系において生じる焦点ぼけが図 8.14 のように必ずしも中心を維持しながら変化しないことによるものと思われる。このような現象は撮像面の前後動による撮像範囲の変化等とは別に、レンズ自身の特性としてありうるものであり、また実際にズームを大きくかけるほど顕著に確認された。

このような焦点ぼけの中心位置のずれは、画像中で位置不変に一定でさえあれば信号処理的統合における恒等式のぼけ関数を置き換えるだけであるから補正可能と考えられるが、位置可変のずれの場合には通常のカメラにおける奥行きごとの拡大率の変化の問題と同様、画質の若干の劣化は不可避となる。また焦点ぼけのずれがどのような形でも近景、遠景領域の境界線における何らかの劣化は避けられず、実際に上述した動物体の上部周辺では最終フレームなどで遠景と近景の干渉が生じてしまっていることが確認できる。このような焦点ぼけの画像取得モデルからのずれについても、その光学系の再検討および改善が新たな課題になるとと思われる。

ただし、図 8.11～図 8.13(a)(b) はゲインをオートに設定して撮像したため全体的な明るさが途中で変化しているのだが、特に大きな劣化もなく全焦点画像が再構成できていることからわかるように、上記のような問題を除けばそれほど厳しい条件によらず現時点の撮像装置でも十分有意で実用性のある映像生成が可能であるといえる。

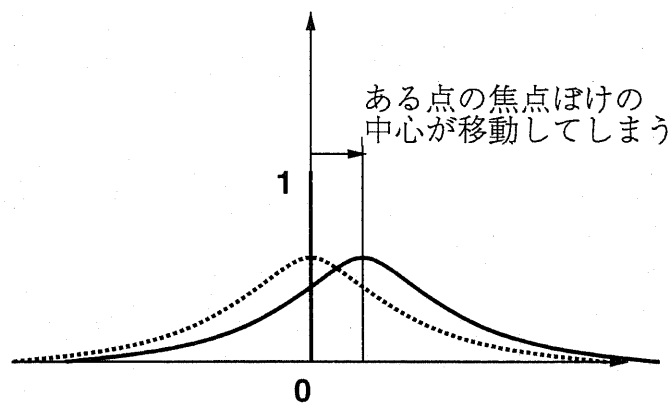


図 8.14: ズームレンズの特性に起因すると思われる焦点ぼけの中心位置の移動

続いて、図 8.15～図 8.16(a)(b) に示すようなシーケンスを近景、遠景それぞれに焦点を



図 8.15: 多焦点カメラ自身の視点の移動と任意焦点画像生成 (その 1)



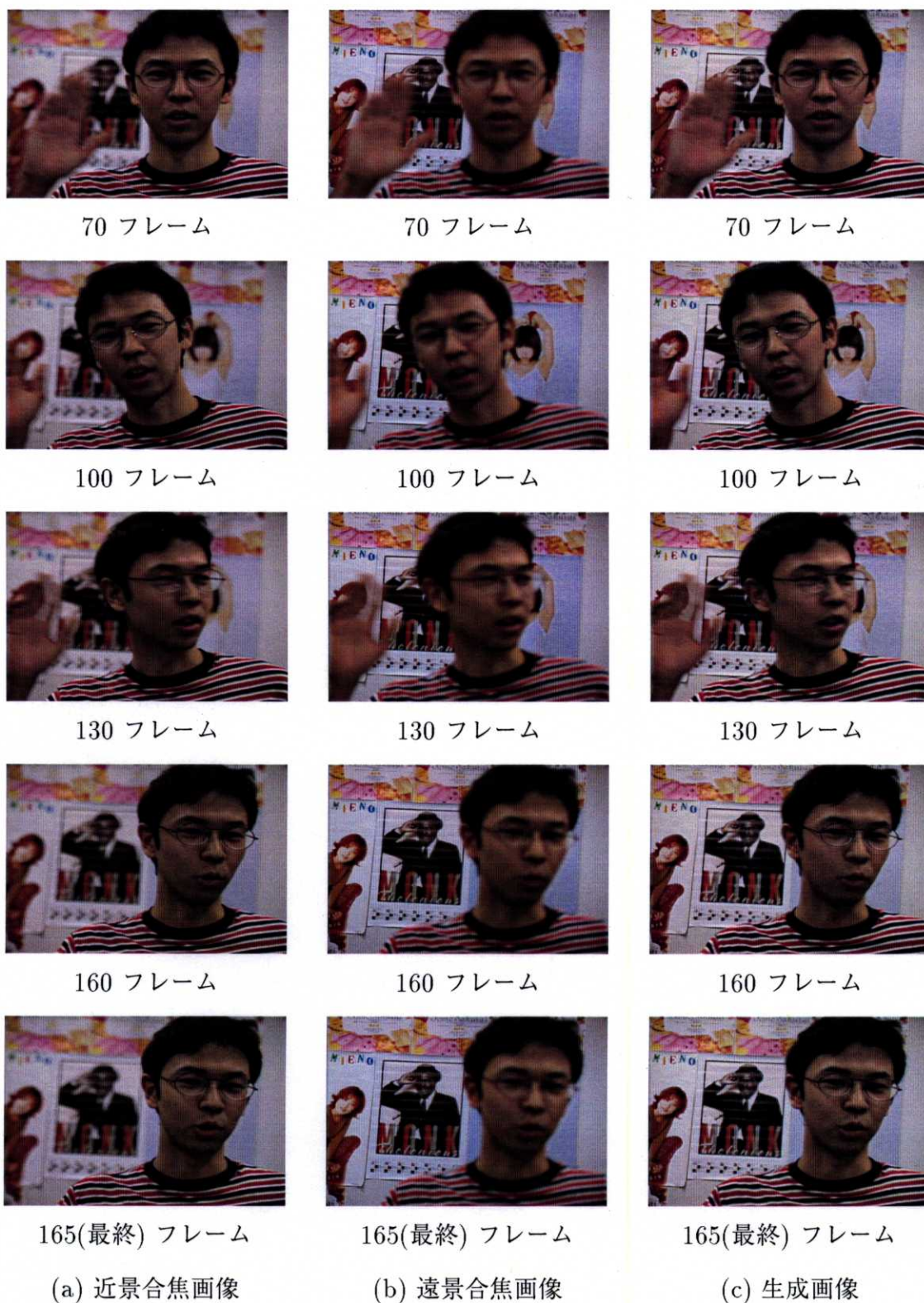


図 8.16: 多焦点カメラ自身の視点の移動と任意焦点画像生成 (その 2)

合わせて撮像しこれを用いて映像生成の実験を行う。全 166 フレーム (約 5.5 秒) のこのシーケンスではまず 0 ~ 40 フレームあたりでカメラ自身が左から右へと視点を移動していく。続いて人物が中央付近に来たところでカメラは視点を固定し、最終フレームまで手などを動かしながら喋っている人物を撮像する。このように多焦点カメラは十分動かしながらも利用することのできる重さであり視点は通常のカメラと同様、自由に調整可能である。

前述の実験と同様、図 8.15 ~ 図 8.16(a)(b) は最終フレームにおける撮像範囲のずれの推定結果に従い、全てのフレームに同じ補正処理をかけることで  $350 \times 238$  の画像サイズに統一されている。焦点ぼけの程度も最終フレームにおける推定結果、 $R_{21} = 2.5$ ,  $R_{12} = 3.4$  を全フレームの処理に適用する。図 8.15 ~ 図 8.16(c) に、生成を行った任意焦点画像のシーケンスを示す。各フレームそれぞれ 3 回の反復復元で再構成している。まず、カメラ自身が視点を移動し背景が激しく変化する 0 ~ 40 フレームでは  $R_a = 0.0$ ,  $R_b = 6.0$  で遠景のぼけを強調した画像を生成する。続いてカメラが視点の移動を停止し背景が固定された後は全焦点画像を生成する。当然ながら、このようにフレームごとに自由に焦点ぼけを調整した画像が生成可能である。

このようなフレームごとの領域強調処理を応用することにより、動画像符号化におけるオブジェクトベース的な手法を期待することもできる。すなわち、背景の激しい変化を焦点ぼけを与えることによって抑え込み、近景人物の画質劣化を低減させるといった処理が考えられよう。多焦点カメラによるこういった新たなアプリケーションへの展開も興味深い課題である。

なお、図 8.15 ~ 図 8.16 においては、前述の実験と異なり焦点ぼけの中心位置のずれの影響による画質劣化等はほとんど見られない。本実験のようにズームをある程度引いた状態ではこのような問題は生じないものと考えられる。

以上、本節では多焦点カメラを実際に用いて撮像を行い様々な映像を生成することにより、動画像における焦点画像処理を実現し、多焦点カメラシステムの有効性を確認した。またここで構築した多焦点カメラシステムに関する新たな問題点や、この撮像系が期待させる新しい課題等についても議論を行った。

## 8.5 まとめ

本章では、前章までに様々に提案し検討してきた焦点合わせの異なる複数の撮像画像からの信号処理的統合に基づく映像生成について、より実用的にこれを行うために適切な撮像装置として、同時に異なる焦点合わせで複数の画像が撮像可能な多焦点カメラの提案を行い実際にこれを含む撮像システムを構築した。

FUJINON に依頼して試作を行った多焦点カメラは、対象シーンから入力される光をプリズムにより 3 方向に配分することで同時に焦点合わせの異なる複数の撮像画像を得ることができる。動的な対象を含む動画像の撮像がこれにより可能となった。光学系も本論文



で仮定する画像取得モデルにより対応した構成に変更されている。画像蓄積部にはタイムコード記録可能な VTR や PC ベースのディスクレコーダを用いて、各焦点合わせのシーケンス間のフレームごとの対応を実現した。PC ベースのシステムでは、将来的にはリアルタイム動画像処理を期待することもできる。この各シーケンス間の対応に基づいて様々な映像生成が可能となった。

動画像処理の実験として、まず動きぼけを生じるような動物体を含む対象シーンに対し複数の焦点合わせの異なる画像を撮像し、これを信号処理的に統合することで全焦点画像のシーケンスを生成した。これにより動きぼけの影響によらず、焦点ぼけの鮮鋭化だけが行えることが確認された。全焦点画像では、動物体に焦点を合わせたシーケンスにおける動きぼけが精度良く保存されており非常に良好な再構成結果であった。

次の実験では、多焦点カメラ自体を動かしながら動画像の撮像を行った。これに伴う背景の動きに合わせて、焦点ぼけを奥行きごとに独立に与えた任意焦点画像のシーケンスを生成した。フレームごとに焦点ぼけが変化するようなシーケンスである。このような動画像におけるオブジェクトベースの領域強調処理は、符号化等への応用なども期待できる。

以上、多焦点カメラによる撮像画像から様々な映像を生成することで、このような撮像系とこれに基づく焦点画像処理手法の有効性を確認した。また、多焦点カメラの構築により、符号化を含む新たなアプリケーションへの展開も今後の興味深い課題として確認された。多焦点カメラの問題点としては、焦点ぼけの特性を含む画像取得モデルとより正確に対応するような光学系へのさらなる改善が望まれる。さらに多焦点カメラそのもののみならず、CCU の画像補正機能の再検討など後段の各撮像装置にもいくつかの検討課題が見出された。

ズームの大きさや画像中のテクスチャによっては、このような問題点に起因する若干の劣化が生成画像に生じるものの、本章の実験から多くの場合それほど厳しい条件を必要とすることなく効率的かつ十分に有意な結果が得られることが確認されたといえる。本章における、多焦点カメラによる動画像への対応とより良好な品質の映像生成の実現は、本論文の提案する焦点合わせの異なる複数の撮像画像からの信号処理的統合に基づく映像生成という枠組のいわば最終的なまとめになったとみなすことができる。

## 第 9 章

### 結論

#### 9.1 本論文の成果

本論文では、複数の焦点合わせの異なる撮像画像からの信号处理的統合に基づく様々な映像生成手法と、このような撮像条件に適した多焦点カメラを含む撮像・映像処理システムについての研究成果をまとめた。

まず、対象シーンが複数の奥行きにより構成されていると仮定し、それぞれの奥行きに焦点を合わせた撮像画像から、これまで検討されてきた画面全体に鮮鋭な画像(全焦点画像)の再構成のみならず、奥行きごとあるいは領域ごとに自由に鮮鋭さを調整した画像(任意焦点画像)を生成する手法を提案した。具体的には、所望の画像と撮像画像との間にぼけ関数等の畳み込みを用いて位置不変の恒等式を導き、これに基づき直接に複数の撮像画像を信号处理的に統合し所望の画像を生成する。このような信号处理的統合手法により、従来の領域選択的に鮮鋭画像を再構成するような手法と異なり、全焦点画像の再構成のみならず良好に任意焦点画像の生成が可能になることが確認された。さらに、この恒等式をより一般化することで、領域を切り出すようなフィルタリングや高域強調処理、視差と焦点ぼけを同時に調整した画像の近似的な生成まで、本信号处理的統合手法が様々な映像処理へと応用可能であることを明らかにした。

このような映像生成処理手法における前提となる、同一の対象シーンに対して同じ視点から焦点合わせの異なる複数の画像を取得するという撮像条件は、通常のカメラを用いた複数回の撮像による実現では照明条件の変化や動画像への対応など制限が多い。そこで、このような撮像条件を満たす複数画像を同時に取得することのできる多焦点カメラとこれを用いた撮像システムを提案し実際に構築を行うことで、より適切な撮像画像をもとに動画像処理においても本論文の提案する信号处理的統合手法による映像生成が可能であることを確認した。

以上、信号处理的統合手法により焦点合わせの異なる複数の撮像画像から任意焦点画像などを含め従来と比較して大幅に多様な映像生成が可能となり、また、多焦点カメラを用いた撮像システムにより動画像への対応も含めより良好かつ効率的な本映像生成手法の実現

が可能となることを明らかにしたことが本論文の主たる成果である。以下に本論文の内容のまとめを行う。

- 第3章では、焦点合わせの異なる複数の画像の処理により、単一の光学系では実現困難な画面全体に鮮鋭な全焦点画像やこれを含む任意に各奥行きのはげの程度を抑制・強調した画像(任意焦点画像)を生成する手法の原理について述べた。複数の奥行きから構成される対象シーンを仮定し、それぞれの奥行きに焦点を合わせた撮像画像と所望の任意焦点画像との間にぼけ関数等の畳み込みを用いて位置不変の恒等式を導き、これを解くことで所望の画像の生成が可能となる。本手法は、従来提案されてきた複数の撮像からそれぞれのより鮮鋭な領域のみを選択的に統合して所望の画像を再構成する手法において用いられる鮮鋭領域判定のように非常に困難な領域分割処理を必要とせず、複数の撮像画像から直接に信号处理的統合に基づき所望の画像を生成する。この特徴によって、全焦点画像の安定した画像再構成が可能となるのみならず、焦点深度の異なるレンズで撮像したような画像や様々な焦点合わせの画像、さらに光学的にはありえないような画像までも生成することができる。合成画像を用いたシミュレーションにおける画像再構成結果を従来手法によるものと比較などしながら以上のような有効性を確認した。
- 第4章では、複数の撮像画像からの任意焦点画像生成のために必要となる撮像範囲のずれの補正と撮像画像中のぼけ関数の決定といった前処理を行うための2通りの手法について説明した。まず、階層的なマッチングによる撮像画像間のレジストレーションと劣化予測に基づくぼけ関数の推定といった画像処理を用いた手法を示した。次に、撮像に用いるカメラ特性をあらかじめ測定しテーブル化しておくことにより、撮像画像ごとの処理によらず撮像時のカメラパラメータとこのテーブルからただちに撮像画像間のレジストレーションとぼけ関数の決定を行なう手法を示した。実際に実画像を用いた実験を行い、以上2通りの手法がそれぞれ有効であることを確認した。前者は、焦点合わせのみ変化させて撮像した複数の画像であれば適用可能であり、より一般的な条件に対応した画像処理に基づく手法といえる。逆に後者は本手法の目的である画像取得という観点をさらに明確にした場合の、より撮像システムそのものにまで立ち入った手法である。
- 第5章では、より効率的な画像再構成の演算手法を検討した。第3章では、導かれた位置不変の恒等式を解くにあたって画像への畳み込み演算を伴う反復的な再構成手法を用いたが、まずその収束性についての議論を行った。これに対し、位置不変の恒等式を周波数領域上に変換することでより効率的な再構成が可能となることを示した。これとは別に、グラフィクスアクセラレータ上でぼけ関数の畳み込みを実現することにより大幅に計算時間を短縮できる手法も示した。以上、任意焦点画像の再構成において領域分割など複雑な処理を必要としない信号处理的統合手法の柔軟な特徴によ

り様々な演算手法が可能となっている。周波数ベースの手法は動画像のリアルタイム処理までを対象とするような専用チップ化の可能性を期待させるものである。また、グラフィクスアクセラレータを用いる手法は、既に現在のプラットフォーム上において、映像編集、映像生成という意味では実際十分高速に所望の画像を生成可能であることが確認された。

- 第 6 章では、第 3 章で導出された位置不変の恒等式をとらえ直しより一般化することで、複数の撮像画像からの信号处理的統合を用いた映像生成において近似的生成も含めさらに多様な所望の画像を生成する手法を検討した。領域分割を必要としない領域ごとのフィルタリングといった非常に有用な映像処理や、複数の焦点画像から生成された任意焦点画像にさらに領域ごとに動き、疑似的な視差を与える拡張など、信号处理的統合手法の特徴を生かし撮像後の映像編集、映像合成等にさらに幅をもたせることが可能であることを明らかにした。同時に、このような信号处理的統合手法の応用の適用範囲についても詳細に考察を行った。
- 第 7 章では、ユーザによる対話的な処理との協調によりさらに多様な画像の生成が可能となることを示した。第 6 章までの信号处理的統合手法に基づく映像生成は奥行きごとの独立な処理に限定されていたが、対象シーンによっては対話的に簡易な領域指定を行うことにより、例えば同じ奥行きに対象が 2 つある場合でもそれぞれの領域ごと、オブジェクトごとに独立にぼけや視差を調整することが可能となることを明らかにした。信号处理的統合手法の特徴に基づき正確な領域分割は必要とならないため、このような対話的な映像生成手法は、撮像後の映像編集、映像合成処理に非常に適合した有効なものといえる。さらに、従来の選択的統合手法の拡張も行い、両手法の特徴を対話的に利用するより効率的な映像生成手法の可能性も示した。
- 第 8 章では、第 7 章までに得られた実験結果とその評価から、本論文で論じた複数の焦点合わせの異なる撮像画像からの信号处理的統合に基づく映像生成に適した撮像システムを提案した。実際に、プリズムと前後動する撮像面により同時に複数の焦点合わせで対象シーンを撮像することが実現可能となる多焦点カメラを試作し、これと GPI による同期録画の可能な VTR 等を組み合わせて動画像にも対応した撮像・映像処理システムを構築した。複数の動画像シーケンスをフレームごとに信号处理的に統合することにより、任意に焦点合わせを調整した映像の生成を行い、多焦点カメラを用いた撮像システムの有効性を明らかにした。すなわちまた、本論文で提案した複数の焦点合わせの異なる撮像画像からの信号处理的統合に基づく多様な映像生成手法の有用性がより確認された。

## 9.2 今後の課題

本節では、前節に述べた成果とともに明らかとなった、新たな問題点および新しい興味深い課題をまとめる。

### 9.2.1 多様な撮像条件への信号処理的統合手法の適用

6.2節では、信号処理的統合手法において所望の画像と撮像画像との間にぼけ関数等の畳み込みを用いて導出される位置不変の恒等式の一般化に基づく様々な映像生成への応用を論じたが、具体的には本論文の仮定する撮像の条件に従い撮像画像における畳み込みの関数  $h_{ij}$  は焦点ぼけに固定し、生成画像における畳み込みの関数  $h_a, h_b, \dots$  の一般化のみを検討した。この仮定された撮像条件を変更すれば、すなわち撮像画像

$$\begin{cases} g_1 = h_{11} * f_1 + h_{12} * f_2 \\ g_2 = h_{21} * f_1 + h_{22} * f_2 \end{cases} \quad (9.1)$$

における畳み込みフィルタ  $h_{ij}$  を一般化することにより、視差画像や動きぼけのある画像からの映像生成という新たな課題も原理的には検討可能になると思われる。このような撮像画像からの信号処理的統合に基づく映像生成も、撮像条件として十分仮定可能なものであり、非常に興味深い話題といえる。

### 9.2.2 撮像システムの最適化

第8章では、光学系の再検討も行いながら、多焦点カメラとこれを用いた撮像システムを構築したが、より精度の良い映像生成を考えた場合、このシステムの評価においてもいくつかの新たな問題点が確認された。精度の良い再構成画像を得るには、第3章以降に仮定した画像取得モデルに従うように最適化された撮像システムが望ましい。

しかしまず、多焦点カメラそのものの光学系において、撮像面の前後動に伴い生じる焦点ぼけが必ずしもある中心を維持してはいないという問題が見られる。通常のカメラにおける光学系で生じる奥行きごとの倍率のずれの問題は本論文で構築した撮像システムでは原理的には生じないが、これとは別に多焦点カメラにおけるズームレンズと撮像面の構成する光学系から生じる焦点ぼけのモデルを新たに検討しなおす必要があると思われる。この検討に基づいてより画像取得モデルに最適化された光学系を持つ撮像システムを構築することは非常に重要な課題といえる。合わせて、ガウス関数による近似のみならず焦点ぼけの特性をさらに詳細に検討しこれをモデルに適用することも良好な映像生成のためには有効であろう [16]。画像取得モデルに関しては、輝度値の飽和を回避するような何らかの対応も必要と考えられる [31, 35]。

また、撮像システムにおいて多焦点カメラより後段の部分でも、例えばカメラコントロールユニット (CCU) におけるエッジ強調など画像補正機能の撮像画像への影響は、画像取得モデルの観点からすれば非常に困難な問題となる。一般にこういった機能は取得画像

に精細な印象を与えるために利用されているものであるが、本論文のように撮像画像にある取得モデルを仮定して画像処理を行う場合、その補正機能により生じるモデルからのずれが処理後の生成画像に影響を与えることは避けられない。このように、撮像システム中には一般には通常の機能であっても、本論文の目的においては不要かつ問題となる箇所が様々にある。これらの機能の再検討とともに画像取得モデルとの対応の最適化が新たな課題となる。

### 9.2.3 様々なアプリケーションへの展開

本論文で提案した、複数画像の信号処理的統合に基づく焦点画像処理は様々なアプリケーションへの展開を期待することができる。

第8章における動画像を対象とした映像生成実験でも実際に確認したが、対象シーンが図9.1のように構成される場合、遠景のぼけを強調することで注目領域(ここでは近景)の画質を維持しながら全体の符号量を抑えた動画像符号化処理 [53, 54] が可能となると考えられる。このようなオブジェクトベースの領域強調処理はシミュレーションにおいては既に有効であることが確認されており [33]、動画像からの映像生成処理への対応のために第8章で構築した多焦点カメラにより撮像された実画像を用いて動画像符号化におけるオブジェクトベース画質制御の有効性を実際に確かめることは大変興味深い課題である。また、撮像システムの画像蓄積部をPCベースで構築すれば、リアルタイム処理へも展開していくことが可能である。

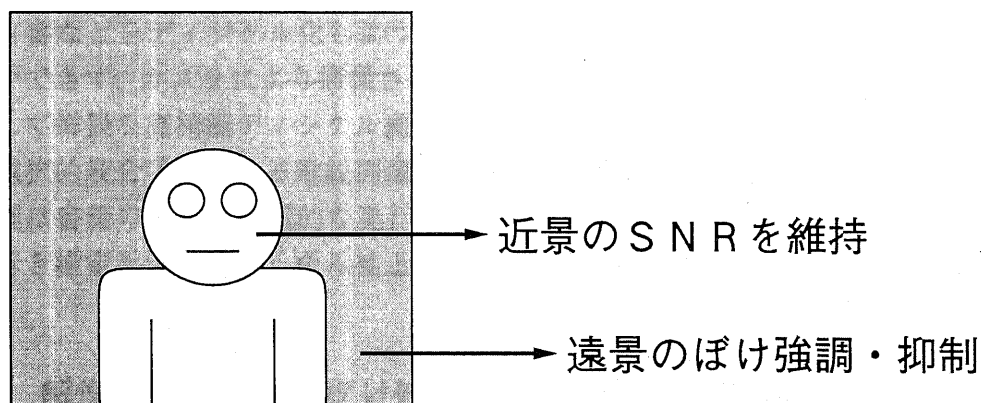


図 9.1: 任意焦点画像生成に基づくオブジェクトベース強調処理を利用した動画像符号化

本論文で提案した焦点画像処理手法を、パノラマ画像へと適用することも考えられる。すなわち、図9.2のように近景、遠景それぞれに焦点を合わせて取得されたパノラマ画像を統合し、視線方向に従いパノラマ画像の対応する領域から視差と焦点ぼけを調整した画像

を近似的に生成することにより、簡易的な仮想環境の構築が期待できる。視点は中心位置から大きく動くことはできないが、焦点ぼけを含めた形でのステレオ視を実現する仮想環境は非常に興味深い話題といえる。

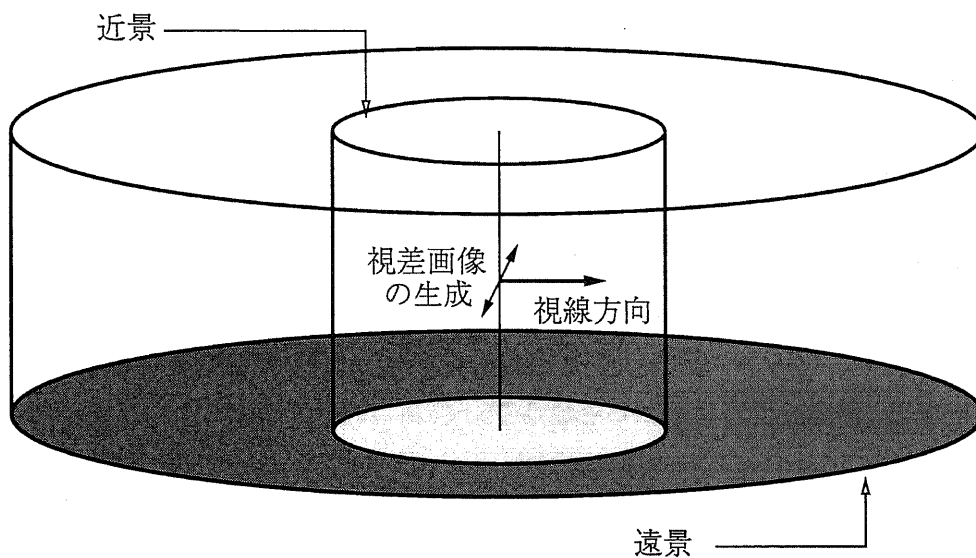


図 9.2: 焦点画像処理のパノラマ画像への適用による簡易仮想環境の構築

近年ますます需要が大きくなってきた問題であるが、価値が高くどのような破壊も回避したい古書などをデジタル化しようとする場合、一般的なコピーを用いた手法は利用することができず、カメラにより撮像された画像から焦点ぼけや本を開いた状態での歪み等を補正して鮮鋭な高精細デジタル画像を取得しなければならない。これに対し、7.3節で論じた選択的統合手法による鮮鋭画像の再構成手法を適用することが考えられる。選択的統合処理は書籍のような連続的な奥行きを持つ対象に有効な手法であり、鮮鋭領域判定からの奥行き推定手法に基づく歪み補正等の問題と合わせて新たに有用な課題になると思われる。

#### 9.2.4 解像度処理と焦点ぼけ処理などを統合した高精細映像生成処理

第 2 章で紹介したように、モザイク統合に基づく複数画像からの高解像度化処理手法が検討されており、これと本手法を統合して解像度と鮮鋭さをともに調整するような高精細画像処理を行うことも考えられる。第 1 章の本論文の導入においても述べたが高精細な画像の取得は解像度におけるデバイスの問題と焦点ぼけにおける光学的問題の両面からのアプローチが必要であり、これに対し複数画像からの統合処理を用いて対応することは一貫した枠組として考察可能と思われる。

## 謝辞

相澤清晴助教授には修士課程、博士課程を合わせ5年間にわたり終始懇切丁寧に御指導頂き心から感謝を申し上げます。私に焦点画像処理研究の機会を与えて下さるとともに様々な御助言を頂きました。

羽鳥光俊教授には随所で豊富な経験に基づく適切な御指導を賜りました。また、国内外の学会に参加する機会を与えて頂き深く感謝致します。

研究室における研究環境の整備に尽力して下さった塚本憲男技術官、田中崇助手に御礼申し上げます。

羽鳥・相澤研究室で焦点画像処理の研究を行ない苦勞を共にした、修士課程の久保田彰君、卒論生の内藤将彦君(現在ソニー)、諏訪啓君、大西隆之君、石戸大資君に感謝の意を表します。特に、大西隆之君には第4章について、久保田彰君には第4章および第8章について、様々な助言と協力を頂きました。ありがとうございました。

研究室外でも、第8章における多焦点カメラの試作において、村上隆さんほか FUJINON 光学機器部の皆様から多大な協力と助言を頂きました。深く御礼申し上げます。

最後に博士課程を共に過ごした浜本隆之さん(現在東京理科大)、李正さん、英語論文に関しアドバイスを頂いた Ajith Asela Pasqual さんをはじめ、羽鳥・相澤研究室の現役、OBの皆様には本当にお世話になりました。ありがとうございました。

1998年12月18日

---



## 参考文献

- [1] 中嶋正之他: “仮想化する映像情報メディア -SFX 技術-”, 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.3, pp.235-260, 1998-3
- [2] 中嶋正之: “デジタル映像処理の基礎と応用”, 電子情報通信学会誌, Vol.80 No.12 ~ Vol.81 No.5, 1997-12 ~ 1998-5
- [3] J.Weng, P.Cohen, M.Herniou: “Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation”, IEEE Trans. on PAMI, Vol.14, No.10, 1992-10
- [4] N.Yagi, K.Fukui, N.Sakai, H.Saitou, K.Enami: “A Programmable Video Signal Multi-processor for HDTV Signals”, IEEE ISCAS '93, 1993-5
- [5] 堀井洋一, 新井清志: “任意の視点移動を表現する対話的画像再合成”, 情報処理学会グラフィクスと CAD, Vol.81-11, pp.61-66, 1996-8
- [6] Y.Horry, K.Anjyo, K.Arai: “Tour Into the Picture: Using a Spidery Mesh Interface to Make Animation from a Single Image”, Proc. SIGGRAPH '97 CD-ROM, 1997
- [7] P.E.Debevec, C.J.Taylor, J.Malik: “Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A hybrid geometry- and image-based approach”, Proc. SIGGRAPH '96, pp.11-20, 1996-8
- [8] D.J.Sturman: “Computer Puppetry” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.18, No.1, pp.38-45, 1998-1
- [9] S.M.Seitz, C.R.Dyer: “View Morphing”, Proc. SIGGRAPH '96, pp.21-30, 1996-8
- [10] B.J.Meier: “Painterly Rendering for Animation”, Proc. SIGGRAPH '96, pp.477-484, 1996-8
- [11] D.E.Breen, J.W.Eischen, M.Kass, N.M.Thalmann, M.Vecchione: “Can We Get There From Here?”, Proc. SIGGRAPH '97 CD-ROM, 1997
- [12] 林正樹: “バーチャルカメラ”, 電子情報通信学会誌, Vol.81, No.3, pp.244-246, 1998-3

- [13] 林正樹他: “超広範囲のカメラワークを実現する仮想カメラシステム”, テレビジョン学会誌, Vol.50, No.10, pp.1549-1557, 1996-10
- [14] 李相吉, 八木伸行, 野口英男: “体操選手のフォーム・軌跡表示システム - マルチモーション -”, 映像情報メディア学会誌, Vol.51, No.11, pp.1881-1887, 1997-11
- [15] 高木幹雄, 下田陽久: “画像解析ハンドブック”
- [16] M.Subbarao, T.-C.Wei, G.Surya: “Focused Image Recovery from Two Defocused Images Recorded with Different Camera Settings”, IEEE Transactions on Image Processing, Vol.4, No.12, pp.1613-1627, 1995-12
- [17] M.Bertero, P.Boccacci: “Introduction to Inverse Problems in Imaging”
- [18] M.I.Sezan et al.: “Survey of Recent Developments in Digital Image Restoration”, Optical Engineering, Vol.29, No.4, pp.393-404, 1990-5
- [19] P.J.Burt, R.J.Kolczynski: “Enhanced Image Capture Through Fusion”, ICCV, pp.173-182, 1993
- [20] P.J.Burt: “A Gradient Pyramid Basis for Pattern-Selective Image Fusion”, 1992 SID
- [21] A.Toet: “Image fusion by a ratio of low-pass pyramid”, Pattern Recognition Letters 9 1989, North-Holland, pp.245-253, 1989
- [22] M.Pavel, J.Larimer, A.Ahumada: “Sensor Fusion for Synthetic Vision”, AIAA-91-3730-CP
- [23] H.Li, B.S.Manjunath, S.K.Mitra: “Multi-Sensor Image Fusion Using the Wavelet Transform”, ICIP '94, Vol.I, pp.51-55, 1994
- [24] 岡林, 菊池, 大山, 本田: “合成法による反射型顕微鏡画像の焦点深度の拡大”, テレビジョン学会技術報告, Vol.13, No.46, pp.19-23, 1989-9
- [25] M.Subbarao, N.Gurumoorthy: “Depth Recovery from Blurred Edges”, CVPR '88
- [26] M.Subbarao, N.B.Agarwal, G.Surya: “Application of Spatial-Domain Convolution/Deconvolution Transform for Determining Distance from Image Defocus”, Computer Vision Laboratory, Stony Brook, Tech.Report 92.01.18, 1992-1
- [27] 藤原 至誠, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊: “複数画像からの再構成による鮮鋭画像の取得”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J77-D-II, No.1, pp.253-255, 1994-1

- [28] 藤原 至誠, 羽鳥 光俊, 相澤 清晴: “焦点合わせの異なる複数画像からの鮮鋭画像再構成”, '93 電子情報通信学会春季全国大会, D-345, 1993-03
- [29] 和泉 直樹: “複数画像を用いた画像の強調的取得”, 1993 年度 東京大学卒業論文
- [30] 内藤 将彦, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊: “劣化推定を用いた異なる焦点画像からの鮮鋭画像の強調的取得”, '95 電子情報通信学会総合大会 A-196, 1995-3
- [31] 内藤 将彦: “焦点外れ予測を用いた異なる焦点画像からの鮮鋭画像の取得”, 1994 年度 東京大学卒業論文
- [32] 大西 隆之: “任意焦点画像の再構成とカメラパラメータの分析”, 1996 年度 東京大学卒業論文
- [33] 石戸 大資: “任意焦点画像生成手法の応用”, 1997 年度 東京大学卒業論文
- [34] 久保田 彰: “多焦点画像処理のための画像間レジストレーションと多焦点動画像撮像系の構築”, 1998 年度 東京大学修士論文
- [35] 浜本 隆之: “撮像面上での圧縮・強調を行う高機能イメージセンサに関する研究”, 1996 年度 東京大学博士論文
- [36] Shree K.Nayar: “Shape from Focus System”, CVPR '92
- [37] R.J.Pieper, A.Korpel: “Image Processing for Extended Depth of Field”, Applied Optics, Vol.22, No.10, pp.1449-1453, 1983-5
- [38] T.C.Nguyen, T.S.Huang: “Image Blurring Effects Due to Depth Discontinuities: Blurring that Creates Emergent Image Details”, ECCV 92, pp.347-362, 1992
- [39] 浅田 尚紀, 藤原 久永, 松山 隆司: “逆投影ぼけモデルを用いた遮へいエッジの光学的性質の解析”, 信学論, J78-D-II, 2, pp.248-262, 1995-2
- [40] 日浦 槇作, 松山 隆司: “構造化瞳を持つ多重フォーカス距離センサ”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU '98), Vol.I, pp.353-358, 1998-7
- [41] K.Illgner, W.Praefcke, F.Muller: “Multiresolution motion estimation” Proc. IS&T/SPIE Image and Video Processing IV, Vol.2666, pp154-162, San Jose, California, USA, 1996-2
- [42] L.G.Brown: “A survey of image registration techniques” ACM Computing Surveys, Vol.24, No.4, 1992-12

- [43] P.J.Burt, E.H.Andelson: "The laplacian pyramid as compact image code", IEEE Trans. on Comm., Vol.COM-31, No.4, 1983-4
- [44] 尾上 守夫, 曾根 光男: "ピラミッド構造の階層間の幾何学的対応に基づいた画像の高速重ね合わせ", 信学論, Vol.J70-D, No.1, pp.139-147, 1997
- [45] 山之上 裕一, 岡野 文男, 木下 成美: "立体ハイビジョン撮像におけるズーム機構の開発", '97 電子情報通信学会総合大会, D-11-152, 1997-3
- [46] 新堀他: "DCT を用いた Gerchberg-Papoulis の反復法を適用した高画質画像拡大", 信学論, J76-D-II,9, pp.1932-1940, 1993-9
- [47] 中沢 裕二, 小松 隆, 斉藤 隆弘: "フレーム間統合による高精細デジタル画像の獲得", テレビジョン学会誌, Vol.49, No.3, pp.299-308, 1995
- [48] 中沢 裕二, 中野 誠巳, 小松 隆, 斉藤 隆弘: "画像中の特徴点に基づく実写画像と CG 画像の動画像合成システム", 映像情報メディア学会誌, Vol.51, No.7, pp.1086-1095, 1997
- [49] M.Irani, P.Anandan, J.Bergen, R.Kumar: "Efficient representations of video sequences and their applications", Signal Processing, August 1996, pp.327-351, 1996-8
- [50] R.Szeliski: "Video Mosaic for Virtual Environments", IEEE Computer Graphics and Applications, March 1996, pp.22-30, 1996-3
- [51] S.Srinivasan, R.Chellappa: "Image Stabilization and Mosaicking Using the Overlapped Basis Optical Flow Field", IEEE International Conference on Image Processing (ICIP '97), 1997
- [52] 星野 准一, 増田 功: "観測・推定画像間の誤差最小化によるパノラマ動画像の生成", 電子情報通信学会論文誌, 1997
- [53] 上野 秀幸, 大関 和夫: "顔領域検出を用いた動画像符号化方式", PCSJ 89, pp.129-130, 1989
- [54] A.Eleftheriadis, A.Jaquin: "Automatic face location detection for model-assisted rate control in H.261-compatible coding of video", Image Communication, Vol.7, No.4, pp.435-456, 1995-11

## 発表文献

### ○ 学会誌論文

- (1) 内藤 将彦, 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “複数の異なる焦点画像からの焦点外れ画像の生成を利用した全焦点画像の強制的取得”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J79-D-II, No.6, pp.1046-1053, 1996-6
- (2) 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “複数画像からの全焦点画像の再構成”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-D-II, No.9, pp.2298-2307, 1997-9 (電子情報通信学会 平成9年度論文賞)
- (3) 児玉 和也, 大西 隆之, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “反復法に基づく複数画像からの任意焦点画像の生成”, 映像情報メディア学会誌, Vol.51, No.12, pp.2072-2081, 1997-12
- (4) K.Kodama, K.Aizawa, M.Hatori : “Generation of arbitrarily focused images by using multiple differently focused images”, SPIE Journal of Electronic Imaging, Vol.7, No.1, pp.138-144, 1998-1
- (5) 児玉 和也, 久保田 彰, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “複数の異なる焦点画像を用いて視差と焦点ぼけを操作する画像生成”, 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.9, pp.1336-1342, 1998-9
- (6) 石戸 大資, 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “任意焦点画像生成による動画像符号化のオブジェクトベース画質制御の検討”, 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.9, pp.1391-1393, 1998-9

### ○ 国際会議論文

- (7) K.Kodama, K.Aizawa, M.Hatori : “Iterative Reconstruction of an All-Focused Image by Using Multiple Differently Focused Images”, 1996 International Conference on Image Processing(ICIP '96), Vol.III, pp.551-554, 1996-9

- (8) K.Kodama, K.Aizawa, M.Hatori :“Generation of arbitrarily focused images by using multiple differently focused images”, Visual Communication and Image Processing'97(VCIP'97), SPIE Vol.3024-130, pp.1294-1305, 1997-2 (“Best Student Paper Award”)
- (9) K.Aizawa, K.Kodama :“Generation of Arbitrarily Focused Images and Its Application to Object Enhanced Coding”, Proc. International Workshop on Synthetic-Natural Hybrid Coding and Three Dimensional Imaging (IWSNHC3DI) '97, pp.1-2, 1997-9
- (10) K.Aizawa, K.Kodama : “Signal Processing based approach to Image Content Manipulation”, Proc. IEEE Workshop on Image and Multidimensional Digital Signal Processing '98, pp.267-270, 1998-7
- (11) K.Aizawa, K.Kodama, A.Kubota :“Scene Content Manipulation Based on Linear Processing of Multiple Differently Focused Images”, First International Symposium on Mixed Reality (ISMR '99), 1999-3 (発表予定)
- (12) A.Kubota, K.Kodama, K.Aizawa, M.Hatori :“Registration and blur estimation methods for multiple differently focused images”, 1999 International Conference on Image Processing(ICIP '99), 1999-9 (投稿中)

### ○ 研究会論文

- (13) 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 :“複数画像からの点拡がり関数の推定と全焦点画像の取得”, 画像符号化シンポジウム (PCSJ 95), 3-4, pp.33-34, 1995-10
- (14) 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 :“複数画像からの全焦点画像の再構成”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU'96), Vol.I, pp.49-54, 1996-7
- (15) 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 :“複数画像からの任意焦点画像の生成”, 映像メディア処理シンポジウム (IMPS 96), I-8.15, pp.85-86, 1996-10
- (16) 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 :“カメラ制御系を用いた焦点ぼけ特性の分析とその任意焦点画像生成への応用”, 第3回画像センシングシンポジウム (SII'97), G-5, pp.241-246, 1997-6
- (17) 児玉 和也, 石戸 大資, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 :“任意焦点画像生成の簡易化と画像符号化への応用”, 映像メディア処理シンポジウム (IMPS 97), I-3.11, pp.39-40, 1997-10

- (18) 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “焦点の異なる複数画像からの視差を含む任意焦点画像生成”, 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU), PRMU97-111 ~ 120, pp.1-6, 1997-10
- (19) 相澤 清晴, 児玉 和也 : “信号処理手法に基づく画像コンテンツのマニピュレーション”, 電子情報通信学会マルチメディア・仮想環境基礎研究会 (MVE), MVE97-80 ~ 87, p.9, 1997-10
- (20) 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “焦点合わせの異なる複数の実写画像からの映像生成”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU'98), Vol.I, pp.189-194, 1998-7
- (21) 児玉 和也, 久保田 彰, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “複数の異なる焦点画像からの画像処理手法の拡張”, 映像メディア処理シンポジウム (IMPS 98), I-4.03, pp.53-54, 1998-10
- (22) 古賀 文博, 加藤 友規, 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “3次元情報を用いる高精細画像の再構成”, 映像メディア処理シンポジウム (IMPS 98), I-4.11, pp.69-70, 1998-10
- (23) 久保田 彰, 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “焦点合わせの異なる画像間のレジストレーションとぼけ推定”, 映像メディア処理シンポジウム (IMPS 98), I-5.02, pp.81-82, 1998-10
- (24) 久保田 彰, 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “任意焦点画像処理用撮像カメラの試作”, 映像メディア処理シンポジウム (IMPS 98), I-6.03, pp.111-112, 1998-10
- (25) 久保田 彰, 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “多焦点画像処理のためのグローバル/ローカルレジストレーションと多焦点動画像カメラの試作”, 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU), 1999-3 (発表予定)

### ○ 大会論文

- (26) 児玉 和也, 内藤 将彦, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “複数の異なる焦点画像からの全焦点画像の再構成”, '95 テレビジョン学会年次大会, 9-2, pp.149-150, 1995-7 (テレビジョン学会平成7年度鈴木記念賞)
- (27) 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “反復法を用いた異なる焦点画像からの全焦点画像の取得”, '95 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 情報・システム, D-158, p.160, 1995-9
- (28) 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “全焦点画像の取得のためのイメージフュージョン”, '95 テレビジョン学会映像メディア部門冬季大会, 8-3, p.87, 1995-12



- (29) 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “多数の奥行きをもつ対象シーンに対する全焦点画像の取得”, '96 電子情報通信学会総合大会, Vol.7, D-442, p.230, 1996-3
- (30) 諏訪 啓, 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “ステレオカメラを用いた異なる焦点画像からの鮮鋭画像の取得”, '96 電子情報通信学会総合大会, Vol.7, D-439, p.227, 1996-3
- (31) 児玉 和也, 大西 隆之, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “カメラ特性を用いた任意焦点画像の生成”, '97 電子情報通信学会総合大会, Vol.7, D-12-137, p.344, 1997-3
- (32) 大西 隆之, 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “焦点画像処理のためのカメラ特性の分析”, '97 電子情報通信学会総合大会, Vol.7, D-12-136, p.343, 1997-3
- (33) 石川 浩二, 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “ランダムサンプリングを用いた注視点抽出の検討”, '97 電子情報通信学会総合大会, Vol.7, D-12-230, p.437, 1997-3
- (34) 児玉 和也, 大西 隆之, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “カメラ特性の分析に基づく任意焦点画像の生成”, '97 映像情報メディア学会年次大会, 24-3, pp.296-297, 1997-7
- (35) 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “グラフィクスアクセラレータを用いた任意焦点画像の高速生成”, '97 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 情報・システム, D-11-93, p.185, 1997-9
- (36) 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “選択的統合に基づく任意焦点画像生成手法の検討 - 反復的復元に基づく手法との比較 -”, '98 電子情報通信学会総合大会, Vol.7, D-11-121, p.121, 1998-3
- (37) 加藤 友規, 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “3次元情報を用いる高精細画像の再構成”, '98 電子情報通信学会総合大会, Vol.7, D-11-115, p.115, 1998-3
- (38) 田上 直樹, 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “高解像度静止画を用いた動画画像の高精細化”, '98 電子情報通信学会総合大会, Vol.7, D-11-123, p.123, 1998-3
- (39) 石戸 大資, 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “任意焦点画像生成の動画画像符号化への応用”, '98 電子情報通信学会総合大会, Vol.7, D-11-125, p.125, 1998-3
- (40) 久保田 彰, 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “焦点画像処理のための複数焦点画像間のレジストレーションとぼけ推定”, '98 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 情報・システム, D-11-107, p.222, 1998-9 ~ 10
- (41) 久保田 彰, 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “任意焦点画像生成のための撮像カメラの試作と前処理”, '98 映像情報メディア学会冬季大会, 11-1, p.96, 1998-12

- (42) 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “複数画像の信号处理的統合に基づく焦点画像処理”, '99 電子情報通信学会総合大会, 1999-3 (発表予定)
- (43) 久保田 彰, 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊 : “焦点合わせの異なる画像間の局所性を考慮したレジストレーション”, '99 電子情報通信学会総合大会, 1999-3 (発表予定)

○ 解説

- (44) 相澤 清晴, 児玉 和也 : “多焦点実写画像の統合に基づく映像生成 - 任意焦点画像の生成 -”, 画像ラボ, Vol.9, No.6, pp.4-8, 1998-6