

平成 27 年度

学位論文

題目

新しい撮像光学系による

高解像度・広被写界深度画像の取得に関する研究

指導教員 浜本 隆之 教授

学籍番号 4311702

氏名 佐藤 俊一

東京理科大学大学院  
工学研究科電気工学専攻

# 目次

1	序論	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	本論文の構成	6
2	高解像度・広被写界深度画像の撮像技術の調査	9
2.1	はじめに	9
2.2	各種撮像技術の調査	10
2.2.1	単眼・単板式	11
2.2.2	単眼・多板式	12
2.2.3	多眼・単板式	12
2.2.4	多眼・多板式	12
2.3	従来技術の問題点の整理	13
2.4	多眼技術と Wavefront Coding に注目した理由	14
2.5	まとめ	14
3	多眼カメラによる高解像度化手法	15
3.1	はじめに	15
3.2	多眼高解像度化手法の原理	15
3.3	多眼による高解像度化の調査	16
3.3.1	複眼カメラの不規則レンズ配置	16
3.3.2	ライトフィールドカメラ	17
3.3.3	多眼カメラの仮想焦点画像生成	18
3.3.4	超解像に基づく高解像度画像生成	18
3.4	各手法の比較と問題点の整理	19
3.5	まとめ	19
4	高解像度化のための多眼カメラ技術の提案	20
4.1	はじめに	20
4.2	従来の多眼カメラの問題点	20
4.3	撮像距離と画素ズレの関係	20
4.4	適切なカメラ画素の配置	21
4.5	オクルージョン領域のエラー処理手法	23
4.6	まとめ	24
5	Quad-HD 多眼カメラシステム及び評価結果	25
5.1	はじめに	25
5.2	システム全体構成	26

5.3	視差マップ生成.....	28
5.4	奥行き対応高解像度画像合成.....	30
5.5	Quad-HD 出力.....	33
5.6	多眼カメラシステムによる合成画像の評価結果.....	34
5.7	まとめ .....	39
6	Wavefront Coding による被写界深度拡大手法.....	40
6.1	はじめに .....	40
6.2	Wavefront Coding の原理.....	40
6.3	Wavefront Coding による被写界深度拡大の調査.....	41
6.3.1	最適化位相マスクを用いた WFC.....	42
6.3.2	コマ収差を用いた低コスト WFC.....	42
6.3.3	4 次位相板を用いた WFC.....	43
6.3.4	液晶空間変調素子を用いた WFC.....	43
6.4	コマ収差を用いた Wavefront Coding.....	44
6.5	従来技術の問題点.....	45
6.6	まとめ .....	46
7	像面上の PSF 補正手法及び撮像面傾斜法の提案.....	47
7.1	はじめに .....	47
7.2	像面上の PSF 補正手法の提案.....	47
7.3	撮像面傾斜法の提案.....	50
7.4	まとめ .....	51
8	提案手法による合成画像の評価結果.....	52
8.1	はじめに .....	52
8.2	提案手法の検証方法及び実験環境.....	52
8.3	像面上の PSF 補正手法による合成画像の評価結果.....	55
8.3.1	シミュレーションによる結果.....	55
8.3.2	光学実験による結果.....	57
8.4	撮像面傾斜法による合成画像の評価結果.....	59
8.5	複数 PSF による復元画像の PSNR 評価.....	60
8.6	奥行きのある物体の実写画像評価.....	61
8.7	まとめ .....	62
9	結論 .....	63
9.1	はじめに .....	63
9.2	本論文のまとめ.....	63
9.3	本論文の成果.....	64
9.4	今後の課題 .....	65

謝辞 .....	66
参考文献 .....	68
発表文献 .....	72
付録 .....	74

# 目次

図 1.1	撮像技術のトレンド.....	1
図 1.2	解像度と被写界深度の関係.....	3
図 1.3	多眼撮像技術と WFC の位置づけ.....	4
図 1.4	各章の関係.....	8
図 3.1	多眼カメラの分類.....	15
図 3.2	不規則レンズ配置.....	16
図 3.3	ライトフィールドカメラ.....	17
図 3.4	多眼カメラの仮想焦点画像生成.....	18
図 4.1	撮影距離と視差（画素ずれ）の関係.....	21
図 4.2	カメラ画素の配置.....	22
図 4.3	撮影距離と視差（画素ずれ）の関係.....	22
図 4.4	オクルージョン.....	23
図 5.1	多眼カメラシステムのブロック図.....	26
図 5.2	多眼カメラ外観.....	27
図 5.3	カメラ配置.....	27
図 5.4	視差マップ生成部のブロック図.....	28
図 5.5	視差エラー検出方法.....	29
図 5.6	視差マップ生成フローチャート.....	29
図 5.7	高解像度画像生成部のブロック図.....	30
図 5.8	視差エラー処理部のブロック図.....	32
図 5.9	出力処理.....	33
図 5.10	多眼カメラシステムの外観.....	34
図 5.11	実験装置.....	35
図 5.12	CIPA 解像度チャート.....	35
図 5.13	高解像度画像生成の実験結果.....	36
図 5.14	エラー処理の実験結果.....	36
図 5.15	撮影距離と生成画像の解像度との関係（半画素シフト有無の比較）.....	37
図 5.16	撮影距離、解像度及び画素ずれの関係.....	38
図 5.17	画素ずれと解像度の関係.....	38
図 6.1	WFC の概要.....	40
図 6.2	PSF（点広がり関数）の変化.....	41
図 6.3	WFC に使用する位相マスクの比較.....	41
図 6.4	コマ収差を用いた WFC の実験システムのブロック図.....	42

図 6.5	コマ発生部と従来の赤外撮像レンズ.....	42
図 6.6	4 次位相板を用いた WFC.....	43
図 6.7	液晶空間変調素子を用いた WFC.....	43
図 6.8	凹凸レンズのシフト.....	44
図 6.9	コマ収差による位相分布.....	45
図 6.10	復元画像に重畳した特有な歪みの一例.....	46
図 7.1	撮像レンズとシミュレーション結果.....	47
図 7.2	シミュレーションによる PSF.....	48
図 7.3	基準 PSF に対する他位置の PSF における正規化相互相関の変化.....	49
図 7.4	像面を傾斜した撮像レンズ.....	50
図 7.5	像面を傾けた時の PSF 変化.....	50
図 7.6	基準 PSF に対する他位置の PSF における正規化相互相関の変化 (垂直方向) .....	51
図 8.1	WFC による被写界深度拡大実験の手順.....	52
図 8.2	ISO12233 解像度チャート (3 倍拡大版).....	53
図 8.3	実験に用いた撮像レンズ.....	54
図 8.4	光学実験装置.....	54
図 8.5	シミュレーションで求めた PSF.....	55
図 8.6	基準 PSF を拡大縮小した PSF で復元した復元画像 (左) と水平解像度測定結 果 (右) の一例 (シミュレーションによる中間画像と PSF).....	56
図 8.7	基準 PSF を拡大縮小した場合の被写体距離と水平解像度測定結果 (シミュレー ションによる中間画像と PSF).....	56
図 8.8	基準 PSF を拡大縮小した PSF で復元した復元画像 (左) と水平解像度測定結 果 (右) の一例 (光学実験による中間画像とシミュレーションによる PSF) .....	57
図 8.9	被写体距離と水平解像度測定結果 (実画像).....	58
図 8.10	撮像面を傾けた場合の被写体距離と水平解像度測定結果 (シミュレーション による中間画像と PSF).....	59
図 8.11	複数 PSF による復元結果 (シミュレーション).....	60
図 8.12	奥行きのある物体の実写画像.....	61

## 表目次

表 2.1	撮像技術の分類.....	9
表 2.2	撮像技術一覧.....	10
表 2.3	従来技術の整理.....	13
表 3.1	各手法の比較.....	19
表 5.1	多眼カメラシステムの課題と提案.....	25
表 5.2	多眼カメラシステムの仕様.....	27
表 5.3	使用した FPGA 基板の一覧.....	34
表 7.1	ガウスレンズ内部に配置した凹凸レンズの仕様.....	47
表 8.1	図 8.3 の撮像レンズに使用した凹凸レンズの仕様.....	54
表 9.1	本論文の総括.....	65

# 1 序論

## 1.1 研究の背景と目的

近年、表示装置が、Full-HD から Quad-HD へ、さらには SHV (Super High Vision) へと大画面化、高解像度化する流れの中で、撮像装置も Quad-HD カメラ、SHV カメラへ向けた開発が増えてきている。また、セキュリティ、監視カメラの応用においても、1 台で広範囲エリアを監視するニーズの高まりにより、焦点合わせ、ズームが不要な監視カメラの高精細化が進んでいる。

図 1.1 に撮像技術のトレンドを示す。大きく、時間、空間、ダイナミックレンジ、波長の 4 つの軸で研究開発が進められている。時間軸については、1000fps がリアルタイム処理の 1 つの目標であり、特殊用途の CCD (Charge Coupled Device) で 1~2Mfps のフレームレートが達成されている。空間の軸では、汎用の CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) イメージセンサで 10M ピクセルを超えている。このような撮像素子の中には、レンズの解像限界を超えるほど微細化しているものもある。したがって、センサの画素を単に空間解像度を上げるためだけではなく、ダイナミックレンジの拡大、多原色化、3 次元空間情報の取得等のために有効的に使用することも研究されている。ダイナミックレンジの軸では、100~200dB の CMOS イメージセンサが研究されている。一般のイメージセンサのダイナミックレ

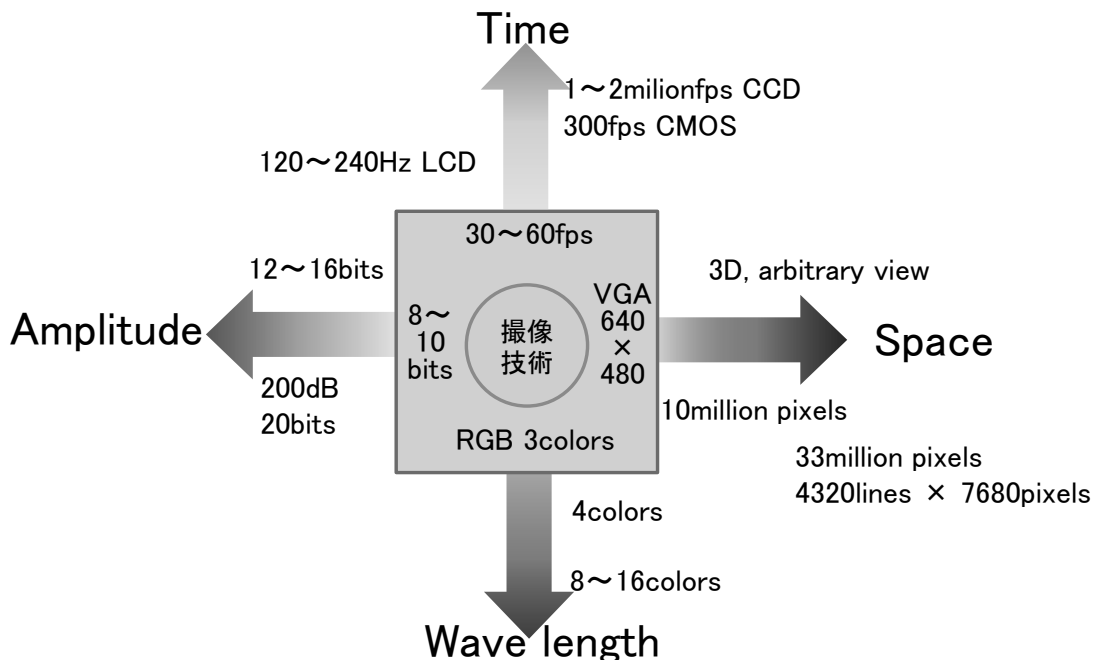


図 1.1 撮像技術のトレンド



レンジは、60～70dB なので、新しい画素構造の導入、異なったサイズの画素からの情報処理、イメージセンサ上での積分時間の制御等の種々の技術の統合によって実現されている。最後に波長の軸については、正確な色再現が重要な課題である。4つのカラーフィルタを有した CMOS イメージセンサや限定された数の色情報から反射スペクトルを推定する画像処理等が研究されている。

また、デジタルカメラに代表される撮像装置の小型化、薄型化の開発も進められており、スマートフォン等の携帯端末等に小型で高画質なデジタルカメラが搭載されてきている。デジタルカメラは、撮像素子、レンズ光学系、イメージプロセッサ、バッファメモリ、フラッシュメモリ、画像モニタ及びこれらを制御する電子回路やメカニカル機構等から構成されている。撮像素子には、通常、CCD や CMOS イメージセンサ等の固体電子デバイスが使われている。撮像素子上に結像された光量分布は光電変換されて、得られた電気信号はイメージプロセッサとバッファメモリによって信号処理される。イメージプロセッサとしては DSP (Digital Signal Processor) 等が、またバッファメモリとしては DRAM (Dynamic Random Access Memory) 等が使用される。撮像された画像はカード型フラッシュメモリ等に記録蓄積される。撮像素子に像を結像させるレンズ光学系は、通常、収差を除去するために、数枚の非球面レンズから構成されている。また、光学的なズーム機能を持たせる場合は、組合せレンズの焦点距離や、レンズと撮像素子の間隔を変える駆動機構 (アクチュエータ) が必要となる。撮像装置の高画質化、高機能化の要求に応じて、撮像素子は多画素化、高精細化し、レンズ光学系はより低収差、高精度化され、かつズーム機能、オートフォーカス機能、手振れ補正機能等の高機能化が進んでいる。

さらに、デジタルカメラに高度なマイクロコンピュータやイメージプロセッサによる画像処理技術を応用したコンピューショナルフォトグラフィという技術の開発が進められている [1], [2]。このコンピューショナルフォトグラフィを適用したカメラは、単に画像を取得するだけでなく、距離情報の付加、焦点ボケの補正、撮影後に焦点を自由に調整できるリフォーカス等の通常の単眼カメラでは不可能であった新たな機能を実現できる。

ここで、撮像レンズの理論によれば、カメラを高解像度化していくと被写界深度が狭くなるという相反関係がある。図 1.2 に解像度と被写界深度の関係を示す。図の横軸が解像度、縦軸が被写界深度で、例えばピンホールカメラは、解像度は低い被写界深度は広いという特性を有する。また、SHV カメラは、高解像度であるが被写界深度は狭い。これは、撮像レンズの重要なファクタである F 値によって決まる。F 値はレンズの焦点距離を有効口径で割った値で、一般に F 値が小さいと明るいレンズと言われ、大きいと暗いレンズと言われる。原理的に、被写界深度は F 値に比例し (付録 A 参照)、解像度は F 値に反比例するため、上述のような相反関係が生じることになる。すなわち、通常の単眼カメラでは、高解像度化していくと、光の波長 (約  $0.5 \mu\text{m}$ ) やレンズの F 値 (開口率) の制約のために、被写界深度がより狭くなるという問題が生じる。このために、SHV 撮像装置は、高解像度であるために、被写界深度が狭くなり、実用上、焦点合せやカメラワークが難しいという問題が生じる。

さらに、従来の単眼カメラでは、撮像センサの画素サイズを光の波長以下にすることは難しいため、画素数を増やすためにはセンササイズを大きくする必要があった。それに伴い、撮像レンズも大きくなり、カメラ自体が大型化するという問題があった。また、奥行きのある被写体に対しては、焦点はずれの領域が生じ、撮像センサの画素数を十分に活かすことができないという問題があった。

そこで、従来の単眼カメラとは違う新たな撮像技術により、すなわち新たな光学系による光学処理を導入し、後段で再構成処理を施すことにより、上記のような問題を解決することができると考えられる。

従来から、複数の小型カメラを使用し複数の画像を用いて、1枚の画像を合成することで解像度を上げる多眼撮像技術がある。ただし、多眼撮像技術においても合焦点画像であれば高解像度化が可能であるが、高周波成分が無くなった焦点はずれの画像から高解像度画像を生成できないという問題が残る。これに対し、Wavefront Coding (WFC) [3]と呼ばれる技術を用いれば被写界深度を拡大することが可能である。WFCの理論では、位相マスクをレンズ系の中に挿入し、意図的にぼけを加えて撮像したぼけ画像（以下、中間画像と表す）に対して、単一のPSF（Point Spread Function；点拡がり関数）による画像復元を行うことで被写界深度を拡大させる。しかし、現実のレンズ環境では、レンズの口径は有限であり収差もあることから、単一のPSFに基づく画像復元では、被写体距離によって復元画像にリングなどの劣化が生じる問題がある[4], [5]。

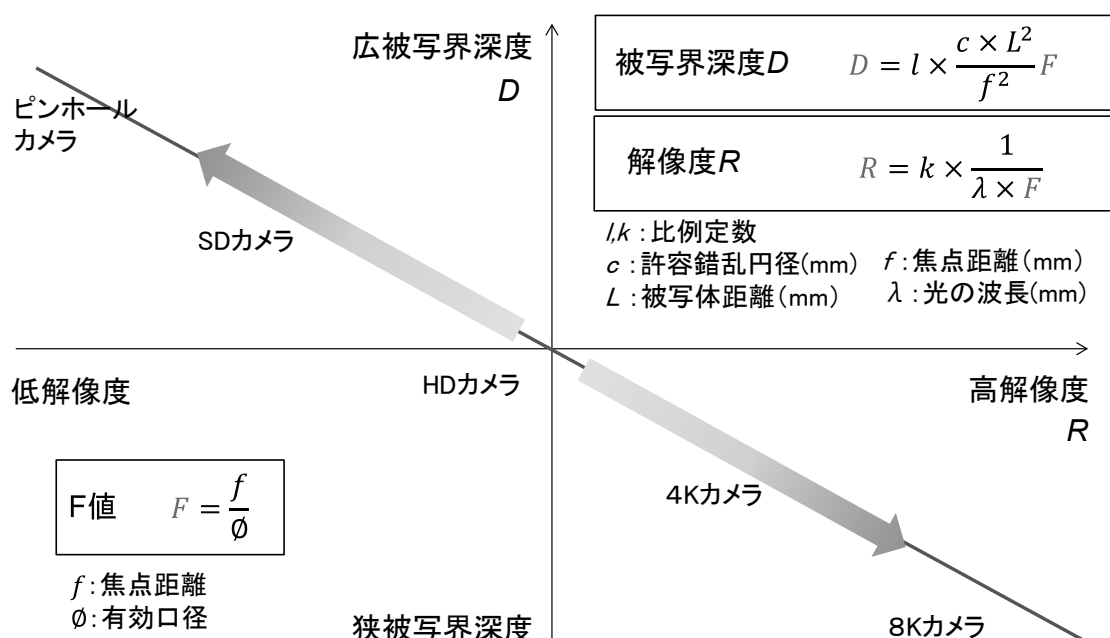


図 1.2 解像度と被写界深度の関係

図 1.3 に多眼撮像技術と WFC の位置づけを示す。多眼, WFC とも, 後述するような問題があるが, 原理的には高解像度で広被写界深度画像の取得が可能になると考えられる。すなわち, 多眼により被写界深度を保ったまま高解像度化を行い, さらに WFC により広被写界深度化を図ることが可能となる。

本研究では, 各種撮像技術の中で高解像度・広被写界深度画像の取得という点で, 通常の単眼の限界を打破できる多眼撮像技術と, 被写界深度を拡大できる WFC に注目した。それぞれの技術の課題を解決するアイデアを加えれば, お互いの長所で短所を補完できると考えた。

多眼撮像技術としてサブピクセル精度の画素の位置合わせのために, 多眼カメラの構成及び相対的な画素配置を工夫し, 視差推定エラーを考慮した奥行きに基づく高解像度画像生成アルゴリズムを提案する。これらの提案手法をハードウェアとして実装した多眼カメラシステムを開発し, 解像度に関して定量的な評価を行った。

主な検討課題は,

- (1) 奥行き推定に基づく多眼画像合成が必要
- (2) 多眼カメラ配置不完全 (画素ズレ小) により画質が劣化
- (3) 多眼合成画像のオクルージョン領域における二重像が発生

の 3 点である。

課題 (1) に対しては, HD6 眼の実証機により多眼画像合成の検討を行う。

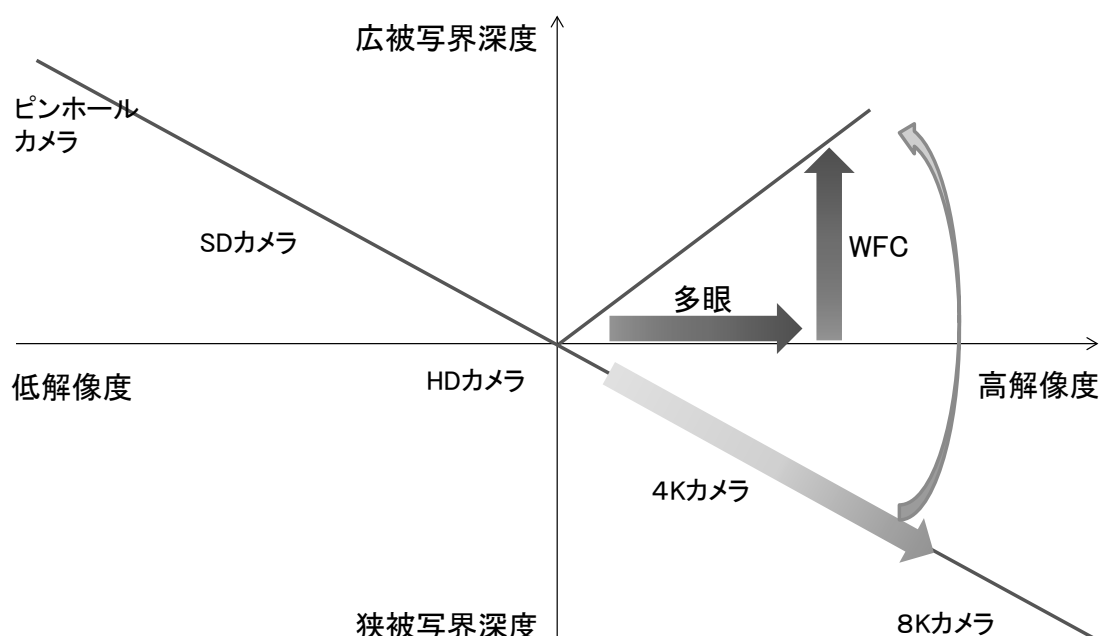


図 1.3 多眼撮像技術と WFC の位置づけ

課題（２）に対しては、被写体距離によらず多眼合成画像を高解像度化可能な最適多眼カメラの画素配置の検討を行う。

課題（３）については、視差推定の誤りを検出し、オクルージョン領域においては基準カメラの画像で補完することにより、二重像の発生による画質劣化を防止する。

また、WFCとして、多眼撮像技術への適用を前提とし、単眼カメラに対して複数の PSF を用いて画像を復元するという考え方を提案し、従来の撮像技術の限界を打開する撮像システムの実現を目的として研究を行った。

主な検討課題は、

- （１）最適な 3 次位相マスクの実現が困難
- （２）固定再構成フィルタ演算による特有ノイズが発生
- （３）被写界深度拡大と画質がトレードオフの関係

の 3 点である。

課題（１）に対しては、凹凸レンズを互いに光軸からずらすことにより発生するコマ収差（3 次位相変化）を位相マスクの代わりに利用する手法を用いて、シミュレーションと光学実験の両方で画像復元の検討を行う。

課題（２）については、撮像画像面内で PSF が変化するため、単一の PSF を用いて画像を復元した場合は特有の雑音が発生するので、複数 PSF の適用、または単一 PSF を所定の計算式で変形して画像を復元することを提案する。

課題（３）については、異なる奥行き方向へ複数 PSF を適用することを提案する。また、レンズ系の非対称性を小さくすることでコマ収差の非対称性を低減でき、被写界深度の拡大が可能なことをシミュレーションにより示す。

以上の考察より、本論文では

- ✓ 多眼カメラアルゴリズムによって HD6 眼から Quad-HD 解像度が達成することが出来る
- ✓ 半画素シフト配置により、撮影距離による合成画像の解像度変化を抑制することが出来る
- ✓ 視差推定の誤りを検出し、オクルージョン領域においては基準カメラの画像で補完することにより、二重像の発生による画質劣化を防止することが出来る
- ✓ 凹凸レンズシフトによって発生する 3 次位相変化を位相マスクとして使用することで、被写界深度を拡大することが出来る
- ✓ PSF を変形させ、像面位置に対応した複数の PSF で画像を復元することにより、復元画像の画質を改善及び被写界深度を拡大することが出来る
- ✓ 像面での PSF 変化が小さくなるように撮像面を傾斜させることにより、復元画像の画質を改善及び被写界深度を拡大することが出来る

という撮像手法について論じる。

## 1.2 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

### 1 章 序論

研究背景と目的及び本論文の構成について述べる。

### 2 章 高解像度・広被写界深度画像の撮像技術の調査

先ず、高解像度・広被写界深度画像の撮像技術の調査結果について考察する。また、これまでに発表された、単眼から多眼までのカメラ構成、画像取得の手法等、各種撮像技術に基づくカメラについて紹介する。

### 3 章 多眼カメラによる高解像度化手法

多眼カメラの手法について考察する。多眼の各手法について説明し、それぞれの方式の問題点を整理し、解決すべき課題について述べる。

### 4 章 高解像度化のための多眼カメラ技術の提案

従来の多眼カメラの問題点を明らかにした上で、多眼カメラ配置及び視差推定エラー処理手法を提案する。まず、サブピクセル精度の画素の位置合わせのために、多眼カメラの構成及び相対的な画素配置を工夫し、視差推定エラーを考慮した奥行きに基づく高解像度画像生成アルゴリズムを提案する。次に、視差の算出出来なかった領域、あるいは誤った視差を算出した領域に関して、基準カメラ (Bayer) 単眼画像を 4K 拡大した画像をそのまま出力する手法について説明する。

### 5 章 Quad-HD 多眼カメラシステム及び評価結果

Quad-HD 多眼カメラシステム構成の詳細について述べる。予め多眼カメラの各画素位置を半画素シフトの関係になるよう機構的に調整することにより、単純なブロックマッチング計算だけで、高解像度画像の生成を行った。また、画質向上のために、視差エラーを用いた画像生成を行った。その後、本多眼カメラシステムを用いた実験において、テストチャートを用いて定量的に評価した結果を示す。さらに、奥行推定できない領域での画像合成エラーを防止できた結果についても示す。

### 6 章 Wavefront Coding による被写界深度拡大手法

Wavefront Coding (WFC) による被写界深度拡大手法について詳細な説明を行う。従来のコマ収差を用いた手法では、所望の 3 次位相変化以外の位相変化が発生し、復元画像が劣化すること、単一 PSF による固定再構成フィルタ演算では、画像ボケ等の特有な歪みが発生す

る，という課題があることを述べる．

## 7章 像面上の PSF 補正手法及び撮像面傾斜法の提案

コマ収差を用いた WFC の課題を踏まえた上で，像面内での PSF の空間的な変化を低減させる 2 種類の提案手法について述べる．像面上の PSF を補正し，複数の PSF を用いて画像を復元する手法及び撮像面を傾斜させることにより像面上の PSF の変化を小さくする手法の提案について詳細な説明を行う．

## 8章 提案手法による合成画像の評価結果

2つの提案手法による復元画像の評価結果について述べる．2つの提案手法の有効性を確認するために，実際のレンズで構成可能な撮影レンズ光学系を Code V [6]でシミュレーションした．このシミュレーションにより求めた中間画像及び PSF を用いて復元した画像の解像度評価を行った．また，実際のレンズで組み立てた光学実験装置を用いて撮影した中間画像をシミュレーションで計算した PSF で復元し，その解像度を評価した．

## 9章 結論

本論文の主たる成果をまとめるとともに，今後の課題について述べ，本論文全体の結論とする．

以上をふまえて，図 1.4 に各章の関係を図説した．先ず，第 2 章で従来の高解像度・広被写界深度画像の撮像技術について調査した結果を示す．その後，第 3 章で多眼カメラによる高解像度化手法の考察を行う．次に，第 4 章から第 5 章で，提案手法を組み込んだ多眼カメラシステムの構成，仕様及び評価結果について述べる．また，第 6 章では，従来 WFC の手法及びその課題について説明する．その後，第 7 章から第 8 章では，WFC に関する 2 つの提案及びその評価結果について述べる．最後に，多眼撮像技術と WFC に関する提案の評価結果について議論し，本研究の総括を第 9 章で行う．

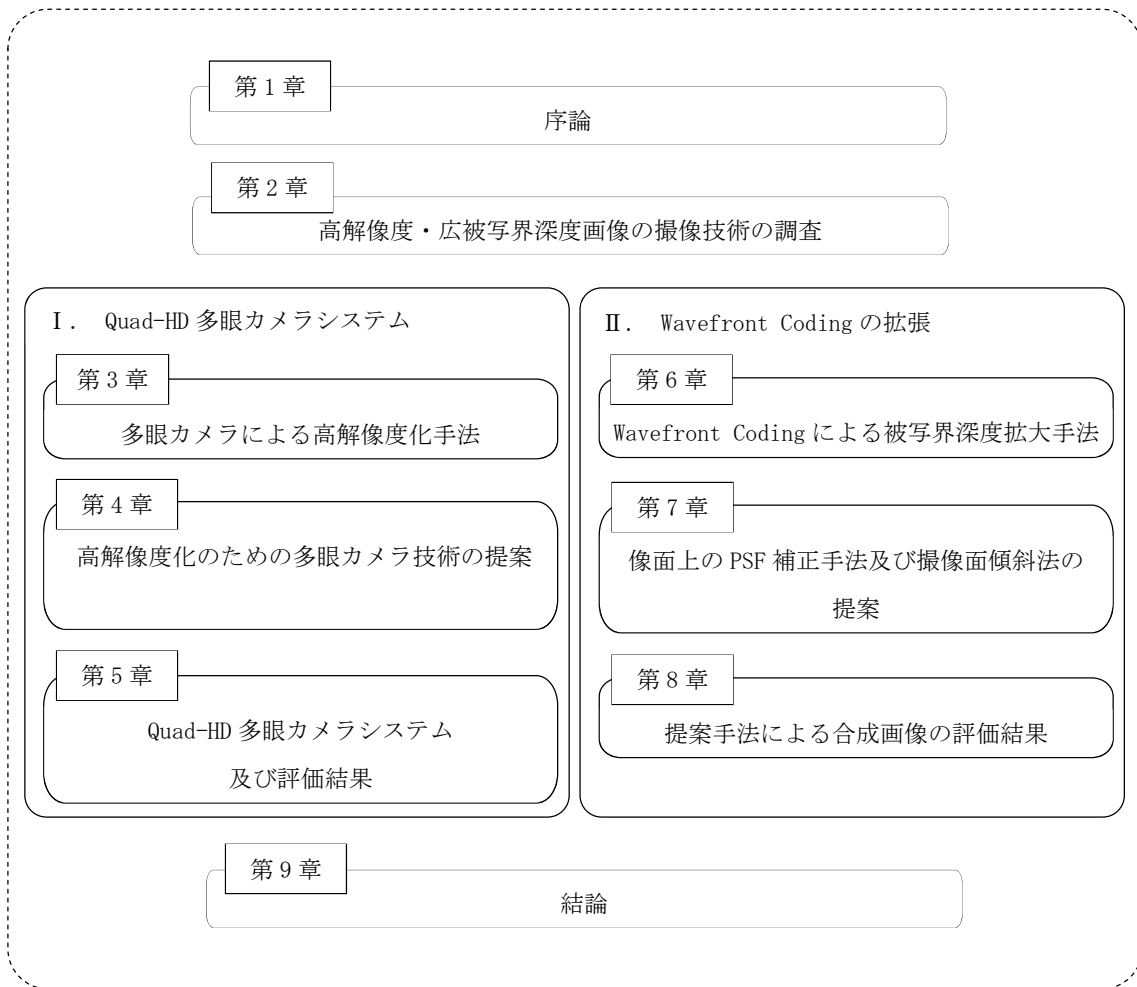


図 1.4 各章の関係

## 2 高解像度・広被写界深度画像の撮像技術の調査

### 2.1 はじめに

本章では、先ず高解像度・広被写界深度画像の撮像技術について、光学系の構成を切り口として考察する。

実世界を再現するために、レンズや撮像素子の高性能化により、高精細な画像を取得できるようになってきた。先の章で述べたように、最近のデジタルカメラは時間分解能、空間解像度、ダイナミックレンジ、波長（色再現）等の基本性能が大幅に向上しており、通常の写真撮影のレベルでは十分な性能を有していると言える。そこで、レンズ、撮像素子、画像処理の各機能を分化・複合・統合して、従来の撮像装置では困難であった機能・性能を実現しようとする各種技術の提案、開発が盛んに行われている。例えば、複眼カメラ[7]やライトフィールドカメラ[8], [9]は、2次元空間解像度を奥行き方向の情報に振り分けることにより、撮影後に焦点位置（視点）を自在に制御することもできる。また、Wavefront Coding[3], Coded Aperture[10], [11], Focus sweep[12]等の技術を適用したカメラは全焦点画像を取得できる。これらの撮像技術を総称してコンピュータショナルフォトグラフィと呼ぶこともある[1], [2]。

上記のように各種光学／画像処理技術をベースした撮像技術であっても、従来のデジタルカメラと同様に、基本的には、レンズ、撮像素子及び画像処理から構成されており、前段の光学系で取得した情報を後段の画像処理で処理するため、まず前段の撮像光学系で必要な情報を後段に伝達することが重要になる。そこで、表 2.1 に示すように、各種撮像技術を前段の撮像光学系で分類し整理を行う。例えば、従来の単眼カメラは、レンズが単一で撮像素子が単一または多数の項目に分類される。従来、高解像度化または広被写界深度化するための撮像技術は、単一レンズ内で光学特性を工夫したり、複数のレンズまたは撮像素子を用いて光学系を工夫したりすることで実現しようとしている。

表 2.1 撮像技術の分類

撮像素子 \ レンズ	単一	多数
単一	従来カメラ (単板ベイヤカメラ) [レンズ開口制御] Wavefront Coding Coded Aperture Focus sweep	複眼 ライトフィールド
多数	従来カメラ (三板式カラーカメラ)	ステレオ 多眼



## 2.2 各種撮像技術の調査

撮像技術は、先の節で述べたようにレンズと撮像素子のカメラ構成によって、大きく4つに分類できる。表2.2にそれら撮像技術概要の一覧表を示す。

ここでは、レンズとセンサの構造に着目し、高解像度、広被写界深度の観点から述べる。レンズの高精度な加工技術や撮像素子の画素の微細化技術等については必要な技術ではあるが触れない。

表 2.2 撮像技術一覧

構成		手法	概要
レンズ	撮像素子		
単一	単一	Auto focus, zoom(写真)	一般的なデジタルカメラ
		Pan focus(動画)	Webカメラ等の安価なカメラ
		Auto focus(動画)	ハイビジョン動画を撮影できるデジタルビデオカメラ
		Multi focus(複数撮影)	焦点を変えた複数枚画像から全焦点画像を合成
		Moving camera	視点を変えた複数の画像から焦点ボケ補正、視点変更や高解像度画像を合成
		Shutter mask	所定の時間間隔でサンプリングした複数の画像を合成することにより動きボケを補正
		Pattern mask	レンズ瞳を所定のパターンマスクを挿入(光強度で符号化)し、全焦点画像を復元
		Partial iris	レンズ瞳の絞りを時分割で変えることにより、焦点ボケ補正、視点変更や高解像度画像を合成
		Moving lens	焦点を変えた複数枚画像から全焦点画像を合成する手法
		Moving sensor	撮像素子を移動させ、多重露光画像を取得、全焦点画像を復元
	Wavefront coding	レンズ瞳に位相マスクを挿入し、全焦点画像を復元	
単一	多数	Auto focus(動画)	RGBで個別の撮像素子を有する三板式の高画質なデジタルビデオカメラ
多数	単一	Lens array 複眼カメラ	レンズアレイで複数の画像を撮像素子上に結像し、焦点ボケ補正、視点変更や高解像度画像を合成
		Micro lens array	撮像素子上にレンズアレイを配置し、焦点ボケ補正、視点変更や高解像度画像を合成
多数	多数	Stereo camera	2つのカメラにより、奥行推定し視点変更や高解像度画像を合成
		Pan + zoom 2眼, 多眼	特性の異なる2つのカメラの画像を合成することにより、高解像度画像を合成
		Camera array	複数のカメラの画像を合成することにより、焦点ボケ補正、視点変更や高解像度画像を合成

### 2.2.1 単眼・単板式

従来のデジタルカメラのようにベイヤカラー撮像素子を有する撮像手法が、この中に分類される。また、従来のレンズとは違う手法により結像した複数の画像を合成することにより、焦点ボケ補正、視点変更や高解像度画像を合成するカメラもある。例えば、レンズ瞳で光の強度や位相を時間的／空間的に制御する手法等がある。以下にこれらの手法の概要について説明する。

#### (1) Moving camera

カメラを左右上下に移動させて視点を変えた複数の画像を撮影し、焦点ボケ補正、視点変更や高解像度画像を合成する手法である[8]。カメラは1台だけで撮影することが可能だが、カメラを移動したり静止したりする制御機構が必要となる。また、撮影対象は静止した物体が対象で、動画像を撮影することはできない。画像の合成手法は後述する多眼撮像技術と同じ手法が適用できる。

#### (2) Shutter mask

所定の時間間隔でサンプリングした複数の画像を合成することにより動きボケを補正する手法である[13]。

#### (3) Pattern mask

レンズ瞳に所定のパターンマスクを挿入（光強度で符号化）し、全焦点画像を復元する手法である[10], [11]。

#### (4) Partial iris

レンズ瞳の絞りの位置を時分割で変えることにより、焦点ボケ補正、視点変更や高解像度画像を合成する手法である。ただし、時系列で絞りの位置を変える必要があるため、動画像を撮影することができない[14]。

上記の問題を解決するために、レンズ瞳に領域で分割された色フィルタを挿入することで、時間ではなく光の波長によって光線を選択するという手法も提案されている[15]。波長の異なる画像に対し画像処理を行うことで、視差（奥行き）推定を行うことができる。色フィルタ以外にプリズム等を用いて光線を分割する手法も提案されている[16]。

#### (5) Moving lens (Focus sweep)

焦点を変えた複数枚画像から全焦点画像を合成する手法である。撮影した複数の画像の中で最も空間周波数が高い領域を選択し一枚の画像を合成することにより、高画質な全焦点画像を形成する。また、後述する Moving sensor と同様に多重露光画像を取得しデコンボリューションすることで全焦点画像を得ることもできる。

#### (6) Moving sensor (Focus sweep)

撮像素子を移動させ、多重露光画像を取得、全焦点画像を復元する手法である[12]。

#### (7) Wavefront Coding

レンズ瞳に位相マスクを挿入し、全焦点画像を復元する手法である[3]。詳細については後述する。

### 2.2.2 単眼・多板式

RGB で個別の撮像素子を有する三板式の高画質なデジタルビデオカメラ等がここに分類される。単一レンズの光軸上に撮像素子を配置するために、光路を分離するためにプリズム、ハーフミラー等が必要になる。一般的には撮像レンズから入ってきた白色光を赤青緑の3原色に分離するダイクロイックプリズムが使用される。ダイクロイックプリズムはハーフミラーによる分光と比較すると、製造や調整精度が求められ高価であるが、光を有効的に活用できる。ただし、多くの撮像素子を配置することは難しく、一般的には三板式がほとんどである。

### 2.2.3 多眼・単板式

上記の単眼・単板式と後述する多眼・多板式の中間的な手法と考えられる。カメラの瞳面を複数のレンズで分割する手法と撮像素子面（結像面）を複数のレンズで分割する手法の2つがある。

#### (1) Lens array（複眼カメラ）

レンズアレイで複数の画像を撮像素子上に結像し、焦点ボケ補正、視点変更や高解像度画像を合成する手法である[7]。各レンズに対応した視点の異なる複数の画像から視差推定も可能である。

#### (2) Micro lens array（ライトフィールドカメラ）

撮像素子上にレンズアレイを配置し、焦点ボケ補正、視点変更や高解像度画像を合成する手法である[17], [18], [19]。この手法では、マイクロレンズアレイの他に結像用のレンズが必要となる。また、撮像素子を移動させることで焦点面を変更したり[20]、複数の視点の情報から高精度に視差を推定したりすることができる[21]。

### 2.2.4 多眼・多板式

複数の単眼カメラを並べる手法である。最小構成はステレオカメラであり、多いもので100眼のカメラをアレイ状に配置したものもある。

#### (1) Stereo camera

2つのカメラにより、奥行推定し視点変更や高解像度画像を合成する手法である。通常はステレオ（立体）用画像の取得に用いられる。

#### (2) Pan + zoom 2眼（多眼）

特性の異なる2つのカメラ（パンフォーカスカメラとズームカメラ等）の画像を合成することにより、高解像度画像を合成する手法である[22]。

#### (3) Camera array

複数のカメラの画像を合成することにより、焦点ボケ補正、視点変更や高解像度画像を合成する手法である[23]。

## 2.3 従来技術の問題点の整理

表 2.3 に、各撮像技術とも長所と短所をまとめた。単一レンズ/単一撮像素子構成で高解像度化可能な技術は、Moving camera である。ただし、動画には対応できない。一方、広被写界深度画像（全焦点画像）を取得できる技術は多数あるが、その中で動画に対応可能な技術としては Pattern mask と Wavefront Coding の 2 つが挙げられる。ただし、Pattern mask はマスクによって光を遮光する必要があるため、光の位相を利用する Wavefront Coding と比較すると光の利用効率が良くない。単一レンズ/多数撮像素子構成は従来の 3 板式カメラで

表 2.3 従来技術の整理

構成		手法	長所	短所
レンズ	撮像素子			
単一	単一	Auto focus, zoom(写真)	高画質	可動部有、静止画のみ
		Pan focus(動画)	可動部無し	低画質
		Auto focus(動画)	高画質	可動部必要
		Multi focus(複数撮影)	全焦点	静止画のみ
		Moving camera	視点移動, 高解像度化	静止画, 移動機構必要(静止画)
		Shutter mask	動きボケ補正	低画質, 低S/N, シャッタ機構必要(静止画)
		Pattern mask	全焦点, 動画	低解像度, 低S/N
		Partial iris	全焦点	移動機構必要(静止画), 低画質, 低S/N
		Moving lens	全焦点	移動機構必要(静止画), 低画質, 低S/N
		Moving sensor	全焦点	移動機構必要(静止画), 低画質, 低S/N
		Wavefront coding	全焦点, 動画	低画質, 低S/N
単一	多数	Auto focus(動画)	高画質	可動部必要, 光を複数の撮像素子に分割する光学素子必要
多数	単一	Lens array 複眼カメラ	視点移動, 高解像度化	低解像度, レンズ配置
		Micro lens array	視点移動, 高解像度化	低解像度, 要精密加工
多数	多数	Stereo camera	視点移動, 高解像度化	Auto focusの場合可動部必要, 位置合せ, 同期
		Pan + zoom 2眼, 多眼	拡張性, 高解像度化	Pan focus(焦点以外で低画質), Auto focusの場合可動部必要, 位置合せ, 同期
		Camera array	拡張性, 高解像度化	Pan focus(焦点以外で低画質)

あり、高解像度、広被写界深度画像の取得は難しい。多数レンズ／単一撮像素子構成は、高解像度化画像合成や焦点移動（全焦点画像の取得）が可能であるが、レンズアレイのレンズ性能や単一の撮像素子の制約により、画像が低画質、低解像度になってしまう。多数レンズ／多数撮像素子構成では、多種多様な構成が可能であり、高解像度な画像の合成や焦点移動（全焦点画像の取得）が可能である。ただし、撮像レンズをオートフォーカス仕様にした場合、カメラの位置合わせ（カメラキャリブレーション）やカメラ間の同期制御が難しくなる。また、オートフォーカスではなくパンフォーカスとした場合、カメラの位置合わせ（カメラキャリブレーション）やカメラ間の同期制御の問題は解決されるが、焦点以外では画像がぼけて低画質になり高画質化できない、という問題が生じる。

## 2.4 多眼技術と Wavefront Coding に注目した理由

高解像度・広被写界深度画像を取得するため、単眼技術の限界を打開する、更なる高解像度化技術が望まれている。高解像度化という切り口で、Wavefront Coding と多眼撮像技術をベースとして、アイデアを加えれば、お互いの長所と短所を補完できると考えられる。ただし、以下に示す多眼技術や Wavefront Coding が持つ特有の課題を解決することが前提条件となる。

多眼撮像技術の課題としては、

- ・合焦点画像であっても、複数の画像を単に合成しただけでは、効果的に高解像度化できないという問題がある。
- ・焦点外れの場合は、高周波成分が無くなるため、複数の画像を合成しても高解像度画像を生成できない、という問題が残る。

また、Wavefront Coding 技術の課題としては、

- ・現実のレンズ環境では、レンズの口径は有限であり収差もあることから、単一の PSF に基づく画像復元では、被写体距離によって復元画像にリングングなどの劣化が生じ、画質が劣化するという問題が残る。

## 2.5 まとめ

本章では、高解像度・広被写界深度画像の観点で従来技術をレンズと撮像素子の数で分類整理し、それぞれの長所短所について考察した。その上で、高解像度・広被写界深度画像を取得できる技術として、多眼技術と Wavefront Coding に注目する理由及びそれらの撮像技術の課題について述べた。

### 3 多眼カメラによる高解像度化手法

#### 3.1 はじめに

本章では、先ず多眼カメラの手法について考察する。従来の単眼カメラでは、撮像センサの画素サイズを光の波長以下にすることは難しいため、画素数を増やすためには、どうしてもセンササイズを大きくする必要があった。それに伴い、撮像レンズも大きくなり、カメラ自体が大型化するという問題があった。そこで、従来から複数の小型カメラを使用し、複数の画像を合成することで解像度を上げる研究開発が行われている[24], [25], [26].

#### 3.2 多眼高解像度化手法の原理

多眼カメラによる高解像度化は、複数の画像を重ね合わせることにより、撮像素子のピクセルより小さいサブピクセルの情報を算出することで実現する。多眼カメラの分類及びサブピクセルの説明を図 3.1 に示す。多眼カメラの要素技術は、カメラキャリブレーション（カメラの位置姿勢や特性を推定）、高解像度画像処理（視差推定、サブピクセルの算出）である。

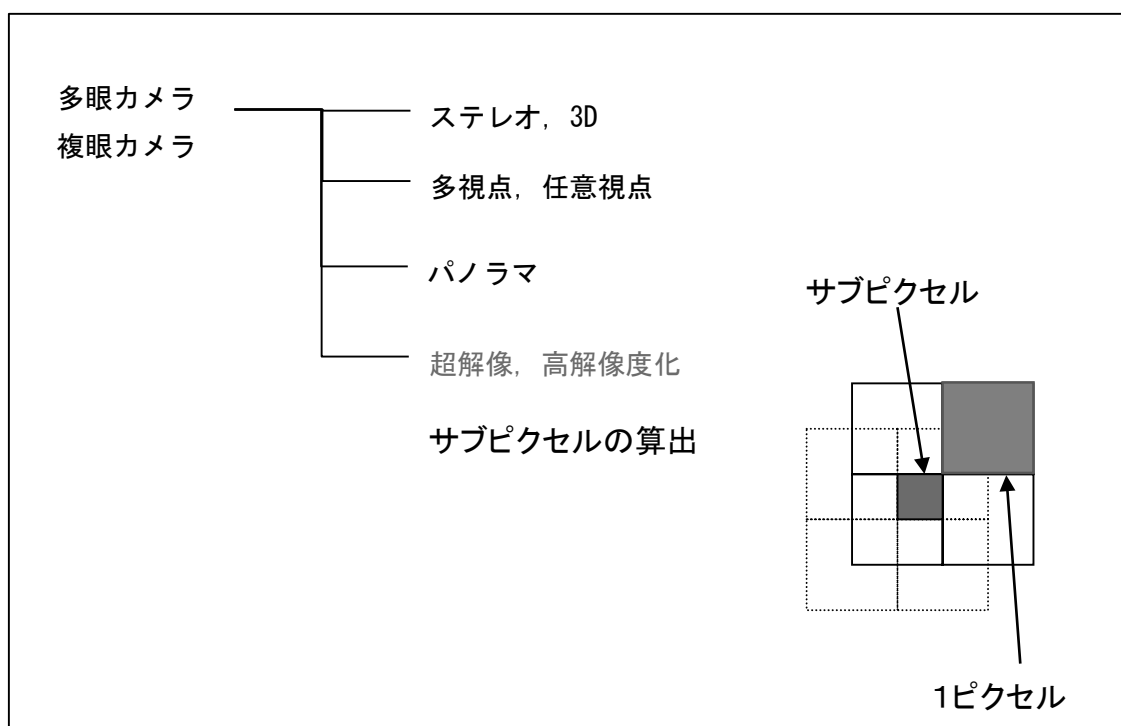


図 3.1 多眼カメラの分類

### 3.3 多眼による高解像度化の調査

複数の画像から 1 枚の高解像度画像を生成する場合、画像間の微小な位置ずれをサブピクセル精度で推定し、基準となる画像の画素間を他の画像の画素で補間する必要がある。多眼構成のカメラの場合、複数のカメラ画素の相対的な位置ずれは、カメラ配置、画像歪及び視差に依存する。カメラ配置、画像歪は、カメラキャリブレーションでカメラの内部パラメータ、外部パラメータを推定することにより補正を行う[27]。カメラキャリブレーション及びレンズ歪補正の詳細については、それぞれ付録 C、付録 D を参照のこと。

また、視差については、ブロックマッチング等により、撮影対象の距離、すなわち奥行きを正確に推定する必要がある。視差により、各カメラの画素の相対位置が変化するため、高解像度化するためには、正確な視差推定が必須となる。視差推定（視差マップの生成）については、付録 E、付録 F を参照のこと。

さらに、高解像度化に向けた課題を解決するために、カメラ構成を工夫することや、超解像のような画像処理アルゴリズムの改良が提案されている。カメラ構成の工夫では、不規則レンズ配置によりサンプリング点の縮退を回避することや各種光線取得カメラにより高解像度化するアルゴリズムが提案されている[28]、[29]。画像処理方法の工夫では、視差推定後、射影変換によって参照画像上の注目領域を基準画像上の注目領域に重ねることで、サブピクセル位置に対応するアルゴリズムが提案されている[29]。また、超解像に基づくアルゴリズムでは、高解像度画像、奥行き、画面全体の位置ずれを MAP 推定により推定、高解像度化する等、各種アルゴリズムが提案されている[30]、[31]、[32]、[33]、[34]。

#### 3.3.1 複眼カメラの不規則レンズ配置

カメラ構成の工夫として、レンズを不規則に配置することで、サンプリング点の縮退を回避することが提案されている[28]。図 3.2 に (a) 均一配置と (b) 不規則配置の場合を示す。こ

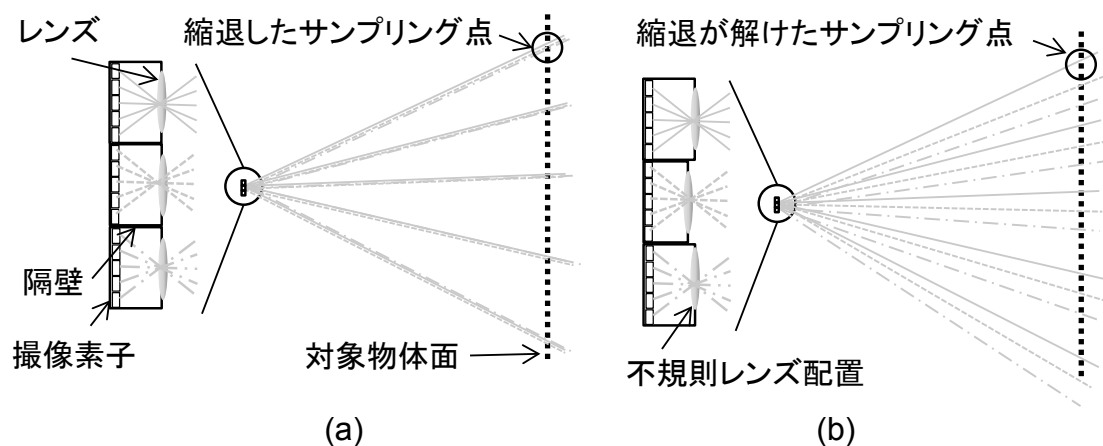


図 3.2 不規則レンズ配置

これは、複眼カメラでの報告であるが、多眼カメラにおいても同様なことが生じる。レンズの均一配置では、特定の距離においてサンプリング点が重複する。一方、各レンズピッチ間とレンズ・撮像素子間距離にランダム性を加えた不規則配置では、サンプリング点が分散し縮退が回避できる。

### 3.3.2 ライトフィールドカメラ

ライトフィールドカメラとは、ライトフィールドを取得するカメラであり、ライトフィールドは光線の状態を意味する。ここで光線の状態とは、適当に設定した2つの平面と光線との交点で指定される。各交点は2次元座標で指定されるためライトフィールドは4次元のデータである。具体的な撮像レンズ系の構成を図3.3(a)に示す。従来のカメラであれば結像レンズの焦点面に撮像素子を配置するのであるが、ライトフィールドカメラではマイクロレンズアレイを配置し、そのマイクロレンズアレイのすぐ後方に撮像素子を設置する。この構成により、結像面に収束してくる光線をマイクロレンズアレイで分離し光線の情報を取得することができる。複眼カメラと同様にレンズアレイを用いるが、結像のためのレンズを別に配置することで高画質化を図っている。ライトフィールドカメラは、取得した光線情報を演算することにより、任意の撮像距離の物体に焦点を合わせたり、カメラの視域の範囲内で自由に視点を移動したりすることができる[29]。ただし、一般に結像レンズは、光軸近傍で結像性能が最も良く、周辺では収差の影響により画質が劣化する。そのため、周辺解像度が劣化するという問題があった。

上記の問題を解決するマルチスケールレンズシステムの構成を図3.2(b)に示す[34], [35]。図3.2(a)のライトフィールドカメラと同様にマイクロレンズアレイを用いているが、これらのレンズアレイは光線の分離だけでなく、結像(収差補正)にも寄与している。すなわち、メインの結像レンズで生じる収差を各領域のマイクロレンズで収差補正するこ

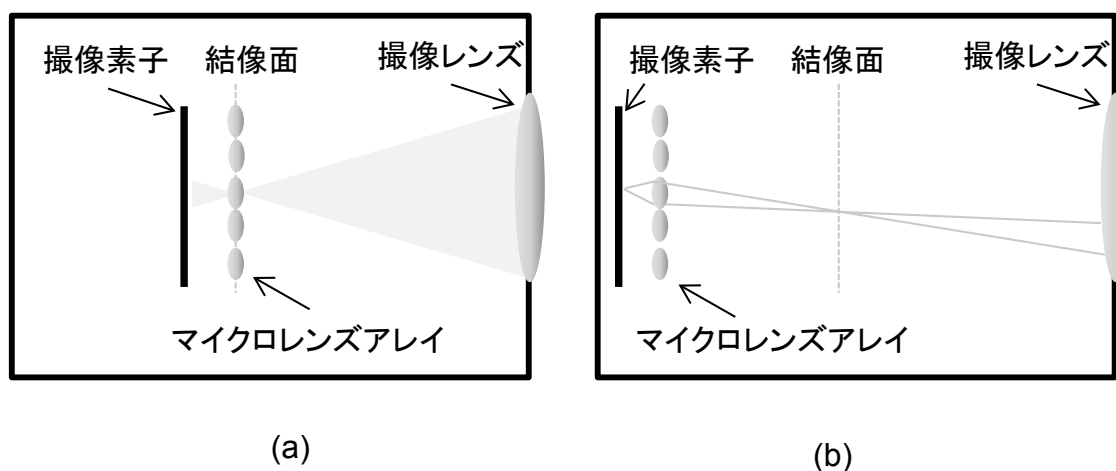


図 3.3 ライトフィールドカメラ



とにより、画質向上を図っている。

ライトフィールドカメラは、光線方向の情報を取得できるため、視差推定が可能であり、視差が画素ピッチの整数倍でないときには、サブピクセル情報を取得できるため、複数の画素情報から高解像度画像を合成することも可能である[36]。

### 3.3.3 多眼カメラの仮想焦点画像生成

多眼カメラの高解像度化に関して、画像処理方法の工夫では、視差推定後、射影変換によって参照画像上の注目領域を基準画像上の注目領域に重ねることで、サブピクセル位置に対応するアルゴリズムが提案されている[37]。提案手法では、多眼カメラからの多視点画像をステレオマッチングすることによって得られた視差に基づき、仮想焦点面を推定する。また、得られた仮想焦点面に対して各画像同士が一致する変形パラメータを求め、これらの変形パラメータを用いて多視点画像をすべて変形し、統合することで仮想焦点面画像を得ている。図 3.4 に多視点画像が 3 枚の場合の例を示している。しかし、カメラ台数が有限であるために、撮像距離とカメラ配置やカメラ台数によっては高解像度化できない場合もある。

### 3.3.4 超解像に基づく高解像度画像生成

高解像度画像、画面全体の位置ずれ、奥行きから推定される観測モデルを用いて、奥行きと高解像度画像の推定を行う等、各種アルゴリズムが提案されている[24]。

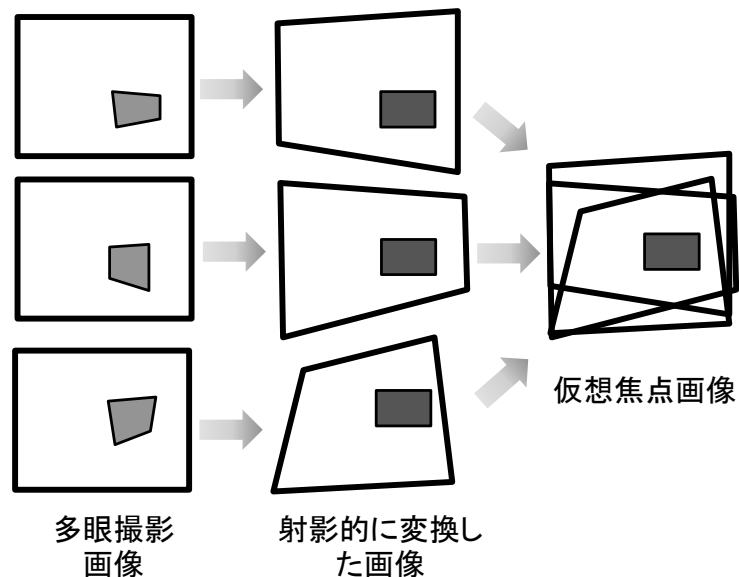


図 3.4 多眼カメラの仮想焦点画像生成

### 3.4 各手法の比較と問題点の整理

これまでに、様々な高解像度化手法が提案されてきた。表 3.1 に各手法の比較を示す。多眼の方式は、複眼カメラ、ライトフィールドカメラ及び多眼カメラの大きく 3 つの方式に分類される。また、高解像度化のための各種手段が提案されているが、撮像距離とカメラ配置（画素配置）による、サンプリング点の重複を回避するのに有効なのは不規則レンズ配置だけである。ライトフィールドカメラの実際の製品である Lytro では、撮像素子とマイクロレンズアレイの位置関係が完全には整列していない[38]。これは生産時の機械的な誤差が原因とも考えられるが、不規則レンズ配置と同等の働きをする。ただし、どちらも画素ズレ量が不規則になり必ずしも高解像度化に適切な画素ズレにはならない。

### 3.5 まとめ

本章では、多眼カメラの高解像度化に関する各手法について説明し、それぞれの方式の問題点を整理し考察した。従来の高解像度画像を生成する手法では、撮像距離とカメラ配置等によって高解像度化できないという問題があった。

表 3.1 各手法の比較

方式	手段	長所	短所
複眼カメラ	不規則レンズ配置	・サンプリング点の重複を回避→高解像度画像合成可能	・マイクロレンズの収差による画質劣化 ・画素ズレも不規則になり必ずしも高解像度化に最適な画素ズレにならない
ライトフィールドカメラ	マルチスケールレンズシステム	・結像性能(収差)の改善→高画質化 ・視差推定可能なのでサンプリング点が重複しなければ高解像度化可能	・撮像距離とカメラ配置等によって高解像度化できない
多眼カメラ	仮想焦点画像生成	・サンプリング点が重複しなければ高解像度化可能	・撮像距離とカメラ配置等によって高解像度化できない
	超解像	・サンプリング点が重複しなければ高解像度化可能	・計算量が大きい ・撮像距離とカメラ配置等によって高解像度化できない

## 4 高解像度化のための多眼カメラ技術の提案

### 4.1 はじめに

本章では、サブピクセル精度の画素の位置合わせのために、多眼カメラの構成及び相対的な画素配置を工夫し、視差推定エラーを考慮した奥行きに基づく高解像度画像生成アルゴリズムを提案する。

### 4.2 従来の多眼カメラの問題点

複数の画像から 1 枚の高解像度画像を生成する場合、画像間の微小な位置ずれをサブピクセル精度で推定し、基準となる画像の画素間を他の画像の画素で補間する必要がある。さらに高解像度化に対しては、画素の位置ずれ推定や奥行き推定は、必ず推定誤差を含むため、推定を誤った時の対処方法が必要である。また Quad-HD 等の高解像度な動画に対応するために、計算量の低減も大きな課題となっている。

本研究では、サブピクセル精度の画素の位置合わせのために、多眼カメラの構成及び相対的な画素配置を工夫し、視差推定エラーを考慮した奥行きに基づく高解像度画像生成アルゴリズムを提案する。これらの提案手法をハードウェアとして実装した多眼カメラシステムを開発し、解像度に関して定量的な評価を行った。

### 4.3 撮像距離と画素ズレの関係

合成画像の解像度変動については、物体までの撮影距離により視差が変化するため、カメラの画素ピッチの周期で変動している、と考えられる。図 4.1 に二眼ステレオカメラの場合の撮影距離と視差（画素ずれ）の関係を示す。撮影距離と視差の関係式は、

$$u_0 - u = B \times f \left( \frac{1}{L_0} - \frac{1}{L} \right) \quad (4.1)$$

$u_0$ : 撮影距離  $L_0$  の視差

$f$ : 焦点距離

$u$ : 基準カメラと参照カメラの中心を通る座標軸

$L_0$ : 基準の撮影距離

$B$ : 基線長

$L$ : 撮影距離

と表わすことができる。ここで、 $u_0$ : 撮影距離  $L_0$  の視差、 $u$ : 基準カメラと参照カメラの中心を通る座標軸、 $B$ : 基線長、 $f$ : 焦点距離、 $L_0$ : 基準の撮影距離、 $L$ : 撮影距離である。多眼カメラで生成画像の解像度変化と、上記関係式から計算された画素ずれは関係があると考え

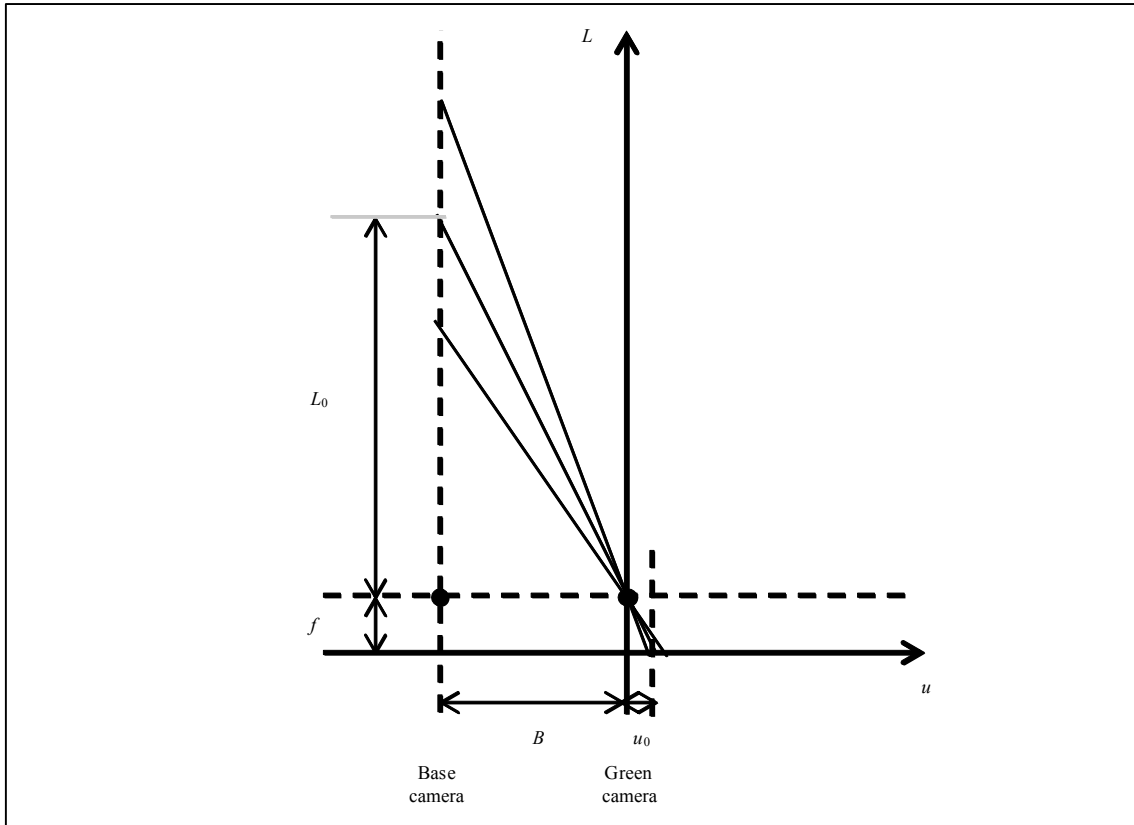


図 4.1 撮影距離と視差（画素ずれ）の関係

られる．すなわち，ステレオカメラのように二眼だけの場合，画素ずれが無い場合は解像度を上げることはできない．しかし，本提案の多眼カメラの場合は，予め多眼カメラの画素配置を工夫することにより，画素ピッチと撮影距離による合成画像の解像度の劣化及び変動を抑制することができる，と考えられる．

#### 4.4 適切なカメラ画素の配置

図 4.2 に高解像度化のためのカメラ画素の配置を示す．基準カメラであるカラーカメラに対して，水平，垂直に配置された緑 2 眼を一軸方向のみ半画素ずらしの位置に固定した．これらの画素配置により，被写体の撮影距離によらず，水平方向に配置した 2 眼（●と■）が垂直方向の解像度の向上に寄与する．同様に，垂直方向に配置した 2 眼（●と▲）で水平方向の解像度を向上させることができる．基準カメラの対角に配置した緑カメラ（★）も基準カメラと同様に，水平方向の画素（★と▲）が垂直方向の解像度の向上に寄与し，垂直方向の画素（★と■）で水平方向の解像度を向上させることができる．基準カメラと斜め  $45^\circ$  のカメラの画素（●と★）の関係は，基線長と垂直方向にずらした配置とすることで，解像度を向上させることができるが，図に示すように，斜め  $45^\circ$  のカメラの画素は，ベイヤカラーである基準カメラの緑画素を補完するように配置することもできる．さらに，緑カメラと

同様に、赤及び青カメラも基準カメラに対して半画素ずらしの配置にすることで、各々の色解像度向上に寄与する。

また、図 4.3 に撮像距離と画素位置の関係を示す。図の左上が本多眼カメラの画素位置の変化を示し、右上が従来の多眼カメラの画素位置の変化を示している。図の下側は、撮像距

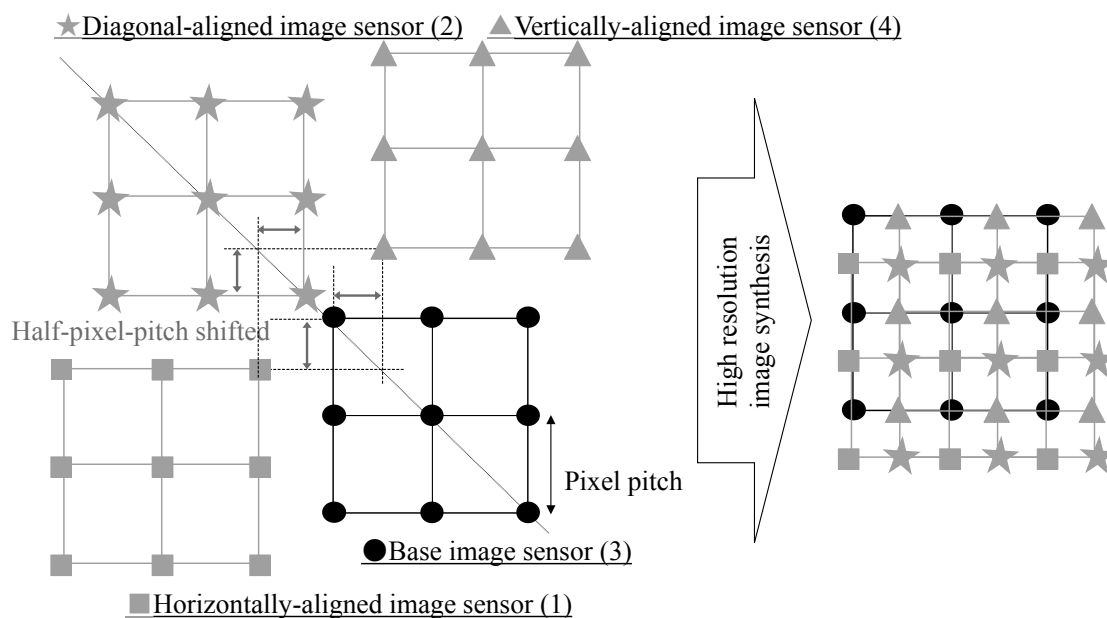


図 4.2 カメラ画素の配置

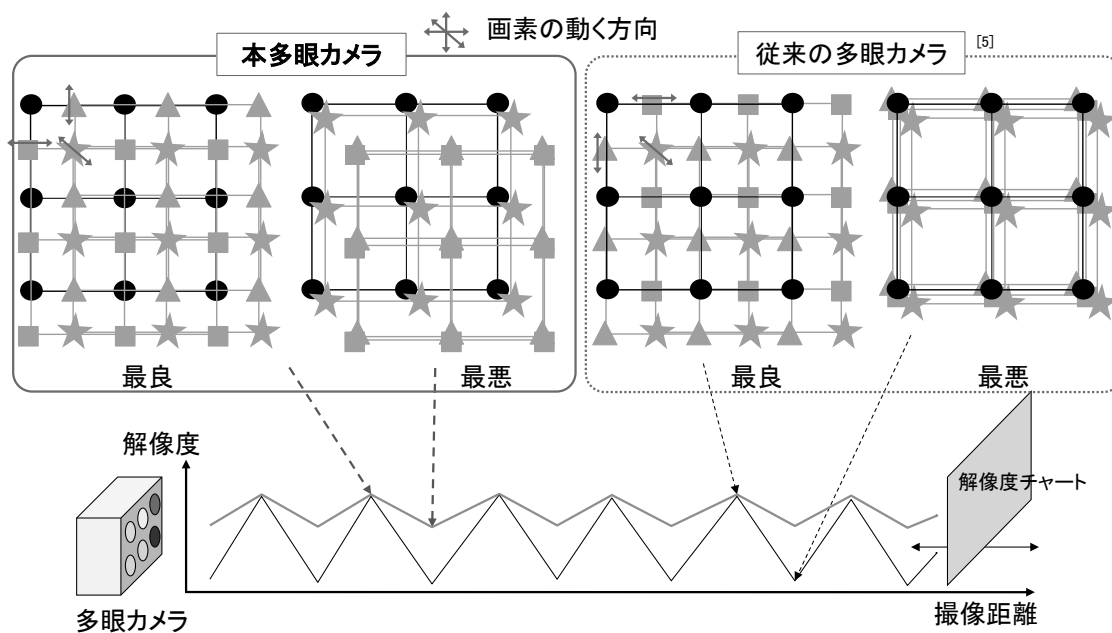


図 4.3 撮影距離と視差（画素ずれ）の関係

離と解像度の変化, 青線が本多眼カメラ, 黒線が従来の多眼カメラである. 図の上側の画素配置は, 本多眼カメラも従来の多眼カメラも, 最良の場合 (左側) と最悪の場合 (右側) を示している. 本多眼カメラも従来の多眼カメラも, 最良の場合, その解像度は同等になる. しかし, 画素位置と画素の移動方向が異なるため, 最悪の場合, 本多眼カメラでは, 画素が重なったとしても, 半画素ずれた位置にあるが, 従来の多眼カメラでは, 半画素ずれた画素情報を取得することができない.

#### 4.5 オクルージョン領域のエラー処理手法

図 4.4 を用いて, オクルージョンについて説明する. 図で上から背景, 中央が物体, 下が camera 1 と camera 2 という配置になっている. 多眼カメラでは, 手前にある物体が背後にある物体を隠して見えない領域 (オクルージョン) が生じる. オクルージョン領域では camera1 と camera2 で対応する画素が無い場合, 本来は対応していない画素を用いて多眼画像合成することにより, 偽の画像が生成され画質が劣化する. したがって, オクルージョン

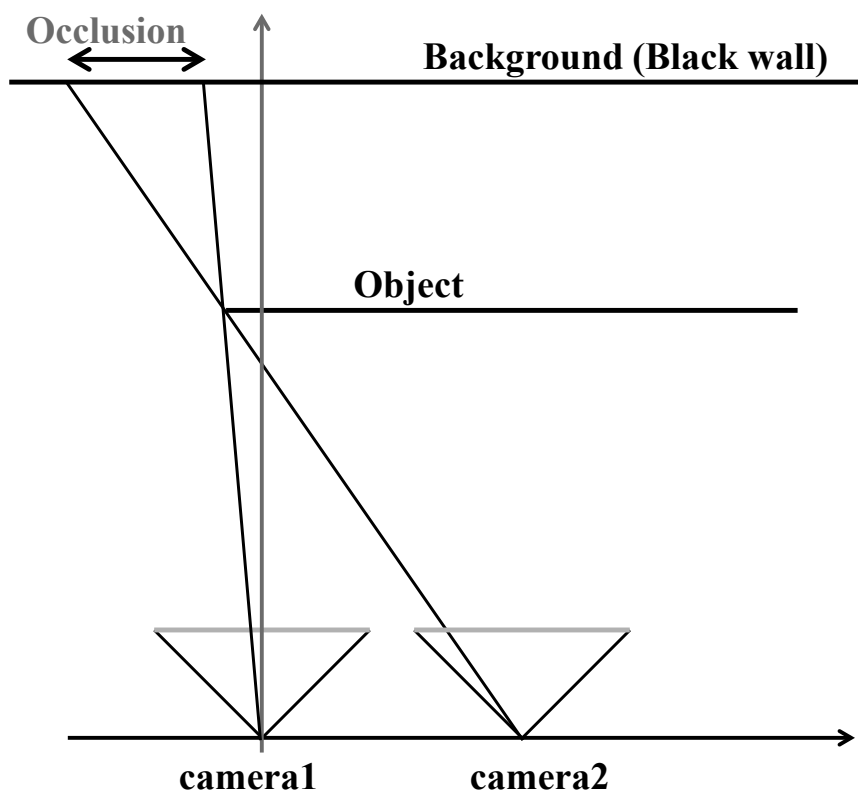


図 4.4 オクルージョン

領域における画質劣化を防止することが必要となる。

上記の問題を解決するために、本多眼カメラでは、視差の算出できなかった領域あるいは誤った視差を算出した領域に関して、基準カメラ (Bayer) 単眼画像を 4K 拡大した画像をそのまま出力する。これらの処理により高解像度化後の最終画像において、視差値の算出誤りやオクルージョンに起因する 2 重像を防止する事が可能となる。基準 HD カメラ画像の拡大処理は最近傍補間で行っている。

#### ①視差マップのエラー

視差マップ生成時に視差値が算出できなかった画素については、エラーフラグが立っている。この画素に対しては、基準 HD カメラを拡大した画素値をそのまま採用する。

#### ②視差値エラー

各画素において、高解像度化合成後に基準 HD カメラの拡大画像の画素値との比較を行う。高解像度化後の画素値が基準カメラ画像の画素値と大きく異なる場合、視差値が誤っている可能性が高い。そのため、高解像度化後の画素値と基準カメラの画素値の差が、レジスタに設定済みの閾値以上であった場合、基準カメラの画素値を採用する。

## 4.6 まとめ

本章では、サブピクセル精度の画素の位置合わせの提案手法及び視差推定エラー処理の提案手法を詳細に説明した。前者の提案手法では、従来と比較して合成画像の解像度を全般的に高くすることができ、またその変動も小さくすることができることを示した。また後者の提案手法では、特にオクルージョン領域でノイズを低減することができ、画質向上につながることを示した。

## 5 Quad-HD 多眼カメラシステム及び評価結果

### 5.1 はじめに

本章では，Quad-HD 多眼カメラシステムの詳細について述べる．多眼カメラシステムの課題と提案を表 5.1 にまとめる．

多眼カメラシステムの課題は，前章で説明したように，撮像距離（奥行き）に対して，各カメラの画素ずれが変化し，高解像度化のための半画素（半位相）シフトを維持することができないという点である．最悪の場合は，相対画素位置が重なり，高解像度化できないという結果になる．また 2 つ目の課題は，視差（奥行き）推定ができない領域（オクルージョン）で誤った視差推定値を用いて画像合成することによる合成画像のノイズである．これはオクルージョン領域に限らず，視差推定を誤った領域では画像合成のノイズが発生することになる．

上記の課題に関して，前者に対しては，視差を検出する方向（基線長）と垂直方向の画素ずれを半画素シフトに固定することを提案した．後者の課題に対しては，視差にエラー情報を付加，かつ単眼カメラ画像の画素と比較し，合成画像の画素を補正することを提案した．これらの提案手法を実装した Quad-HD 多眼カメラシステムを試作し，解像度テストチャートで多眼合成画像の画質評価を行った．また，オクルージョン領域でのエラー処理については，オクルージョンが特に目立つ撮影条件で，本多眼カメラを用いて，エラー処理有り無しで撮影した画像の画質を比較することで，提案手法の有効性を確認した．さらに，Quad-HD ディスプレイに多眼合成画像を動画像として表示し，動画像でも上記の提案は十分に動作していることを確認した．

表 5.1 多眼カメラシステムの課題と提案

課題	提案
<ul style="list-style-type: none"><li>・高解像度化のための半画素(半位相)シフト</li><li>・撮像距離(奥行き)に対して画素(位相)ずれが変化</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・視差を検出する方向(基線長)と垂直方向の画素ずれを半画素シフトに固定</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>・奥行き推定誤り，オクルージョン(奥行き推定不可)による合成画像のノイズ</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・視差にエラー情報を付加，かつ単眼カメラ画像の画素と比較し，合成画像の画素を補正</li></ul>



## 5.2 システム全体構成

Quad-HD (3840x2180 画素) 多眼カメラは, HD(1920x1080 画素)解像度のカラー (ベイヤ), 緑3眼, 赤, 青の各1眼, 計6眼の構成とした. 緑カメラを3眼使用した理由は, 高解像度に最も寄与する緑色に重点を置いたためである. また, 一眼のみカラーカメラとした理由は, 高解像度画像生成が失敗した場合に, カラーカメラの画像を単純拡大して補間するためである.

図 5.1 に多眼カメラシステムのブロック図, 図 5.2 に多眼カメラ部の外観, 図 5.3 にカメラ配置を示す. また, 表 5.2 に多眼カメラシステムの仕様を示す. 使用したレンズの MTF については付録 B を参照のこと. 多眼カメラを構成する計 6 眼のカメラは, 24mm 間隔に 2×3 で配置されている. CAM1, CAM2, CAM4 が緑カメラ, CAM3 がカラーカメラ, CAM5 が赤カメラ, CAM6 が青カメラである. CAM3 を基準カメラとして, 奥行きは基準カメラと水平に配置された CAM1 との視差によって推定する. それにより CAM2, CAM4, CAM5, CAM6 との視差を求める. また, 映像信号処理部は, 歪み補正部, 視差マップ生成部, Quad-HD 画像合成部, ガンマ補正部から構成されている. カメラパラメータを求めるためのカメラキャリブレーション及びレンズ歪み補正については, それぞれ付録 C, 付録 D を参照のこと.

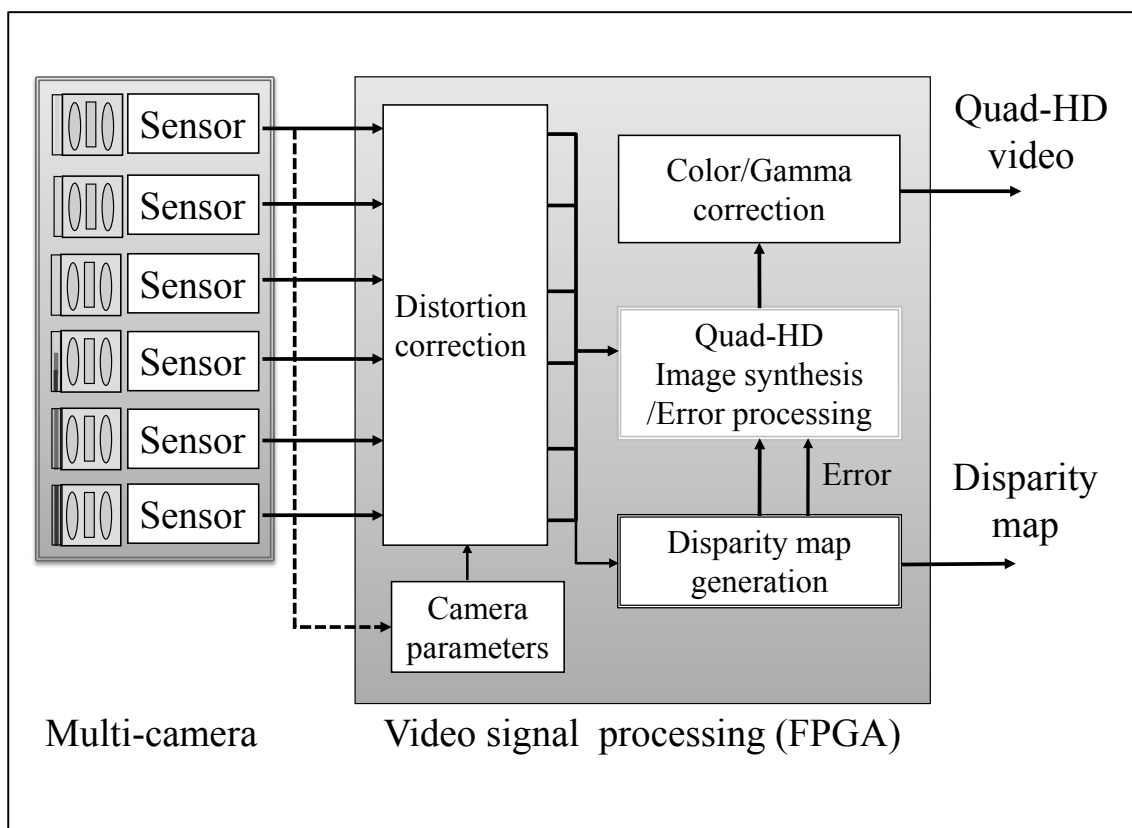


図 5.1 多眼カメラシステムのブロック図

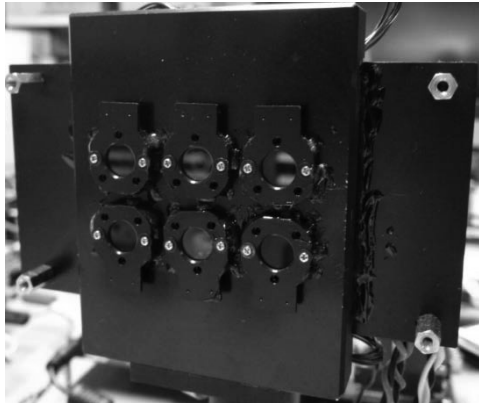


図 5.2 多眼カメラ外観

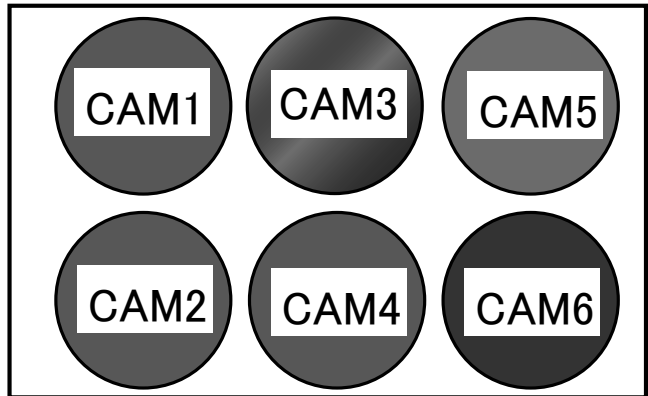


図 5.3 カメラ配置

表 5.2 多眼カメラシステムの仕様

Parameter		Typical value
Output image	Resolution	Quad-HD (3840x2160 pixels)
	Frame rate	60fps
Disparity map	Resolution	HD (1920x1080 pixels)
	Frame rate	60fps
Number of cameras		HD camera x 6 (Green x 3, Bayer, Red, Blue)
Lens	Focal length	4.7 mm
	F number	2.8
	Size (Diameter x Height)	7.0 x 4.3 mm
Sensor	Pixel size	2.7 x 2.7 $\mu\text{m}$
	16:9 array format	1920 (H) x 1080 (V) pixels
		6.0 mm diagonal (Type 1/3)

### 5.3 視差マップ生成

多眼カメラから出力された複数の画像を基に 1 枚の画像を生成するためには、奥行きまたは視差に応じて各カメラの画素位置をシフトして画素毎に合成する必要がある。図 5.4 に視差マップ生成部のブロック図を示す。図ではブロックサイズ 3x3 の場合を例に説明している。実際のシステムではブロックサイズ 9x9 を使用した。視差推定には、基準カメラ CAM3 と緑カメラ CAM1 の二つの画像を用いた。基準カメラのそれぞれの画素に対して、緑カメラの画素を走査し、緑色間で SAD(Sum of Absolute Difference)が最小となるブロックの位置を求める。その時の基準カメラのブロック位置との差が視差となる(付録 E, 付録 F 参照)。また、視差マップ生成部において、視差エラーの検出も行う、図 5.5 に視差エラーの検出方法を示す。図に示した計算式を満たす画素が探索範囲内に一つでも存在する場合は、その画素の視差をエラーと判定する。この視差エラー判定では、最小の SAD 値となる前後一画素は除外される。また、視差エラー検出パラメータである“uniqueness”を変更することにより、エラー検出感度を変更できる。ここで、視差エラーが検出された画素についてはエラーフラグを立てておく。また、図 5.6 に視差マップ生成のフローチャートを示す。

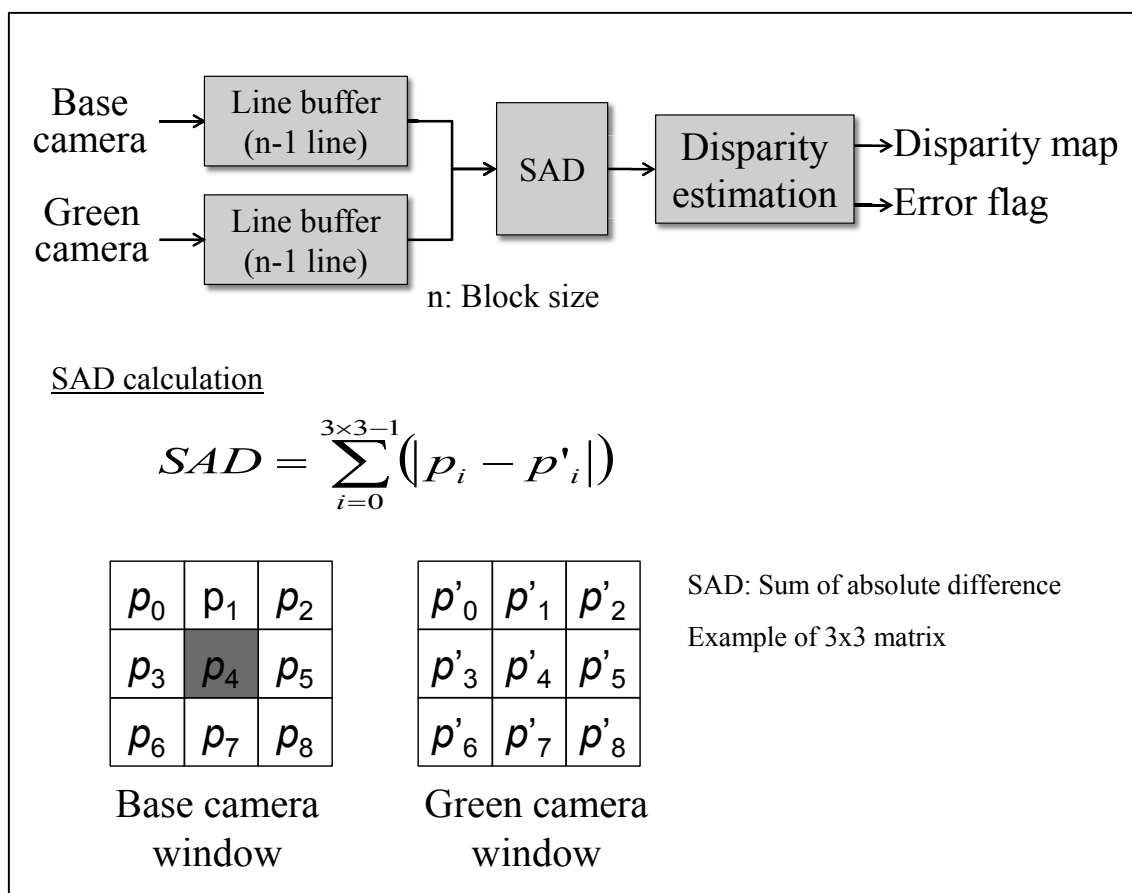
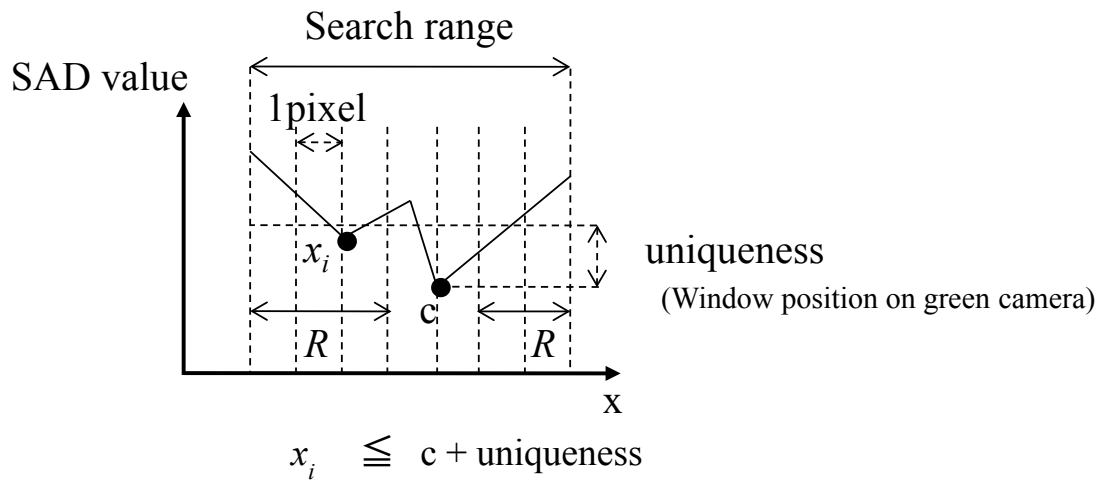


図 5.4 視差マップ生成部のブロック図



c:	Minimum SAD value
R:	Range for error detect
uniqueness:	Error detect parameter
$x_i$ :	SAD value of each x

図 5.5 視差エラー検出方法

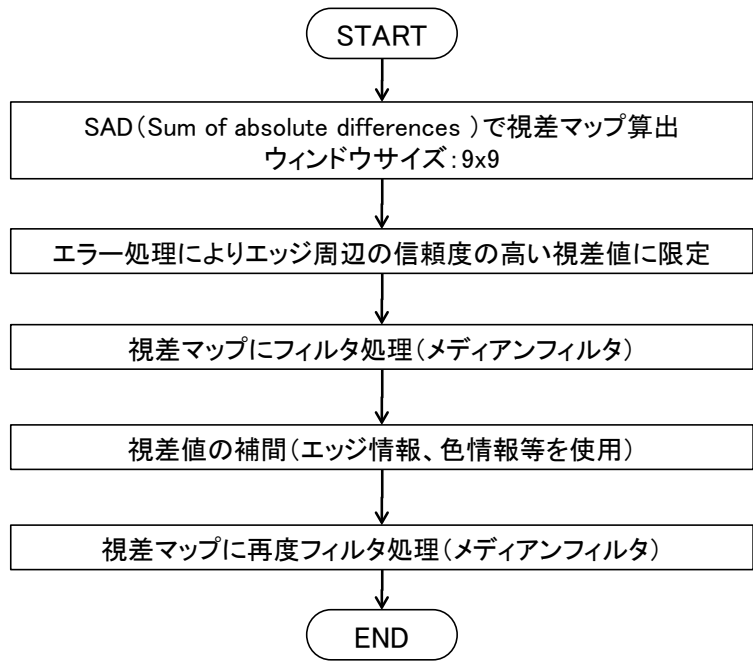


図 5.6 視差マップ生成フローチャート

## 5.4 奥行き対応高解像度画像合成

図 5.7 に高解像度生成部のブロック図を示す。高解像度生成は、カラー1眼と緑3眼の計4眼の撮影画像を合成して Quad-HD 画像に高解像度化する。合成する Quad-HD 画像の画素が各カメラ座標系でどこに位置するかを座標変換で求める。Quad-HD 画像の座標を  $(X_{QHD}, Y_{QHD})$ 、座標変換後の各カメラ座標を  $(X'_{CAMn}, Y'_{CAMn})$  ( $n=1, 2, 3, 4$ ) とすると、両者の関係は、

$$\begin{pmatrix} X'_{CAMn} \\ Y'_{CAMn} \\ 1 \end{pmatrix} = K_n R_n \begin{pmatrix} X_{QHD} + d \times tx_n \\ Y_{QHD} + d \times ty_n \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

で表すことができる。ここで、

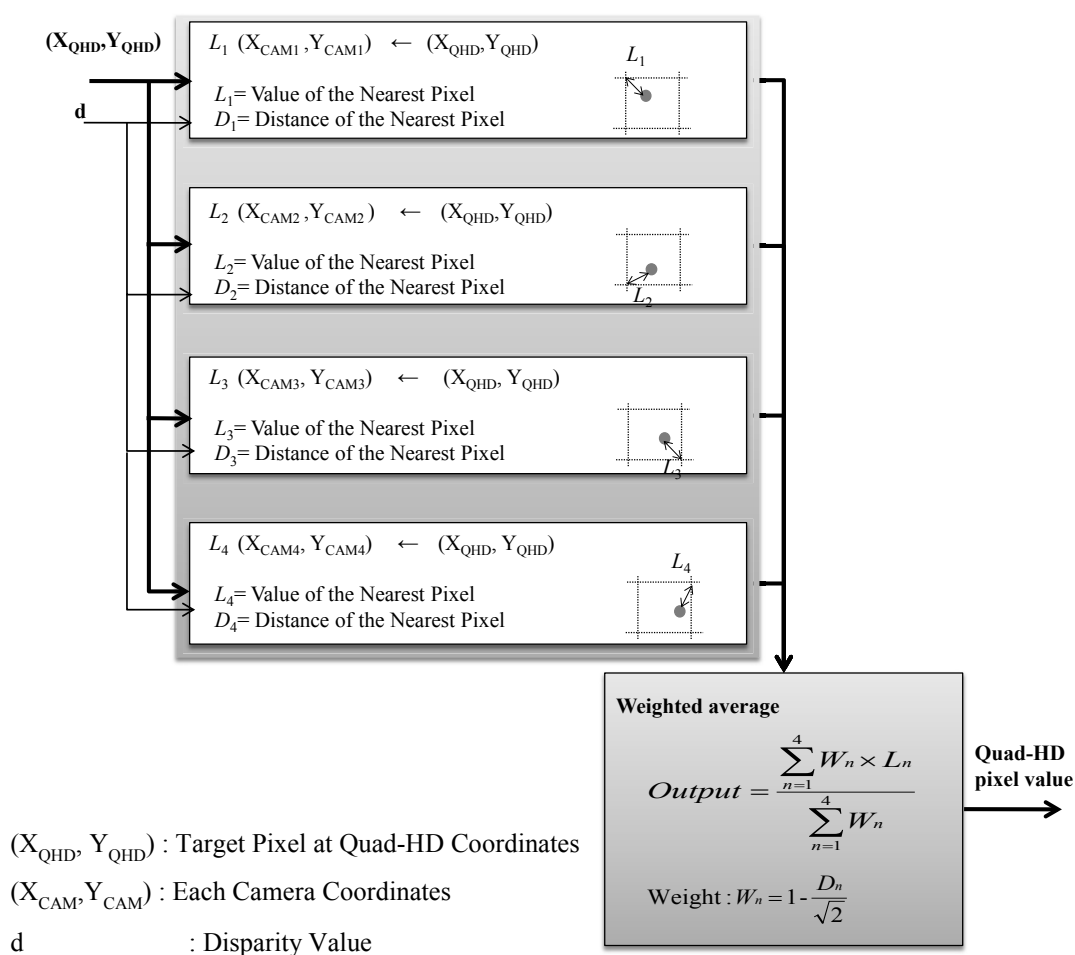


図 5.7 高解像度画像生成部のブロック図

$K_n$	: CAMn の内部カメラパラメータ (n=1, 2, 3, 4)
$R_n$	: CAMn の回転を表す外部カメラパラメータ (n=1, 2, 3, 4)
$d$	: 視差値
$t_{X_n}$	: CAMn の $x$ 軸方向の基線長補正係数 (n=1, 2, 3, 4)
$t_{Y_n}$	: CAMn の $y$ 軸方向の基線長補正係数 (n=1, 2, 3, 4)

で表すことができる. 次に, (5.1)式の関係式で求めた変換後の各カメラの座標から, 実際の各カメラ座標 ( $X_{CAMn}$ ,  $Y_{CAMn}$ ) で最も近傍に位置する画素 (最近傍画素) とそれぞれの距離  $D_n$  (n=1, 2, 3, 4) を求める. ここで,  $D_n$ は, カメラの画素間を1とした時の距離である. 求めた計四つの最近傍画素の輝度値  $L_n$  (n=1, 2, 3, 4) から距離による重み付け合成を行う. Quad-HD画像の画素の輝度値Outputは,

$$Output = \frac{\sum_{n=1}^4 W_n \times L_n}{\sum_{n=1}^4 W_n} \quad (5.2)$$

$$Weight : W_n = 1 - \frac{D_n}{\sqrt{2}} \quad (n=1, 2, 3, 4) \quad (5.3)$$

で求めることができる.

また, 高解像度生成部と連携して動作する視差エラー処理部のブロック図を図 5.8 に示す. エラーが無い場合は, 図中(a)の経路を通り, 高解像度化した画素値を採用する, エラーがある場合は, 視差エラー処理部で, 次の二つの処理を行う.

一つ目は, 視差マップのエラーに関する. 図中(b)に示すように, エラーフラグが立っている画素に対しては, 図中(c)の経路を通り, 基準HDカメラを拡大した画素値をそのまま採用する.

二つ目は, 視差値エラーに関する. 図 5.8 (d)に示すように, 各画素において高解像度画像生成後に基準HDカメラの拡大画像の画素値との比較を行う. 高解像度化後の画素値が基準カメラ画像の画素値と大きく異なる場合, 視差値が誤っている可能性が高い. そのため, 高解像度化後の画素値と基準カメラの画素値の差が, レジスタに設定済みの閾値以上であった場合, 図中(c)の経路を通り, 基準カメラの画素値を採用する. なお, 基準HDカメラ画像の拡大処理はバイリニア補間で行っている.

以上の視差エラー処理により高解像度化後の最終画像において, 奥行き の推定誤りやオクルージョンに起因する二重像を防止する事が可能となる. また, 視差が精度良く推定できる画像周波数の高い部分のみを高解像度画像生成を行い, 画像周波数の低い部分は, 視差推定エラー領域として扱い, オクリュージョン領域と同様に基準カメラの画像で補間することが可能となる.

以上の視差エラー処理により高解像度化後の最終画像において, 奥行き の推定誤りやオ

クレーションに起因する二重像を防止することが可能となる。また、視差が精度良く推定できる領域は高解像度画像生成を行い、テクスチャのない領域などは、視差推定エラー領域と判定される可能性が大きくなり、オクルージョン領域と同様に基準カメラの画像で補間することが可能となる。

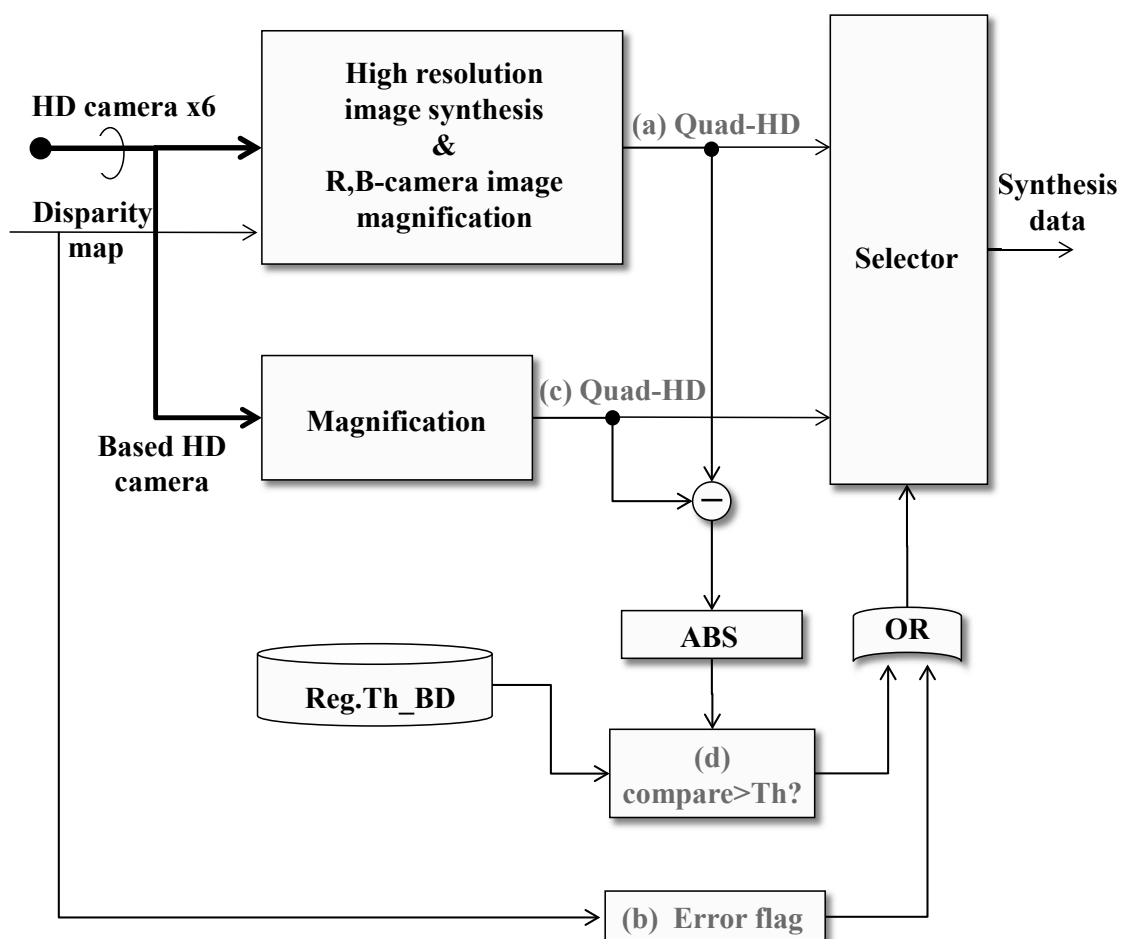


図 5.8 視差エラー処理部のブロック図

## 5.5 Quad-HD 出力

多眼カメラの出力を QuadHD モニタの映像入力仕様に合わせるため、高解像度合成ブロックから入力された4系統多重データを4画面分割して DVI ポートから出力する。図 5.9 に出力処理部のブロックを示す。

図 5.9 に示すように、148.5MHz、8bit の HD レート画像の4系統（トータルのレートは Quad-HD レート）を並び替えて、画面を4分割して出力する。これは使用した Quad-HD ディスプレイの仕様に合わせた形式で出力するためである。

また、Quad-HD 出力部では、表示用の色変換も行っている。表示用色変換では、3行4列の行列式を用いて RGB 値に対し色変換処理を行った。処理手法自体は視差マップ生成用色変換（付録 F 参照）と同様であるが、前者が基準以外のカメラ特性を基準カメラに合わせるように色変換を行ったのに対し、ここでの色変換処理では表示するディスプレイ特性に応じた色変換処理を行う必要がある。表示用ディスプレイとして sRGB の色域であることを想定している。なお、視差マップ生成用色変換と同様、被写体の光源が変化した場合には再度変換行列を算出する必要がある。

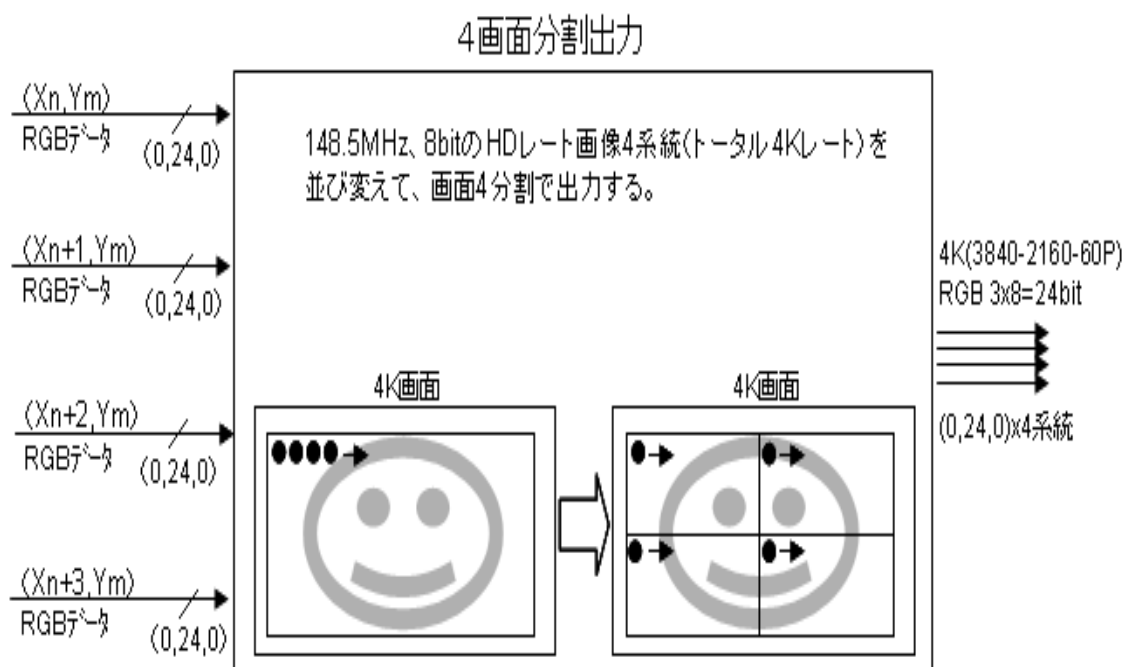


図 5.9 出力処理



## 5.6 多眼カメラシステムによる合成画像の評価結果

多眼カメラシステムは汎用のFPGA評価基板5枚で構成されている。表5.3にその一覧を示す。また、図5.10に多眼カメラシステムの信号処理基板の外観及び図5.11に実験装置の配置の写真を示す。この多眼カメラシステムで撮影した画像の解像度測定を行った。

画像解像度の評価方法については、CIPA規格DC-003「デジタルカメラの解像度測定方法」[39]に準じた。使用したCIPA解像度チャートを図5.12に示す。

表 5.3 使用したFPGA基板の一覧

機能ブロック	基板型番	搭載FPGA (DSP数, BRAM数)	搭載外部メモリ
カメラ制御	TB-5V-LX110-DDR2	Virtex5 LX110T (DSP64, BRAM128)	-
視差マップ生成(SAD版)	TB-5V-LX330-DDR2	Virtex5 LX330T (DSP192, BRAM324)	-
視差マップフィルタ	TB-5V-LX110-DDR2	Virtex5 LX110T (DSP64, BRAM128)	-
高解像度化合成	HIBIKI-X	Virtex5 SX240 (DSP1056, BRAM516)	DDR2 SO-DIMM, SDRAM
	TB-5V-SX95T- PCIEXP	Virtex5 SX95T (DSP640, BRAM244)	DDR2 SO-DIMM, SDRAM
出力	TB-5V-LX220-DDR2	Virtex5 LX220T (DSP128, BRAM192)	DDR2 SO-DIMM, SDRAM

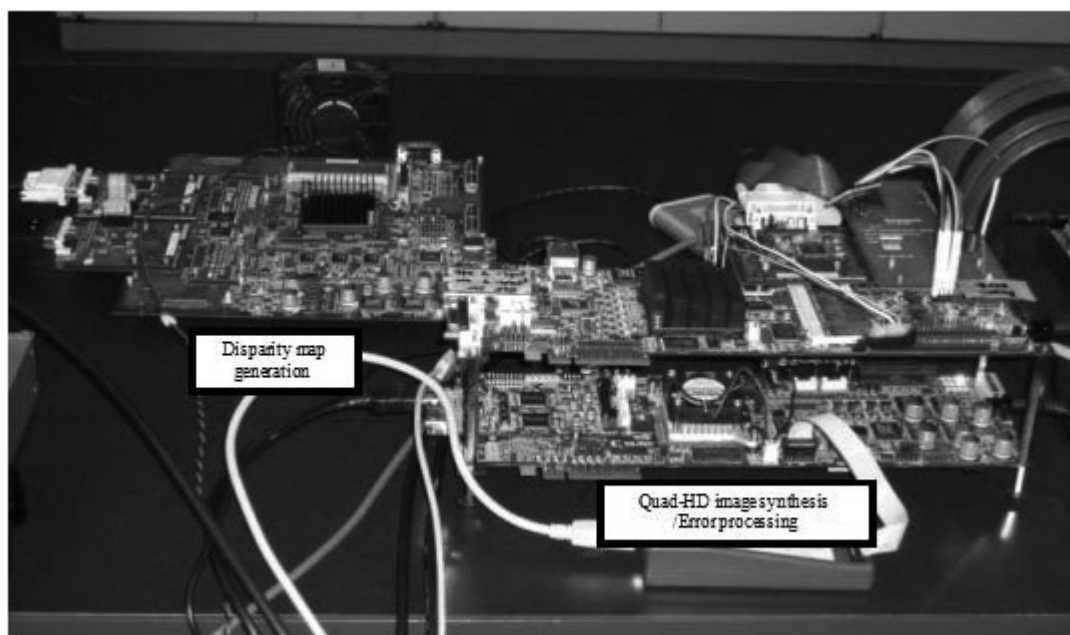


図 5.10 多眼カメラシステムの外観

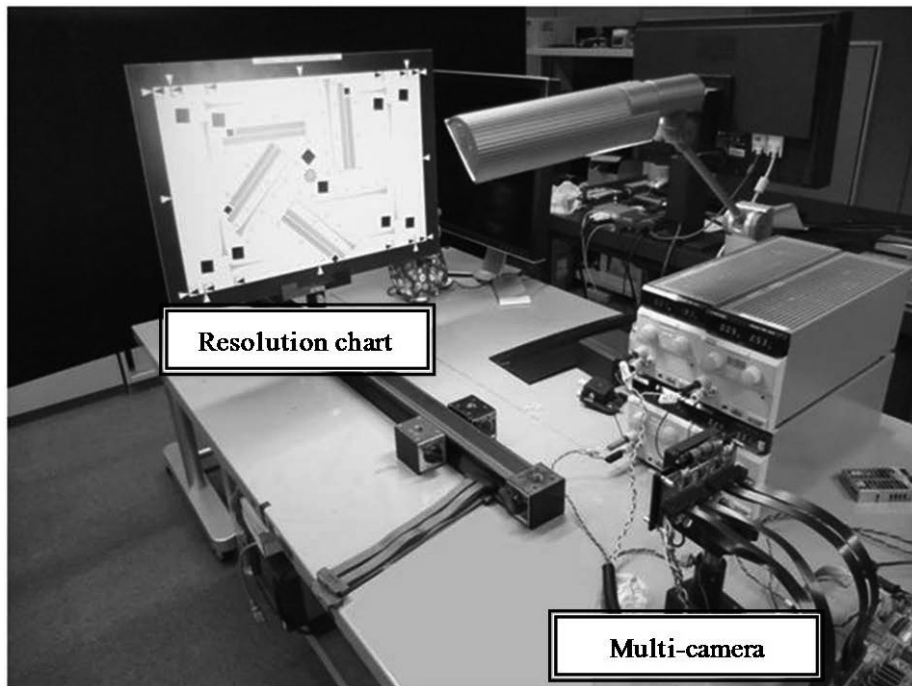


図 5.11 実験装置

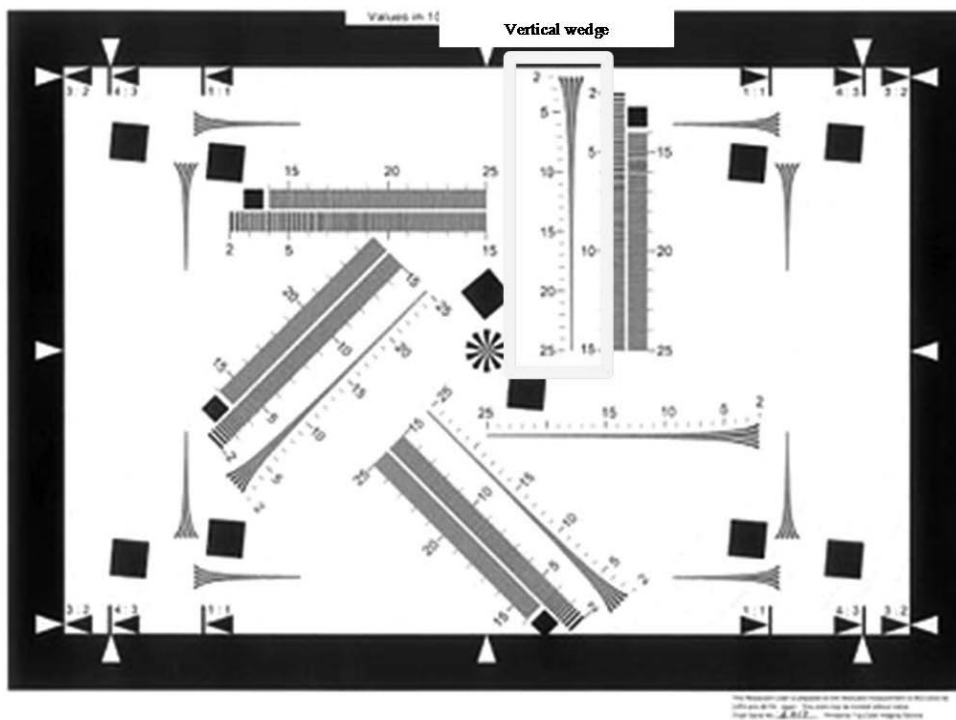


図 5.12 CIPA 解像度チャート

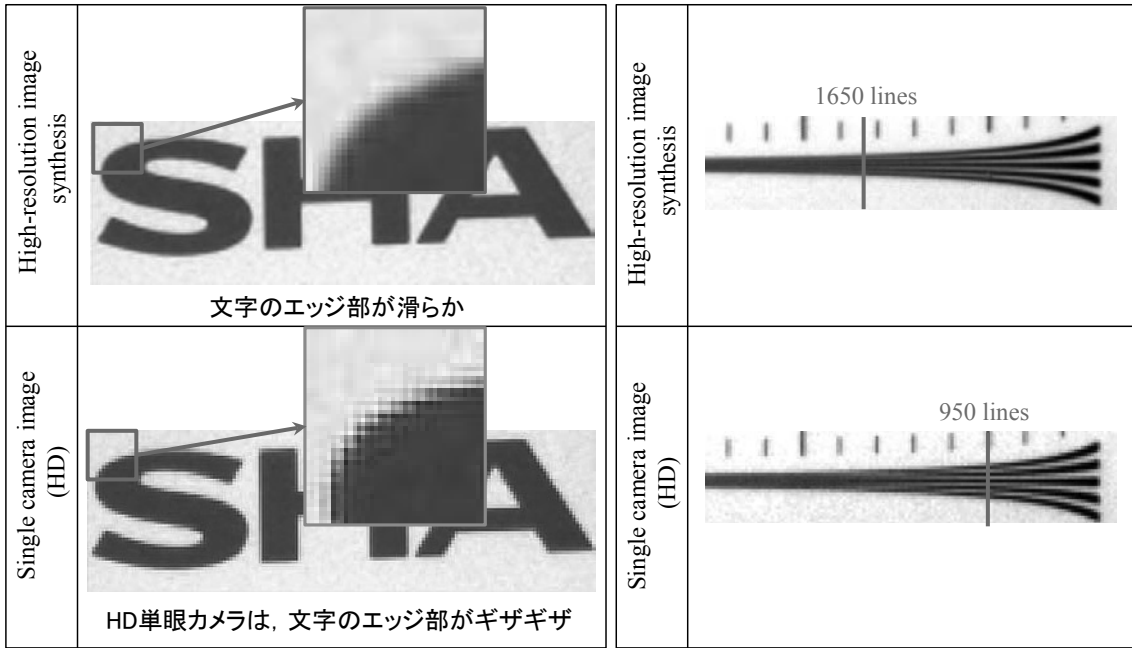


図 5.13 高解像度画像生成の実験結果

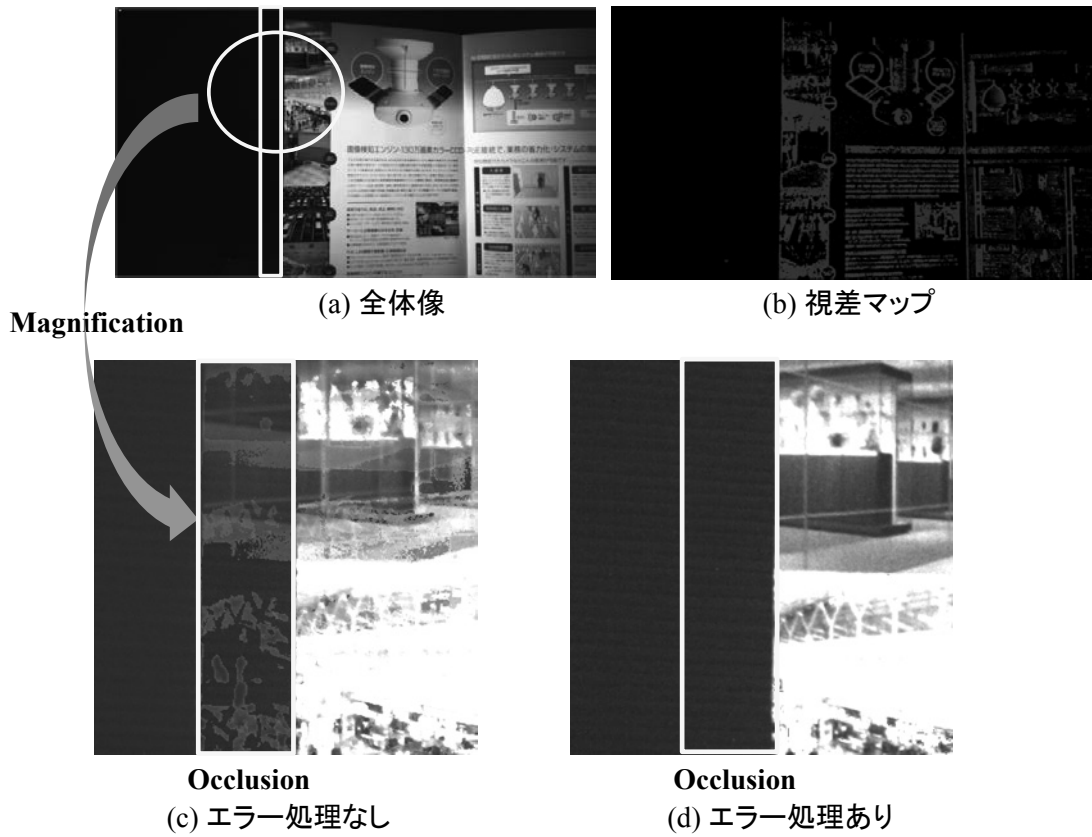


図 5.14 エラー処理の実験結果

図 5.13 に撮影距離 100 cm で撮影した HD 単眼画像と生成した高解像度画像の解像度測定結果を示す。HD 単眼カメラは、文字のエッジ部がギザギザであり、解像度も 950 本という結果であった。一方、高解像度画像は、文字のエッジ部が滑らかであり、単眼の Quad-HD カメラと同等の 1650 本という解像度が得られた。

図 5.14 に高解像度画像のエラー処理結果を示す。図 5.14(a) に撮影した被写体の全体像を示す。被写体は、背景の黒い壁紙の前に配置したカタログである。そのカタログは、ページの周辺まで写真で埋められている。エラー処理無しの場合には、図 5.14(c) に示すように、オクルージョン領域で、奥行き推定を誤りカタログ上の画素を使って画像が合成され、二重像のようにになっていることがわかる。エラー処理を行うことにより、図 5.14(d) に示すように、オクルージョン領域において画像合成の失敗を回避できた。

次に、物体の撮影距離を 100cm から 110cm の間で変化させた場合の生成画像の解像度を測定した結果を図 5.15 に示す。また半画素シフトの有無をパラメータとした結果を図 5.16、図 5.17 に示す。図 5.17 より、撮影距離に関わらず合成画像の解像度がほぼ 1500 本を上まわっていることがわかる。また、生成画像の解像度は、1500 本から 1700 本の間で周期的な変動を有していることもわかった。最終的な生成画像の最大解像度として単眼解像度の約 1.7 倍、1733 本という結果が得られた。図 5.15 より、センサ及びレンズの半画素ずらし調整を

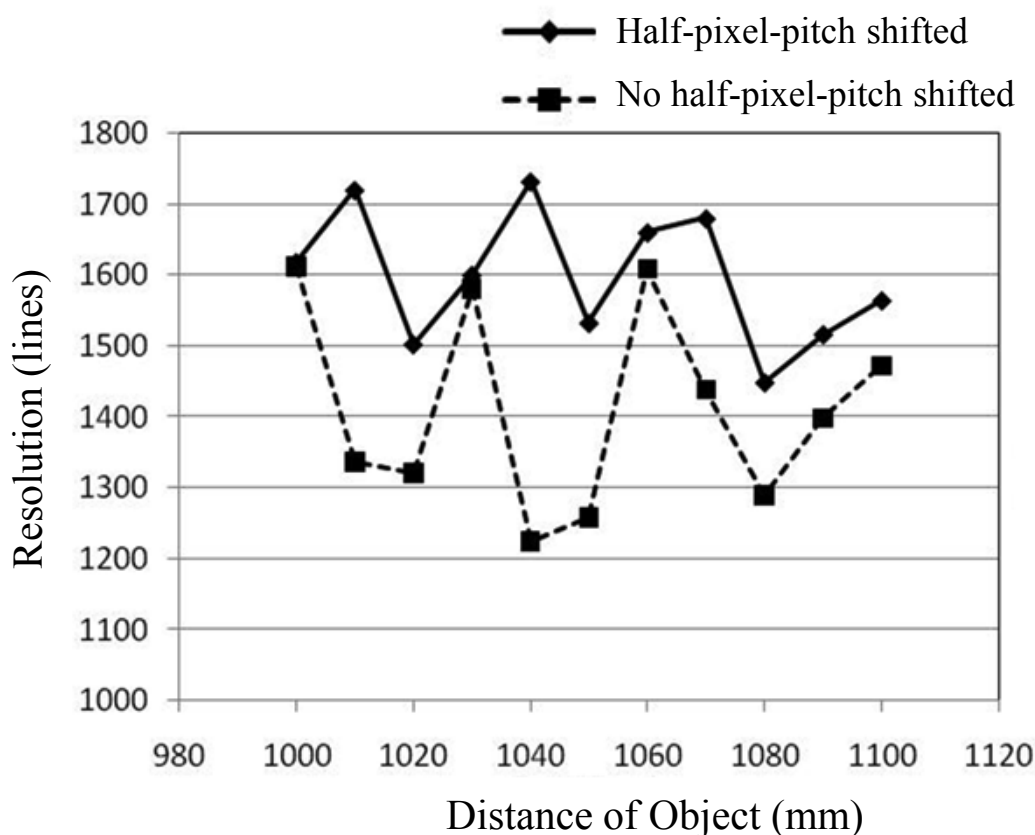


図 5.15 撮影距離と生成画像の解像度との関係（半画素シフト有無の比較）

行わない場合、奥行きに対応した多眼合成画像の解像度の変動が大きいことがわかる。また、半画素ずらし配置により、画素ピッチによる解像度変動を約半分程度に抑制できていることがわかった。

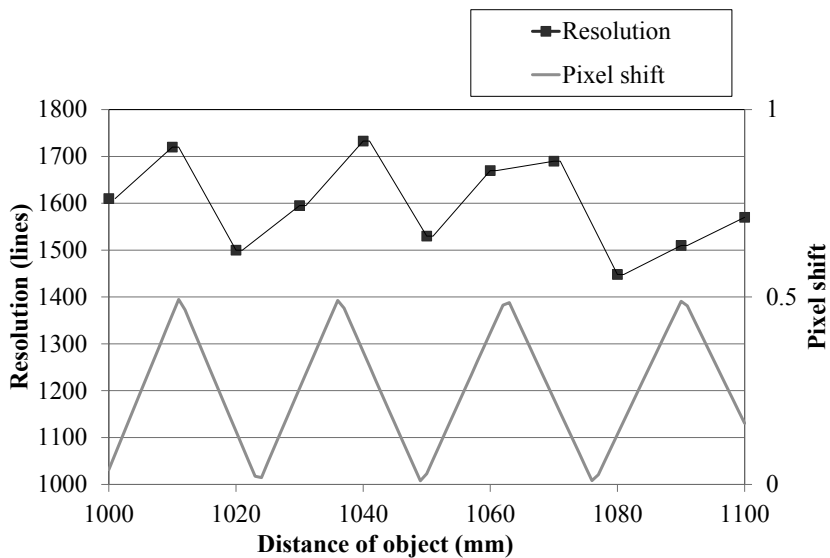


図 5.16 撮影距離、解像度及び画素ずれの関係

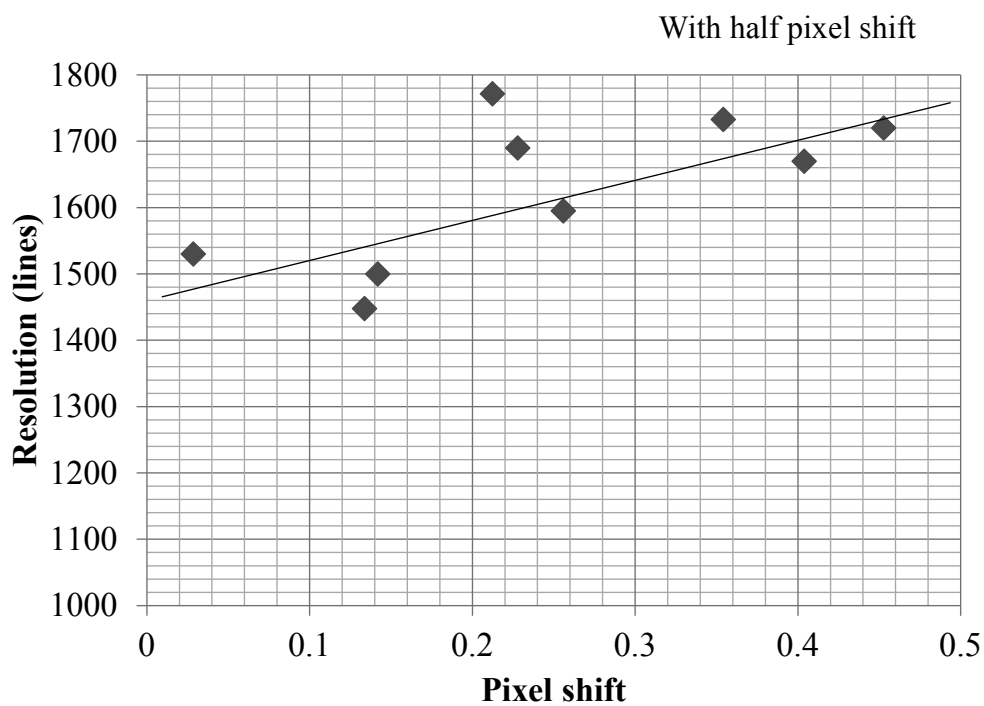


図 5.17 画素ずれと解像度の関係

## 5.7 まとめ

本章では、Quad-HD 多眼カメラシステムについて詳細な説明を行った。

試作した Quad-HD 多眼カメラシステムは、HD カメラ 4 眼で撮影した映像を合成して Quad-HD の映像を生成するものであり、以下の機能が搭載されている。

### ①半画素ずらし配置の多眼カメラ

カメラ（イメージセンサ+レンズ）をピクセル精度（ $2.4\mu\text{m}$ ）で半画素ずらして配置。

### ②HD/60fps 視差マップ生成

左右 2 眼のカメラで撮影した映像をステレオマッチング（SAD）し、被写体までの距離情報を算出する。HD サイズ 60fps の視差マップをリアルタイムで生成可能。

### ③カメラキャリブレーション&補正

事前にカメラキャリブレーションで算出したカメラパラメータから、各カメラのレンズ歪みと、カメラ間の回転や並進を補正可能。

### ④多眼高解像度化合成

上記の視差マップとカメラパラメータから、合成する画素データを各カメラから選定、重み付け合成することで、4 台の HD カメラで撮影した映像から Quad-HD の映像を生成可能。

上記の多眼カメラシステムで、予め多眼カメラの各画素位置を半画素シフトの関係になるよう機構的に調整することにより、単純なブロックマッチング計算だけで、Quad-HD 高解像度画像を生成した。その Quad-HD 合成画像を解像度チャートにより画質評価を行った。その結果、提案の多眼カメラ手法によって HD6 眼から Quad-HD 解像度が達成された。また、半画素シフト配置により、撮影距離による合成画像の解像度変化を抑制することができた。

さらに、提案の視差エラー処理手法により、奥行推定できない領域での画像合成エラーを防止することも実現できた。実画像で評価した結果、画質の改善を確認できた。

## 6 Wavefront Coding による被写界深度拡大手法

### 6.1 はじめに

本章では, Wavefront Coding (WFC) による被写界深度拡大手法について述べる. WFC では, 撮像レンズの中に位相板と呼ばれる光学素子を挿入し, 像に所定のボケを加えることで撮像距離によらない全焦点画像を生成できる技術である.

### 6.2 Wavefront Coding の原理

被写界深度を拡大する方法として, WFC と呼ばれる技術が研究されている [3], [40], [41]. WFC では, 3 次位相マスクをレンズ系の中に挿入することで, 撮像距離によって変化しない単一の点拡がり関数 (Point Spread Function: PSF) によって決定されるボケを撮像する中間画像に加える. その中間画像に対して画像復元処理を行うことで, 被写界深度を拡大できることが文献 [3] で理論的に示されている.

WFC の基本となる手法では, 図 6. 1, 図 6. 2 に示すように, 3 次位相マスクをレンズ系の中に挿入し, 意図的にぼけを加えた中間画像に対してデジタル信号処理による画像復元を行う. これにより, 被写界深度を拡大させる. 波面上の座標を  $u, v$  としたとき挿入する位相マスクの位相分布が,

$$\phi(u, v) = \alpha(u^3 + v^3) \quad (6.1)$$

で表される 3 次位相マスクを用いることで, 被写体の距離に依存する焦点ずれの影響を原理

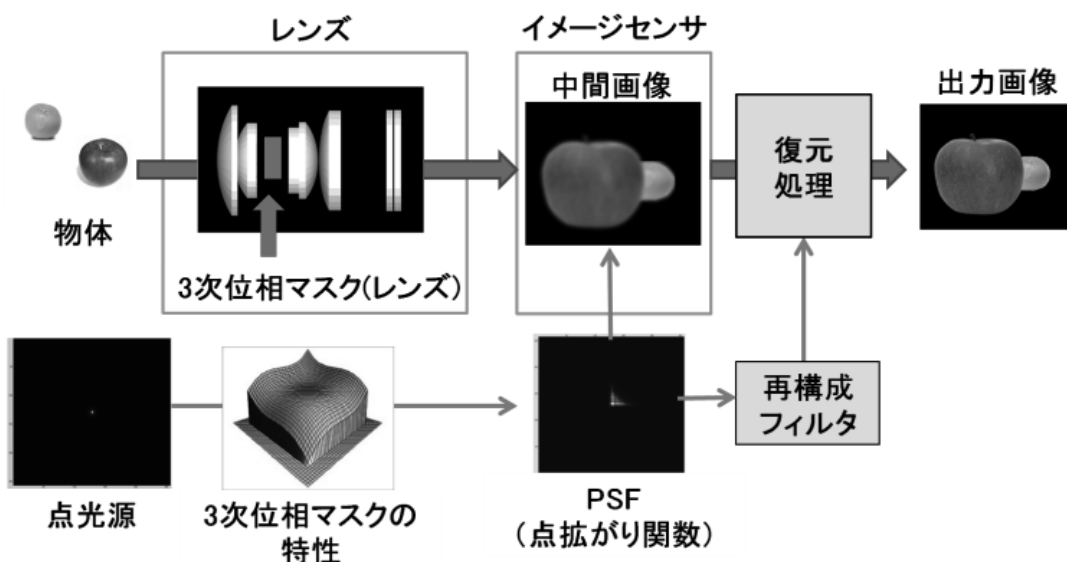


図 6.1 WFC の概要

3次位相マスク	合焦面	非合焦面 (近)	非合焦面 (遠)
なし			
あり (WFC)			

図 6.2 PSF (点広がり関数) の変化

的に小さくできる. ここで,  $\alpha$  は位相マスクの焦点ぼけ量を決定する定数である. すなわち, 撮像される画像のぼけ方は撮像距離に依存せず, 位相マスクに対応する単一のPSFのみによって決定される. そして, 後段のデジタル信号処理では, そのPSFによって求まる再構成フィルタを用いて鮮明な画像復元が可能となる.

### 6.3 Wavefront Coding による被写界深度拡大の調査

図 6.3 に, WFC に使用する位相マスクの比較を示す. 位相マスクとしては, 3 次関数の他に 3 次関数と 2 次関数の組合せや 2 次関数だけを使用するものがある. 純粋な 3 次位相マスクは製造が難しく高価なものとなるため, 光学レンズと同様な製造方法が適用可能な 2 次関数の位相マスク等が量産用の WFC レンズに使用されることが多い.

Rectangular cubic	Generalised rectangular cubic	Radial quartic
$\theta(x, y) = \alpha(x^3 + y^3)$	$\theta(x, y) = \alpha(x^3 + y^3) + \beta(x^2y + xy^2)$	$\theta(x, y) = \alpha(x^2 + y^2)$

図 6.3 WFC に使用する位相マスクの比較



### 6.3.1 最適化位相マスクを用いた WFC

3 次位相マスクを用いた WFC の被写界深度及び画角の問題を解決するために、WFC の位相マスクの分布関数をべき級数 $\varphi(u, v) = \sum_{n=0}^K (\sum_{m=0}^n C_{nm} u^m v^{n-m})$ で展開し、展開係数を最適化アルゴリズムにより求めた最適化位相マスクを用いて、広い被写界深度及び大きな画角での復元画像の画質を改善できることが報告されている[41], [42].

### 6.3.2 コマ収差を用いた低コスト WFC

全焦点画像が取得できる WFC は監視カメラへの応用に適している. ただし, 夜間用の監視カメラは赤外光を用いるため, 赤外光に対応した 3 次位相板が必要となる. しかしながら, 赤外光用 3 次位相板は可視光用よりもさらに製作が困難で高価となる. また, 赤外光領域では温度変化によってボケが生じるため, 恒温システムを使用して温度を一定に保つ必要があり高価なものとなる. これらの課題を解決するために, レンズシフトやレンズの傾斜によって発生するコマ収差を 3 次位相板として用いることが提案されている[43]. 詳細については後述する. その実験システムのブロック図を図 6.4 に, 撮像レンズを図 6.5 に示す. また, コマ収差を用いた WFC をズームレンズに適用することも報告されている[44].

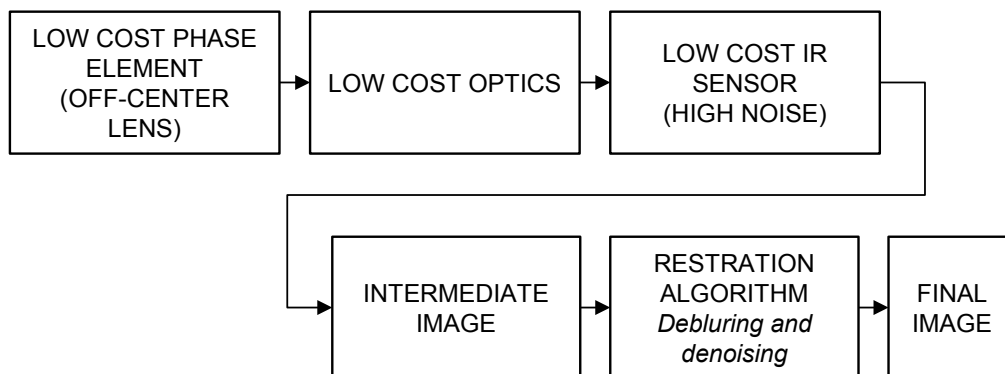


図 6.4 コマ収差を用いた WFC の実験システムのブロック図

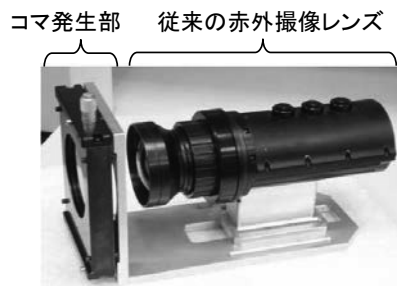


図 6.5 コマ発生部と従来の赤外撮像レンズ

### 6.3.3 4次位相板を用いた WFC

3次位相板を製作するのが困難であり高価なものとなるため、図 6.6 のように偶数次である 4 次位相板を 2 枚重ねて使用し、その 4 次位相板の中心軸をずらすことで 3 次位相板の機能を実現することが提案されている[45]. 4 次位相板のズレ量を制御することにより、3 次位相板の位相変化  $\alpha$  の大きさを調整することができる.

### 6.3.4 液晶空間変調素子を用いた WFC

従来の 3 次位相板は位相変化が固定で汎用性がないという問題がある. この問題に対して、図 6.7 のように液晶空間変調素子を 3 次位相板として用いることで被写界深度の深さを調整することが提案されている[43].

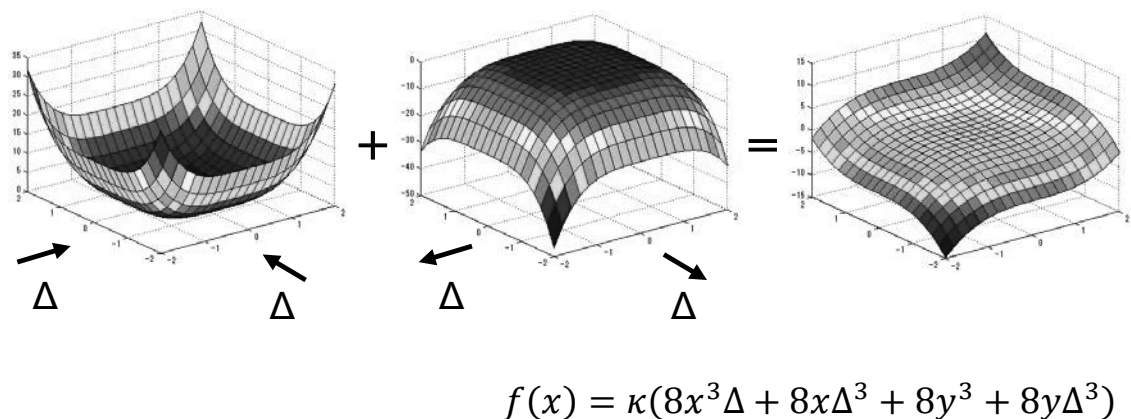


図 6.6 4 次位相板を用いた WFC

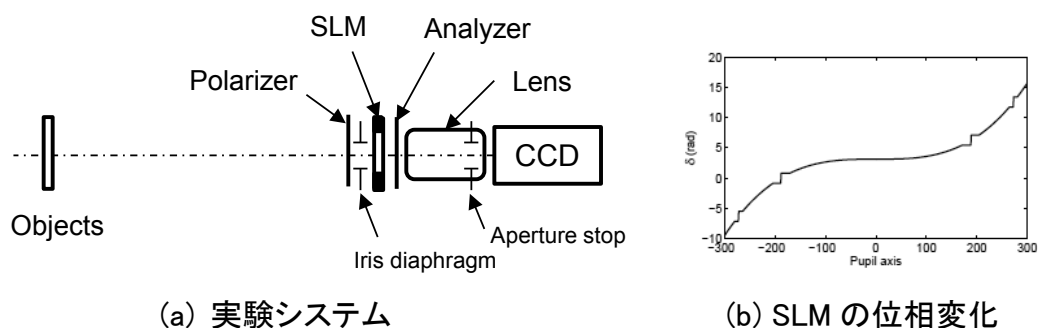


図 6.7 液晶空間変調素子を用いた WFC

## 6.4 コマ収差を用いた Wavefront Coding

レンズのコマ収差を活用したりすることで WFC を近似的に実現した研究が報告されている[43], [44]. ここで, コマ収差とは, 凹凸レンズの光軸をずらしたり, 光軸に対して傾けたりすることによって生じる非対称な波面変化の特性を示し, この特性を WFC の 3 次位相マスクの代わりに利用する.

コマ収差は, 同じ曲率半径の凸レンズと凹レンズのペアを光軸と垂直面内で逆方向にシフトすることにより発生させることができる. 図6.8に模式図を示す. 凹凸レンズのペアを光軸 $z$ に対して垂直面内で $v$ 軸方向にシフトする. これによって生じるコマ収差によるレンズ瞳面での位相変化は,

$$Coma(u, v) = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ -(n-1) \left( \frac{2d}{R} - \frac{d^3}{R^3} \right) v + (n-1) \frac{d}{R^3} (u^2 + v^2) v \right\} \quad (6.2)$$

で表すことができる (付録 G 参照). ここで,  $\lambda$  は光の波長,  $n$  はレンズの屈折率,  $d$  は凹凸レンズの光軸からのシフト量,  $R$  は凹凸レンズの曲率半径,  $u, v$  はレンズ瞳面での座標である. (6.2) 式の第一項は画角に対して 1 次の位相変化を示し, 第二項は 3 次の位相変化を示す. (6.2) 式によれば, 凹凸レンズのシフト量  $d$  を変えることにより, 第二項の 3 次位相量を変化させることができるので, 可変位相マスクの WFC を実現できる.

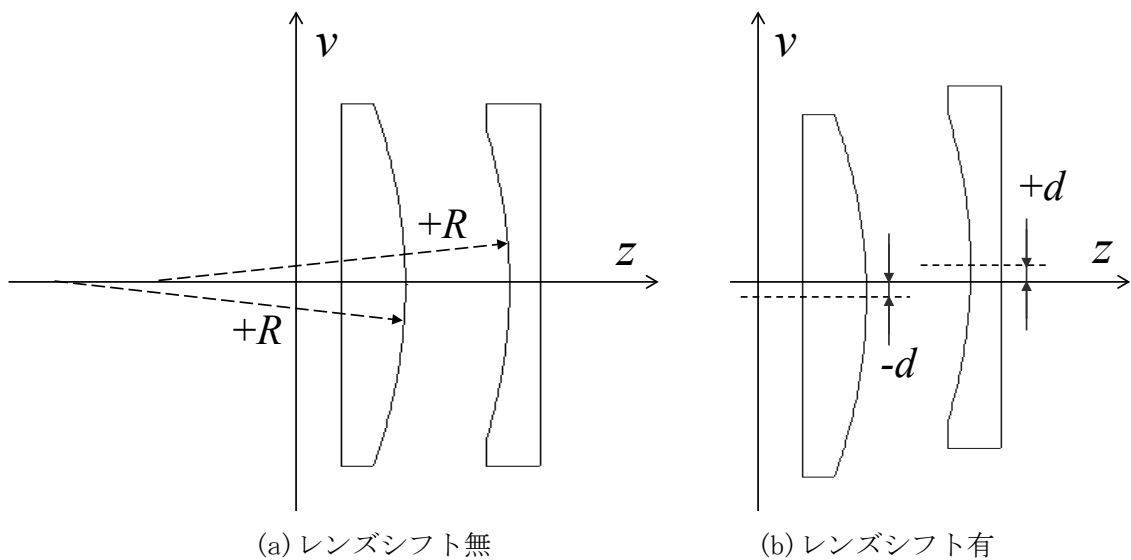


図 6.8 凹凸レンズのシフト

## 6.5 従来技術の問題点

実際のカメラレンズでは、そのレンズ口径が有限であることから、3次位相マスクで生じる波面の直線的な傾きによる横ずれ、レンズの収差等によって、実際のPSFは理想的なPSFから、縮小、拡大、回転等が加わり、変化したものになる。このため、単一のPSFに基づく画像復元では、被写体距離や画角によって復元画像にボケやリングなどの劣化が生じるという問題がある[4], [5]。これらの問題に対して、位相マスクの分布関数をべき級数で展開し、展開係数を最適化アルゴリズムにより求めた最適化位相マスクを用いて、広い被写界深度及び大きな画角での復元画像の画質を改善できることが報告されている[41]。また、被写体距離に応じて最適な複数のPSFを用いた画像復元手法等が提案されている[47], [48], [49]。

その一方で、WFCで使用する3次位相マスクや最適化位相マスクは、その製造が難しく高価であるという課題があった。このようなWFCの実現における課題に対し、2枚の4次位相マスクを重ねてシフトすることで可変の3次位相マスクを実現したり[45]、レンズのコマ収差を活用したりすることでWFCを近似的に実現した研究が報告されている[43], [44]。ここで、コマ収差とは、凹凸レンズの光軸をずらしたり、光軸に対して傾けたりすることによって生じる非対称な波面変化の特性を示し、この特性をWFCの3次位相マスクの代わりに利用する。しかし、現実のレンズでは、コマ収差の3次位相変化以外の影響により、被写界深度が狭くなったり、復元画像の画質が劣化したりするという問題がある。また、像面上でPSFも大きく変化するため、単一のPSFに基づく復元画像の画質の劣化も大きくなるという問題がある。

(6.2)式によれば、凹凸レンズのシフト量 $d$ を変えることにより、第二項の3次位相量を変化させることができるので、可変位相マスクのWFCを実現できる。しかし、第二項の3次位相変化以外に、第一項に示す位相変化も生じる。この第一項は、瞳面で波面の線形の傾きを表す。この線形の位相変化は、像面上においてPSFが変化する一因となる。図6.9に(6.2)式の

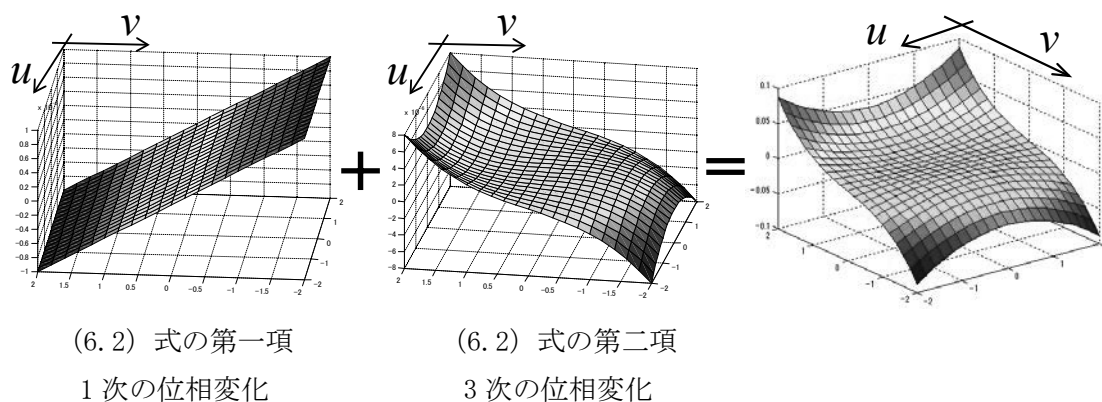


図 6.9 コマ収差による位相分布

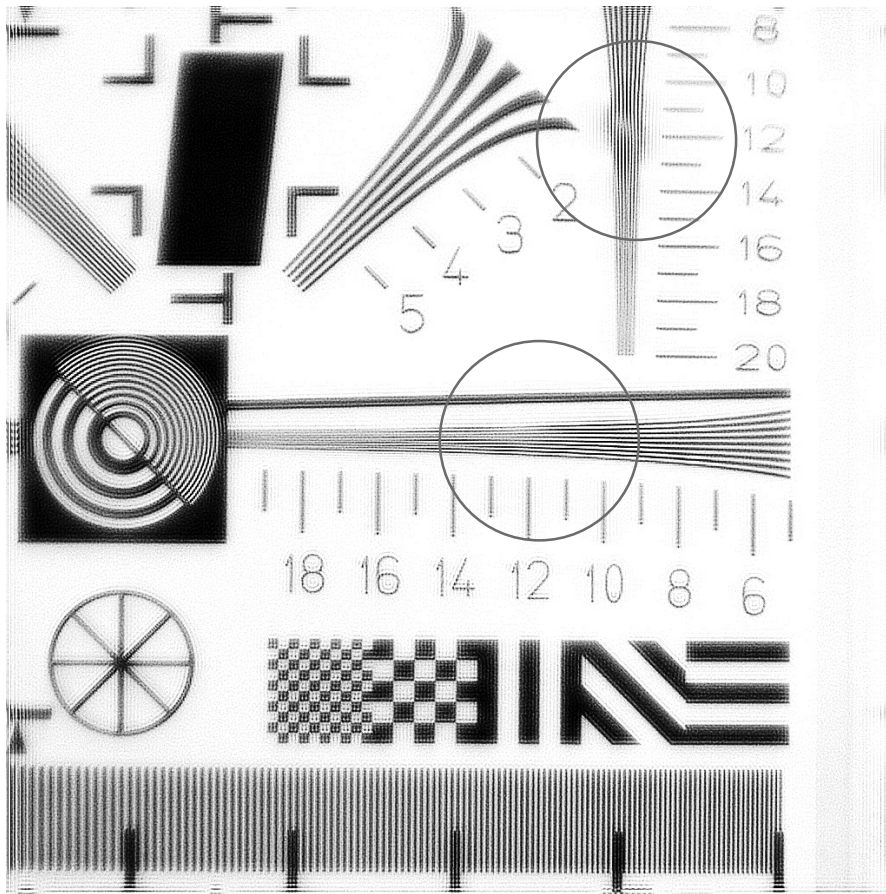


図 6.10 復元画像に重畳した特有な歪みの一例

$Coma(u, v)$ 位相分布を視覚的に示す. 計算条件は,  $R=100\text{mm}$ ,  $d=1\text{mm}$ ,  $n=1.5$ ,  $\lambda=0.5\mu\text{m}$ である.

図6.10に収差が存在し像面内でPSFが変化しているとき, 単一PSFで復元した場合の復元画像に重畳した特有な歪みの一例を示す. 本来のPSFとは違うPSFで復元した場合, 赤い円で示したように, 復元画像の解像度が劣化する. また, PSFの違いによって決まる特定の周波数成分を有するリングング等が生じる.

## 6.6 まとめ

本章では, WFCによる被写界深度拡大手法について詳細に述べた. 従来のコマ収差を用いた手法では, (A) 所望の3次位相変化以外の位相変化が発生し, 復元画像が劣化する, (B) 単一PSFによる固定再構成フィルタ演算では, 画像ボケ等の特有な歪みが発生する, という課題がある.

## 7 像面上の PSF 補正手法及び撮像面傾斜法の提案

### 7.1 はじめに

本章では，コマ収差を用いた WFC の課題を踏まえた上で，像面内での PSF の空間的な変化を低減させる 2 種類の提案手法を述べる．

### 7.2 像面上の PSF 補正手法の提案

図7.1に提案手法の検証に用いた撮像レンズのCode Vシミュレーション結果を，表7.1に凹凸レンズのパラメータ値を示す．撮像レンズは，凹凸レンズペアをダブルガウス型レンズの中央に配置した構成とした．ここで，今回，図7.1で示した光学系の場合は，像面でのPSFの変化が大きいという理由から，Code Vのデフォルト値5x5の約4倍の11x11の領域に細かく分割した．これにより，後で図7.3や図7.6に示すように，PSFの変化を相互相関として把握できるため妥当である，と考える．また，粗い領域分割の場合，領域内の中心と境界付近と

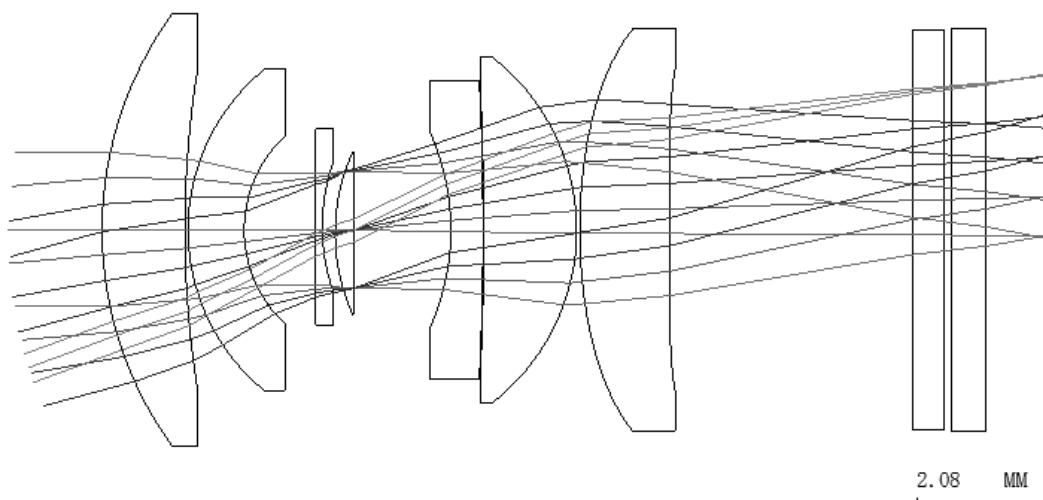


図 7.1 撮像レンズとシミュレーション結果

表 7.1 ガウスレンズ内部に配置した凹凸レンズの仕様

項目	設定値
レンズの曲率半径	R=30mm
レンズのシフト	d=±0.05mm
レンズの屈折率	n=1.5

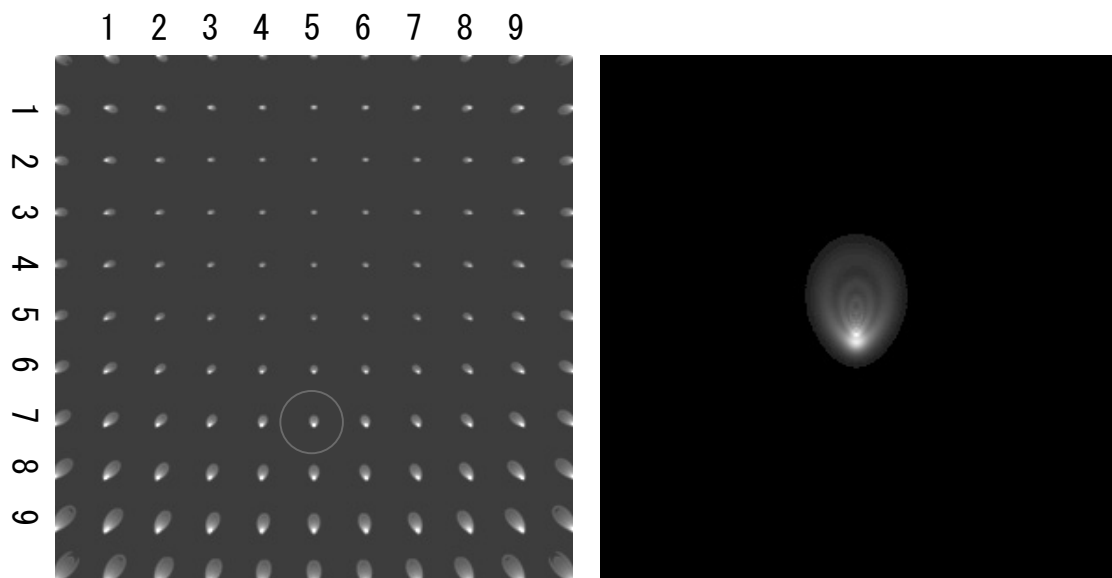
で画質に違いが出たり、再構成画像が不連続になったりする可能性がある。詳細な分割数の決定方法については、今後検討する必要がある。

図7.2(a)に撮影画像面を11×11に分割してシミュレーションしたPSFを、図7.2(b)に一つのPSFを拡大した図を示す。なお、被写体距離は1000mmである。図7.2より、凹凸レンズシフトによって、像面上でPSFが変化していることがわかる。これは(6.2)式第一項に起因するものであり、これを除外することがWFCの精度改善に繋がる。円内で示す基準PSFに対して、同一行内のPSFは画面中央に向かって回転し、同一列内のPSFは垂直方向に縮小または拡大している。そこで、基準となるPSFを水平方向には位置に応じてPSFを回転し、垂直方向には、基準PSFを位置に応じて垂直方向に縮小または拡大することにより、PSFの空間的な変化による影響を低減することができると考えられる。ここで、基準PSFとしては、3次位相以外の位相変化（収差）が小さい場所、画角の小さい場所（像面中心部）のPSFを使用する。

拡大縮小、回転でPSFの変形を表現できると考えると、基準PSF画像を  $A$ 、その座標を  $(m, n)$ 、その他のPSF画像を  $B$ 、その座標を  $(m', n')$  としたときに両者には次のような関係があるとみなす。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} m' \\ n' \end{pmatrix} &= R((M_x, M_y), \theta) \begin{pmatrix} m \\ n \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_x & 0 \\ 0 & M_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m \\ n \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (7.1)$$

$M_x, M_y, \theta$  は、それぞれ像面上で  $x$  方向、 $y$  方向の拡大縮小率及び回転量である。次に、 $B$



(a) 11x11 分割

(b) 円内の PSF の拡大

図 7.2 シミュレーションによる PSF

が  $A$  に近づくような最適な拡大縮小率, 回転量を定めるために, 以下の目的関数を最大化する.

$$\{(M_x^*, M_y^*), \theta^*\} = \arg \max_{M_x, M_y, \theta} \{r((M_x, M_y), \theta)\} \quad (7.2)$$

像面上で  $x$  方向,  $y$  方向の最適な拡大縮小率を  $M_x^*, M_y^*$ , 最適な回転量を  $\theta^*$  とした. ここで,  $r$  は正規化相互相関関数であり, 次式で表される.

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2)(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2)}} \quad (7.3)$$

$A_{mn}, B_{mn}$  は,  $A, B$  それぞれの画素位置  $(m, n)$  の画素値,  $\bar{A}, \bar{B}$  は, それぞれ  $A, B$  の算術平均であり,

$$\bar{A} = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn} \quad (7.4)$$

$$\bar{B} = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N B_{mn} \quad (7.5)$$

で表される.  $M \times N$  は分割した PSF 画像  $A, B$  のサイズである.

正規化相互相関は, 拡大縮小回転に対して変化するため, それらの影響を調べるために使用した. また, 正規化相互相関は, 輝度値の平均値を引いて計算することで, 明るさの変動があっても安定的に類似度を計算することができる.

図 7.3 に, 図 7.2 の円で示した PSF を基準としたときの, 水平方向, 垂直方向の正規化相互相関  $r$  の変化を示す. 図 7.3 において, 赤色実線は PSF 拡大縮小, 回転後の像面上の PSF と基準 PSF との相関, 青色点線は PSF を変形しない場合の像面上の PSF と基準 PSF との相関を示す. 図 7.3 から PSF に拡大縮小, 回転の処理を行うことにより, 相関が高くなること

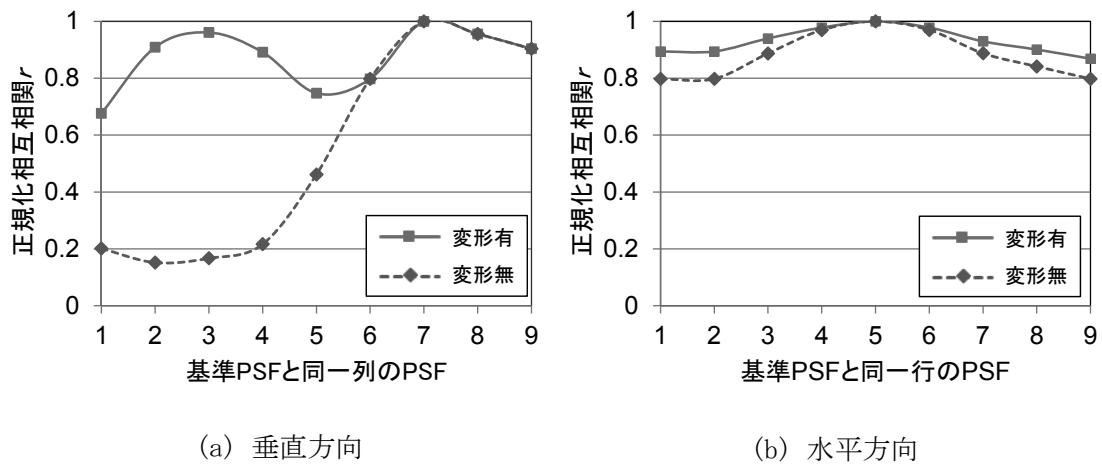


図 7.3 基準 PSF に対する他位置の PSF における正規化相互相関の変化



がわかる．このように，正規化相互相関に基づく基準 PSF の変形により，像面内での PSF の変化による課題に対処することができる．

### 7.3 撮像面傾斜法の提案

次に，手法(2)として，像面での PSF 変化が小さくなるように撮像面を傾斜させることを提案する．これは，像面を傾けることにより，(6.2)式の第一項の影響を軽減できる，と考えられるためである．手法(2)に関して，図 7.1 の撮像光学系で像面を  $2^\circ$  傾けた場合の光

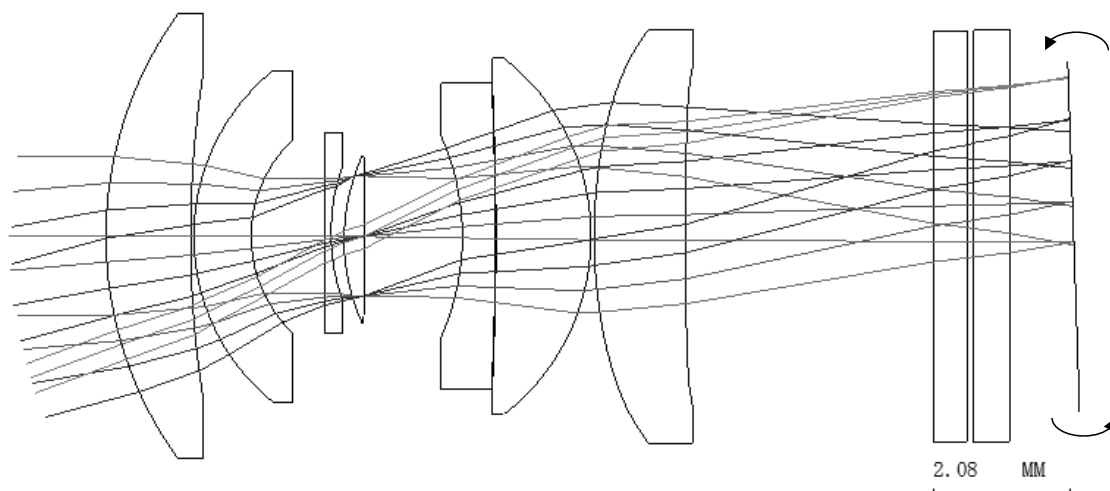


図 7.4 像面を傾斜した撮像レンズ

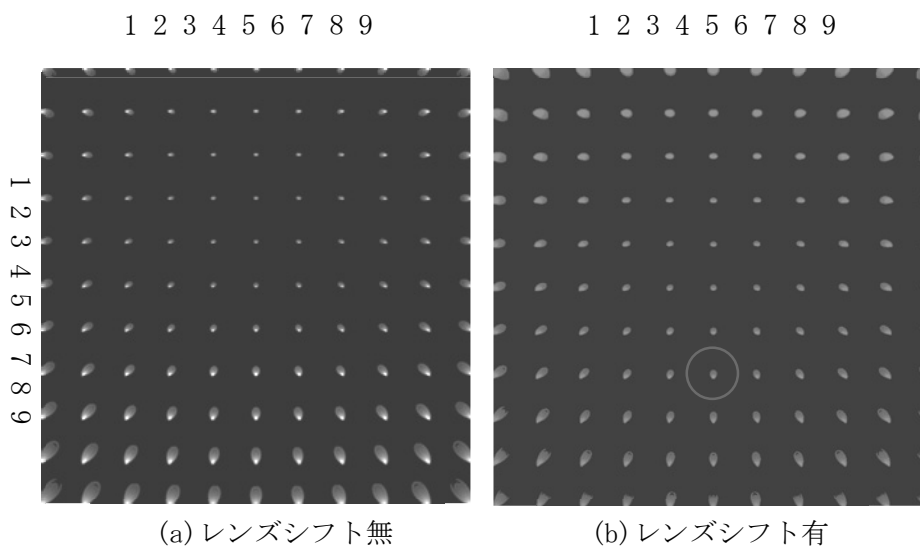


図 7.5 像面を傾けた時の PSF 変化

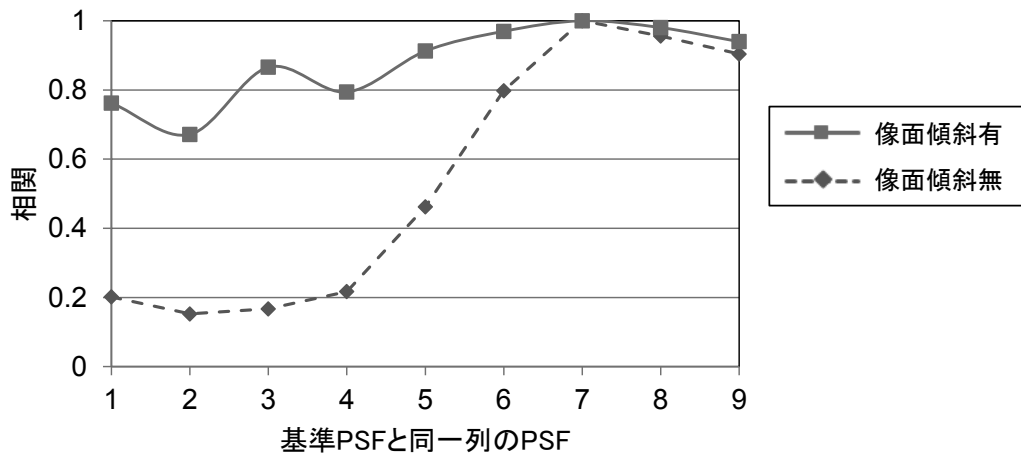


図 7.6 基準 PSF に対する他位置の PSF における正規化相互相関の変化（垂直方向）

学系を図 7.4 に，その PSF の空間的な変化を図 7.5 に示す．また，図 7.6 に(7.3)式の正規化相互相関を用いて，図 7.5(b)の円で示した PSF を基準として垂直方向のバラつきを示す．赤色実線は像面を  $2^\circ$  傾けた場合の像面上の PSF と基準 PSF との相関，青色点線は像面を傾けない場合の像面上の PSF と基準 PSF との相関を示す．図 7.6 より，像面を傾けることにより， $r$  の値が大きくなり，その  $r$  の変化も小さいとわかる．そのため，手法(1)と同様に，像面を傾けた PSF によって復元された画像の画質改善が期待できる．

## 7.4 まとめ

本章では，コマ収差を用いた WFC の像面内で PSF が変化するという課題に対して，像面上の PSF 補正する手法(1)及び撮像面を傾斜させる手法(2)を提案した．これら 2 つの提案手法について，正規化相互相関を用いて，基準 PSF との相関を調べた結果，どちらの手法とも PSF の変化を小さくすることができることを示した．これらのことより提案手法で復元された画像の画質改善が期待できる．

## 8 提案手法による合成画像の評価結果

### 8.1 はじめに

本章では、2つの提案手法による復元画像の評価結果について述べる。提案手法(1)、(2)の有効性を確認するために、実際のレンズで構成可能な撮影レンズ光学系を Code V でシミュレーションした。このシミュレーションにより求めた中間画像及び PSF を用いて復元した画像の解像度評価を行った。また、実際のレンズで組み立てた光学実験装置を用いて撮影した中間画像をシミュレーションで計算した PSF で復元し、その解像度を評価した。その際カメラレンズの評価と同じ基準で WFC のレンズを評価するために、解像度テストチャートによる評価を行った。

### 8.2 提案手法の検証方法及び実験環境

図 8.1 に WFC による画像復元の一連の処理の流れを示す。WFC の撮像レンズの構成で、所定の被写体距離における PSF を Code V を使用して計算する。また、同時に Code V により中間画像も計算する。次に、実際の撮像レンズを使用した光学実験装置により、撮影距離を

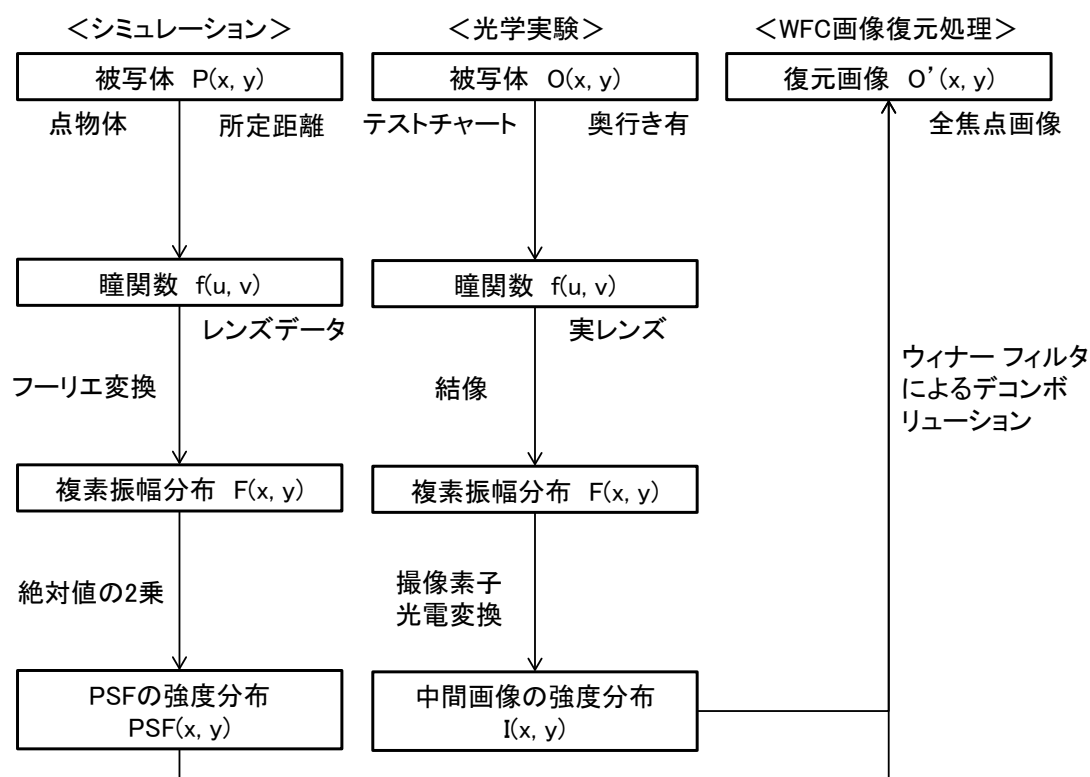


図 8.1 WFC による被写界深度拡大実験の手順

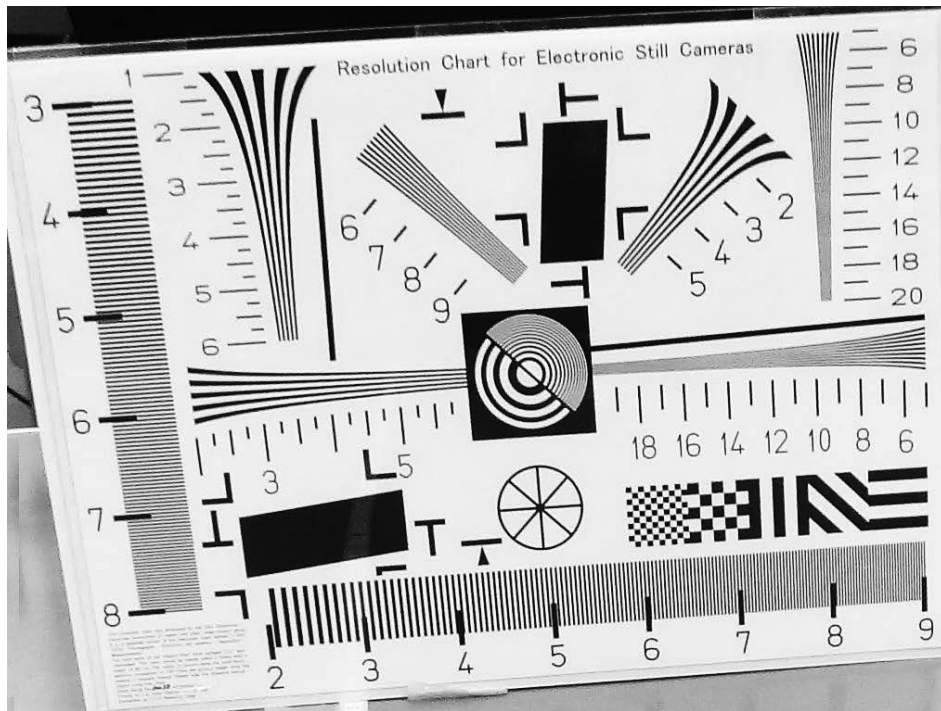


図 8.2 ISO12233 解像度チャート (3 倍拡大版)

変えてテストチャートを撮影し、各々の撮影距離での撮像画像 (中間画像) を求める。そして、MATLAB を使用して、Code V で求めた中間画像、または光学実験で求めた中間画像に対し CODE V で求めた PSF でウィナーフィルタを用いてデコンボリューションすることにより復元画像を得る。

WFC 復元画像の空間解像度の評価方法については、各種提案[50]があるが、本論文では CIPA (一般社団法人カメラ映像機器工業会) 規格 DC-003 「デジタルカメラの解像度測定方法」に準じた[39]。解像度チャートは、図 8.2 に示す ISO12233 解像度チャート (3 倍拡大版) を使用した。解像度測定には、解像度チャートに対応した解像度測定補助ソフトウェア HYRes3.1 を使用し、復元画像の解像度を測定することで画像復元手法を評価した。具体的には、

- (1) ISO12233 解像度チャートを適当な倍率で撮影したものを評価画像として保存
  - (2) 解像度測定補助ソフトウェア HYRes3.1 を使用して、くさび (ウェッジ) 画像の切出し
  - (3) 解像度測定処理の実行
- の手順で行った。

本来、ISO12233 チャートの有効高さが画面いっぱいになるように撮影する必要があるが実際には難しい。そのため「画面全体の垂直画素数 / 画面中のチャート有効高さにあたる画素数」を乗算し、キャリブレーションすることで正確な解像度を算出できる。しかし本論文では提案手法の効果を確認するのが目的のため、解像度測定補助ソフトウェア HYRes3.1 の出力した値をそのまま使用して評価を行った。

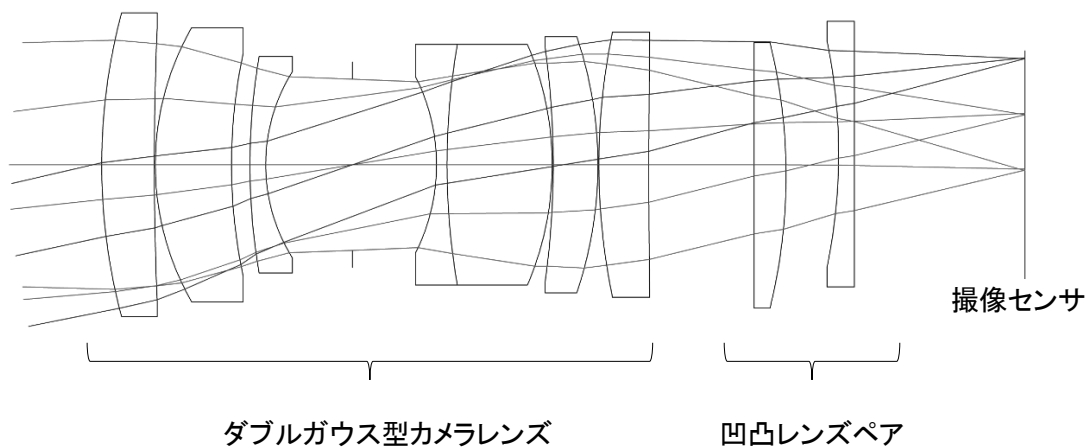


図 8.3 実験に用いた撮像レンズ

図 8.3 に示すようにダブルガウス型レンズ[51]の外側に、表 8.1 に示す仕様の凹凸レンズを配置した撮像レンズ構成に基づき、シミュレーションと光学実験を行った。

また図 8.4 に光学実験装置の写真を示す。撮像レンズの前段のダブルガウスレンズとして、smc PENTAX-FA 43mmF1.9 Limited を使用した。後段の凹凸レンズは、シグマ光機製の SLB-50-100PM (凸レンズ), SLB-50-100NM (凹レンズ) を使用した。撮像センサは、IDS 社製 USB カメラ UI-3370CP-C を使用した。

表 8.1 図 8.3 の撮像レンズに使用した凹凸レンズの仕様

項目	設定値
レンズの曲率半径	$R=100\text{mm}$
レンズのシフト	$d=\pm 2\text{mm}$
レンズの屈折率	$n=1.5$

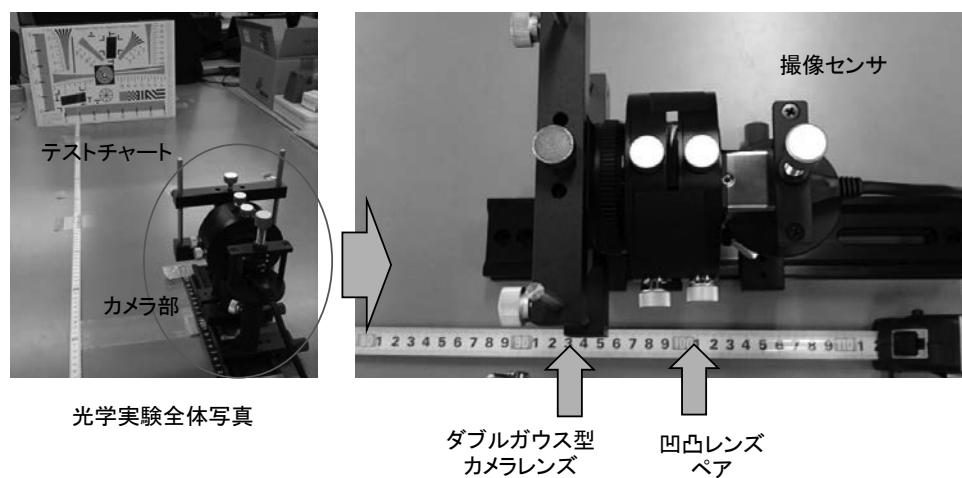


図 8.4 光学実験装置

## 8.3 像面上の PSF 補正手法による合成画像の評価結果

### 8.3.1 シミュレーションによる結果

図 8.3 の撮像レンズ構成で、Code V を使用して PSF を計算した結果を図 8.5 に示す。図 8.3 の撮影レンズ構成では、図 7.1 の構成よりも像面での PSF 変化が大きくないため、像面中心の PSF を基準 PSF とした。また、基準 PSF の被写体距離は 1000mm とした。ここで、7.2 節の提案手法の説明では、PSF を拡大縮小だけでなく、回転することも提案に含めた。本節では、図 8.3 に示すように、凹凸レンズペアをダブルガウス型レンズの外側に配置した撮像レンズ構成となっており、像面での PSF の変化が図 7.1 のレンズ構成と比較して小さくなっている。特に、凹凸レンズシフトによる非対称性（PSF の回転）の影響が小さくなっているため、回転角を  $0^\circ$  とし、拡大縮小だけ行った PSF で画像を復元した。

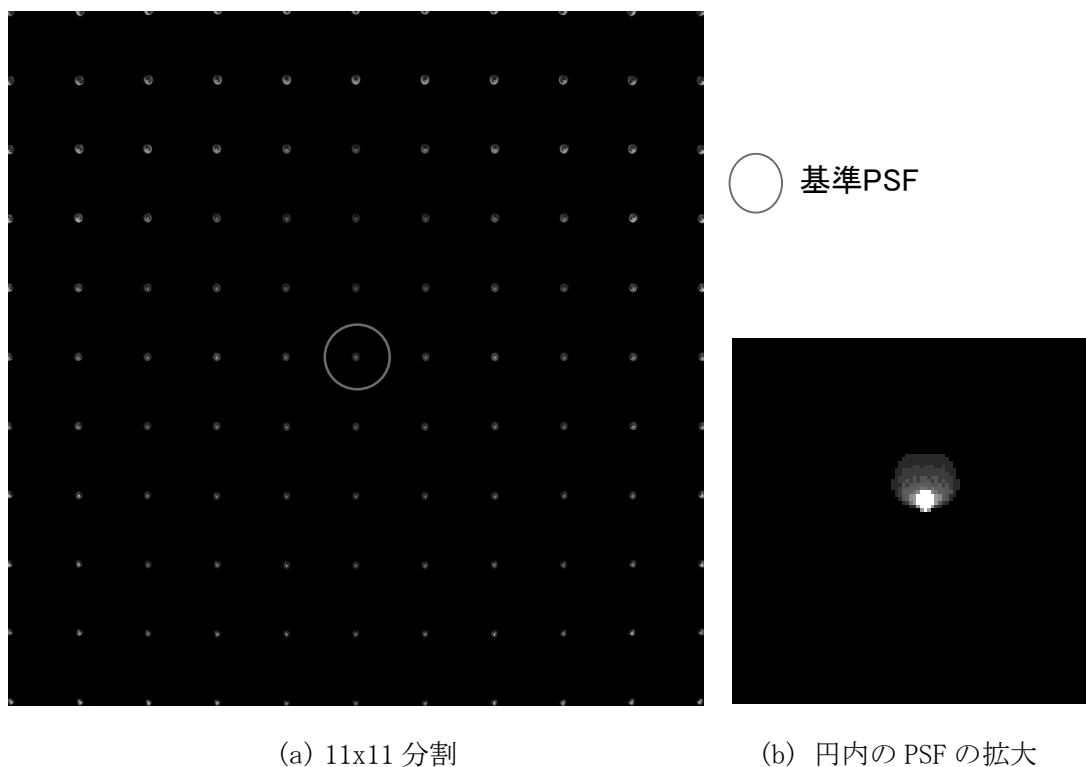


図 8.5 シミュレーションで求めた PSF

手法(1)の検証結果として、図 8.6 に、Code V で計算した中間画像を、図 8.5(b)の基準 PSF を拡大縮小した PSF により復元した画像とその水平解像度測定結果の一例を示す。なお、被写体距離は 1000mm である。また、図 8.7 に、被写体距離を変えた際に、基準 PSF を

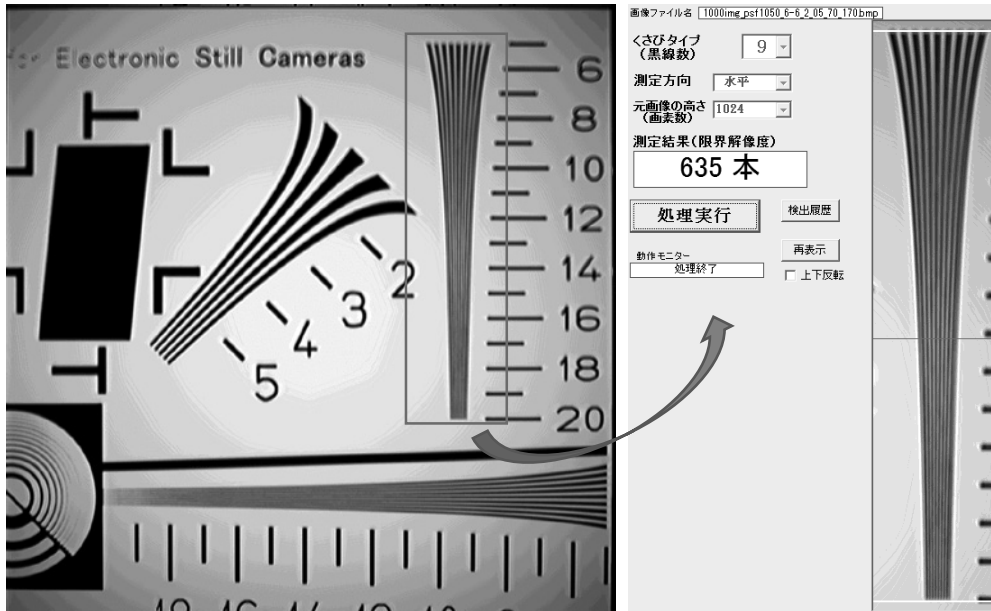


図 8.6 基準 PSF を拡大縮小した PSF で復元した復元画像（左）と水平解像度測定結果（右）の一例（シミュレーションによる中間画像と PSF）

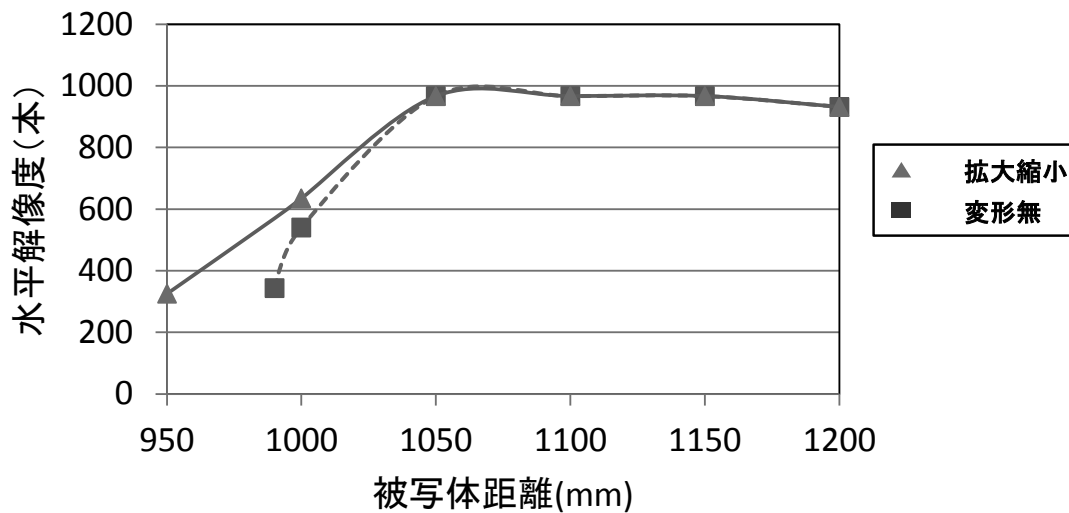


図 8.7 基準 PSF を拡大縮小した場合の被写体距離と水平解像度測定結果（シミュレーションによる中間画像と PSF）

使用する場合と基準 PSF を変形した場合の復元画像の水平解像度を評価した結果を示す。基準 PSF を縦 0.7 倍、横 1.7 倍に拡大縮小した PSF を使用した。撮影距離 950~1050mm の間で、PSF を変形した方が、基準 PSF をそのまま使用する場合より、被写界深度が拡大していることがわかる。ここで、解像度は、基準となる PSF の位置とテストチャートの楔の位置関係に応じて変化する。しかし、PSF の拡大縮小によって解像度が改善するという傾向は、テストチャートの楔が像面上のどこにあっても同じである。

### 8.3.2 光学実験による結果

図 8.4 に示した光学実験装置で撮影した中間画像による手法(1)の検証結果を図 8.8、図 8.9 に示す。撮影条件は、凹凸レンズのシフト量±2mm、テストチャートの被写体距離 1050mm、基準 PSF の被写体距離 1000mm である。図 8.8 は、光学実験装置で撮影した中間画像を図 8.5(b)の基準 PSF を拡大縮小した PSF により復元した画像とその水平解像度測定結果の一例を示す。

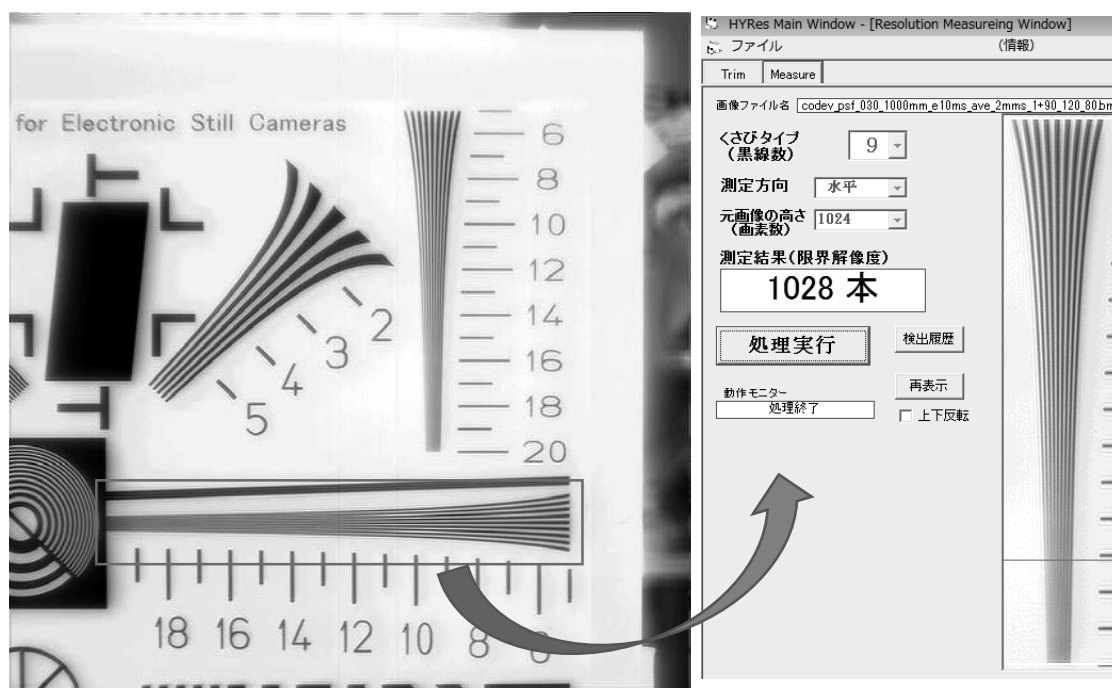


図 8.8 基準 PSF を拡大縮小した PSF で復元した復元画像（左）と水平解像度測定結果（右）の一例（光学実験による中間画像とシミュレーションによる PSF）



次に、図 8.9 に、被写体距離を変えて、凹凸レンズを挿入していないダブルガウス型レンズ（通常レンズ）の撮影画像、凹凸レンズを挿入した場合の復元画像（8.3.1 項と同様に回転角を  $0^\circ$  として、基準 PSF を縦 1.1 倍、横 0.9 倍に拡大縮小した場合）の水平解像度を評価した結果を示す。光学実験においても、基準 PSF を拡大縮小した方が、撮影距離 950～1200mm の間で被写界深度が拡大していることがわかる。

ここで図 8.7 と図 8.9 の結果において、前者は被写体深度が距離の近いほうに広がっているのに対し、後者は遠いほうに広がっている。この被写体深度の改善の傾向が異なっているように見える原因について考察する。この理由として、CODE V のシミュレーションでは、被写体距離 1050mm から 1200mm で、使用したテストチャートの最高解像度を超過しており約 1000 本で制限されていることが一因と考えられる。高解像度なテストチャートを使用することで、光学実験と同様な傾向になると考えられる。また、CODE V のシミュレーション、光学実験の両方とも、CODE V のシミュレーションで求めた PSF を使用して画像の復元を行っていることも一つの原因と考えられる。

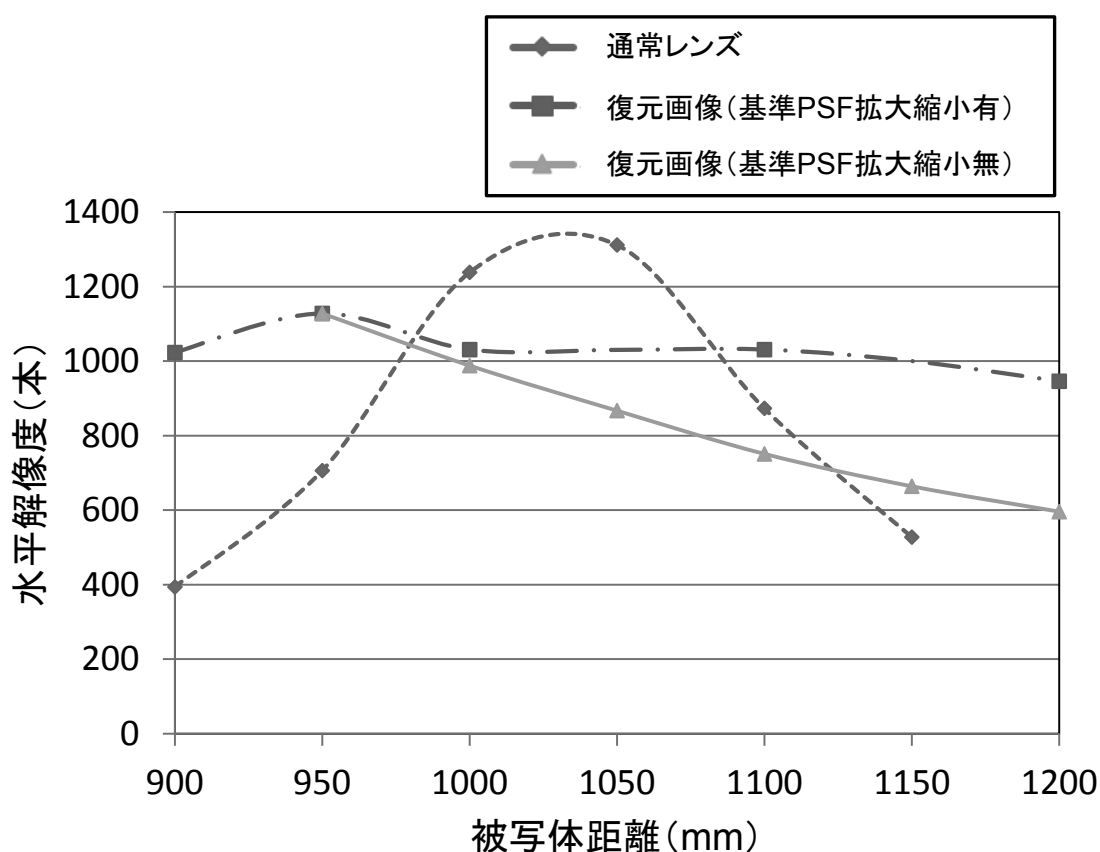


図 8.9 被写体距離と水平解像度測定結果（実画像）

## 8.4 撮像面傾斜法による合成画像の評価結果

手法(2)の検証結果として、図 8.10 に、被写体距離を変えた際に、撮像面を傾けない場合と撮像面を  $1.5^\circ$  傾けた場合の復元画像の水平解像度を評価した結果を示す。撮影距離 950～1050mm の間で、像面を  $1.5^\circ$  傾けた方が、傾けない場合より、被写界深度が拡大していることがわかる。

ここで図 8.10 の結果は図 8.7 の結果と同様に被写体深度が距離の近いほうに広がっている。この理由として前述したように、CODE V のシミュレーションでは、被写体距離 1050mm から 1200mm で、使用したテストチャートの最高解像度を超過しており約 1000 本で制限されていることが一因と考えられる。高解像度なテストチャートを使用することで、被写体深度が距離の遠い方においても違いが出てくると考えられる。

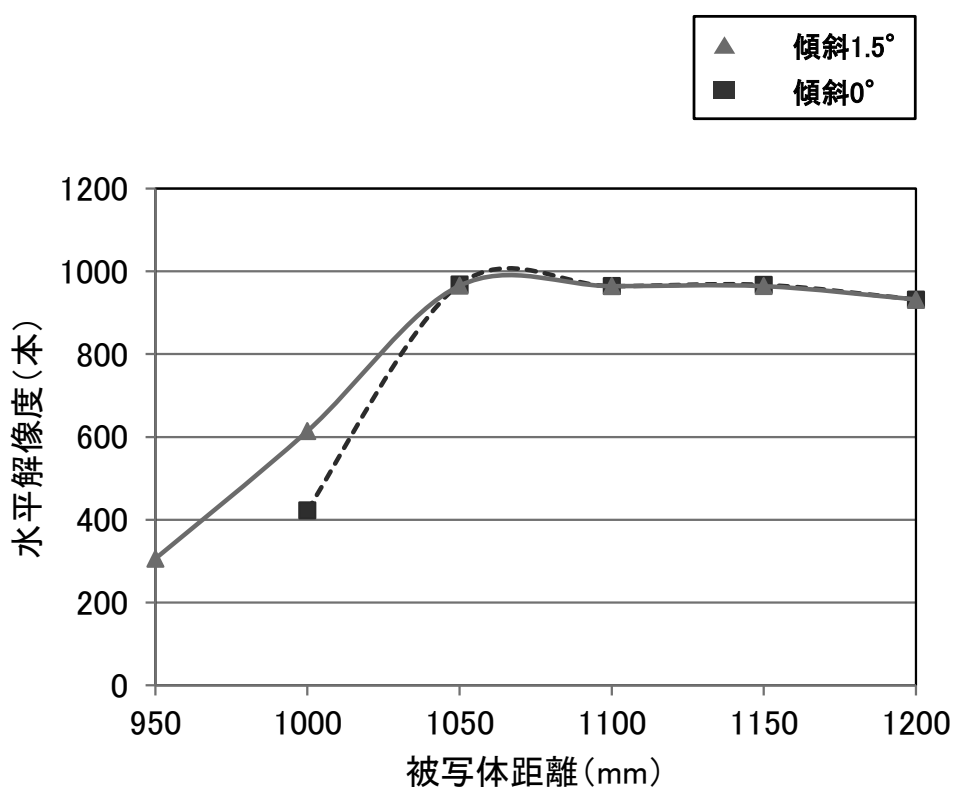
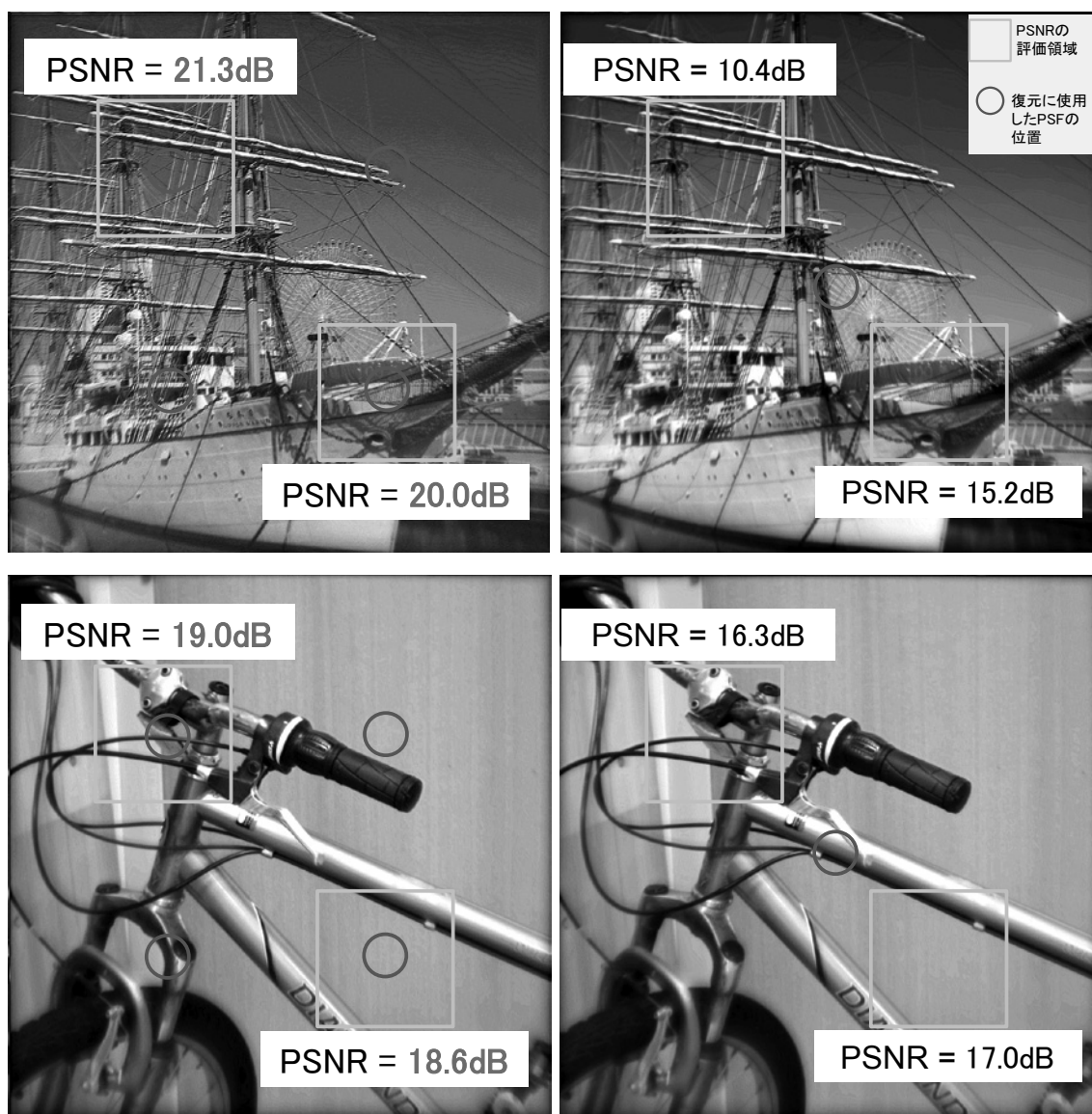


図 8.10 撮像面を傾けた場合の被写体距離と水平解像度測定結果 (シミュレーションによる中間画像と PSF)

## 8.5 複数 PSF による復元画像の PSNR 評価

テストチャートではなく，2 枚の標準画像を用いて PSNR で評価した結果を図 8.11 に示す．図 (a) は映像情報メディア学会，超高精細・広色域標準画像の Ship，図 (b) は Middlebury 大学のデータセットでの結果である．被写体距離 1200mm の撮影画像（中間画像）を，被写体距離 1000mm の複数 PSF（4 個）と単一 PSF（画像中心）で画像を復元した結果，複数の PSF で復元した画像の方の PSNR が高いことが分かった．



(a) 複数 PSF (4 点) による復元

(b) 単一 PSF による復元

図 8.11 複数 PSF による復元結果 (シミュレーション)

## 8.6 奥行きのある物体の実写画像評価

図 8.12 に、奥行きをつけて並べた物体を撮影した実写中間画像を、拡大縮小した PSF を用いて復元した結果を示す。物体は、1000mm から 1300mm の奥行き範囲に配置した。図 (a) が通常レンズを用いて撮影した画像、(b) が WFC レンズで撮影した画像である。通常レンズでは、文字がぼけて細かい文字は判別が難しいが、WFC 復元画像では、撮影距離 1000mm では解像度測定結果のグラフのように通常レンズより解像感が落ちるが、ほぼ 1000mm から 1300mm までフォーカスが合っており、文字を判別できることがわかった。また、PSF を拡大縮小した WFC の方が、文字の明暗がはっきりしていることも確認できた。

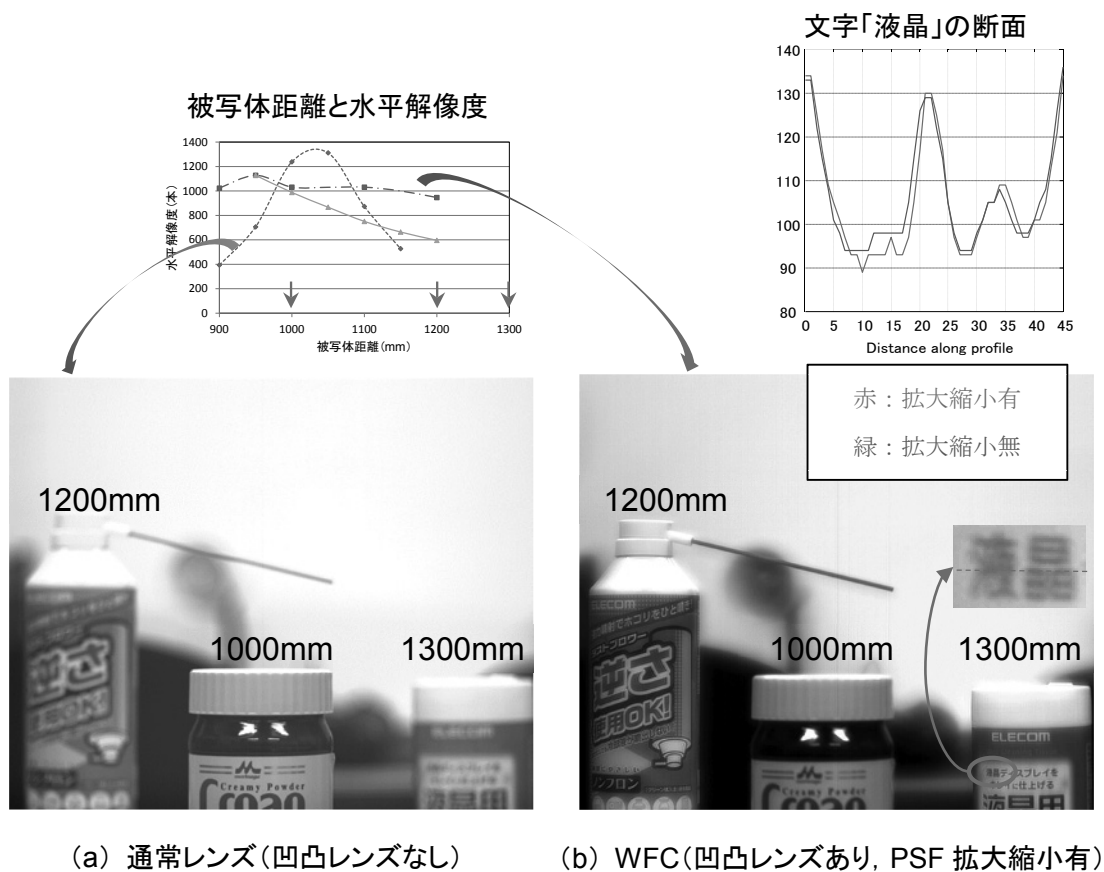


図 8.12 奥行きのある物体の実写画像

## 8.7 まとめ

本章では、2つの提案手法の検証結果について述べた。

提案手法(1)において、シミュレーションによる解像度チャートを用いた評価では、基準 PSF を縦 0.7 倍、横 1.7 倍に拡大縮小した PSF を使用した方が、基準 PSF をそのまま使用する場合より、撮影距離 950~1050mm で解像度が高く、被写界深度が拡大していることを確認できた。同様に提案手法(2)においても撮像面を  $1.5^\circ$  傾けた方が、傾けない場合より撮影距離 950~1050mm で解像度が高く、被写界深度が拡大していることを確認できた。光学実験による解像度チャートを用いた提案手法(1)の評価でも、基準 PSF を縦 1.1 倍、横 0.9 倍に拡大縮小した方が、撮影距離 950~1200mm の間で被写界深度が拡大していることを確認できた。

さらに、提案手法(1)において、テストチャートではなく高解像度な標準画像を用いた PSNR 評価と奥行きをつけて並べた物体を撮影した実写画像による評価も行った結果、前者の評価において PSNR の改善を、後者の評価においても画質の改善を確認できた。

提案手法(1)は、像面をサンプリングし、複数の PSF を用いて画像を復元する必要があるが、画像処理に基づくため自由度が高い。一方、提案手法(2)は、機構的に像面を傾ける必要があるが、単一の PSF によって画像を復元できるため、従来の WFC と相性が良い。これら、二つの手法は単独使用で有効であるが、併用も可能である。例えば、手法(2)を適用した上で、さらに手法(1)を適用することもできる。

## 9 結論

### 9.1 はじめに

本章では, Quad-HD 多眼カメラシステムの開発及び Wavefront Coding の拡張に関する提案手法について纏める. また, 本論文の成果についても述べる. さらに, 本研究によって明らかになった今後の課題についても述べる.

### 9.2 本論文のまとめ

本論文では, 被写体距離によらず多眼合成画像を高解像度化可能な多眼カメラの画素配置及び視差推定の誤りを検出し, オクルージョン領域においては基準カメラの画像で補完することにより, 二重像の発生による画質劣化を防止する手法を提案した. これらの提案手法によって, 高解像度な Quad-HD 画像が取得できることを多眼実証機により明らかにした. さらに, 凹凸レンズにより発生するコマ収差 (3 次位相変化) を位相マスクの代わりに利用する Wavefront Coding を用いて, 基準 PSF を変形させた複数 PSF による画像復元及び PSF 変化が小さくなるように撮像面を傾斜させる二つの手法を提案した. これらの提案手法によって, 広被写界深度画像を取得できることをシミュレーションと実証実験により明らかにした.

すなわち, Quad-HD 多眼カメラシステムの開発については, (1) 奥行き推定に基づく多眼画像合成が必要, (2) 多眼カメラの配置不完全 (画素ズレ小) による画質が劣化, (3) 多眼合成画像のオクルージョン領域における二重像が発生, という課題を設定し,

- 多眼カメラアルゴリズムにより, HD (1920x1080 pixels) 6 眼から Quad-HD (3840x2160 pixels) を実現できた. その画像を評価した結果, 単眼 Quad-HD カメラと同等の最大 1730 本の解像度を達成できた.
- 垂直水平 1/2 画素シフトのカメラ配置により, 撮影距離による合成画像の解像度変化が約 1500~1700 本と, カメラ配置を考慮しない場合の解像度変化 (1200~1600 本) と比較し約半分に抑制することができた.
- オクルージョン等の奥行き推定できない領域での画像合成エラーを防止することも実現できた.

また, WFC の拡張については, (1) 最適な 3 次位相マスクの実現が困難, (2) 固定再構成フィルタ演算による特有ノイズが発生, (3) 被写界深度拡大と画質がトレードオフの関係, という課題を設定し,

- 一眼レフレンズと凹凸レンズを組み合わせた WFC 光学実験システムを構築し, シミュレーションと光学実験により, WFC の動作実証を行うことができた.
- 撮像面で PSF を変形させる提案手法により, 一眼レフレンズと凹凸レンズを組み合わせた

WFC 光学実験において、撮像距離 900~1200mm で、一定の解像度 (テストチャート表示で約 1000 本, 換算値で約 720 本) を実現できた. これは, 通常のレンズ (同じ解像度で約 100mm の被写界深度) や通常の WFC 光学系より広い被写界深度を実現できていることを確認した.

- ・さらに, 撮像面を傾斜させる提案手法でも, WFC 光学系の PSF 変化を小さくできることを示し, 広い被写界深度が実現できる可能性を示すことができた.

以上のように, 本学位論文では, 大画面で高精細な画像の取得を目指した撮像技術での, 撮像における実用的な問題点を明らかにした上で, 高解像度・広被写界深度画像を取得することが可能な新しい撮像光学系を提案し, 評価実験によりその有効性を示した. 提案の撮像光学系は, 単に高解像度画像を撮像するだけでなく, 奥行きのある被写体に対しても撮像距離や焦点外れに係わらず高解像度な画像を得るのに適したものであり, 現在検討が進んでいる撮像光学系と画像技術を組み合わせた撮像技術とも親和性が高いと言える.

### 9.3 本論文の成果

本論文の主な成果を下記に列挙する.

- ① 3次元空間全体を高解像度化できる撮像システムの実現に向けた, Quad-HD 多眼カメラシステムの提案・開発と実験・理論考察による有効性の実証
- ② Quad-HD 多眼カメラシステムによる実時間高解像度化画像合成機能の実現
- ③ 従来の多眼カメラによる高解像度化手法の問題点の抽出と半画素シフト手法の提案と多眼カメラシステムへの実装
- ④ 従来の多眼カメラで必ず奥行き推定誤りが生じるオクルージョン (奥行き推定不可) による合成画像のノイズを低減するために, 視差にエラー情報を付加かつ単眼カメラ画像の画素と比較する手法の考案と実装
- ⑤ 被写界深度拡大に向けた, コマ収差を利用した Wavefront Coding の複数 PSF による画像復元の提案と実験・理論考察による有効性の実証
- ⑥ 凹凸レンズシフトによる 3 次位相変化の理論解析と WFC カメラ実験システムの構築
- ⑦ 像面上の PSF の理論解析と PSF 変化手法の考案と実証
- ⑧ 像面での PSF 変化が小さくなるように撮像面を傾斜させる手法の考案と実証

表 9.1 本論文の総括

寄与/貢献したこと	新しい撮像光学系による高解像度画像の取得に関して, Quad-HD 多眼カメラシステムの提案・開発及びコマ収差を利用した Wavefront Coding の複数 PSF による画像復元の提案と実験・理論考察
提案したこと	多眼カメラにおける半画素シフト手法, 奥行き推定誤りが生じるオクルージョン (奥行き推定不可) 領域でのエラー処理手法及びコマ収差を利用した Wavefront Coding の複数 PSF による画像復元手法
変化を与えたこと	① 多眼カメラによる高解像度画像の取得手法 ② 多眼カメラによる高解像度画像のエラー処理手法 ③ 複数 PSF 補正に基づく画質改善と被写界深度拡大手法
インパクトを与えたこと	① 新しいカメラ画素構成による高解像度画像の取得 ② 高解像度化処理とオクルージョン領域でのエラー処理の両立 ③ 凹凸レンズによる位相変化を利用した WFC において, PSF を補正することにより, 復元画像の画質改善と被写界深度拡大の両立

最後に, 本論文の総括を表 9.1 に纏める.

## 9.4 今後の課題

本研究は, Wavefront Coding の拡張において, 撮像面の傾斜による実物体の撮影での検証を行うことができなかった. これは, 撮像画像を幾何変換等の画像処理を適用することで, WFC 本来の特長である 1 つの PSF, またはより少ない数の PSF で復元できる可能性を有する.

また, 本研究では, 多眼技術と WFC の統合の検証を行うことが出来なかった.

今後の課題としては, WFC の中間画像変換に基づく拡張及び撮像システムでの多眼技術と WFC の融合の実証であり, 次に特記する.

- ① WFC の中間画像変換に基づく, 高解像度・広被写界深度な実物体画像の取得を示したいと考える.
- ② 多眼撮像技術と WFC を統合することにより, 2 次元画像の高解像度化と焦点ぼけの復元を同時に実現, すなわち高解像度でかつ広被写界深度画像の取得を示したいと考える.
- ③ 多眼撮像技術と WFC を統合することにより, 焦点ぼけだけでなく, 動きボケも復元し, 動画像の高解像度・広被写界深度化を実現したいと考える.



## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方からご厚情を賜りました。皆さまへの感謝の気持ちを込めて、ここにお礼の言葉を述べさせていただきます。

本研究の指導教授の浜本隆之先生には、ご多忙にもかかわらず、終始懇切丁寧なご指導を賜りました。社会人博士課程の途中で中国に赴任するという厳しい状況の中でも、親身に相談にのっていただき、十分な時間を割いて熱心に議論頂きました。心より深く感謝申し上げます。先生のご指導とご鞭撻が無ければ、本研究をまとめ上げることはできなかったと強く感じています。

電気工学専攻の岩村恵市教授、長谷川幹雄教授、半谷精一郎教授、村口正弘教授には、研究当初より研究の方向性を含めて様々なご議論、ご助言を賜りました。また、先生方には、ご多忙中にもかかわらずお時間を割いていただき、本論文の審査を賜り、心より感謝申し上げます。特に半谷精一郎教授には、論文標題や作成において、数多くの有益で丁寧なご教示、ご助言をいただき、心から御礼申し上げます。

国立情報学研究所 コンテンツ科学研究系の児玉和也准教授には、本論文の審査を賜る過程で、論文のまとめ方に対して、的確で丁寧なご議論、ご助言をいただき、心より感謝申し上げます。

東京理科大学経営学部経営学科に移られた保坂忠明先生には、研究当初より多くの研究の種やアドバイス、活発な議論をいただきました。また学会投稿論文の作成にあたって、懇切丁寧なご指導、添削をいただきました。本研究当初の苦しい時期を順調に乗り切れたのも先生のお陰であり、心より感謝申し上げます。

電気工学科の杉村大輔先生には、研究の後半の過程で、数多くの的確で丁寧なアドバイス、熱心な議論をいただきました。また論文のまとめ方についても、懇切丁寧で論理的なご指導、ご教示をいただき、心より感謝申し上げます。

浜本研究室では、研究生活でともに苦勞した、木村圭一氏、村山大輔氏、向井成樹氏、大森達也氏、串田聡氏、大倉水斗氏、熊澤佳奈氏、齋藤一希氏、中野広基氏には、いろいろと多岐にわたる議論やサポートをいただき、心から感謝いたします。特に、大倉水斗氏、齋藤一希氏には、WFCの実験評価システムのセットアップから実験、データ整理まで、多大な協力をいただき、心より感謝いたします。彼らの協力無しには、本研究を進めることができなかったと思います。ここにお名前を挙げることはできませんでしたが、浜本研究室のメンバーの方々には、研究面、学生生活の両面でご協力をいただき、とても感謝しています。

本研究の一部は、シャープ株式会社で行ったものをまとめたものであり、共に研究活動を行い、論文作成にあたっては多大なご協力、ご支援をいただいた、齋藤栄氏、田中誠一氏、北川真氏、瀬尾光慶氏、若林保孝氏、紫村智哉氏、今井巧氏、大森圭祐氏に、心より感謝いたします。特に齋藤栄氏には、研究の面だけでなく、会社での業務をサポートいただきました。また、出向先である Sharp Laboratories of China Co., Ltd. 社長の呉亜棟氏、同僚の

岩田繁幸氏には、筆者が論文作成のため多忙な時期に業務面でサポートいただき、心より感謝いたします。

筆者の社会人博士課程への入学を応援してくれて、筆者の家庭への貢献が疎かになったときでも、惜しめない協力をしてくれた、妻 美佐子に感謝します。

最後に、すべての方のお名前をここに挙げることはできませんでしたが、筆者を支えていただいた多くの方々に、この場を借りてお礼を申し上げます。

2015年7月10日

佐藤俊一

## 参考文献

- [1] R. Raskar, J. Tumblin, A. Mohan, A. Agrawal, Y. Li, “Computational photography,” Proc. Eurographics STAR, pp.1-20 (2006)
- [2] 日浦慎作, “コンピュータシヨナルフォトグラフィ,” 電子情報通信学会誌, Vol. 95, No. 9, pp. 823-828 (2012)
- [3] E. R. Dowski and W. T. Cathey, “Extended Depth of Field Through Wavefront Coding,” Applied Optics, vol.34, no.11, pp.1859-1866 (1995)
- [4] Zhao T1, Ye Z, Zhang W, Chen Y, Yu F., “Wide viewing angle skewed effect of the point spread function in a wavefront coding system,” OPTICS LETTERS vol.32, no.10, pp.1220-1222 (2007)
- [5] Martin Larivière-Bastien and Simon Thibault, “Limits of imaging-system simplification using cubic mask wavefront coding,” OPTICS LETTERS, vol.38, no.19, pp.3830-3833 (2013)
- [6] CODE V 10.7 リファレンスマニュアル 日本語版, Synopsys, Inc. (2014)
- [7] J. Tanida, T. Kumagai, K. Yamada, S. Miyatake, K. Ishida, T. Morimoto, N. Kondou, D. Miyazaki, and Y. Ichioka, “Thin observation module by bound optics (tombo) concept and experimental verification,” Applied Optics, vol.40, no.11, pp.1806-1819 (2001)
- [8] M. Levoy, P. Hanrahan, “Light field rendering,” Proc. ACM SIGGRAPH 96, pp.31-42 (1996)
- [9] S. J. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, M. Cohen, “The Lumigraph,” Proc. ACM SIGGRAPH 96, pp.43-54 (1996)
- [10] A. Veeraraghavan, R. Raskar, A. Agrawal, A. Mohan, J. Tumblin, “Dappled photography: mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing,” ACM Trans. Graphics, vol.26, no.3, 69:1-69:12 (2007)
- [11] C. Zhou and S. Nayar, “What are good apertures for defocus deblurring?,” IEEE International Conference on Computational Photography, pp.1-8 (2009)
- [12] H. Nagahara, S. Kuthirummal, C. Zhou and S. Nayar, “Flexible depth of field Photography,” Europe Conference on Computer Vision, pp.60-73 (2008)
- [13] R. Raskar, A. Agrawal, J. Tumblin, “Coded Exposure Photography: Motion Deblurring using Fluttered Shutter,” ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH, vol.25 Issue 3, pp.795-804 (2006)
- [14] C.-K. Liang, T.-H. Lin, B.-Y. Wong, C. Liu, H. H. Chen, “Programmable aperture photography: multiplexed light field acquisition,” ACM Trans. Graphics, vol.27, no3, 55:1-55:10 (2008)

- [15] Y. Bando, B.-Y. Chen, T. Nishita, “Extracting depth and matte using a color-filtered aperture,” *ACM Trans. Graphics*, vol.27, no.5, 134:1-134:9 (2008)
- [16] Georgeiv, K. C. Zheng, B. Curless, D. Salesin, S. Nayar, C. Intwala, “Spatio-angular resolution tradeoff in integral photography,” *Proc. Eurographics Symposium on Rendering*, pp.263-272 (2006)
- [17] E.H. Adelson and J.Y. Wang, “Single lens stereo with a plenoptic camera,” *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.14, no.2, pp.99-106 (1992)
- [18] R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz, P. Hanrahan, “Light field photography with a hand-held plenoptic camera,” *Tech. Rep. CSTR 2005-02*, Stanford Computer Science (2005)
- [19] R. Ng, “Digital light field photography,” *Ph.D thesis*, Stanford University (2006)
- [20] A. Isaksen, L. McMillan, S. J. Gortler, “Dynamically reparameterized light fields,” *Proc. ACM SIGGRAPH*, pp.297-306 (2000)
- [21] M. Okutomi, T. Kanade, “A multiple-baseline stereo,” *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.5, no.4, pp.353-363 (1993)
- [22] 大森達也, 保坂忠明, 佐藤俊一, 浜本隆之, “ズーム量が異なる多視点画像を用いた再構成型超解像,” *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol. J95D, No.9, pp.1698-1702 (2012)
- [23] B. Wilburn, N. Joshi, V. Vaish, E.-V. Talvala, E. Antunez, A. Barth, A. Adams, M. Horowitz, M. Levoy, “High performance imaging using large camera arrays,” *ACM Trans. Graphics* vol.24, no.3, pp.765-776 (2005)
- [24] 生源寺類, 北村嘉郎, 山田憲嗣, 宮武茂博, 谷田純, “複眼光学系を用いた薄型画像入力装置の開発,” *映像情報メディア学会誌*, vol57, no.9, pp.1135-1141 (2003)
- [25] 関口大陸, 松山方大, 桑島茂, “25眼カメラアレイシステム ProFUSION25 の設計と開発,” *電子情報通信学会技術研究報告*, PRMU2007-282, pp.239-242 (2008)
- [26] 佐藤俊一, 田中誠一, 紫村智哉, 有田真一, 大森圭祐, 北川 真, 京本忠男, 井上理, 伊藤寛, 齋藤栄, “多眼カメラによる撮像距離と高解像度画像生成に関する検討,” *映像情報メディア学会冬季大会*, 講演番号 1-3 (2008)
- [27] Zhengyou Zhang, “A flexible new technique for camera calibration,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.22, no.11, pp.1330-1334 (2000)
- [28] 香川景一郎, 堀崎遼一, 藤井慶太, 中尾良純, 豊田孝, 政木康生, 谷田純, “不均一レンズ配置を用いた薄型複眼カメラの高解像度化と超解像処理の高速化,” *映像情報メディア学会技術報告* vol.33, no.18, pp.9-12 (2009)

- [29] Andrew Lumsdaine and Todor Georgiev, “Full Resolution Lightfield Rendering,” Adobe Technical Report (2008)
- [30] 小松隆, 五十嵐徹, 斎藤隆弘, 相澤清晴, “多眼カメラを用いた高精細画像入力方式,” テレビジョン学会技術報告, Vol.16, No. 43, ICS’ 92-43, pp.1-6 (1992)
- [31] 小鷲宜也, 高木真一, 富永英義, “超解像手法を用いた高解像度画像と奥行き同時推定に関する検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.107, no. 427, PRMU2007-166, pp. 55-60 (2008)
- [32] Niranjana, Damara-Venkata and Nelson L. Chang, “On the Resolution Limits of Superimposed,” IEEE International Conference Image Processing, pp.373-376 (2007)
- [33] Patrick Vandewalle, Luciano Sbaiz, Joos Vandewalle and Martin Vetterli, “Super-Resolution From Unregistered and Totally Aliased Signals Using Subspace Method”, IEEE Transactions on Signal Processing, vol.55, no.7, pp. 3687-3703 (2007)
- [34] D. J. Brady and N. Hagen, “Multiscale lens design,” Opt. Express 17, pp.2026-2032 (2009)
- [35] D. J. Brady, M. E. Gehm, R. A. Stack, D. L. Marks, D. S. Kittle, D. R. Golish, M. E. Vera and S. D. Feller, “Multiscale gigapixel photography,” Nature 486, pp.386-389 (2012)
- [36] T. Bishop, S. Zanetti, P. Favaro, “Light field superresolution,” Proc. IEEE International Conference on Computational Photography, pp.1-9 (2009)
- [37] 池田薫, 清水雅夫, 奥富正敏, “撮影位置の異なる複数の画像を用いた高解像仮想焦点面画像生成,” 第156回コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 情報処理学会研究報告(コンピュータビジョンとイメージメディア 2006-CVIM-156), Vol.2006, No.115, pp.101-108 (2006)
- [38] 蚊野浩, “ライトフィールドカメラ Lytro の動作原理とアルゴリズム,” 第127回微小光学研究会, Vol.31, No.1, pp.17-22 (2013)
- [39] “Resolution Measurement methods for digital camera,” CIPA DC-003 (2003)
- [40] W. T. Cathey and E. R. Dowski, “New paradigm for imaging systems,” Applied Optics, vol.41, no.29, pp.6080-6092 (2002)
- [41] Yasuhisa Takahashi and Shinichi Komatsu, “Optimized free-form phase mask for extension of depth of field in wavefront-coded imaging,” OPTICS LETTERS, vol.33, no.13, pp.1515-1517 (2008)
- [42] 小松進一, “Wavefront coding による被写界深度の拡大,” 情報処理学会研究報告, CVIM, vol.174, no.5, pp.1-8 (2010)
- [43] Carlos Dorransoro, Jose A. Guerrero-Colon, Marta C. de la Fuente, Jose M.

- Infante and Javier Portilla, “Low-cost Wavefront Coding Using Coma and a Denoising-based Deconvolution,” Proc. of SPIE Vol.6737, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications IV, 67370E, pp.67370E-1-67370E-12 (2007)
- [44] Jose M. Infante, Marta C. de la Fuente, “Wavefront Coding Using Coma Aberration for Dual Field of View IR Systems,” Proc. of SPIE, Vol.7000, Optical and Digital Image Processing, 70001Q, pp. 70001Q-1-70001Q-8 (2008)
- [45] T. Hellmut, A. Bich, R. Borret, A. Holschbach, A. Kelm, “Variable phaseplates for focus invariant optical systems,” Proc. of SPIE, Vol.5962, Optical Design and Engineering II, 596215, pp.596215-1-596215-11 (2005)
- [46] G. Carles, G. Muyo, S. Bosch, A. R. Harvey, “Use of a spatial light modulator as an adaptable phase mask for wavefront coding,” Journal of Modern Optics, Vol. 57, No. 10, pp.893-900 (2010)
- [47] 大倉水斗, 佐藤俊一, 保坂忠明, 浜本隆之, “奥行情報に基づく PSF 選択による Wavefront Coding 撮像方式,” 映像情報メディア学会技術報告, vol.36, no.20(IST2012 16-28), pp.29-32 (2012)
- [48] 大倉水斗, 佐藤俊一, 保坂忠明, 浜本隆之, “Wavefront Coding におけるステレオ情報に基づく再構成フィルタ選択,” 映像情報メディア学会年次大会講演予稿集, 25-10 (2012)
- [49] 大倉水斗, 佐藤俊一, 杉村大輔, 浜本隆之, “Wavefront Coding における複数 PSF 選択に基づく復元精度の改善,” 映像メディア処理シンポジウム (IMPS), I2-08 (2013)
- [50] Kalin Atanassov, Sergio Goma, “Evaluating the quality of EDof in camera phones,” Proc. of SPIE, Vol.7529, Image Quality and System Performance VII, 75290K, pp.75290K-1-75290K-11 (2010)
- [51] US Patent 3,451,754, “LARGE APERTURE SEVEN-LENS OBJECTIVE LENS SYSTEM” (1969)

## 発表文献

### [学会論文誌]

- [1] 佐藤俊一, 齋藤一希, 大倉水斗, 杉村大輔, 浜本隆之, “コマ収差による3次位相変化を用いたWavefront CodingにおけるPSF補正に基づく復元画像の画質改善,” 映像情報メディア学会誌, Vol. 69, No. 3, pp. J91-97 (2015)
- [2] 佐藤俊一, 田中誠一, 北川 真, 瀬尾光慶, 若林保孝, 紫村智哉, 今井 巧, 大森圭祐, 齋藤 栄, 保坂忠明, 浜本隆之, “新たな多眼Quad-HD撮像系と高解像度画像生成アルゴリズムの提案,” 映像情報メディア学会誌, Vol. 66, No. 10, pp. J354-J364(2012)
- [3] 大森達也, 保坂忠明, 佐藤俊一, 浜本隆之, “ズーム量が異なる多視点画像を用いた再構成型超解像,” 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J95D, No. 9, pp. 1698-1702(2012)

### [国際会議論文集]

(査読付)

- [1] Shunichi Sato, Seiichi Tanaka, Makoto Kitagawa, Mitsuyoshi Seo, Yasutaka Wakabayashi, Tomoya Shimura, Takumi Imai, Keisuke Omori, Skae Saito, Tadaaki Hosaka, Takayuki Hamamoto, “Development and Analysis of Quad-HD Multi-Camera System,” Proc. of International Display Workshops (IDW'11), INP4/3D1-3, pp. 1327-1330 (2011)

### [国内研究会発表等]

- [1] 大倉水斗, 佐藤俊一, 保坂忠明, 浜本隆之, “奥行情報に基づくPSF選択によるWavefront Coding撮像方式,” 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 36, No. 20(IST2012 16-28), pp. 29-32 (2012)

### [総合大会発表等]

- [1] 齋藤 一希, 佐藤 俊一, 杉村 大輔, 浜本 隆之, “Wave-front coding における最適化処理を用いた画像再構成による被写界深度の拡大,” Image Media Processing Symposium (IMPS14), I1-04, pp. 1-2 (2014)
- [2] 大倉水斗, 佐藤俊一, 杉村大輔, 浜本隆之, “Wavefront Codingにおける複数PSF選択に基づく復元精度の改善,” Image Media Processing Symposium (IMPS13), I2-08, pp. 1-2 (2013)
- [3] 串田 聡, 保坂忠明, 佐藤俊一, 浜本隆之, “時空間領域分割と時間-平面フィッティングを用いたステレオ動画像に対する視差推定,” Image Media Processing Symposium (IMPS12), I2-05, pp. 23-24 (2012)

- [4] 大倉水斗, 佐藤俊一, 保坂忠明, 浜本隆之, “Wavefront Coding におけるステレオ情報に基づく再構成フィルタ選択,” 映像情報メディア学会年次大会講演予稿集, NO. 25-10 (2012)
- [5] 大森 達也, 保坂 忠明, 浜本 隆之, 田中 誠一, 若林 保孝, 佐藤 俊一, 齋藤 栄, “ズーム量が異なる多眼画像を用いた再構成型超解像処理,” Image Media Processing Symposium (IMPS11), I2-15, pp.47-48 (2011)

[技術雑誌等]

- [1] 佐藤俊一, 齋藤栄, 浜本隆之, “新たな多眼 Quad-HD 撮像システム,” 画像ラボ, Vol. 24, No. 12, pp. 75-83 (2013)



# 付録

## A. 被写界深度に関する説明

図 A.1 に、被写界深度に関する説明図を示す。撮像レンズの F 値は、

$$F = \frac{f}{\Phi} \tag{A.1}$$

で表される。ここで、 $f$  はレンズの焦点距離、 $\Phi$  はレンズの有効径である。

この F 値とイメージセンサ上で許容できる錯乱円の大きさ  $c$  より、前方被写体距離  $L_f$  と後方被写体距離  $L_b$  は、それぞれ、

$$L_f = \frac{c \times F \times L^2}{f^2 + c \times F \times L} \tag{A.2}$$

$$L_b = \frac{c \times F \times L^2}{f^2 - c \times F \times L} \tag{A.3}$$

で表される。ここで、 $L$  は被写体距離である。

したがって、被写界深度は、

$$D = L_f + L_b \tag{A.4}$$

となる。

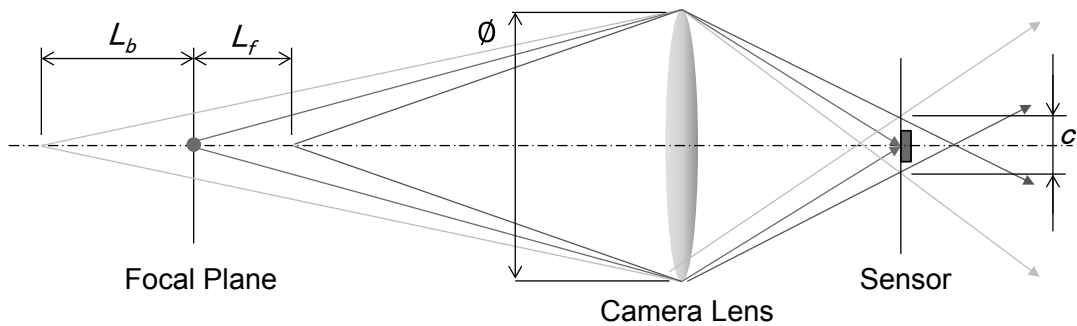


図 A.1 被写界深度に関する説明図

## B. 多眼カメラに使用したレンズの MTF

図 B.1 に撮影レンズの MTF を示す。Quad-HD 解像度の空間周波数 370lp/mm では、撮像レンズの MTF (Modulation Transfer Function) は 26.4%であった。

多眼カメラで生成した画像の最大解像度が、単眼画像の解像度の 2 倍にならない理由は、撮影レンズの MTF の制約を受けていることと、高解像度画像生成による MTF 劣化が原因である。使用したカメラは、画素サイズ  $2.7 \times 2.7 \mu\text{m}$  の HD 仕様であるため、解像度 1,080TV 本に必要な空間周波数は 185lp/mm となる。同様に Quad-HD の解像度 2,160TV 本に必要な空間周波数は 370lp/mm となる。レンズ解像度は Quad-HD 解像度をカバーしており、高解像度化に必要な情報が撮像できていることがわかる。一方、解像度チャートによる測定結果が最大 1733 本と理想的な解像度 2160 本に達しなかった理由は、レンズの MTF による影響がないとは言えないが、高解像度画像生成による MTF 劣化の方が大きく影響していると考えられる。

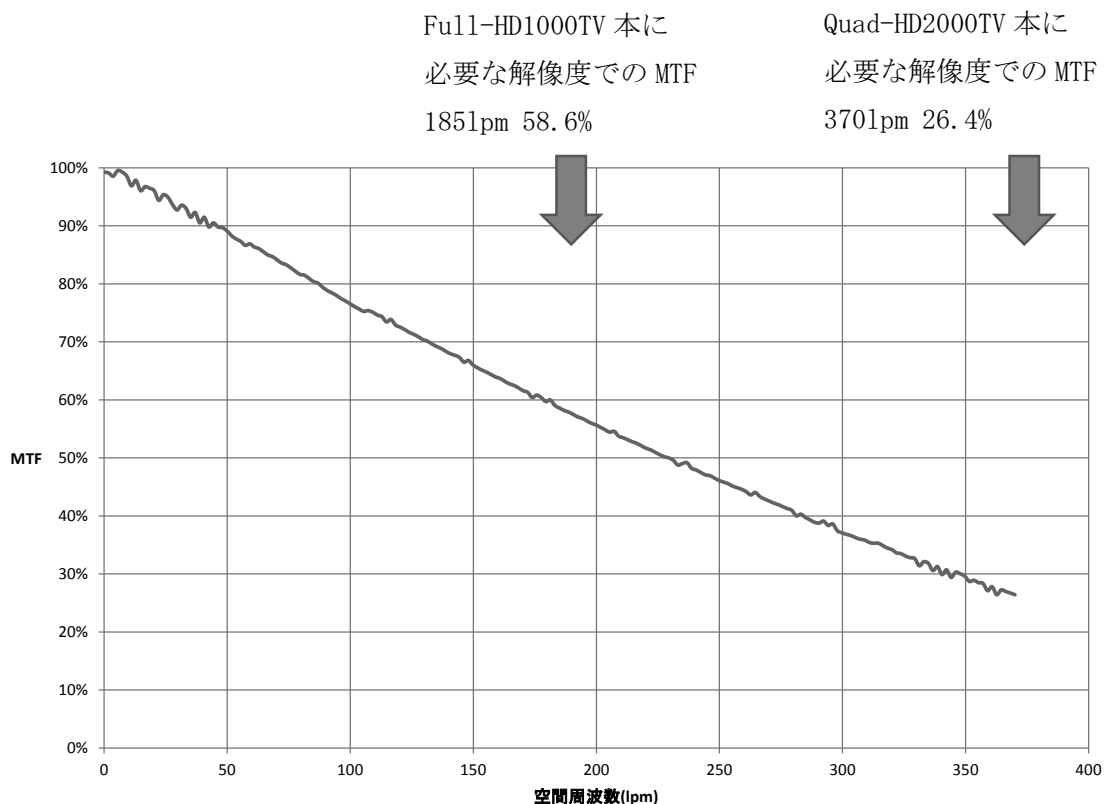


図 B.1 多眼カメラに使用した撮影レンズの MTF

## C. カメラキャリブレーションに関する説明

### C.1 はじめに

カメラキャリブレーションとは、カメラのレンズ特性（焦点距離、光学主点、イメージセンサの画素及び角度）、カメラ位置／姿勢を表すカメラパラメータを推定する処理である。推定されたカメラパラメータを用いることで、各カメラの撮影映像を高精度に補正することができる。高精度にステレオマッチングするためには、左右2台のカメラの撮影画像を正確に合わせる必要があるため、カメラキャリブレーション（カメラパラメータ推定）が必要不可欠となる。

### C.2 座標系変換

ピンホールカメラモデルに基づく幾何学的キャリブレーションの説明図を図 C.1 に示す。3次元実空間（世界座標系）とカメラで撮影した2次元画像平面（画像座標系）との対応関係を表すには、撮影するカメラの位置と向きから定義されるカメラ座標系が必要となる。すなわち、カメラの位置と向きから求まる回転行列と並進ベクトルからなる  $3 \times 4$  行列  $[\mathbf{R} \mid \mathbf{T}]$  を用いて、世界座標系  $(X_w, Y_w, Z_w)$  からカメラ座標系  $(X_c, Y_c, Z_c)$  へ変換する。変換されたカメラ座標系  $(X_c, Y_c, Z_c)$  をピンホールカメラモデルに基づいて画像座標系  $(u, v)$  に変換する。ピンホールカメラモデルとは光が一点を通過して撮像面に理想的に投影されるモデルであ

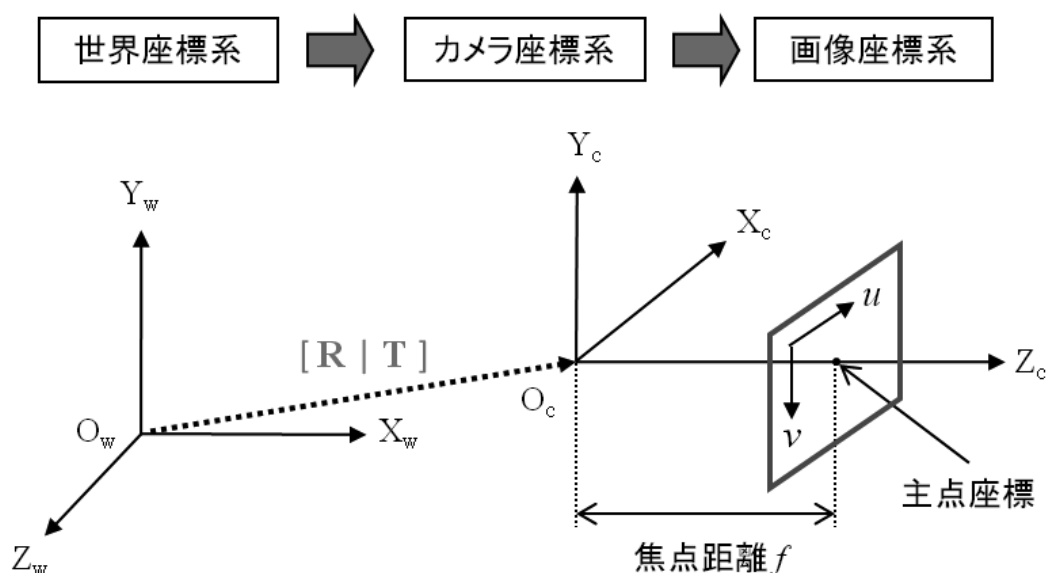


図 C.1 座標系変換の説明図

る. 図 C.1 のカメラ座標系の原点  $O_c$  はピンホールカメラモデルにおけるピンホールであり,  $Z_c$  軸とレンズの光軸方向が一致している. そして,  $u-v$  の 2 次元平面で表される画像平面 (画像座標系) は  $Z_c$  軸上の焦点距離  $f$  の位置に置かれる.  $Z_c$  軸 (光軸) と画像平面との交点が主点であり, 画像平面上の主点の座標が主点座標である. カメラ座標系上の点  $(x_c, y_c, z_c)$  は下記式のようにカメラの焦点距離  $f$  を用いて, 画像平面上の点  $(u', v')$  に投影される.

$$u' = f \frac{x_c}{z_c} \quad (\text{C.1})$$

$$v' = f \frac{y_c}{z_c} \quad (\text{C.2})$$

### C.3 カメラパラメータ

カメラパラメータは図 C.2 に示すように, 外部パラメータと内部パラメータから構成される. 外部パラメータは 3 次元座標におけるカメラの姿勢を示すヨー, ピッチ, ロールの 3 軸の回転行列と, カメラの位置を示す 3 軸の並進ベクトルから構成される. また, 内部パラメータは, 焦点距離, 主点座標, レンズ歪係数から構成される. このカメラパラメータを用いることで, 世界座標系上の点  $P(P_x, P_y, P_z)$  と, 画像座標系上における投影点  $p(p_u, p_v)$  との関係は

$$sp = \mathbf{K} [\mathbf{R} \mid \mathbf{T}] \mathbf{P} \quad (\text{C.3})$$

のように記述できる.

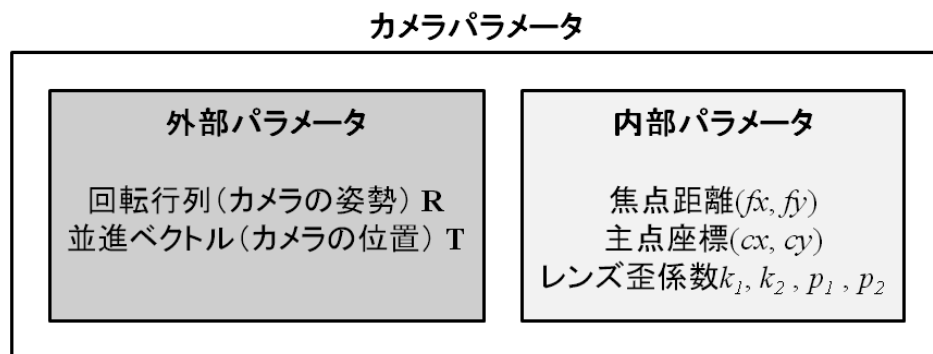


図 C.2 カメラパラメータ

### C.3.1 外部パラメータ

外部パラメータ  $[R | T]$  は、カメラの姿勢（向き）を表す  $X, Y, Z$  軸周りの回転行列  $R$  と、カメラの位置を表す並進ベクトル  $T$  で記述される。(C.4)式, (C.5)式から外部パラメータ  $[R | T]$  は  $3 \times 4$  の行列となる。

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r1 & r2 & r3 \\ r4 & r5 & r6 \\ r7 & r8 & r9 \end{bmatrix} \quad (C.4)$$

$$T = \begin{bmatrix} tx \\ ty \\ tz \end{bmatrix} \quad (C.5)$$

### C.3.2 内部パラメータ

内部パラメータとしては、スケールパラメータとレンズ歪係数がある。

#### C.3.2.1 スケールパラメータ

内部パラメータには、 $z$  軸（光軸）の大きさを 1 に正規化したカメラ座標系から画像座標系にスケールリングするパラメータがある。これは、スケールパラメータと呼び  $3 \times 3$  の行列  $K$  で表わす。

$$K = \begin{bmatrix} fx & 0 & cx \\ 0 & fy & cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (C.6)$$

- $K$  : スケールパラメータ
- $fx$  :  $u$  軸方向の焦点距離
- $fy$  :  $v$  軸方向の焦点距離
- $cx, cy$  : 主点座標（画像座標系と光軸の交点）

### C.3.2.2 レンズ歪係数パラメータ

実際のカメラのレンズには光学的な歪が光軸の同心円上に発生する。レンズ歪を補正するためのパラメータ（下記、レンズ歪係数）も内部パラメータの1つである。レンズ歪の補正は、図 C.3 に示す破線の領域である糸巻型の歪を直線の領域である矩形型に変換することである。レンズ歪のモデル化は、下記 [レンズ歪関数] によって行う。レンズ歪関数は、レンズ歪なしの座標  $(x, y)$  をレンズ歪が付加された座標  $(x', y')$  に変換する。レンズ歪をモデル化する係数としてレンズ歪係数  $k_1, k_2, p_1, p_2$  がある。

[レンズ歪関数]

$$x' = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4) + 2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)$$

$$y' = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4) + 2p_2xy + p_1(r^2 + 2y^2)$$

ここで、 $r^2 = x^2 + y^2$

$x, y$  : レンズ歪なしの座標

$x', y'$  : レンズ歪ありの座標

$k_1, k_2, p_1, p_2$  : レンズ歪係数

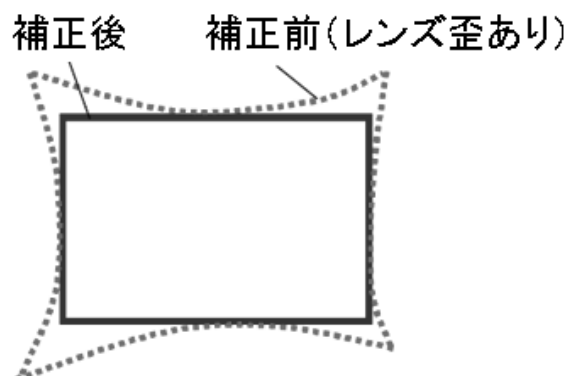


図 C.3 レンズ歪補正

## C.4 カメラキャリブレーション手順

本研究では, Zhang アルゴリズムによるカメラキャリブレーション手法を用いた[27]. 手順は下記 1 から 3 の通りである.

### 1. キャリブレーションパターン撮影

特徴点座標が既知のパターンを撮影する.

### 2. 特徴点座標検出

撮影画像から特徴点座標を検出する.

### 3. カメラパラメータ推定

世界座標系と画像座標系の対応関係を表す式に特徴点座標を代入して方程式を作成する. 最小二乗法を用いて方程式を解き, カメラパラメータを推定する.

### C.4.1 キャリブレーションパターン撮影

パターン形状が既知の市松模様などのキャリブレーションパターンを用意し, 姿勢やアングルを変えながら数回撮像する. 異なる姿勢からの平面パターンを 3 枚以上撮影することでカメラパラメータの推定が可能となる. 図 C.4 にキャリブレーションパターンの一例を示す.

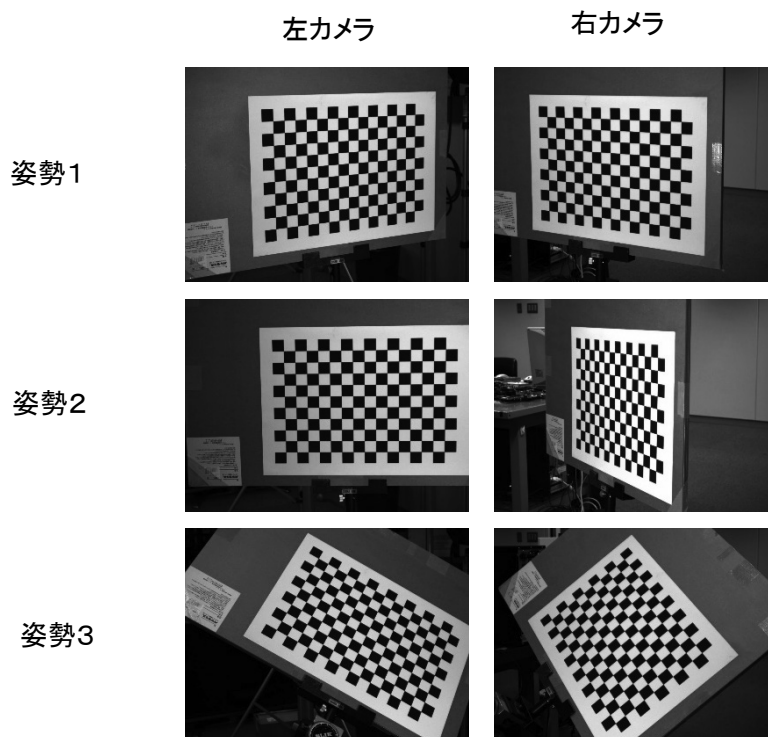


図 C.4 キャリブレーションパターン撮影画像の例

## C.4.2 特徴点検出と対応関係導出

市松模様のキャリブレーションパターンを撮影した場合は、図 C.5 に示すように、市松模様の交点を特徴点として検出し、その座標値を求める。キャリブレーションの精度を高めるため、交点の座標をサブピクセル精度で求める。

世界座標系における平面パターン上の点と、画像座標系における画像上の点との対応は  $3 \times 3$  のホモグラフィ行列  $H$  を用いて

$$sp = HP \tag{C.7}$$

と表すことができる。この世界座標系と画像座標系の対応関係を複数求めて、カメラパラメータを推定する。

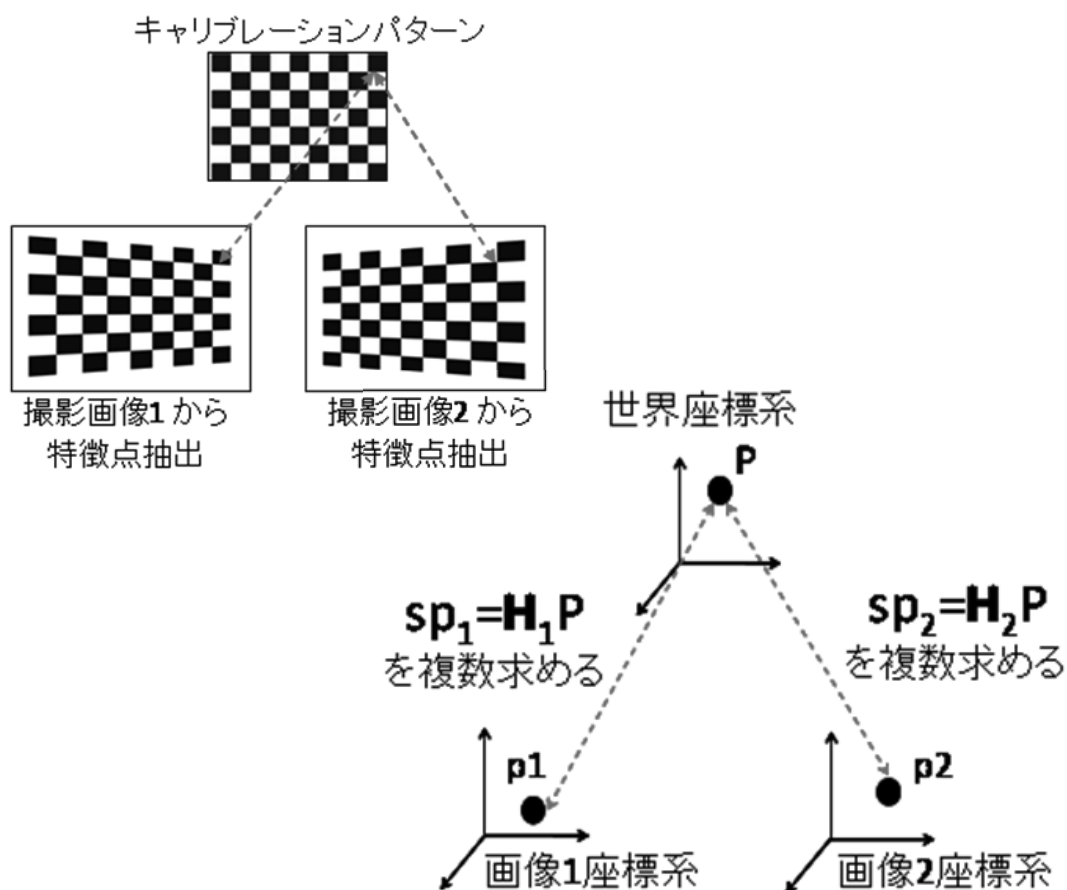


図 C.5 キャリブレーションパターン例



### C.4.3 カメラパラメータ推定

$\mathbf{H} = \mathbf{K} [ \mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t} ]$ であり( $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ )は回転行列 $\mathbf{R}$ の単位ベクトル, $\mathbf{t}$ は並進ベクトル $\mathbf{T}$ の係数値, 平面パターンの画像1枚につき, ホモグラフィ行列 $\mathbf{H}$ が1つ得られる.

$\mathbf{H} = [ h_1 \quad h_2 \quad h_3 ]$ とすると,

$$[ h_1 \quad h_2 \quad h_3 ] = \mathbf{K} [ \mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t} ] \quad (\text{C.8})$$

となり, $\mathbf{r}_1$ と $\mathbf{r}_2$ が互いに直交する単位ベクトルであることを利用すると, 内部パラメータ $\mathbf{K}$ に関する以下の制約条件が成り立つ.

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_2 = 0 \quad (\text{C.9})$$

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^T \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_2 \quad (\text{C.10})$$

1つのホモグラフィ行列につき, 2つの式を立てることができるので, ホモグラフィ行列を3つ以上得れば, $\mathbf{H} = [ h_1 \quad h_2 \quad h_3 ]$ に含まれる6つの未知数を計算することができ, 内部パラメータの導出が可能となる. また, 外部パラメータは内部パラメータを用いて推定することができる. 更に, 推定した内部パラメータ及び外部パラメータを初期値として, 非線形最適化によって最終的なパラメータを求めることができる.

### C.4.4 ステレオカメラキャリブレーション

カメラキャリブレーションは, 一般に単眼カメラに適用される処理であるが, ここではそれをステレオカメラ(左右2眼カメラ)に拡張した場合について説明する. ステレオカメラのカメラキャリブレーションは以下のステップによって行う.

#### 1. キャリブレーションパターンの同時撮影

- ・基準カメラを左カメラとする.
- ・キャリブレーションパターンの向き, 位置, 撮影距離を変えて3回以上左右カメラで同時に撮影する. 撮影回数は20回以上を推奨する.
- ・キャリブレーションパターンの特徴点が撮影画像周辺についても撮影されるように, 向き, 位置, 撮影距離を調整する.

#### 2. 特徴点座標抽出

- ・全てのキャリブレーションパターン撮影画像から特徴点座標を求める.

#### 3. 各カメラのカメラパラメータを推定

- ・世界座標系と画像座標系の対応関係を表す式に特徴点座標を代入して方程式を作成する。最小二乗法を用いて方程式を解き、カメラパラメータ推定する。
  - ・カメラパラメータ推定は、各カメラで個別に行う。
4. ワールド座標系を基準カメラ座標系へ変換
- ・ワールド座標系を基準カメラ（左カメラ）座標系に変換し、左右カメラ間の姿勢及び位置関係を表す外部パラメータを求める。

次に、図 C.6 を用いて、ワールド座標系を左カメラ座標系（基準カメラ）に変換する方法

[基準カメラからの変換式]

$$\mathit{convRT} = [\mathbf{R}_R | \mathbf{T}_R] \cdot [\mathbf{R}_L | \mathbf{T}_L]^{-1} \quad (\text{C.11})$$

$$\mathbf{p}_R = \mathbf{K}_R \cdot \mathit{convRT} \cdot \mathbf{K}_L^{-1} \cdot \mathbf{p}_L \quad (\text{C.12})$$

$X_L, X_R$  : ワールド座標系上の点  $X$  を各カメラ座標系上で見た点  
 $\mathbf{p}_L, \mathbf{p}_R$  : 各カメラ座標系上の点を各画像座標系上で見た点  
 $[\mathbf{R}_L | \mathbf{T}_L], [\mathbf{R}_R | \mathbf{T}_R]$  :  
 ワールド座標系上の点を各カメラ座標系上の点に変換する外部パラメータ  
 $\mathit{convRT}$  :  $\mathbf{p}_L$  を  $\mathbf{p}_R$  に変換する外部パラメータ  
 $\mathbf{K}_L, \mathbf{K}_R$  : 各カメラの内部パラメータ

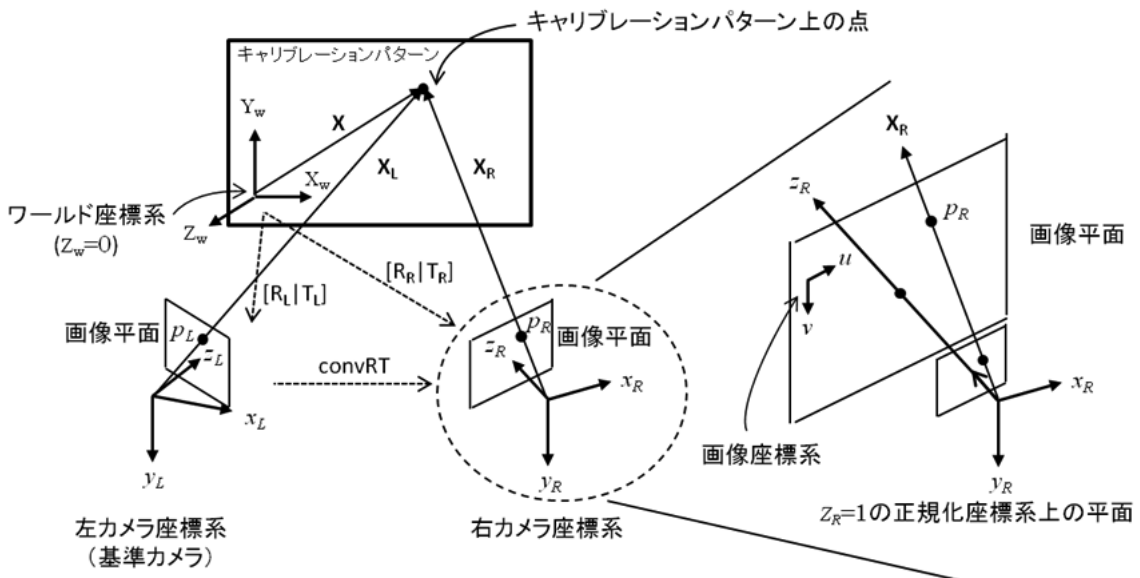


図 C.6 世界座標系とカメラ座標系

について説明する。ワールド座標系を図 C.6 に示すキャリブレーションパターン上とした場合、各カメラ座標系へ変換する外部パラメータは、 $[R_L|T_L]$ 、 $[R_R|T_R]$ となる。ワールド座標系上の点  $X$  は、各カメラ座標系上からみると  $X_L$ 、 $X_R$  と表わすことができ、各カメラ画像座標系上では  $P_L$ 、 $P_R$  と表わすことができる。ここで、 $P_L$  を  $P_R$  に変換することを考える。左カメラ座標系を右カメラ座標系へ変換する外部パラメータは、図 C.6 の中に示した (C.11) 式のように  $\text{convRT}$  と表すことができるため、 $P_L$  から  $P_R$  への変換は (C.12) 式となる。

これは、点  $P_L$  を  $Z_L$  軸成分が 1 の正規化座標系へ変換 ( $K_L^{-1}$ ) し、 $\text{convRT}$  によって右カメラ座標系への回転及び並進を行う。そして、 $Z_R$  軸成分が 1 の正規化座標系から右カメラ画像座標系へ変換 ( $K_R$ ) することで、 $P_L$  を  $P_R$  に変換することができる。表 C.1 にカメラパラメータの一例を示す。

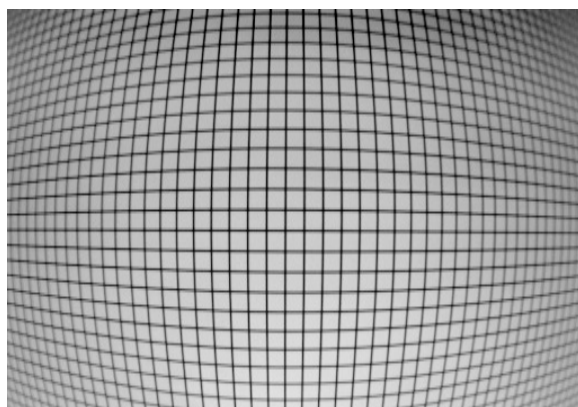
表 C.1 カメラパラメータの一例

		左カメラ	右カメラ
焦点距離	$f_x$	2232.1590	2236.2196
	$f_y$	2230.6516	2235.6124
主点座標	$c_x$	529.6889	464.1726
	$c_y$	430.1410	453.1307
レンズ歪係数	$k_1$	0.04156	0.01419
	$k_2$	0.06969	0.1474
	$p_1$	0.008644	0.01306
	$p_2$	0.0002665	0.005644
回転行列	<b>R</b>	0.8918 -0.08990 0.4434 -0.01375 -0.9849 -0.1720 0.4522 0.1473 -0.8796	0.8578 0.09048 -0.5060 -0.003213 -0.9834 -0.1813 -0.5140 0.1571 -0.8434
並進ベクトル	<b>T</b>	-426.0398 281.6541 1085.5846	829.5674 284.6579 1068.0885

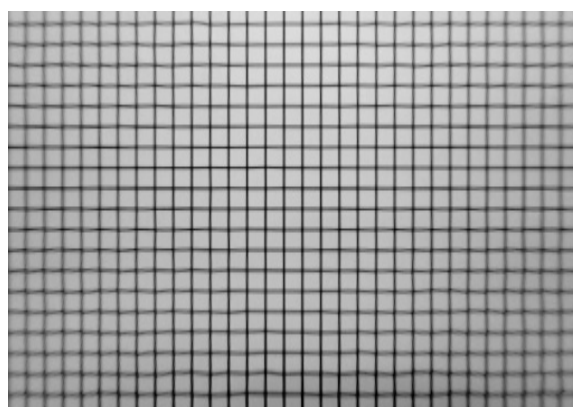
## D. レンズ歪の補正

### D.1 はじめに

レンズ歪をモデル化した関数及びレンズ歪係数を用いて、レンズ歪を除去した補正画像を生成する。レンズ歪の補正画像生成は、後述する光軸を平行化した画像の生成にて説明する。図 D.1 にレンズ歪補正の一例を示す。



歪補正前



歪補正後

図 D.1 レンズ歪補正の例

## D.2 Rectification

左右画像間の幾何学的関係は、エピポーラ幾何を用いて表すことができる。図 D.2 は、空間中の点  $P$  を左右カメラ画像平面に投影した図である。左右カメラの光学中心を  $O_L$ ,  $O_R$  とすると 3 点  $P$ ,  $O_L$ ,  $O_R$  を通る平面をエピポーラ平面と呼ぶ。エピポーラ平面と左右カメラの画像平面とが交わる線をエピポーラ線と呼ぶ。ステレオ画像では、各カメラの光軸が平行でない場合、エピポーラ線も平行とならない (図の光軸平行化前参照)。エピポーラ線が平行でない左右画像に対し、エピポーラ線に沿ってステレオマッチングの探索を行うと、計算量の増加や誤検出の増加といった問題が発生する。しかし、ステレオ画像は光軸が平行なカメラで撮影したものと同等なステレオ画像に変換することができる。これをステレオ画像の平行化 (Rectification) という。つまり、Rectification は、左右カメラ画像の光軸の平行化と、光学中心の位置ずれを補正する処理である。中心射影モデルでの光軸の平行化は、仮想的な画像平面に対してそれぞれの画像を射影することにより、Rectification を行うことが可能である。

Rectification 画像の生成は、光軸の平行化を行う  $3 \times 3$  の射影変換行列 (以下、光軸平行化行列) の算出と、光軸平行化行列及びカメラパラメータによる光軸を平行化した画像の生成からなる。ここで示す内部パラメータ、外部パラメータは、カメラキャリブレーションによって推定されたカメラパラメータである。

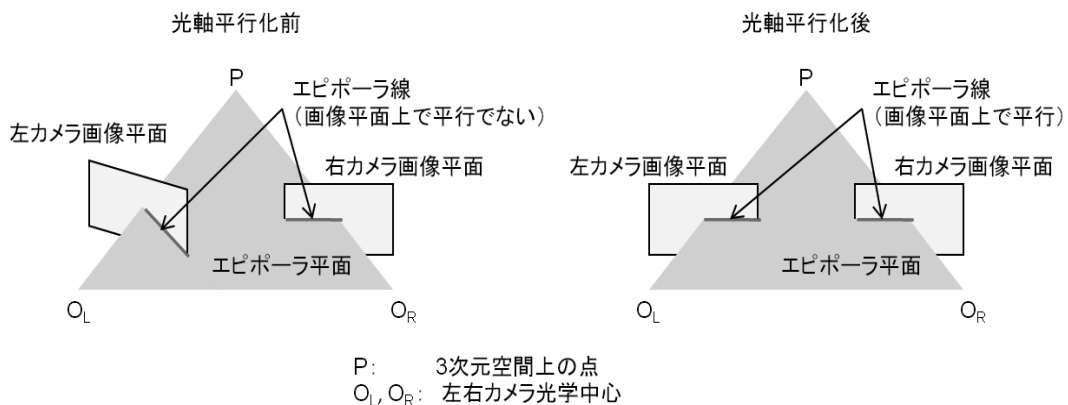


図 D.2 エピポーラ線の平行化

### D.3 光軸平行化行列の算出

左右カメラの光軸平行化行列の算出は、下記ステップによって行う。

1. 右カメラ座標系と平行となるように左カメラ座標系を回転行列  $\mathbf{R}$  で回転させる。  
図 D.3 の(a) から (b)
2. 1. で回転させた左カメラ座標系の  $x_L$  軸がベースラインと平行となるように回転させる。  
図 D.3 の(b) から (c) 及び (d)
3. 右カメラ座標系の  $x_R$  軸がベースラインと平行となるように回転させる。  
図 D.3 の(b) から (c) 及び (d)

[ステップ 1]

左右カメラ間の位置・姿勢の関係を図 D.3(a) に示す。(a) は、左カメラ座標系を基準 (ワールド) 座標系とし、左右カメラの光軸をそれぞれ  $Z_L$ ,  $Z_R$  とした場合に、左右カメラの光軸が平行でないことを表している。3次元空間上の点  $\mathbf{X}$  について、左カメラ座標系からみたベクトルを  $\mathbf{X}_L$ , 右カメラ座標系からみたベクトルを  $\mathbf{X}_R$  で表している。左カメラ座標系を右カメラ座標系に回転させる  $3 \times 3$  の回転行列  $\mathbf{R}$ , 並進ベクトル  $\mathbf{t}$  とすると、ベクトル  $\mathbf{X}_L$ ,  $\mathbf{X}_R$  間には、(D.1) 式が成り立つ。

$$\mathbf{X}_R = \mathbf{X}'_L = [\mathbf{R} \mid \mathbf{t}] \mathbf{X}_L \quad \text{ここで, } \mathbf{t} = \mathbf{R}\mathbf{T} \quad (\text{D.1})$$

処理ステップ 1 の目的は、右カメラ座標系と平行となるように左カメラ座標系を回転させることであるため、左カメラ座標系を下記式により  $3 \times 3$  の回転行列  $\mathbf{R}$  だけ回転させる。回転させた結果、左カメラ座標系は図 D.3 (b) の破線領域のように回転する。

$$\mathbf{X}'_L = \mathbf{R} \mathbf{X}_L \quad (\text{D.2})$$

[ステップ 2]

図 D.3 (b) の破線領域を拡大したものが図 D.3 (d) である。図 D.3 (d) のように大きさが 1 である単位ベクトル  $\mathbf{u} = [1, 0, 0]$  と右カメラ座標系への並進ベクトル  $\mathbf{t}$  との外積  $\mathbf{C}$  を求める。

$$\mathbf{C} = \mathbf{t} \times \mathbf{u} \quad (\text{D.3})$$

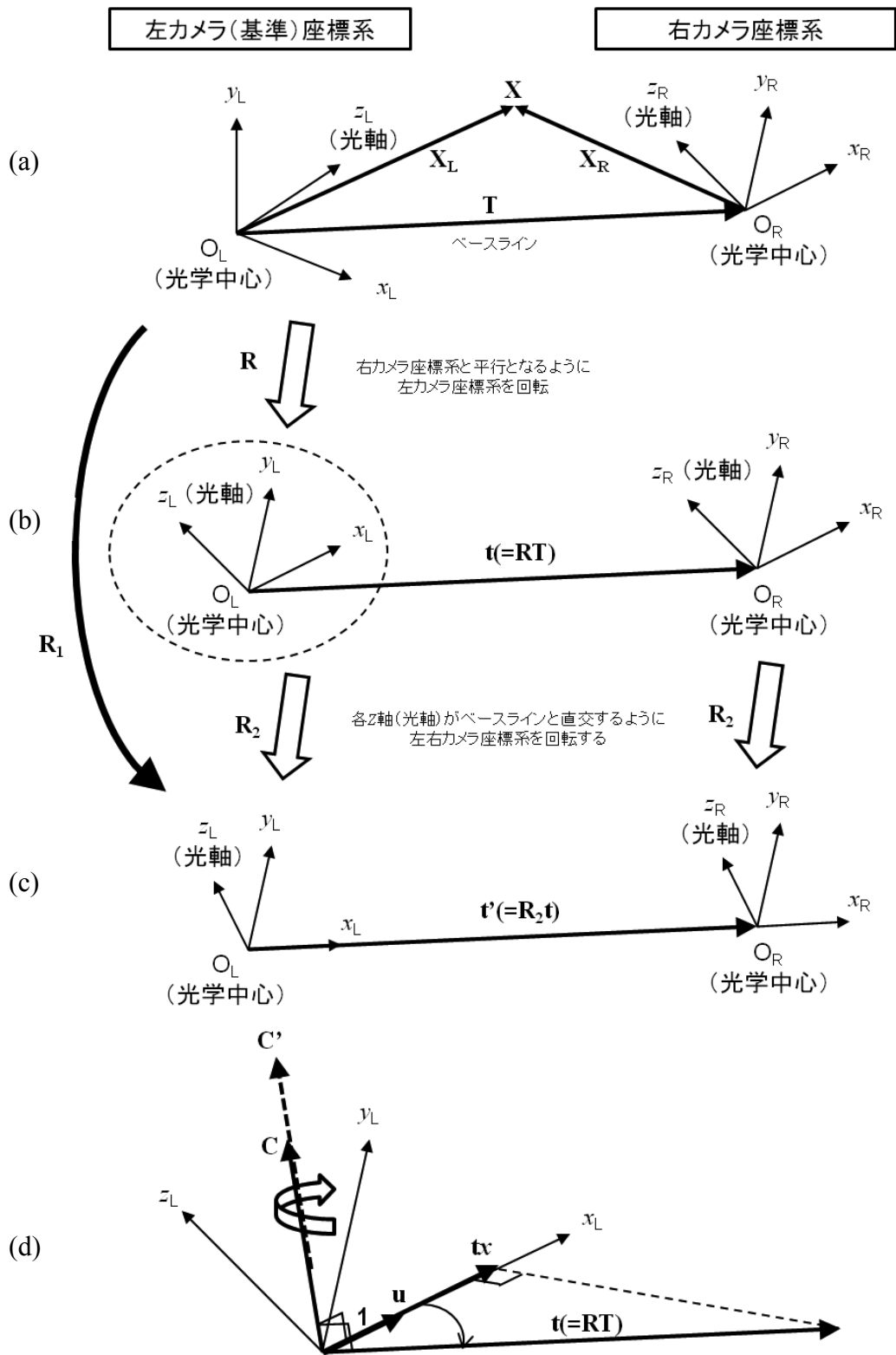


図 D.3 光軸平行化行列の算出

$\mathbf{C}$  は,  $\mathbf{u}$  ベクトルと  $\mathbf{t}$  ベクトルによって作られる平面に直交するベクトルである. この直交ベクトル  $\mathbf{C}$  を中心に左カメラ座標系を回転させると,  $x_L$  軸をベクトル  $\mathbf{t}$  と平行にすることができる. この回転を表す回転ベクトル  $\mathbf{C}'$  は, (D.4)式で表わすことができる.

$$\mathbf{C}' = \mathbf{C} \cdot \arccos \left( \frac{\mathbf{t} \cdot \mathbf{C}}{\|\mathbf{t}\| \|\mathbf{C}\|} \right) \quad (\text{D.4})$$

回転ベクトル  $\mathbf{C}'$  を  $3 \times 3$  の回転行列  $\mathbf{R}_2$  に変換する.

$$\mathbf{R}_2 \leftarrow \mathbf{C}' \quad (\text{D.5})$$

ステップ 1 で右カメラ座標系と平行にした左カメラ座標系を回転ベクトル  $\mathbf{R}_2$  で回転させることにより,  $x_L$  軸をベースラインと平行にすることができる. 以上をまとめると, 図 D.3 (a) の左カメラ座標系から図 D.3 (c) の左カメラ座標系への変換は, (D.6)式のように表わすことができる.

$$\mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_2 \mathbf{R} \quad (\text{D.6})$$

[ステップ 3]

前述のステップ 2 と同様に, 右カメラ座標系を回転ベクトル  $\mathbf{R}_2$  で回転することにより,  $x_R$  軸をベースラインと平行にすることができる (図 D.3 (c)).

以上のステップ 1 から 3 までの処理を行うことにより, 左右カメラ座標系の各光軸を平行化することができる. また, 光軸の平行化後の並進ベクトル  $\mathbf{t}'$  は (D.7)式で表わせる.

$$\mathbf{t}' = \mathbf{R}_2 \mathbf{t} = \mathbf{R}_1 \mathbf{T} \quad (\text{D.7})$$

#### D.4 光軸平行化後の投影行列の算出

光軸平行化行列の算出によって, 左右カメラの光軸を平行化することができる. 次に, 平行化後の各カメラ座標系上の投影像をそれぞれの画像座標系上に投影する. 各画像座標系上の画像は, 左右カメラで同じスケール, 位置に投影される必要があるため, 左右カメラで同じ焦点距離, 主点座標となる投影行列を求める. この投影行列は, Rectification 後カメラの内部パラメータと考えることができ, 左右カメラで共通のパラメータとなる.

投影行列は, カメラの向き, 位置, レンズ歪量によって適切に調整する必要がある. 光軸平行化後の画像をどのように表示させるかによって設定方法が決まるため, D.4.1 及び D.4.2 に設定方法の例を挙げる.

決定した焦点距離を  $f'$ , 主点座標を  $(cx', cy')$  とすると, 投影行列  $\mathbf{K}'$  は下記 (D.8)式で表わされる.



$$\mathbf{K}' = \begin{bmatrix} f' & 0 & cx' \\ 0 & f' & cy' \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{D.8})$$

$\mathbf{K}'$ : 3x3投影行列  
 $f'$ : 焦点距離  
 $cx', cy'$ : 主点座標

#### D.4.1 焦点距離決定方法

焦点距離は、投影後の画像の画角を決定する。ここでは、左右カメラのカメラパラメータがほぼ等しい場合（カメラの個体差を除く違いがない場合）について説明する。左カメラのx成分の焦点距離を  $f_{xL}$ 、右カメラを  $f_{xR}$  とすると、光軸平行化後の画像の見切れる領域（消失点）を少なくするために、小さい方の値を投影行列の焦点距離  $f'$  とする。

$$f' \leftarrow \text{Min}(f_{xL}, f_{xR}) \quad (\text{D.9})$$

#### D.4.2 主点座標決定方法

主点座標は、投影後の画像の投影位置を決定する。ここでは、左右カメラのカメラパラメータが大体等しい場合（カメラの個体差を無視して左右カメラで同一のカメラを使用した場合を指す）について説明する。左カメラの主点座標を  $(cx_L, cy_L)$ 、右カメラを  $(cx_R, cy_R)$  とすると、x, y 成分毎の平均値を投影行列の主点座標  $(cx', cy')$  とする。

$$cx' \leftarrow \text{Avg}(cx_L, cx_R) \quad (\text{D.10})$$

$$cy' \leftarrow \text{Avg}(cy_L, cy_R) \quad (\text{D.11})$$

## D.5 光軸を平行化した画像の生成

算出した光軸平行化行列  $\mathbf{R}_L$  と  $\mathbf{R}_R$  をそれぞれ  $\mathbf{H}_L$  と  $\mathbf{H}_R$  とすると下記座標変換式により, 光軸を平行化した後の左右カメラ画像座標を左右カメラの撮影画像座標へ変換できる.

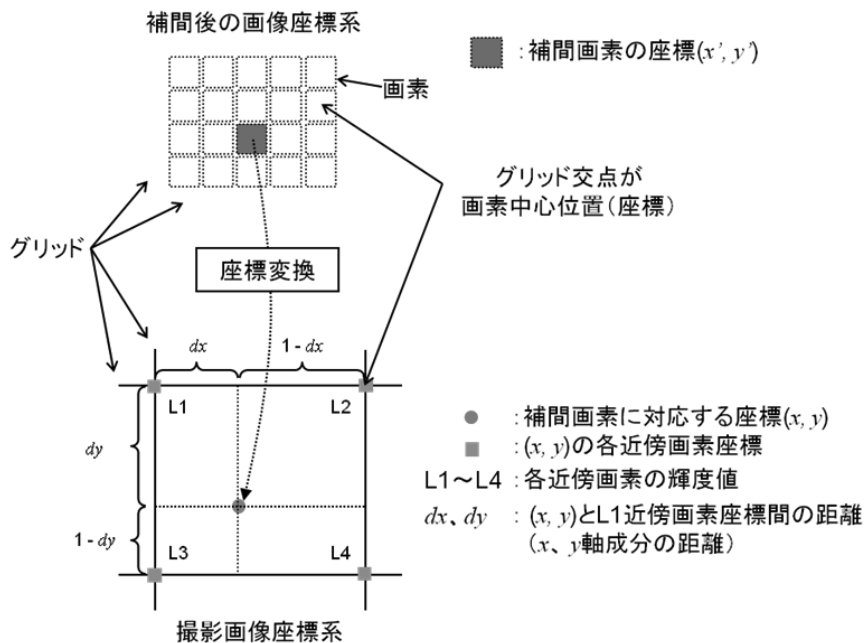
$$\mathbf{x}_L = \mathbf{K}_L \Phi_L \mathbf{H}_L^{-1} \mathbf{K}'^{-1} \mathbf{x}'_L \quad (\text{D.12})$$

$$\mathbf{x}_R = \mathbf{K}_R \Phi_R \mathbf{H}_R^{-1} \mathbf{K}'^{-1} \mathbf{x}'_R \quad (\text{D.13})$$

- $\mathbf{x}'_L, \mathbf{x}'_R$ : Rectification後の左右カメラ画像上の座標
- $\mathbf{x}_L, \mathbf{x}_R$ : 左右カメラ撮影画像上の座標
- $\mathbf{K}'^{-1}$ : Rectification後の3x3投影行列
- $\mathbf{H}_L^{-1}, \mathbf{H}_R^{-1}$ : 3x3光軸平行化行列
- $\Phi_L, \Phi_R$ : 左右カメラのレンズ歪関数
- $\mathbf{K}_L, \mathbf{K}_R$ : 左右カメラの内部パラメータ

### D.5.1 光軸平行化画像の生成

座標変換処理にて算出した左右カメラの撮影画像座標からバイリニア補間 (図 D.4 「補間画素の輝度値」算出式参照) により, Rectification 後の画像上の座標を補間する. Rectification 後の画像全体について「補間画素の輝度値」を算出し, 左右カメラそれぞれについて光軸平行化画像を生成する.



$$\text{補間画素の輝度値} = (1-dx) \cdot (1-dy) \cdot L1 + dx \cdot (1-dy) \cdot L2 + (1-dx) \cdot dy \cdot L3 + dx \cdot dy \cdot L4$$

図 D.4 バイリニア補間

## D.5.2 光軸平行化画像の例

光軸平行化処理の前後画像を図 D.5 に示す. 光軸平行化前では, 画像の水平ライン (画像の  $x$  座標と平行である線) に対し, 左右カメラ画像の各対応点 (左カメラ画像は赤点, 右カメラ画像は黄点) を通る各エピポーラ線が斜めに傾いており, 光軸の平行化がなされていない. しかし, 光軸平行化後では, 画像の水平ラインに対し, 各エピポーラ線が平行となっている. このように左右カメラ画像をステレオマッチングする際, 光軸の平行化処理を行うと左画像と同一ライン上のみ右画像から探索すれば済むことになる. これは, 対応点探索の処理量を大幅に削減し, 同時に誤検出の削減につながる.

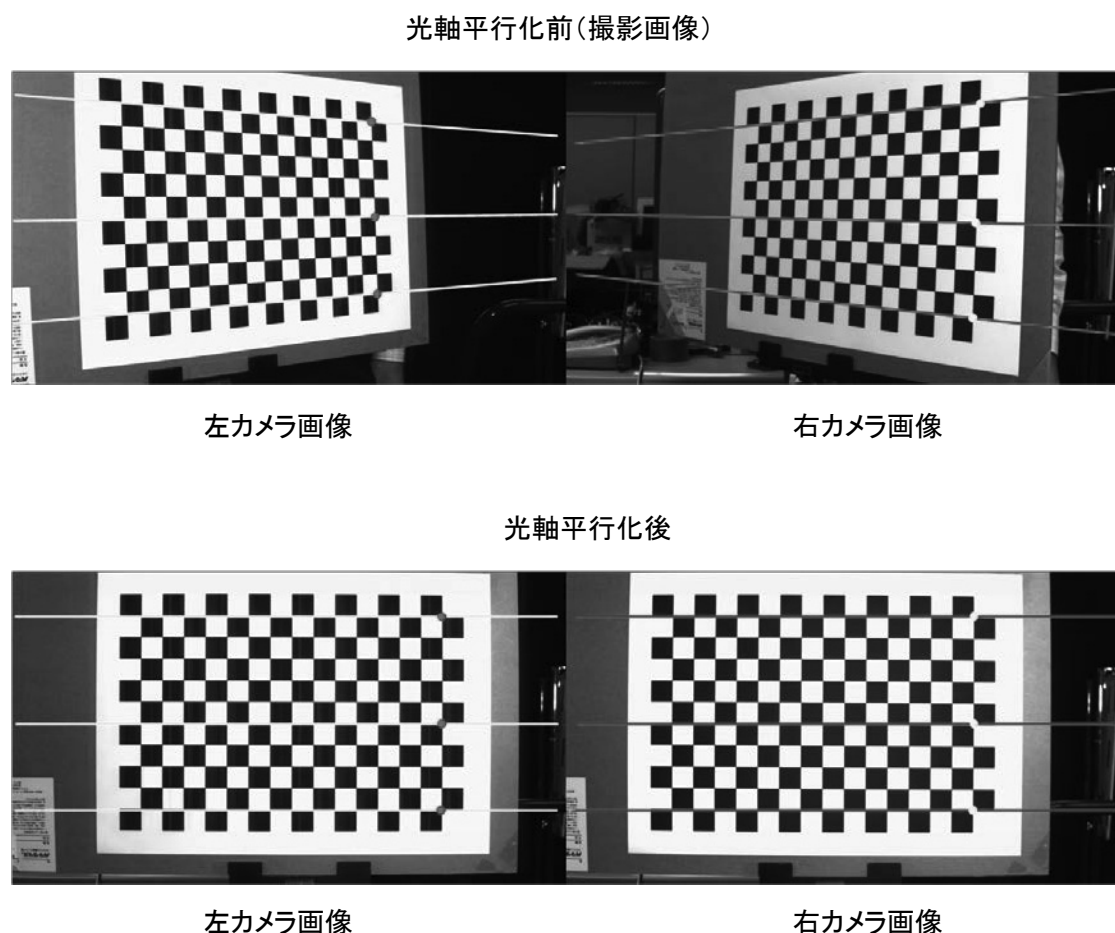


図 D.5 光軸平行化画像の例

## E. 視差マップ

本研究で用いた視差マップ生成技術は、Full-HD カメラ 2 眼で撮影した左右映像から SAD(Sum of Absolute Difference)演算を用いたステレオマッチングにより、Full-HD/60fps の視差マップをリアルタイム生成するものである。

### E.1 視差マップとは

異なる二地点で対象物を観測した時に、対象物の見える方向（位置）が異なる。その異なる方向の角度や、異なる位置の移動量（ズレ量）を視差と呼ぶ。この視差と観測した二点間の距離（基線長）、観測機の焦点距離が分かれば、三角測量で対象物までの距離を測定することができる。人間の視覚系も左右2つの眼を持ち、その網膜上に同じ対象物がズレて投影される。このズレを両眼視差と呼び、人間の立体知覚において大きな役割をもつ。ステレオ画像の場合でも右と左の画像で同じ被写体が写っている位置（座標）を探索して、その座標の差分を算出すれば視差を算出することができる。更に、撮影したステレオカメラのカメラ間隔とレンズの焦点距離が分かれば、その被写体までの距離を算出することができる。

視差マップとはモノクロ画像の階調を用いて視差を表示するものである。即ち、撮影した被写体の撮影距離を画素毎に示すものである。図 E.1 にステレオ画像（左右画像）と視差マ



図 E.1 多眼カメラに使用した撮影レンズの MTF

ップの一例を示す，ここでは輝度の高い白い領域が手前，逆に輝度の低い黒い領域が奥側であることを表現している。

## E.2 アルゴリズム

視差マップ生成技術の主要処理である歪補正処理とステレオマッチング処理のアルゴリズムについて説明する。

### E.2.1 歪補正処理

本視差マップ生成技術における歪補正処理は，左右画像の歪を補正してステレオマッチングの精度を向上させることを目的としている。処理内容は，光学像の幾何学的歪（Lens Distortion）を補正するレンズ歪補正と，カメラの姿勢による投影の幾何学に起因する歪を補正する Rectification とからなる。両方の歪補正とも，カメラキャリブレーションによって算出されたカメラパラメータによる座標変換をもとに処理される。

### E.2.2 歪補正処理ステレオマッチング処理

ステレオマッチングとは，左右に配置された2台のカメラで撮影した2枚1組の画像を

表 E.1 代表的ステレオマッチングアルゴリズム

アルゴリズム	処理概要	評価関数
ブロックマッチング (SAD, SSD)	<ul style="list-style-type: none"> <li>基準画像に対し、所定のブロックサイズでテンプレート画像の位置を移動</li> <li>重ね合わせの差分が最小となる座標を求める。</li> </ul>	$\text{SAD: } \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1}  I(i, j) - T(i, j) $ $\text{SSD: } \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (I(i, j) - T(i, j))^2$ <p><math>I(i, j)</math>: 基準画像 <math>T(i, j)</math>: テンプレート画像</p>
位相限定相関 (POC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>基準画像とテンプレート画像の両者に、離散フーリエ変換(DFT)、位相画像抽出</li> <li>位相相関関数より視差を算出 相関の最大値の座標がマッチング点</li> <li>位相成分を用いるため、ノイズや輝度差の影響を弱くしにくい</li> </ul>	<p>入力画像 <math>f(n_1)</math>: 基準画像 <math>g(n_1)</math>: テンプレート画像</p> <p>位相抽出</p> $\hat{R}(k_1) = \frac{F(k_1) \overline{G(k_1)}}{ F(k_1)   G(k_1) }$
動的計画法 (DP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>離散化された最適化問題の幅優先探索</li> <li>固有空間上のユークリッド距離(視差)を算出</li> <li>光軸の平行化(Rectification)と親和性が高い</li> </ul>	<p>画像間相違度 <math>d(i, j) = \ I_i - T_j\ ^2</math> <math>T_j</math>: テンプレート画像(<math>j: 0 \sim n</math>) <math>I_i</math>: 基準画像(<math>i: 0 \sim n</math>)</p> <p>開始を <math>D(1, 1) = d(1, 1)</math> として漸化式を計算する</p> $D(i, j) = \min \begin{cases} D(i-1, j) + w_1 \cdot d(i, j) & w_1, w_2, w_3 \\ D(i-1, j-1) + w_2 \cdot d(i, j) & \text{相違度に対する} \\ D(i, j-1) + w_3 \cdot d(i, j) & \text{重み係数} \end{cases}$ <p><math>D(n, n)</math>まで計算すると <math>D(i, j)</math>の値が画像間の対応(視差値)を表す</p>
グラフカット (GC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>エネルギー最小化問題によるマッチング平面</li> <li>グラフの最小切断(グラフカット)理論を適用</li> <li>グラフ理論とは、物の結び付きに関する情報を抽出する数学理論</li> </ul>	<p>エネルギー関数 <math>E(X)</math>を最小化することにより、マッチング画像を検出する。</p> $E(X) = \sum_{v \in V} g_v(X_v) + \sum_{(u,v) \in E} h_{uv}(X_u, X_v)$ <p>データ項 (各座標ノリの視差に依存する値の集合)      平滑化 (視差の隣接関係 (ex: 等間隔)を表す)</p>

用いて、左のカメラで撮影された画像が、右のカメラで撮影された画像のどの部分に対応するかを演算により求め、その対応関係から物体までの距離情報である視差値を推測するものである。ステレオマッチングのアルゴリズムは表 E.1 に示す様に幾つか存在するが、本書では、計算量が少なく、高速処理が可能な、SAD 演算を用いたステレオマッチングを採用した。

### E.2.2.1 処理フロー

左右  $3 \times 3$  のウィンドウサイズを例とした SAD ステレオマッチング処理を図 E.2 に示す。ステレオマッチング処理では、まず左右画像の一方を基準に決める。ここでは左画像を基準とする。その基準（左）画像内においてある注目画素の周囲に小さな注目ウィンドウを設定する。右の画像内でも注目画素の周囲に左と同じ大きさのウィンドウをとり、左右画像のウィンドウ内の各ピクセル値の差の総和を計算する。これを右画像のウィンドウを同一ライン上にずらしていきながら探索し、その総和が最小だった点を対応点として検出する。基準画像の注目点は下記の左画像探索開始位置からスタートして左画像探索開始位置まで移動する。なお網掛け示している左画像の周辺領域は探索する右画像にウィンドウが設定できないため、視差値を算出することができない。この SAD アルゴリズムでは、設定するウィンドウサイズを大きくとるほど正確な対応点を検出できるが、計算量はウィンドウサイズの 2 次関数的に増加する。

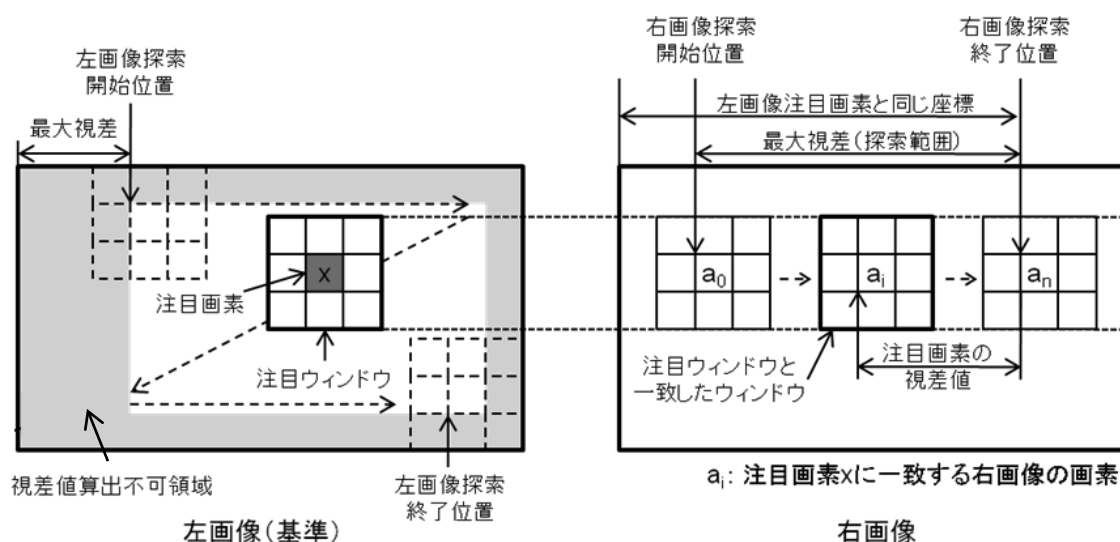


図 E.2 SAD ステレオマッチング処理

### E.2.2.2 一致ウィンドウの検出

一致したウィンドウの検出手順は以下の通りである。

#### (1) SAD 値の算出

SAD 値は、図 E.3 に示す左右ウィンドウの各画素値の差の絶対値の合計 (E.1) 式から算出される。

$$SAD = \sum_{i=0}^{3 \times 3 - 1} (|p_i - p'_i|) \quad (E.1)$$

#### (2) 一致ウィンドウ探索

左画像の注目ウィンドウと右画像の探索範囲内の各ウィンドウ間でそれぞれ SAD 値を算出し、SAD 値が最も小さいウィンドウを一致ウィンドウとする。

#### (3) 視差値の算出

注目画素の座標と、最小の SAD 値となった一致ウィンドウの中心画素座標との座標の差分から、(E.2)式にて視差値を算出する。

$$Disparity = P_{target} - P_{match} \quad (E.2)$$

*Disparity* : 注目画素の視差値

$P_{target}$  : 注目画素座標

$P_{match}$  : 一致ウィンドウの中央画素座標

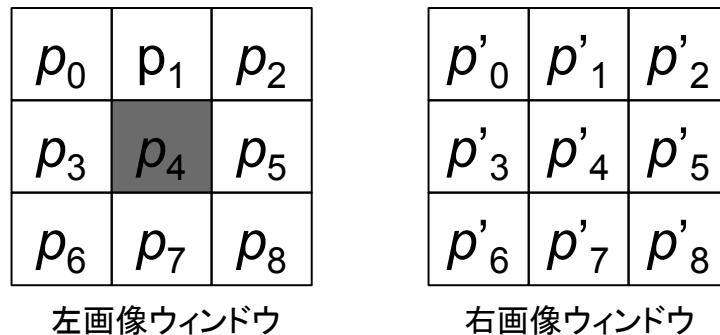


図 E.3 SAD 値算出方法

## F. 視差マップ生成用色変換

本研究の多眼カメラで使用しているカメラモジュールでは、基準カメラである Bayer イメージセンサの RGB カラーフィルタ特性と、各モノクロの RGB モジュールのカラーフィルタ特性が異なっている。そのため、各カメラからの RAW データをそのまま使用した場合には視差マップ生成時に誤差が生じること、また画像合成時にエラースルー領域と高解像度化領域で色が変わってしまうという問題点が生じる。

そのため、視差マップ生成や高解像度化の処理を行う前の段階で、Bayer 出力をモノクロもカメラモジュールに対して違いが最小限になるよう色変換処理を行っている。色変換処理は、モノクロの RGB センサでマクベスカラーチャート（24 色）を撮影し、R・G・Bそれぞれの出力から想定されるチャートの RGB 値を出力し、この値に Bayer で同様に撮影したカラーチャートにおける各チャートの RGB 値の色差が最小となるような変換を行う。変換は 3 行 4 列の行列式によって行っている。行列式の一例を以下に示す。

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.32019 & -0.40517 & 0.13579 & -0.00447 \\ -0.27552 & 1.34286 & -0.20640 & -0.00068 \\ -0.27552 & -0.29320 & 1.84180 & -0.00705 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (\text{F.1})$$

なお、ここでの各係数の値は昼光色（cool white）蛍光灯下での値であり、被写体の照明環境が変化した場合、係数を照明光に合わせて最適化する必要がある。



## G. 凹凸レンズのシフトによる位相変化の導出

図 G.1 に、凹凸レンズのシフトによる位相変化を導出するための構成図を示す。導出計算の前提条件は、

- ・近軸光線で計算（光軸に平行な光線）
- ・ $d < R$

である。

光軸に平行な光線 L について、①～⑤の光路長を計算すると次のようになる。

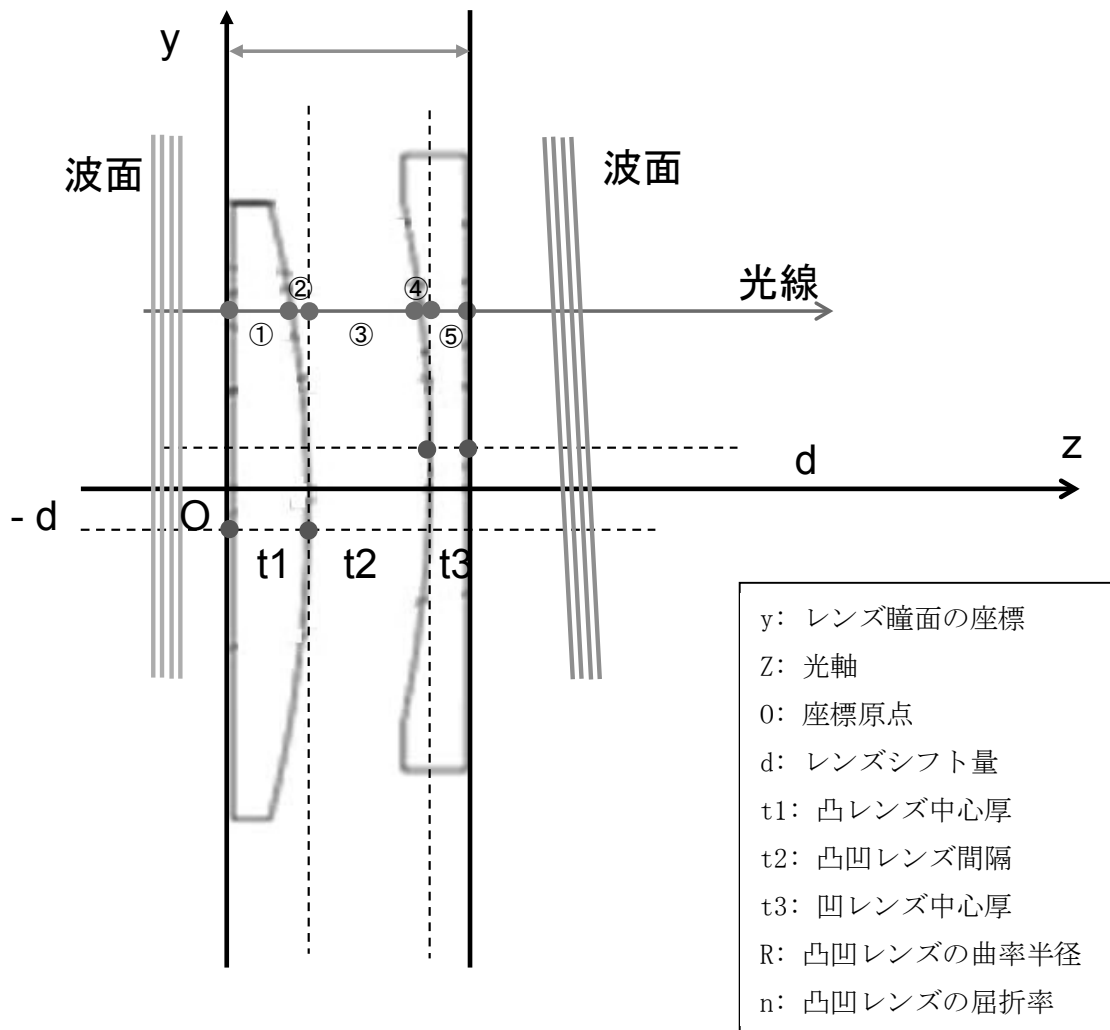


図 G.1 凹凸レンズのシフトによる位相変化を導出するための構成図

$$\textcircled{1} \quad z_1 = t_1 + z_2 \quad (\text{G. 1})$$

$$\begin{aligned} \textcircled{2} \quad z_2 &= R - \sqrt{R^2 - (y + d)^2} \\ &= R - R \sqrt{1 - \frac{(y + d)^2}{R^2}} \\ &= R - R + \frac{1}{2R}(y + d)^2 + \frac{1}{8R^3}(y + d)^4 \\ &= \frac{1}{2R}(y + d)^2 + \frac{1}{8R^3}(y + d)^4 \end{aligned} \quad (\text{G. 2})$$

$$\textcircled{3} \quad z_3 = t_2 + z_4 \quad (\text{G. 3})$$

$$\begin{aligned} \textcircled{4} \quad z_2 &= R - \sqrt{R^2 - (y - d)^2} \\ &= R - R \sqrt{1 - \frac{(y - d)^2}{R^2}} \\ &= R - R + \frac{1}{2R}(y - d)^2 + \frac{1}{8R^3}(y - d)^4 \\ &= \frac{1}{2R}(y - d)^2 + \frac{1}{8R^3}(y - d)^4 \end{aligned} \quad (\text{G. 4})$$

$$\textcircled{5} \quad z_5 = t_3 \quad (\text{G. 5})$$

レンズシフト量が0の時の光路長は,

$$L_0 = n \cdot t_1 + t_2 + n \cdot t_3 \quad (\text{G. 6})$$

となる. 次に, レンズを  $d$  シフトしたときの光路は,

$$\begin{aligned} L_d = n \cdot t_1 - n \left\{ \frac{1}{2R} (y+d)^2 + \frac{1}{8R^3} (y+d)^4 \right\} \\ + \frac{1}{2R} (y+d)^2 + \frac{1}{8R^3} (y+d)^4 + t_2 \\ - \left\{ \frac{1}{2R} (y-d)^2 + \frac{1}{8R^3} (y-d)^4 \right\} \\ + n \left\{ \frac{1}{2R} (y-d)^2 + \frac{1}{8R^3} (y-d)^4 \right\} \\ + n \cdot t_3 \end{aligned} \quad (\text{G. 7})$$

で表される. したがって, レンズを  $d$  シフトしたときの光路差 (位相差) は,

$$\begin{aligned} \Delta L_d = L_d - L_0 \\ \Delta L_d = -n \left\{ \frac{1}{2R} (y+d)^2 + \frac{1}{8R^3} (y+d)^4 \right\} \\ + \frac{1}{2R} (y+d)^2 - \frac{1}{8R^3} (y+d)^4 \\ + - \left\{ \frac{1}{2R} (y-d)^2 - \frac{1}{8R^3} (y-d)^4 \right\} \\ + n \left\{ \frac{1}{2R} (y-d)^2 - \frac{1}{8R^3} (y-d)^4 \right\} \end{aligned} \quad (\text{D. 8})$$

となる.

更に式を整理すると,

$$\begin{aligned}\Delta L_d &= -\frac{n}{2R}(y+d)^2 + \frac{n}{8R^3}(y+d)^4 + \frac{1}{2R}(y+d)^2 \\ &\quad - \frac{1}{8R^3}(y+d)^4 - \frac{1}{2R}(y-d)^2 \\ &\quad + \frac{1}{8R^3}(y-d)^4 + \frac{n}{2R}(y-d)^2 \\ &\quad - \frac{n}{8R^3}(y-d)^4 \\ &= -(n-1)\frac{2d}{R}y + (n-1)\frac{d}{R^3}y^3 + (n-1)\frac{d^3}{R^3}y \\ &= -(n-1)\left(\frac{2d}{R} - \frac{d^3}{R^3}\right)y + (n-1)\frac{d}{R^3}y^3\end{aligned}\tag{G. 9}$$

となる.