

信州大学審査学位論文  
ポアソン分布に基づく輝度偏差を用いた  
合焦評価に関する研究

2019年3月

松原 洋一

# 目 次

<b>第 1 章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 FA における画像処理の動向 . . . . .	1
1.2 計測に対する要望の高まり . . . . .	2
1.3 奥行き方向の測定手法 . . . . .	3
1.4 DfF 法における測定精度 . . . . .	4
1.5 DfF 法による奥行き推定の現状と今後の展望 . . . . .	4
1.6 関連研究 . . . . .	5
1.7 従来の DfF 法の課題 . . . . .	7
1.8 本論文の構成 . . . . .	8
<b>第 2 章 先行研究</b>	<b>9</b>
2.1 はじめに . . . . .	9
2.2 AHO 法の概要 . . . . .	9
2.3 AHO 法の課題 . . . . .	10
2.4 Helmler らの合焦評価値値計算方法 . . . . .	10
<b>第 3 章 提案法 : RM 法</b>	<b>11</b>
3.1 はじめに . . . . .	11
3.2 RM 法の処理フロー . . . . .	11
3.3 諸定義 . . . . .	12
3.4 合焦評価 . . . . .	13
3.5 合焦評価値の選択と合成 . . . . .	14
3.6 アグリゲーション . . . . .	15
3.7 奥行き値の補間 . . . . .	17
3.8 シミュレーション画像を用いた評価 . . . . .	19
3.8.1 合焦評価方法の性能評価 . . . . .	20

3.8.2	アグリゲーションと奥行き補間法の性能評価 . . . . .	23
3.9	実画像を用いた定性的評価 . . . . .	24
3.10	RM 値の計算方法の導出 . . . . .	28
3.11	むすび . . . . .	30
<b>第 4 章</b>	<b>RM 法の効率化：並列化 RM 法</b>	<b>31</b>
4.1	RM 法の課題 . . . . .	31
4.2	課題の解決方法：並列化 RM 法 . . . . .	31
4.3	並列化 RM 法の合焦評価計算 . . . . .	31
4.4	差分値の表現 . . . . .	33
4.5	シミュレーション画像を用いた評価 . . . . .	34
4.6	実画像を用いた定性的評価 . . . . .	35
4.7	並列化処理の実装 . . . . .	36
4.8	メモリ使用量 . . . . .	38
4.9	むすび . . . . .	39
<b>第 5 章</b>	<b>打切り RM 法</b>	<b>43</b>
5.1	RM 法・並列化 RM 法の課題と改善 . . . . .	43
5.2	打切り RM 法での合焦評価値の選択 . . . . .	43
5.3	打切り RM 法のシミュレーション画像での評価 . . . . .	44
5.4	打切り RM 法の実画像での評価 . . . . .	45
5.5	むすび . . . . .	50
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b>	<b>52</b>
6.1	本論文の成果 . . . . .	52
6.2	今後の課題と展望 . . . . .	54
	参考文献	59
	発表論文	63
	謝辞	64

# 第1章

## 序論

---

### 1.1 FA における画像処理の動向

Factory Automation 分野において、画像処理の果たす役割は年々大きくなってきている。FA 分野における画像処理の主な用途としては、外観検査、位置決め（アライメント）、寸法計測、ピッキングなどのロボットビジョンなどがあげられる。

外観検査装置においては、高画素数のカメラが入手しやすくなり、かつ、CPU や GPU の高性能化に伴うコンピューティング能力の向上によって、高精度化、高速化が進展している。また、近年では、Deep Learning 技術が、ロジックベースの処理では難しい検査に徐々に適用されつつある。しかし、大量の学習データを必要とする点や、どのように精度保証をするかなどの課題もあり、多くの改善の余地が残っている。

位置決め分野では、旧来主流であった輝度値比較による位置決めから、形状比較（輪郭比較）による位置決め [1] が広く使われるようになってきている。また、近年は、2次元の位置決めのみではなく、3次元での位置決めも実用的に使われてきており、ロボットピッキング等にも応用されている。3次元画像の取得方法としては、光投影法が広く採用されている。ドットパターンなどのパターン光を物体に照射し、三角測量の原理で物体の奥行きを推定するものである [2]。

寸法計測においても、3次元計測が広く使われてきている。光投影法の中でも、ライン光を用いた三角測量が主に用いられる。これは、ライン状にカメラの視野を限定することで、計測の精度を上げやすく、また、物体またはカメラを走査することで広い視野も確保しやすいと思われる。

これらの用途は、大量生産現場で使用されることが多い。なぜなら、画像処理システムは生産性を直接向上させるものではないため、大量生産の製品検査でないと投資に見合わないことが多いためである。また、画像処理システムが多くの設定パラメーターを持つことが多いため、多品種少量生産製品に適用するには、労力がかかりすぎるという問題もある。しか



し、近年の人手不足の影響による目視検査のコストアップもあり、徐々にではあるが、中小企業の現場にも画像処理システムの採用が広がっていくものと思われる。

## 1.2 計測に対する要望の高まり

前節で述べた用途の内、寸法計測については、目視やノギス等の測定治具を用いて行うことが困難な場合も多い。例えば、微小な製品の計測は測定治具を用いての測定は出来ないため、何らかの計測機器が必要である。

従来、寸法計測を行うには、高価な三次元測定機 (CMM) であったり、測定顕微鏡を導入する必要があった。これらの測定機は精度が高い反面、一点ごとの測定が基本となるため、測定に時間がかかっていた。

中小企業においては、それほど高精度でなくてもよいので、安価な機器で短時間に計測したいというニーズがある。その為に、既存の顕微鏡にカメラを付けパソコンとつなげることで測定を行うシステムが開発されてきた。USB カメラが安価に入手できるようになり、また画素数も飛躍的に増加してきてきたため、数万円から数十万円の投資で、顕微鏡に測定機能を付加することが可能となった。これらのシステムでは、製品・部品などの測定対象をカメラで撮像し、測定したい箇所をマウスでクリックするなどして寸法測定を行う。ソフトウェアがクリックした画像の座標から、寸法を計算する。ソフトウェアによってはエッジを自動認識して測定を行うものも有る。(なお、事前の校正(分解能算出)が必要となる。)

また、カメラでの撮像を前提とし、接眼レンズのないデジタルマイクロスコープも登場している。これは、メーカー側で予め校正を行うことも出来るため、より簡便に測定が出来る。

一方で、全数検査の要望も多い。その要望に応えるために、カメラと画像処理を用いた測定機が開発されてきた。製品(部品)全体もしくは複数の製品が一度に入る視野で撮像を行い、画像処理を用いて予め登録した各部の計測を行う物である。測定精度は、画素分解能に依存するため、三次元測定機などと比べるとやや劣るが、一度登録しておけば、高速に測定が出来るため全数検査も可能となる。しかし、広い視野を高精度で撮像できる専用の光学系が必要となり、また高度な画像処理の能力も必要であるため、比較的高価な製品となり、中小企業への導入は難しい面もあった。

これらの測定機器では、CMM 以外は、基本機能としては二次元測定のみが可能であり、奥行き方向の測定は通常は出来ない。オプション機能として、変位計などを用いて奥行き測定を可能にする場合もあるが測定機として複雑になる。二次元測定に奥行きを加えた三次元測定のニーズは大きいですが、簡便に測定できる装置がないのが現状である。

## 1.3 奥行き方向の測定手法

奥行き方向の測定には種々の方法がある．点ではなく面で測定が出来る手法について，手法と特徴を以下に考察する．

1. 干渉法 [3, 4]：光の干渉を利用した計測である．非常に精度が高い（数 nm $\sim$  $\mu$  m）反面，測定範囲は広くない．微少な凹凸を測定するのに向く．特殊な光学系が必要である．
2. ステレオ法 [5]：複数台のカメラで異なる方向から撮像し，奥行きを推定する方法である．複数の方向から撮像した対象物のエッジやテクスチャをマッチングさせることで，三角測量の原理で奥行きを推定できる．近年は，車の自動運転のための撮像デバイスとして注目されているが，二台以上のカメラで撮像する必要があるため，小型の部品の測定には向かない．
3. 光投影法 [6, 7]：ライン光やランダムドット光，モアレ縞などのパターン光を対象物に投射し三角測量の原理で測定する．ステレオ法では対象物のエッジやテクスチャが必要であるが，光投影法ではパターン光を照射し，その位置から奥行きを推定するため，対象物にテクスチャがなくても測定できる．近年は，部品のロボットピッキングの分野で利用が拡大している．
4. **Time of Flight** 法 [8, 9]：カメラ側から光を照射し，その往復時間から奥行きを推定する．測定精度は cm オーダーであり高精度ではない．しかし，近年小型化されてきており，物体認識用途で使用が広まってきている．
5. 焦点法：焦点の合い具合から奥行きを推定する方法である．対象物のエッジやテクスチャがどの程度鮮明に写るかで焦点の合い具合を測定する．焦点を変えて複数の画像を撮像し，最も焦点の合った画像から奥行きを推定する Depth from Focus 法 (DfF 法) (Shape from Focus 法と呼ばれることもある) と，一枚の画像のテクスチャのボケ具合から奥行きを推定する Depth from Defocus(DfD) 法 [10, 11] がある．DfD 法は構造化瞳を用いることで推定の信頼度を上げることが出来る [12, 13] が，寸法測定として使用できるほどの精度は期待できない．

一方，DfF 法は奥行き方向の移動機構および移動量測定機構が必要であるが，特殊な光学系を必要としない．顕微鏡やデジタルマイクロスコープはピント調整のため奥行き方向の移動機構を備えており，移動量を取得する機構があれば，奥行き測定が可能となる．精度はレンズの焦点深度程度であり，顕微鏡であれば  $\mu$  m オーダーでの寸法測定も可能となる．

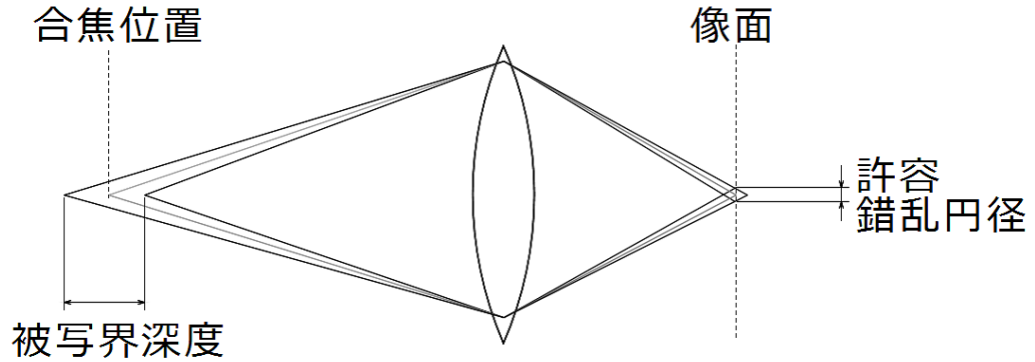


図 1.1: 被写界深度の模式図

## 1.4 DfF 法における測定精度

DfF における奥行き方向の測定精度は、被写体とレンズとの距離である作動距離を変化させたときに、ピント（ボケ度合い）が変化したと認識できる最小距離程度である。従って、レンズの被写界深度 (Depth of field) 程度であると言える。図 1.1 は被写界深度を表した模式図である。合焦位置から外れると、物体から出た光は広がりを持って像面で結像する。許容錯乱円は、ぼけたと認識できる最小の広がり大きさである。この大きさは、レンズの収差が十分小さければ、撮像素子の画素サイズ程度である。

被写界深度 DoF は、以下の式で表される [14]。

$$DoF \approx \frac{2CoC \cdot F_{eff}}{M^2} \quad (1.1)$$

ここで、 $CoC$  は許容錯乱円径、 $F_{eff}$  は実効 F ナンバー、 $M$  は光学倍率である。実効 F ナンバーは、レンズの F ナンバーを  $F$  とすると  $F_{eff} = F(1 + M)$  と表される。例えば、 $M = 10$ 、 $F = 2.8$  のレンズを用いて、画素サイズ  $4.4 \mu\text{m}$  の撮像素子で撮像した場合、 $CoC = 4.4 \mu\text{m}$  で計算を行うと、被写界深度  $DoF = 2.7 \mu\text{m}$  となる。

## 1.5 DfF 法による奥行き推定の現状と今後の展望

このように、DfF 法を用いることで、顕微鏡やデジタルマイクロスコープに奥行き測定機能を付加することは比較的容易である。実際、デジタルマイクロスコープの機能として、奥行き測定を持つ製品も存在する。

しかし、市販のデジタルマイクロスコープの奥行き推定の結果は必ずしも満足のいくものではない。図 1.2 は、あるメーカーのデジタルマイクロスコープでの測定結果である。(a) が全焦点画像 (b) が奥行き推定を行った三次元画像である。基板の右側にチップ抵抗が

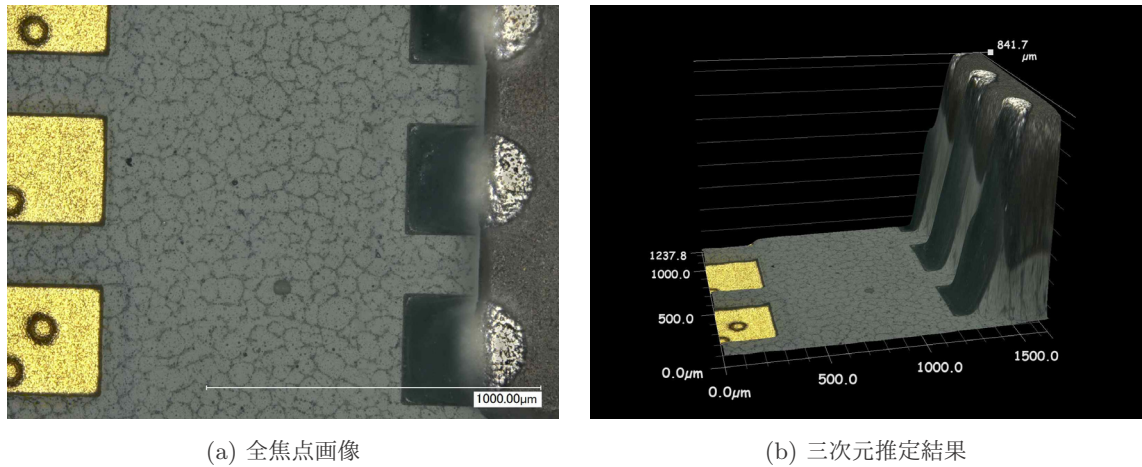


図 1.2: 市販デジタルマイクロスコプでの奥行き推定

載っている。三次元画像を見ると、チップ抵抗の上面の暗い部分が、側面にも広がっているのが分かる。おそらく、かなり強い平滑化処理が入っているためにこのような画像になっていると思われる。このように平滑化された画像でも、基板面からチップ抵抗の上面までの高さを調べるという用途では十分な精度であるが、より複雑な形状の対象物や、細かな高さを調べるには不十分と思われる。

また、DfF の今後の応用分野が広がる可能性も出てきたと考えている。最近になり、液体レンズ [15] と呼ばれるデバイスが登場してきた。ホルダーに入った液体に電圧を加えることで、屈折率を変えるレンズである。このため、焦点距離を高速に変化させることが出来る。テクスチャのある対象物に限られるとは言え、シンプルなシステム構成で物体の奥行き認識が高速に出来る可能性があり、今後の発展が期待される。

## 1.6 関連研究

DfF で重要となるのは、どのように焦点の合い具合を測定するかということである。これは局所的な画像の鮮明度をどのように測定するかと言うことであり、この鮮明度の指標を合焦評価値と呼ぶ。

これまで、合焦評価値の計算方法として様々な手法が研究されてきた。合焦評価値を計算する手法を大きく分類すると、一階微分、二階微分、ウェーブレット変換、統計値を用いる方法などがある。なお、これらの計算方法は、DfF のために研究されてきたもの以外に、オートフォーカスの手法として研究されてきたものも含まれる。似たような考えであるが、DfF の方がより局所的な合焦精度を要求される。

1. 一階微分：画像の一次微分や勾配を指標として用いる方法である。画像に X, Y 方向

のソベルフィルタをかけその強度（二乗和）を用いる Tenengrad 法 [16]，一次微分の分散値を用いる方法 [17]，奥行き方向の一次微分も加味した方法 [18] などが提案されている。

2. 二階微分：画像の二次微分を用いる方法である。代表的な手法に，Modified Laplacian (ML) 法 [19] がある。この方法は，X，Y 方向の二次微分値の絶対値を加算する方法である。また，斜め方向の微分も考慮した方法 [20]，二次微分の分散値を用いる方法 [17]，奥行き方向の二次微分も加味した方法 [21] など提案されている。
3. ウェーブレット変換：画像のウェーブレット変換に基づいて評価値を求める方法である。ハイパス帯域とローパス帯域の比を指標とする方法 [22]，ウェーブレット変換のサブバンドの内，高周波の 3 バンドの総和や分散を用いた方法 [23]，比率を用いた方法 [24] などがある。
4. 統計値：画像の統計値を基に評価値を求める方法である。輝度値の窓範囲内での分散値を用いる方法 [25]，ヒストグラムのエントロピーを用いる方法 [26] などがある。また，4 つの異なる窓範囲内で分散値を求め，最も大きな分散値をとる窓範囲を使用する方法も提案されている [27]。
5. その他：複数のバンドパスフィルタを用いる方法 [28]，輝度分布を面で近似しその係数を使用する方法 [29] など提案されている。

いずれの手法でも，注目画素近傍範囲（窓範囲）の指標の値を総和計算して，合焦評価値として用いている。

上記手法を含む多くの手法について，性能評価を行った結果が文献 [30] にある。ここでは，対象物によって性能が大きく変わることが指摘されている。ただその中でも，前述の ML 法は様々な条件で比較的良好な結果を得られていた。

DfF 法に関して，合焦評価値の計算方法以外の研究テーマとしては，合焦評価値から奥行きを推定する方法についても研究がされている。合焦評価値から奥行きを推定する問題を，非凸最小化問題ととらえ，total variation (TV) 正則化を導入し，これを ADMM で解き奥行きを推定する方法 [31]，奥行き推定の精度を上げるため，部分的に三次元の面 (Focus Image Surface : FIS) で近似する方法 [32] などが提案されている。また，奥行き推定の信頼性を評価して信頼性の低い点や外れ値を除去する方法 [33, 34] などもある。

また，最近の研究としては，Deep learning を用いた奥行き推定の研究もある [35]。Light-Field カメラを用いて焦点深度を変更した画像を生成し，RGB-D センサ（RGB + Depth の撮像できるカメラ）の情報とあわせて学習を行っている。



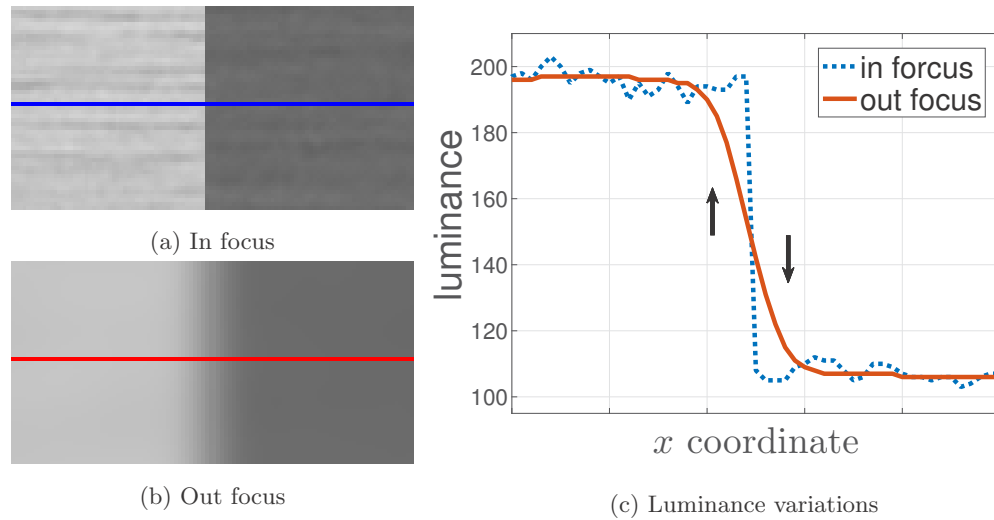


図 1.3: 輝度変化の大きなエッジとテクスチャの輝度変化の比較. (a) 合焦時の画像, (b) 焦点が不適切でぼけた画像, (c) 各画像の水平方向への輝度値の変化

## 1.7 従来の DfF 法の課題

これらの従来法には共通する問題点が2つある.

(i) 大きな輝度変化をもつエッジの周辺で合焦評価に失敗する: 図 1.3 の中央のエッジ近辺 (矢印箇所) では, ぼけ画像 (b) の輝度 (赤線) が大きく変化しており, 合焦時 (a) のテクスチャ由来の輝度変化 (青線) を上回る. このように, エッジ由来の輝度の変化量がぼけて広がり, 合焦時のテクスチャ由来の輝度変化量を上回ると, ぼけた領域が合焦と誤判定される.

(ii) テクスチャが少ない平坦領域で奥行き推定精度が低下する: 平坦領域の輝度変化は小さく緩やかとなり, ぼけ画像と合焦画像を知覚的にも区別しにくい部分があり, このような領域は奥行き推定がうまくいかない場合がある.

(i) の問題に対して有効な方法は, エッジを保護しつつエッジ周辺を平滑化するフィルタを用いる方法 [36] や, 多方向への高階微分を用いてエッジ由来の周波数成分を除外する方法 [37] である.

(ii) の問題に対して有効な方法は, フィルタ処理の窓サイズを広げる方法である [25]. ただしこの弊害として, (i) の輝度変化の大きなエッジの影響を受けやすくなり, また, 微細な形状を正確に推定できなくなることがある.

## 1.8 本論文の構成

本論文では、前節の (i) と (ii) の問題に対処できる合焦評価法の提案を行ったものである。特に、顕微鏡やマイクロスコープを用いた奥行き測定を対象に考えている。また、安価なシステム構成の為、汎用のパソコンを用いた処理が出来ることを念頭に研究を進めた。本章を含め、6章から構成される。また、付録を設け、本文中で省略したプログラムコードを示す。第2章では、まず、提案手法のもととなった手法について説明をし、その特徴と改善すべき問題点をあげる。

第3章では、合焦評価値の計算方法として、注目画素の輝度値と周辺画素の平均輝度値の關係に着目し、これらがポアソン分布にしたがうと仮定した計算方法を提案する。実験をとおりして、他の手法と比較し、提案手法の優位点について説明を行う。

第4章では、第3章での提案法の課題である、処理速度とメモリ使用量の多さについて改善する方法を提案する。実際の実装を行い、改善の効果について検証を行う。

第5章では、第4章の手法について、性能面での改善効果を狙った手法を提案する。特に、前節の (i) と (ii) の問題及び、ノイズに対する耐性を改善効果を期待した手法である。実験をとおりして性能を検証した。

第6章では、本研究における全体的な成果をまとめる。

## 第2章

# 先行研究

---

### 2.1 はじめに

1.7 節であげた課題を解決するためには，テクスチャの状態によって窓半径を可変にする方法が有効である．ただし，どのように窓半径を決定するかが問題となる．この点に関しての興味深い先行研究として，Frommer らの DfF 法 [37] のアルゴリズムがある (以降 AHO 法と呼ぶ)．2.2 節では AHO 法の概要を述べ，2.3 に AHO 法の課題を述べる．

また，2.4 節では本論文で提案する合焦評価値計算方法と関連のある手法についても述べる．

### 2.2 AHO 法の概要

2015 年に Frommer らにより提案された AHO 法 [37] は，合焦評価値の計算に微分値の絶対値を用いる．ここで，微分の次数は，1～10 などの複数の次数を用いる．高階微分を行うことで，周辺の画素の情報が考慮されることになり，事実上窓半径を広げた場合に似た効果があらわれる．また，微分の方角も，X,Y および斜め方向の 4 方向で計算を行う．

合焦評価値の奥行き方向の変化を合焦評価曲線と呼ぶ．一般的には，焦点の合った奥行きを頂点とする単峰の山形の形状になる．AHO 法では，複数の次数，複数の方向で求めた合焦評価曲線を “curve standard deviation”(CSTD) という指標を用いて合成する．CSTD は半値全幅に似た指標であり，山形の曲線の鋭さに関連する（鋭い山ほど CSTD は小さくなる）．CSTD の値を用いた重みを使い，複数の次数，複数の方向で求めた合焦評価曲線を合成する．この処理は画素ごとに行われる．従って，画像のテクスチャ等の状態により合成される割合は画素ごとに変わる．

合成した合焦評価曲線は，アグリゲーション処理により平滑化される．アグリゲーションには，合成した合焦評価曲線の CSTD を用いる．すなわち，CSTD の外れ値を除外していくような処理となる．



その後、アグリゲーションを行った合焦評価曲線から、奥行き値を求める。AHO法では、合焦評価曲線の単純最大値をとる奥行きを用いる方法と、曲線の期待値を用いる方法を使用している。

## 2.3 AHO法の課題

AHO法は、画素ごとに窓半径に相当する微分の階数を変化させているといえる。このため、様々な被写体に対して誤りの少ない奥行き推定が出来ることが期待され、文献でも示されている。しかし、各画素ごとに多方向の微分処理と複数の次数の微分を行い、あとで統合するために、それらの値を保持する必要がある。このデータ量は膨大であり、汎用パソコンでは、処理できる画像サイズや画像枚数に制約が生じることが懸念される。

また、微分を用いているため、ノイズに対して過敏になるのではないかという懸念がある。これは、アグリゲーションにより低減させることができるが、アグリゲーションは対象物の輪郭も平滑化されるため、なるべくアグリゲーションに頼らないことが理想である。

3章で提案する方法は、アルゴリズムの流れはAHOと同等である。一方、合焦評価値の計算方法には新たな方法を提示する。提案法では、注目画素の輝度値とその周辺画素の平均輝度値との偏差を用いる。ただし、一般的な標準偏差や平均偏差などの計算とは異なり、平均値からの差分のかわりに比率を用いる。

また、アグリゲーションについては、必要以上に平滑化が働きすぎないように改善した方法を提案する。奥行き推定の計算については、別の方法も含めて検討を行う。

## 2.4 Helmliらの合焦評価値値計算方法

また、提案する合焦評価値の計算方法に近い方法が、Helmliらにより提案されている[29]。Helmliらの手法では、従来法も含め複数の合焦評価曲線を求め、最もガウス分布に近い形状の曲線を選択する方法である。合焦評価値の計算方法の1つとして、提案法に近い方法が用いられているが、その論理的背景は示されておらず、どの合焦評価計算方法が有効であったかの評価もされていない。

## 第3章

# 提案法：RM法

---

### 3.1 はじめに

従来のDfF法の課題を解決する方法として、Ratio against Mean: RM法を提案する。RM法はAHO法と同等の処理フローをとる。しかし、AHO法とRM法とは合焦評価法が異なり、アルゴリズムの各処理を改良して用いる。次に、提案する合焦評価法と同様の計算式をHelmlerらも提案しているが、Helmlerらの方法では他の評価法と併用して単一窓幅で処理を行うのに対し、RM法では論理背景にもとづき、他の評価法とは併用せず、複数窓幅で処理を行う。これらにより、RM法ではHelmlerらの方法とAHO法のいずれをも上回る性能の実現を目指す。

### 3.2 RM法の処理フロー

RM法の処理の流れを図3.1に示し、以降に述べる大きく四つのステップからなる。

1. 合焦評価値の計算：各画素ごとに、各画像の鮮鋭度合いを求めて鮮鋭度の遷移を表す曲線を得る。なお複数の窓半径を用いて複数の曲線を求める。AHO法とは、評価値の計算方法が異なる。
2. 評価値の選択と合成：画素ごとに、得られた合焦評価用の曲線（合焦評価曲線）のうち、単峰でピーク形状が明確なものを、信頼度の高い曲線として選び合成する。AHO法と同一となる。
3. アグリゲーション：合成された曲線を周辺画素の曲線と比べ、外れ値を除去する。ここでは平滑化を行い、滑らかな曲線を得る。RM法では可変窓幅で処理し、過度な平滑化の抑制と高速化の効果を得る。

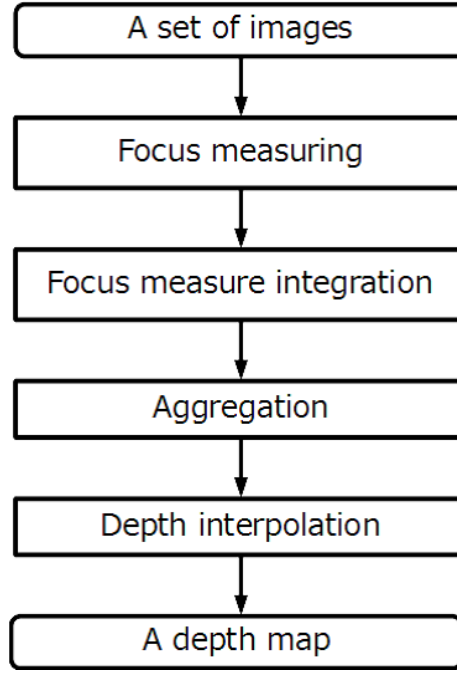


図 3.1: RM 法のアルゴリズムフローチャート

4. 奥行き値の補間：合焦評価曲線のピーク位置から奥行き値を推定する．内挿補間を行い小数精度で連続的に変化する奥行き値を求める．RM 法では三点補間法 [19] と半値補間法の評価を行う．

以降の節において，各ステップでの処理の説明を行う．

### 3.3 諸定義

DfF 法では，焦点の異なる複数枚の画像を用いる．整数の奥行き値を兼ねるインデックスを  $z \in \{1, \dots, Z\}$  と表す．画像  $z$  の画素座標  $(x, y)$  での画素値や合焦値などの値を  $V(x, y, z)$ （主にスカラー値）と表し，多次元配列のボリュームデータとして扱う．ただし，各画素での  $z$  方向への値の変化を曲線として考える場合があり，その際は  $V_{x,y}(z)$  と表す．また，各画像の  $xy$  平面で周辺の画素値を用いて平滑化処理などを行う場合は  $V_z(x, y)$  と表す．

$$V(x, y, z) := \begin{cases} V_{x,y}(z) & \text{as the curve line at } (x, y) \\ V_z(x, y) & \text{as the } z\text{-th image} \end{cases} \quad (3.1)$$

注目画素での計算に用いる周辺画素については，ある画素  $(x, y)$  を中心とした半径  $r \in \{1, \dots, R\}$  の正方形の窓に含まれる画素の集合（座標）を  $\{x', y'\} \in \mathcal{N}_r(x, y)$  と表し，窓内部に含まれる画素数を  $|\mathcal{N}_r| := (2r + 1)^2$  と表す．

### 3.4 合焦評価

RM 法では、画像の鮮明度合い指標である合焦評価値として、注目画素の画素値とその周辺画素の平均値の変化率を用いる。ただし、一般的な標準偏差や平均偏差などの計算とは異なり、平均値からの差分のかわりに比率を用いる (以降, Ratio against Mean: RM 値と呼ぶ)。この計算は、注目画素の輝度値と周辺画素の平均輝度値の間にポアソン分布の関係があることを利用している (図 3.12 参照。計算式の導出方法については 3.10 節を参照されたい)。単純な計算ではあるが、画像の暗所や平坦領域でも、ピーク形状の鋭い合焦評価用の曲線を得られる。Helmli らも同様の尺度を提案しており [29]、後述の式 (3.3) の計算が僅かに異なる。Helmli らの計算では  $I$  と  $M$  のうち、大きい方を分子に小さい方を分母とし、 $-1$  は含まない。式は若干異なるが、Helmli らの計算結果と式 (3.3) の計算結果はほぼ同等となる。

各画像の画素値を  $I_z(x, y)$  とし、各画像ごとに周辺の画素値の平均  $M$  を得る。また、複数の窓半径  $r \in \{1, \dots, R\}$  で処理を行う。

$$M_z^r(x, y) := \frac{1}{|\mathcal{N}_r|} \sum_{\{x', y'\} \in \mathcal{N}_r(x, y)} I_z(x', y') \quad (3.2)$$

次に、RM 値を次のように求める。

$$\text{RM}_z^r(x, y) := \left| \frac{I_z(x, y)}{M_z^r(x, y) + \varepsilon} - 1 \right| \quad (3.3)$$

ここで  $|\cdot|$  は絶対値、 $\varepsilon$  はゼロ除算回避用の微小値とする。更に、周辺で得られた RM 値の平均を求め、合焦評価値とする。

$$\Phi_z^r(x, y) := \frac{1}{|\mathcal{N}_r|} \sum_{\{x', y'\} \in \mathcal{N}_r(x, y)} \text{RM}_z^r(x', y') \quad (3.4)$$

なお、式 (3.3) の絶対値内部が  $I_z(x, y) - M_z^{(r)}(x, y)$  であれば、平均偏差の計算に相当する。

得られた評価値の  $z$  方向への変化  $\Phi_{x,y}^{(r)}(z) (= \Phi^{(r)}(x, y, z)$ , 式 (3.1) 参照) は、鮮明な画像番号付近で最大値をもつ曲線を描き、理想的にはローレンツ関数に従う [38]。この曲線を合焦評価曲線と呼ぶ。なお、画像間の合焦評価値の最大値で除算し、曲線の振幅を 1 に正規化して用いる。

$$\widehat{\Phi}_{x,y}^{(r)}(z) := \Phi_{x,y}^{(r)}(z) / \max_z \Phi_{x,y}^{(r)}(z) \quad (3.5)$$

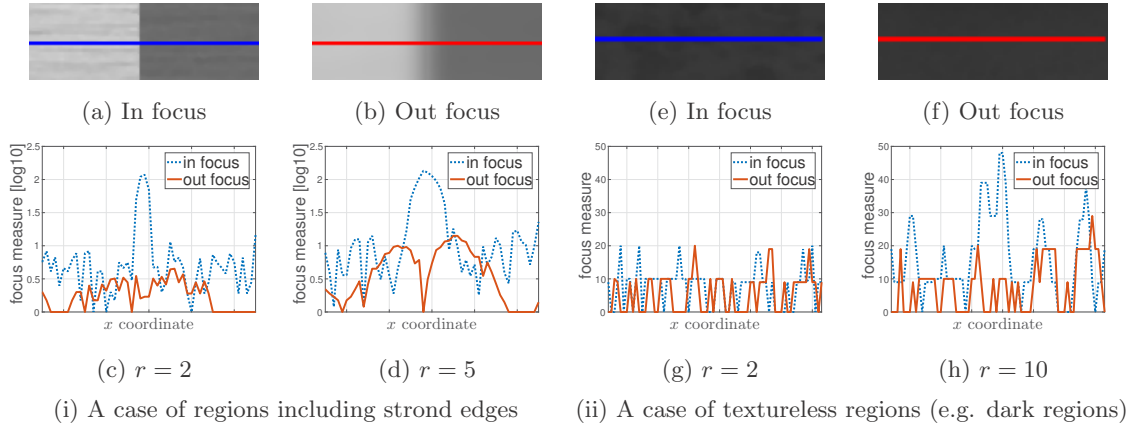


図 3.2: 合焦画像とぼけ画像における異なる窓半径から得られる RM 値の比較 (式 (3.3) 参照)

以降は正規化された評価値  $\hat{\Phi}^{(r)}(x, y, z)$  を用いる。

式 (3.3) での比の計算は、画像の暗所部分において効果があり、暗部で低下するテクスチャの変化量を強調し、鮮明度の判断を可能にする。式 (3.4) での RM 値の平均を求める計算は、画素ごとにばらつきのある RM 値に対する平滑化の効果がある。

窓半径が合焦評価値へ与える影響を図 3.2 に示す。輝度変化の大きなエッジを含む画像 (a) と (b) では、(c) の小さな窓半径の方が、画像がぼけた際にエッジの影響を低減できる。(d) の大きな窓半径では、赤色の曲線に 2 つのピークが生じており、合焦時の信号を上回る。赤色の曲線はぼけ画像での RM 値であるため、奥行き推定で誤りが生じる可能性がある。一方、テクスチャの平坦な画像 (e) と (f) では、(g) の小さな窓半径では、合焦時とぼけた際の信号レベルは等しいが、(h) の大きな窓半径では、テクスチャ由来の信号は鮮明となる。

このように、テクスチャに応じて窓半径を選ぶのが望ましい。

### 3.5 合焦評価値の選択と合成

合焦評価曲線  $\hat{\Phi}_{x,y}^{(r)}(z)$  の形状は、輝度変化の大きなエッジの影響の有無で異なる (図 3.3 参照)。エッジの影響を受けない場合は、曲線は鋭い単峰形状となるが、エッジの影響を受けた場合は、曲線は緩やかな多峰形状となる。この特徴を用いて、複数の窓サイズから単峰で鋭いピークを持つ曲線を選択して合成し、1 つの曲線  $\Psi_{x,y}(z)$  を得る。

$$\Psi_{x,y}(z) := \sum_{r \in \{1, \dots, R\}} \alpha_{x,y}^r \hat{\Phi}_{x,y}^r(z) \quad (3.6)$$

ここで、 $\alpha_{x,y}^r \in [0, 1]$  は合成用の重みであり、上述のローレンツ関数に関連付けて重み付けを行う。まず、分布のパラメータである期待値と“曲線標準偏差” (CSTD: curve standard deviation) を推定する [37]。

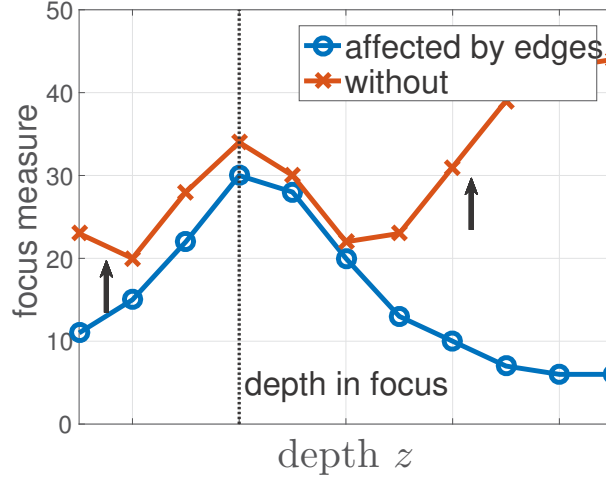


図 3.3: Variation of focus measure around a strong edge

$$\begin{aligned}\mu &:= \left( \sum_{z \in \mathcal{Z}_1} z \cdot \hat{\Phi}_{x,y}^r(z) \right) / \left( \sum_{z \in \mathcal{Z}_1} \hat{\Phi}_{x,y}^r(z) \right) \\ \sigma_{x,y}^r &:= \sqrt{\frac{1}{C_1} \sum_{z \in \mathcal{Z}_1} (z - \mu)^2 \hat{\Phi}_{x,y}^r(z)}\end{aligned}\quad (3.7)$$

ここで  $\mu$  は  $z$  の期待値，総和範囲  $\mathcal{Z}_1$  は半値全幅（最大値の半値以上を与える範囲）， $C_1 := \sum_{z \in \mathcal{Z}_1} \hat{\Phi}_{x,y}^r(z)$  は正規化用の係数である．次に，CSTD 値が小さくピーク形状の鋭い曲線を多く採用するように，重みをローレンツ関数を用いて表す．

$$\alpha_{x,y}^r := [1 + (\sigma_{x,y}^r / \rho)^2]^{-1} \quad (3.8)$$

パラメータ  $\rho$  は減衰定数であり，実験では AHO と同じく  $\rho = 6$  とした．

### 3.6 アグリゲーション

式 (3.6) で得られたボリュームデータ  $\Psi(x, y, z)$  に対して平滑化を施し，外れ値を除去し，かつ，平坦領域での合焦評価値を周辺領域の値から補間した  $\bar{\Psi}(x, y, z)$  を得る．

平滑化は各画像  $\Psi_z(x, y)$  ごとに反復的に施す．なお，AHO 法では固定の窓幅を用いるが，提案法では動的に定める（後述）．可変窓幅を用いることで，過剰な平滑化を抑えられ，処理時間も短縮できる．

$$\bar{\Psi}_z^{(t+1)}(x, y) := \sum_{\{x', y'\} \in \mathcal{N}_{r'}(x, y)} \hat{\omega}(x', y') \bar{\Psi}_z^{(t)}(x', y') \quad (3.9)$$

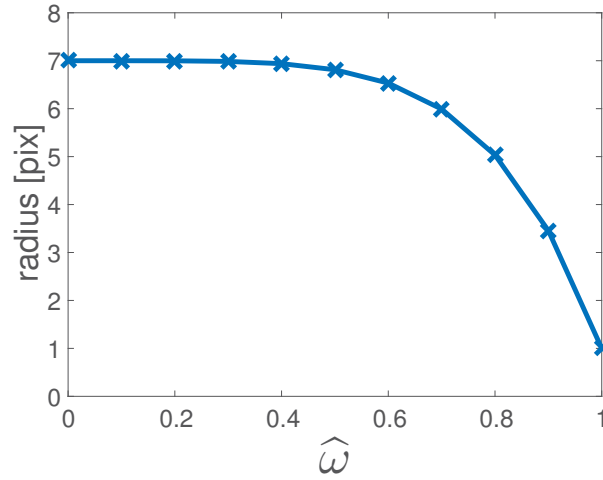


図 3.4: Computed window size  $r'$  from  $\hat{\omega}$  in Eq. 3.11

初期値は  $\bar{\Psi}^{(0)} = \Psi$  し、反復回数は本章の実験では5とした。平滑化用の重み  $\hat{\omega}$  は、式 (3.7) と同様にローレンツ関数と  $\Psi_{x,y}(z)$  の CSTD :  $\sigma_{x,y}$  を用いて表し、すべての画素の最大値で除算して正規化して用いる。

$$\begin{aligned}\omega(x, y) &:= \left[1 + ((\sigma_{x,y} - \bar{\sigma})/\rho)^2\right]^{-1} \\ \hat{\omega}(x, y) &:= \omega(x, y) / \max_{x,y} \omega(x, y)\end{aligned}\tag{3.10}$$

減衰定数  $\rho$  は式 (3.8) と同値とする。実験では  $\rho = 6$  とした。 $\bar{\sigma}$  は CSTD の最頻値で、ここでは全画素での中央値とした。上式 (3.9) での平滑化の窓幅は前節の式 (3.10) の重み  $\omega$  に基づいて決定する。経験的に、白黒2値のごま塩ノイズでは CSTD は小さくなり、 $\bar{\sigma}$  から値は離れて  $\omega$  は小さくなる。一方、平坦領域では CSTD は大きくなり、 $\bar{\sigma}$  から値は離れ、この場合も  $\omega$  は小さくなる。そのため、窓半径を次式のように最小幅と最大幅  $[r_{\min}, r_{\max}]$  の間で動的に決定する。

$$r' := \beta(\omega) \cdot r_{\min} + (1 - \beta(\omega)) \cdot r_{\max}\tag{3.11}$$

ここで  $\beta(\omega) \in [0, 1]$  は調整用の重み関数である。本章の実験では  $[r_{\min}, r_{\max}] = [1, 7]$  とし、 $\beta_{\omega}$  は経験的に次式で定めた。

$$\beta(\omega) := \hat{\omega}^5\tag{3.12}$$

$\hat{\omega}$  が1に近いと窓幅は狭くなる (図 3.4 参照)。 $\hat{\omega}$  は1付近の値となる傾向があり、 $r'$  は1付近で急峻に変化する式とした。

### 3.7 奥行き値の補間

各画素において奥行き値を推定し、奥行きマップ  $D$  を得る．合焦評価曲線  $\bar{\Psi}_{x,y}(z)$  のピーク位置を奥行きとするが、2枚の画像  $z$  と  $z+1$  の間に存在するピーク位置を小数精度で求めるには、ピーク位置近傍の値を用いた内挿補間が必要となる．ここでは AHO 法で用いられた2種類の補間方法に加え、提案方法で用いる2種類の補間方法、合計4種類の補間方法を示す．まず、AHO 法で用いられた単純な補間法としては以下がある．

- 最近傍補間：合焦評価値が最大となる奥行き  $z$  を用いる．

$$D(x, y) := \arg \max_z \bar{\Psi}_{x,y}(z) \quad (3.13)$$

- 期待値補間：曲線を分布関数とみなしてピーク位置の期待値を用いる．

$$D(x, y) := \frac{1}{C_2} \sum_{z \in \mathcal{Z}_2} z \bar{\Psi}_{x,y}(z) \quad (3.14)$$

ここで  $C_2 := \sum_{z \in \mathcal{Z}_2} \bar{\Psi}_{x,y}(z)$  は正規化係数、 $\mathcal{Z}_2$  は閾値条件  $\bar{\Psi}_{x,y}(z) \geq \tau_\Psi$  を満たす範囲である．本章の実験では  $\tau_\Psi = 0.7$  とした．曲線をローレンツ関数として扱う場合、対応する分布関数はコーシー分布となる．なお、積分範囲を無限とするとコーシー分布に期待値は存在しないが、ここでは有限であるので期待値が得られる．

提案法では、Nayar らの DfF 法 [19] で用いられた補間方法を用い、対数を計算した曲線に対して2次曲線  $f(z; \theta := \{a, b, c\}) := az^2 + bz + c$  を当てはめ、その極大値を与える点を奥行き値として求める．

$$\begin{aligned} D(x, y) &:= \arg \max_z f(z; \theta^*), \\ \theta^* &:= \arg \min_{\theta} \sum_{z \in \mathcal{Z}_3} (f(z; \theta) - \log \bar{\Psi}_{x,y}(z))^2 \end{aligned} \quad (3.15)$$

パラメータ  $\theta$  を求める際、用いるデータを  $z \in \mathcal{Z}_3$  に制限し、近似精度を高める．詳しくは後述する．なお、従来法では曲線はガウス関数に従うとみなすが、本論文ではローレンツ関数に従うとみなす．この場合も、対数を計算すれば極値付近を2次関数で近似できる： $-\log(1+x^2) \approx -x^2 + \frac{1}{2}x^4 - \frac{1}{3}x^6$ ．

式 (3.15) の計算に用いる奥行きの範囲を  $\mathcal{Z}_3$  として、ここでは2つの範囲を用い、それぞれを以下のように呼ぶ．

- 三点補間：ピーク値を与える点と、その前後の1点、合計3点を用いて2次関数近似を行う．前述の Nayar らの方法 [19] でも用いられた．

$$\mathcal{Z}_3 := [z_0 - 1, z_0 + 1], \quad z_0 := \arg \max_z \bar{\Psi}_{x,y}(z) \quad (3.16)$$



- 半値補間：ピーク値の半分以上の値をもつ点を用いて2次関数近似を行う．三点補間の場合，三点のうち二点がピーク付近に存在する場合がある．半値補間では，三点補間よりも多くの点を用いて補間するため，精度の向上を期待できる．

$$\mathcal{Z}_3 := \{z \mid \bar{\Psi}_{x,y}(z) \geq \frac{1}{2} \max_z \log \bar{\Psi}_{x,y}(z)\} \quad (3.17)$$

### 3.8 シミュレーション画像を用いた評価

奥行き推定の実験をシミュレーション用に生成した画像を用いて行った．画像は階調数  $8\text{bit} = [0, 255]$  で表し，ただし小数精度で計算する．奥行きマップも階調数を  $[0, 255]$  にスケーリングして正規化し，奥行きの最小値と最大値を 0 と 255 に対応付ける．シミュレーション用の正解奥行きマップ (GT: ground truth) がある場合は，GT のスケーリングを用いて，推定した奥行き値をスケーリングする．

比較する従来法としては，4 種類の従来法：modified Laplacian (ML) 法 [19]，gray level variance (GLV) 法 [25]，Helmli らの方法 [29]，及び AHO 法 [37] を用いた．Helmli らは合焦評価において RM 値の計算 (式 (3.2)~(3.4)) を用いるため従来法に含めた．

AHO 法と RM 法では，アグリゲーションの方法と奥行き補間方法の組み合わせがわかるように，方法名の後ろに組み合わせを次のように記載する．

- アグリゲーションの種類：{Non, Fix, Ada}

左から，“なし”，固定窓幅，可変窓幅を表す．“なし”では 3.6 節の処理を行わない．固定窓幅では式 (3.9) において固定窓幅 ( $r' = 7$ ) を用いる．

- 奥行き補間法の種類：{Near, Exp, Tri, Half}

左から，式 (3.13)~(3.17) で述べた最近傍補間，期待値補間，三点補間，半値補間を表す．

- 表記例：

「AHO 法，固定幅のアグリゲーション，期待値補間」であれば，AHO (Fix, Exp) と簡略表記する．

図 3.5 にシミュレーション用の画像の作成に用いた 2 種類のテクスチャ画像と 3 種類の正解奥行きマップを示す．

- 2 種類の金属面を撮影した画像を貼り合わせ， $700 \times 700$  サイズのテクスチャ画像 (a) を作成し，奥行きマップ (b) と (c) には斜面と段差の 2 種類を用いた．用意した奥行き値をもとに画像 (a) の各画素をぼかし，焦点の異なる 11 枚の画像を生成した．ぼかす際の“点拡がり関数”にはガウス関数を用いた．なお，奥行きマップでは青色から黄色に向かってレンズに近づく（対象物の高さは高くなる）方向である．

また，ノイズ耐性を調べるため，11 枚の画像それぞれにガウシアンノイズとごま塩ノイズを付加した画像を生成した．ノイズには標準偏差 2.55 のガウシアンノイズと，ノイズ密度 (全画素数に対して，画素値が 0 または 255 にランダム置換された画素数の

比率) 0.0005 のごま塩ノイズを使用した．実際の撮影画像ではごま塩ノイズはほとんど発生しないが，参考用として評価に加えた．

- (ii) Pertuz らが公開配布している画像セットであり [39]， $256 \times 256$  サイズの焦点の異なる 30 枚の画像となる．(d) はすべての画像から合成した全焦点画像となる．

### 3.8.1 合焦評価方法の性能評価

3.4 節と 3.5 節で提案した合焦評価法の効果を確認するため，アグリゲーションによる平滑化を行わず，また，奥行き推定での小数精度の補間を行わずに (最近傍補間を使用して) 求めた奥行き値の結果を評価する．

#### (a) 定性評価

図 3.6 に従来法と RM 法の各種法の結果を示す．AHO 法 ((a-5),(b-5),(c-5)) と RM 法 ((a-6),(b-6),(c-6)) では，アグリゲーションと補間処理を行わず，合焦評価法と合成法 (3.4 節と 3.5 節参照) のみの性能を示した．暗色の画素ほど奥行きがあることを意味する．なお，小数精度の補間ではないため，奥行きは離散値となり，階段状の模様が生じるが問題はない．画像セット (i) の結果では，ML, GLV, Helmler らの方法 (a-2)~(a-4) では，中央部にエッジに起因するアーティファクトが生じているが，AHO 法 (a-5) と RM 法 (a-6) では見られない．

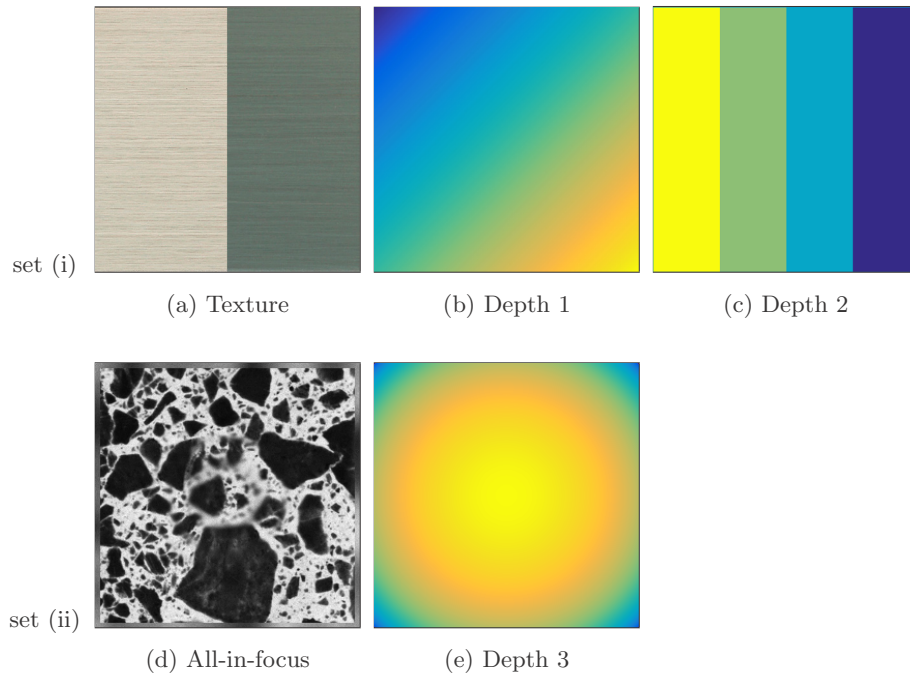


図 3.5: シミュレーション用の画像セットの作成に用いた画像 (set (i): テクスチャ画像 (a) と 2 種類の正解奥行きマップ (b),(c), set (ii): 全焦点画像 (d) と正解奥行きマップ (e))

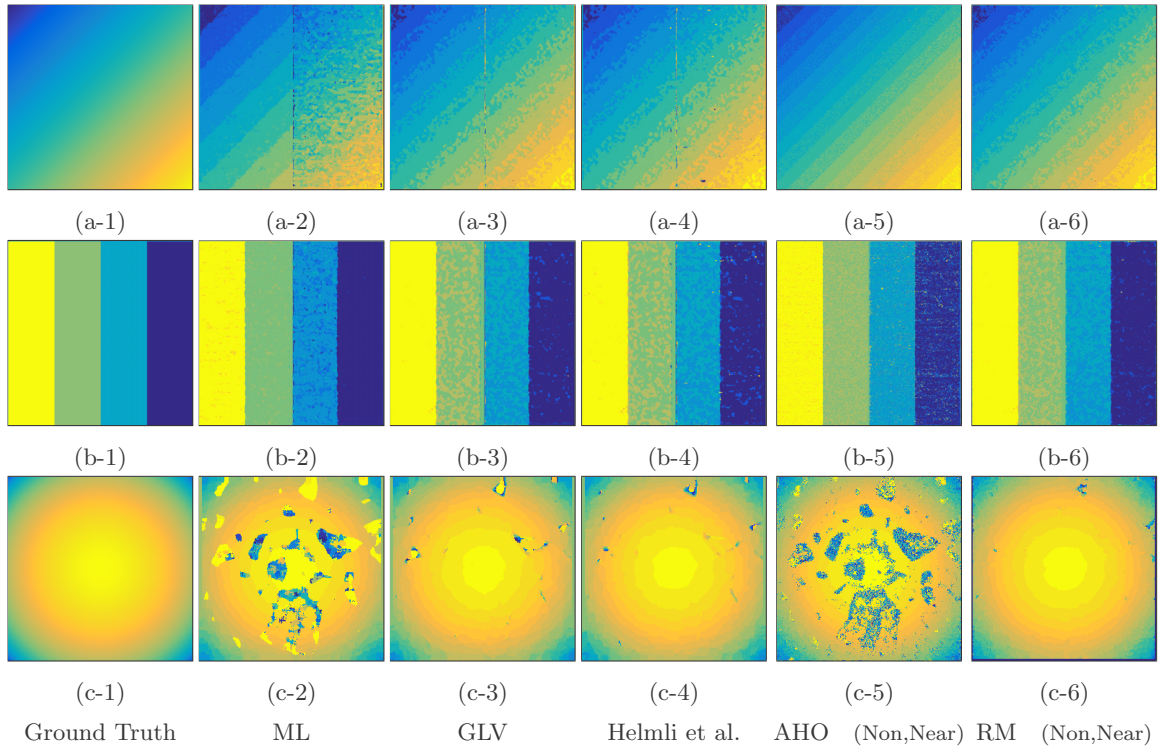


図 3.6: シミュレーション画像 (図 3.5 参照) を用いた合焦評価法の比較

画像セット (ii) の結果では、黒色の平坦領域で差異が生じており、RM 値を用いた (c-4) と (c-6) が良好な結果となった。また、(a-5) と (a-6) を比較すると、AHO 法の方が滑らかな画像に見えるが、これは、ディザによる知覚的な平滑化効果であり、実際には連続的に変化する奥行きは得られていない。

図 3.7 にノイズ画像に対する AHO 法と RM 法の結果を示す。図 3.7 において、(a) はガウシアンノイズを付加したテクスチャ画像 (一部を拡大表示)、(b),(c)、はガウシアンノイズ画像の奥行き推定、(d),(e) はごま塩ノイズ画像の奥行き推定である。いずれもアグリゲーションと補間処理は使用していない。ガウシアンノイズに対しては、(c) の RM 法の方が良好な結果が得られた。ごま塩ノイズに対しては (d) の AHO 法の方が良好な結果が得られた。RM 法は、窓範囲内の平均輝度を用いるため、平均輝度を一定に保つガウシアンノイズに対して有効であり、平均輝度が変動するごま塩ノイズに対しては、AHO 法の方が有効であるためと考えられる。実際の撮影画像で発生するノイズはガウシアンノイズに近いと考えられるので、RM 法の優位性が示されたといえる。

### (b) 定量評価

推定した奥行きマップ  $D$  と図 3.5(b),(c),(e) の正解奥行きマップ  $D^*$  との 2 乗平均平方根誤差:  $\text{RMSE}(D; D^*) := \sqrt{\frac{1}{\sum_{x,y} 1} \sum_{x,y} (D(x,y) - D^*(x,y))^2}$  を計算した結果を表 3.1 (a) に示す。RMSE が低いほど推定結果が良いことを意味する。太字は最良の結果を示す。なお、

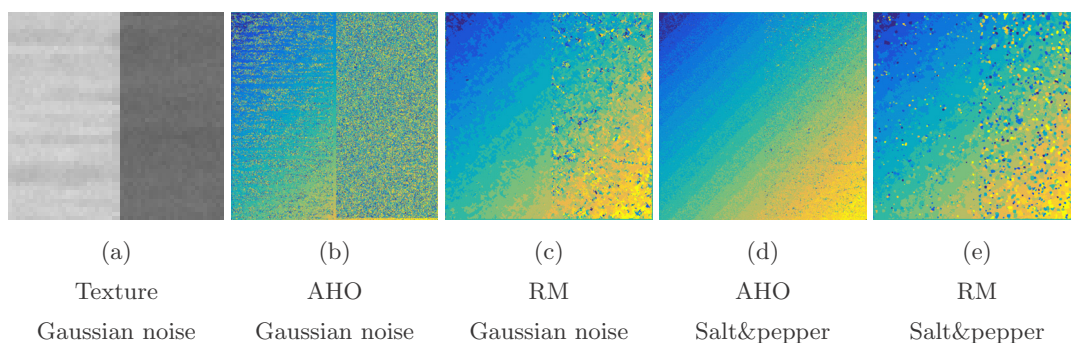


図 3.7: ノイズを付加したシミュレーション画像に対する合焦評価法の比較

表 3.1: 図 3.5 の画像を用いたシミュレーションでの正解奥行きマップと推定された奥行きマップの 2 乗平均平方根誤差の比較

(a) Without aggregation and with nearest interpolation

方法		ML	GLV	Helmli	AHO	RM
アグリゲーション		Non				
補間法		Near				
Depth 1	中央	28.5	19.3	18.9	11.4	11.3
	全体	23.6	11.8	12.9	10.6	10.0
Depth 1 + Gaussian noise	中央	-	-	-	57.9	24.8
	全体	-	-	-	72.9	25.6
Depth 2	中央	26.0	25.1	23.4	21.5	16.6
	全体	18.2	14.3	15.0	23.8	12.2
Depth 3	全体	54.4	13.7	7.4	66.6	4.0

(b) With aggregation methods and interpolation methods

方法		AHO	RM			
アグリゲーション		Fix		Ada		
補間法		Exp			Tri	Half
Depth 1	中央	4.4	3.9	4.2	2.9	2.3
	全体	4.5	4.2	4.6	3.2	2.4
Depth 2	中央	13.0	11.4	11.1	13.0	11.9
	全体	11.5	12.0	11.1	7.8	6.7
Depth 3	全体	4.7	4.4	3.7	1.9	4.0

画像全体の画素を用いて計算した RMSE に加え、中央部分  $100 \times 100$  画素の輝度変化の大きなエッジを含む範囲のみで計算した RMSE を参考用に示した。(ただし、画像の外周部分は境界部分となるため、RMSE の計算からは除外した。) また、上述のガウシアンノイズを付加した Depth1 について、AHO 法と RM 法の結果も示した。

表 3.1 の結果からは、3 枚すべての奥行きマップにおいて RM 法が最良の RMSE を示し、エッジを含む中央部の RMSE も良好であった。このことから、画像セット (i) の図 3.5(a) に



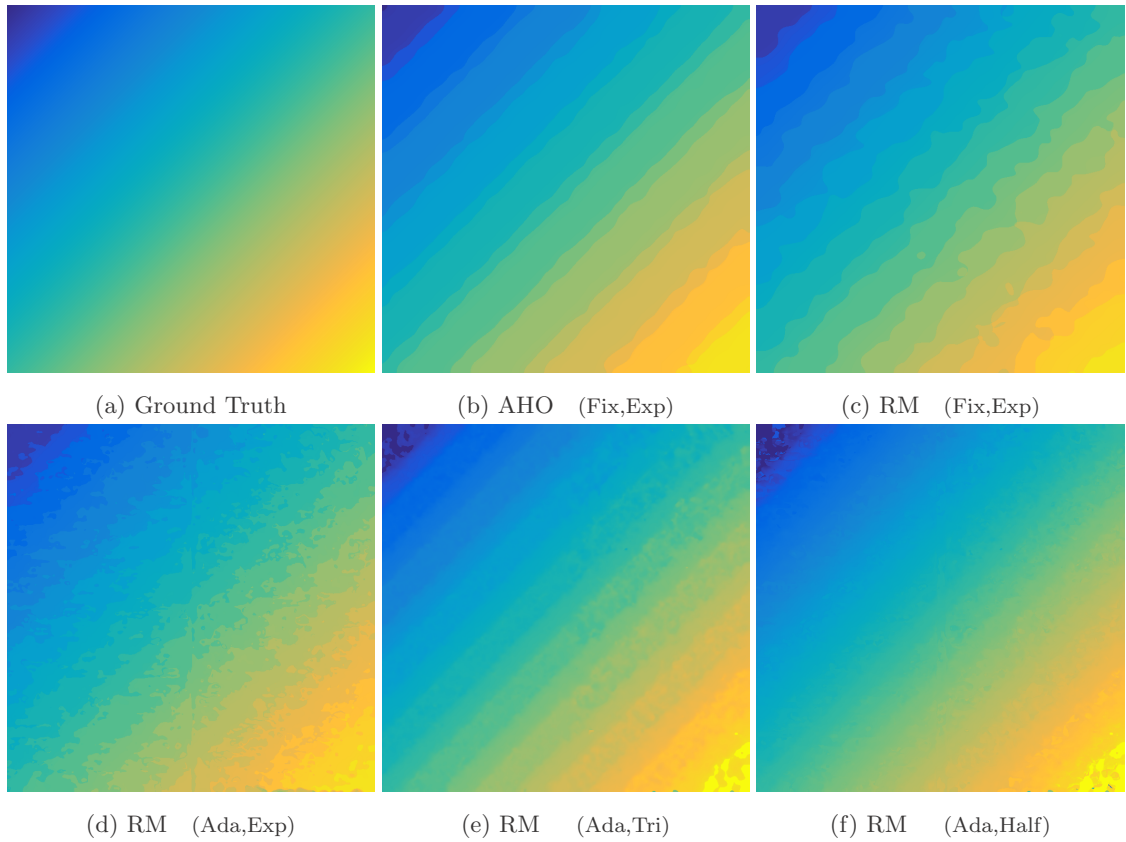


図 3.8: アグリゲーションの有無と奥行き補間法の組み合わせの比較

見られたエッジの影響を受けておらず、また、画像セット (ii) の図 3.5(d) に見られた平坦領域にも対処できおり、提案した合焦評価法は有効であるといえる。

### 3.8.2 アグリゲーションと奥行き補間法の性能評価

AHO 法と RM 法で用いるアグリゲーションと奥行き的小数精度の補間法の評価を行う。アグリゲーションで用いる窓幅については、固定幅 (AHO 法) と可変幅 (提案法) があり、小数精度の補間法については、期待値補間 (AHO 法) と三点補間、及び半値補間 (提案法) がある。それぞれの組み合わせから得られた奥行きマップを図 3.8 に示し、RMSE を計算した結果を表 3.1 (b) に示す。

#### (a) アグリゲーションの定性評価、及び定量評価

アグリゲーションを固定/可変にした場合の差異は、期待値補間を行った場合は定量的には均衡している。RMSE 値 (表 3.1(b) の 2 列目と 3 列目を参照) は同程度の値となる。定性的には、固定窓幅の方が良好に見えるが、過度に平滑化されているとも考えられる (図 3.8(c) と (d) 参照)。更なる定性評価のため、図 3.5(c) の“段差”の奥行きマップを用いた結果での中央部の拡大図を図 3.9 に示す。この結果からは固定幅 (b) よりも可変幅 (c) の方が段差が

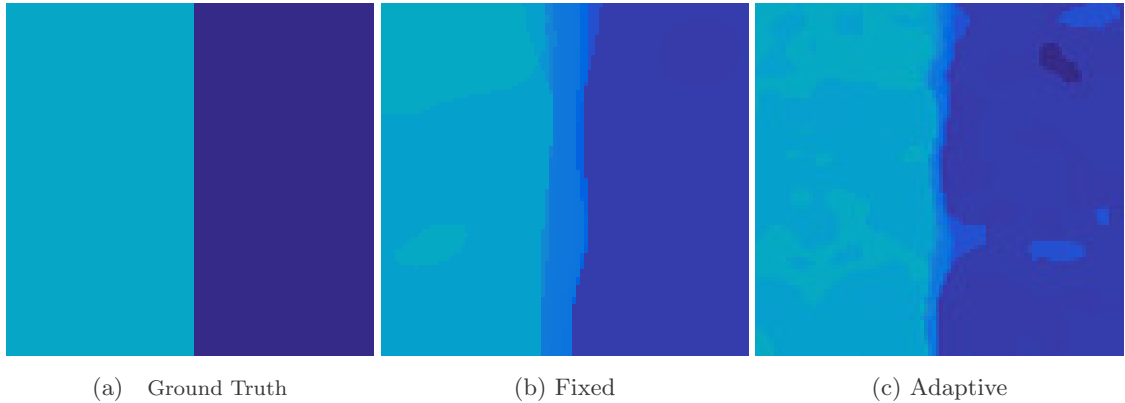


図 3.9: RM 法における固定/可変窓幅のアグリゲーションの差異

鮮鋭に推定できているのがわかる。

実行時間には大きく違いが生じ，固定幅を用いる従来法は 104 秒，提案した可変幅を用いる方法は 8 秒であった (実装環境は，MSVC++2005，Core i5 CPU，6GB RAM)。

以上より，奥行き推定の精度を維持・改善しつつ実行時間を大幅に短縮できており，提案した可変窓幅のアグリゲーションは有効であるといえる。

#### (b) 奥行き補間法の性能評価

図 3.8 の奥行きマップの結果からは，期待値補間，三点補間，半値補間法の順に階段状のアーティファクトが低減されるのがわかる．表 3.1 (b) の RMSE の結果からも大幅な改善が確認できる．ただし，半値補間の結果には推定値が正解奥行き値から大きく外れた値が生じる傾向があり，画像セット (ii) の結果では RMSE 値が増加し，三点補間の方が良い結果となった．半値補間法を含め，奥行き補間方法については更なる改善が必要といえる。

### 3.9 実画像を用いた定性的評価

実際にデジタルマイクロスコープで撮影した画像を用いて，奥行き推定の実験を行った．図 3.10 と図 3.11 に用いた画像セットの一部と奥行き推定結果を示す．画像サイズは，図 3.10 の画像セットでは  $800 \times 600$ ，図 3.11 では  $852 \times 640$  となる．図 3.10 の画像は，撮影時は  $1600 \times 1200$  画素だったものをサブサンプリング（画素間引き）して  $800 \times 600$  とした． $1600 \times 1200$  画素のままだと，AHO 法で PC のメモリ不足となり処理が行えなかったためである．また，カラー画像はグレイ画像に変換後，各種法にて奥行き推定を行った。

なお，撮像条件および被写界深度の値は以下のとおりである（1.4 節参照）．図 3.10 では，光学倍率 24 倍，サブサンプリングを考慮した画素サイズは  $8.8 \mu\text{m}$  であり被写界深度は  $2 \mu\text{m}$  程度となる．図 3.11 では，画素サイズは  $6.6 \mu\text{m}$  であり，光学倍率は (a) が 1 倍，(b)

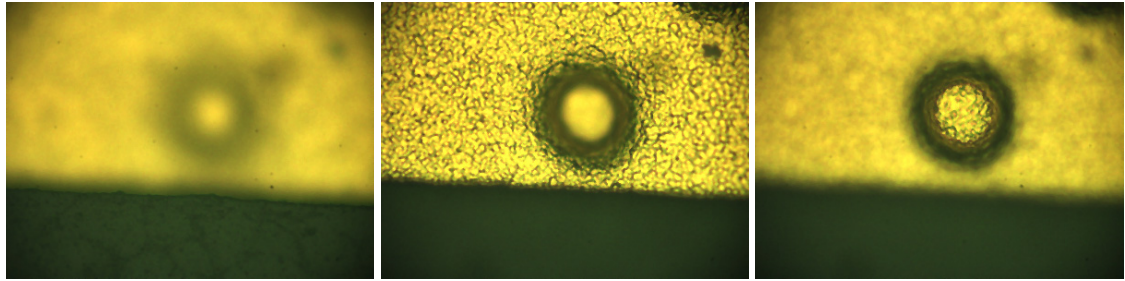
が1.49倍、(c)が3.99倍であり、被写界深度は、それぞれ、 $74\text{ }\mu\text{m}$ 、 $41\text{ }\mu\text{m}$ 、 $12\text{ }\mu\text{m}$ 程度になる。

図 3.10 の最上段の画像は基板面を撮影した 11 枚のうちの 3 枚であり、それぞれ下部黒色面、金色部分、中央の凹部底面に合焦した画像となる。下部黒色面はテクスチャが平坦で知覚的にも合焦判断しにくい。(a)~(c) は各手法の結果であり、(a) は標準的な方法である ML 法、(b) と (c) は AHO 法と RM 法の合焦評価法の効果を確認するため、アグリゲーションをせず、奥行き推定に最近傍補間を用いた結果となる。(d)~(f) は RM 法において可変窓のアグリゲーションと各補間法を用いた結果となる。更に、奥行きマップの左下から右上への断面波形を (g) と (h) に示す。

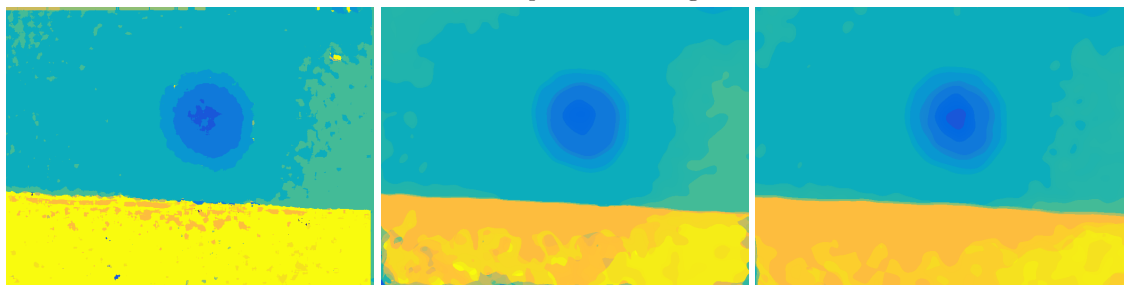
まず、奥行きマップ (a)~(c) と奥行き波形 (g) の結果からは、RM 法では他の手法に比べて基板部分に生じる外れ値が少なく、奥行きが滑らかであることがわかる。次に、提案法での補間方法による差異については、期待値補間で見られたノイズが、三点補間と半値補間では低減できていることがわかる。ただし、半値補間では中央の凹部周辺に外れ値がいくつか見られる。凹部の縁では内側凹部と外側平坦部で傾斜が急峻に変わり、ぼけかたも異なる。このため、合焦評価曲線  $\overline{\Psi}_{x,y}(z)$  の形状がピーク値の前後で非対称となり、補間に失敗して外れ値が生じたと考えられる。

更に図 3.11 に示す 3 種類の画像を用いて評価を行う。(a-1)~(a-6) は金属と樹脂の成形品で、左端にネジ穴がある以外は概ね平坦である。(b-1)~(b-6) はマーガレットの花、(c-1)~(c-6) は羽アリの羽となる。それぞれ 10 枚ほどの画像を用いて奥行き推定を行った。AHO 法と RM 法ともに可変サイズのアグリゲーションを用い、小数精度の補間なし (最近傍補間) の結果と三点補間の結果を示した。図 3.11 (a-3)(b-3) の AHO 法において赤枠で示した箇所には外れ値やアーティファクトが生じている。一方、図 3.11 (a-5)(b-5) と (a-6)(b-6) の RM 法では生じておらず、良好に奥行きを推定ができている。ただし、(a-3) で生じたアーティファクトについては、撮像ごとのわずかな位置ズレによる可能性が高いと考える。RM 法は周辺画素の平均化処理を行っているため、位置ズレに対して敏感には反応していないためと思われる。





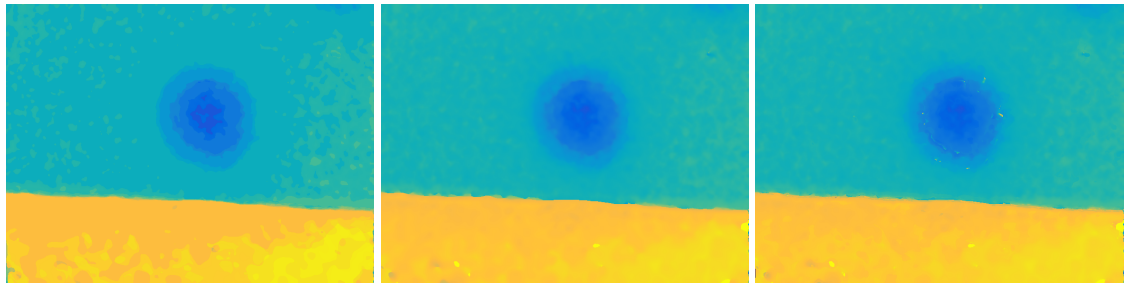
Three of input eleven images



(a) ML

(b) AHO (Fix,Exp)

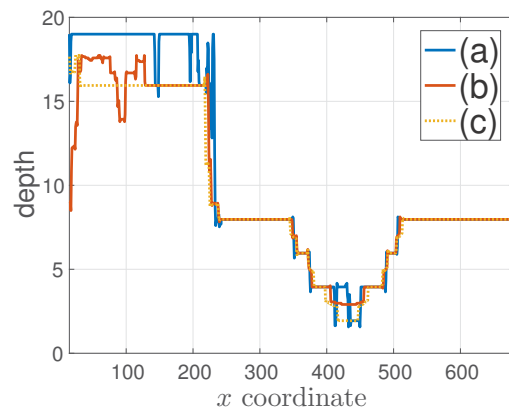
(c) RM (Fix,Exp)



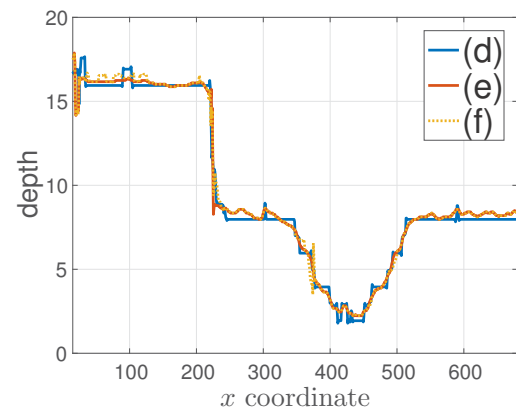
(d) RM (Ada,Exp)

(e) RM (Ada,Tri)

(f) RM (Ada,Half)



(g)



(h)

図 3.10: 実画像でのアグリゲーションの有無と奥行き補間法の組み合わせの比較

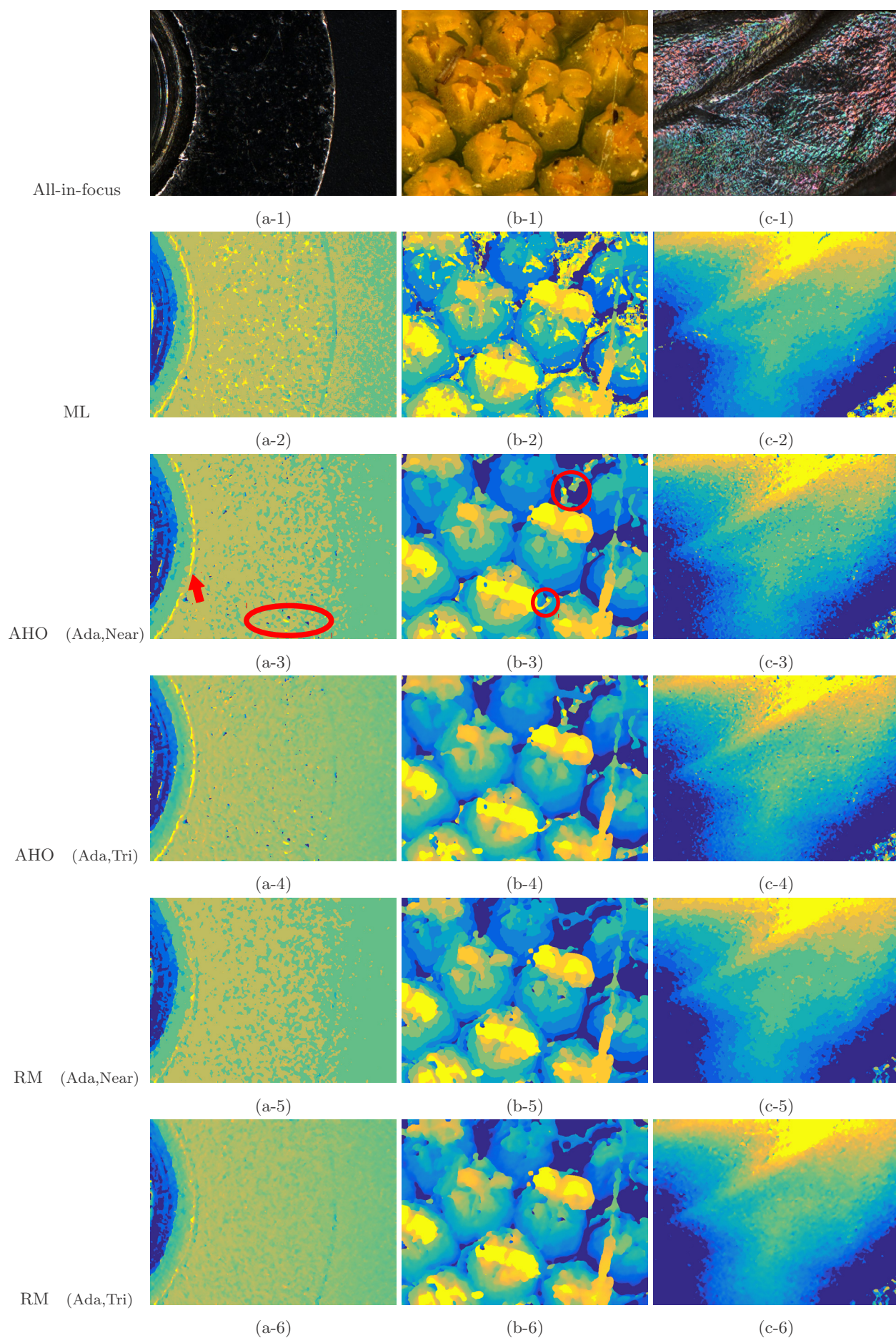


図 3.11: 実画像を用いた従来法と RM 法による奥行き推定の比較

### 3.10 RM 値の計算方法の導出

合焦箇所は鮮明な模様をもち、固有の輝度変化が生じていると仮定すると、その輝度変化は周辺の輝度値からは補間しにくく、周辺画素値の平均値との違いも大きくなると考えられる。そのため、ある画素の画素値が、その周辺の平均画素値から推定できる確率を考え、その対数の勾配量を、現在の値からの推定のしにくさ、言い換えると、合焦の程度として定義する。また、画像の輝度変化は、特に暗い箇所ではポアソン分布に従うと仮定し [40]、上述の平均値からの差もポアソン分布に従うと考える。

図 3.12 は実験に用いた図 3.11(a-1) の、注目画素の画素値と周辺画素の平均画素値の関係を示したヒストグラムとなる。ある平均値が観測された時の注目画素値の分布となる。平均値が小さく暗い領域では、分布形状の裾が広がり、ポアソン分布に近いことがわかる。

ある観察された画像  $J$  と、各画素で周辺輝度値の平均を求めた画像  $M = K * I$ , ( $M > 0$ ) を考える。ここで  $K$  は正方形の矩形フィルタ、 $I$  はノイズの生じていない理想的な画像、演算子  $*$  はフィルタリングを表す。平均値から輝度値が推定される確率は、ポアソン過程では次式で与えられる。

$$\text{Poisson}(J|M) = \prod_x \frac{M(x)^{J(x)}}{J(x)!} \exp(-M(x)) \quad (3.18)$$

ここで各画素を  $x$  とした。以下では簡素化のため  $(x)$  を省略する。次に、上式を各画素  $I(x)$  について微分し勾配量を求める。ただし、指数系の関数は扱いにくいため、 $-\log$  を計算した後微分を行う。

$$-\log \prod_x \frac{M^J}{J!} \exp(-M) = \sum_x \{M - J \circ \log M + \log J!\} \quad (3.19)$$

ここで演算子  $\circ$  は要素ごとの乗算を表す。次に、 $M = K * I$  を代入し、微分する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial I(x)} \sum_x \{K * I - J \circ \log(K * I)\} &= K \otimes 1 - K \otimes \frac{I}{K * I} \\ &= K \otimes \left(1 - \frac{J}{K * I}\right) = K * \left(1 - \frac{J}{K * I}\right) \end{aligned} \quad (3.20)$$

ここで演算子  $\otimes$  は畳み込みを表す。正方形の矩形フィルタは対象性 (180 度回転させたフィルタと一致する係数配置) をもつため、畳み込み  $\otimes$  とフィルタリング  $*$  は同一演算となり、両方とも平均を求める計算となる。

上式 (3.20) より得られた勾配量において、 $I = J$  とし、更に丸括弧  $(\cdot)$  を絶対値の計算  $|\cdot|$  に変更して変化量の絶対値を得ることを考えると、3.4 節で述べた RM 値を得る計算が得ら



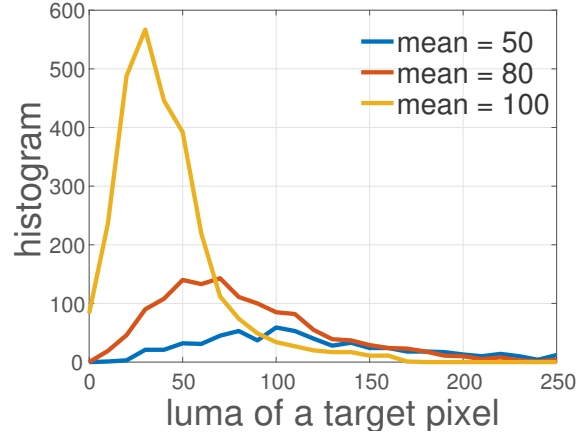


図 3.12: 図 3.11(a-1) の画像における注目画素の輝度値と周辺画素の平均画素値の間に見られるポアソン分布

れる．

$$\left\{ \begin{array}{l} K * \left| 1 - \frac{J}{K * J} \right| = \frac{1}{|\mathcal{N}|} \sum_{x' \in \mathcal{N}(x)} RM(x') \\ RM(x) = \left| 1 - \frac{J(x)}{\bar{J}(x)} \right| \\ \bar{J}(x) = \frac{1}{|\mathcal{N}|} \sum_{x' \in \mathcal{N}(x)} J(x') \end{array} \right. \quad (3.21)$$

上述の計算であるが，ガウス過程に基づく場合は次式で与えられる．

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Gauss}(J | M) = \prod_x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{|J(x) - (K * I)(x)|^2}{2\sigma^2}\right) \\ \frac{\partial}{\partial I(x)} - \log \text{Gauss}(J | M) = \frac{1}{2\sigma^2} K \otimes (J - K * I) \end{array} \right. \quad (3.22)$$

式 (3.21) の場合と同様に，丸括弧  $(\cdot)$  を絶対値に変更すると，上式は平均偏差の計算と一致する．

$$\left\{ \begin{array}{l} K * |J - K * J| = \frac{1}{|\mathcal{N}|} \sum_{x' \in \mathcal{N}(x)} |J(x) - \bar{J}(x)| \\ \bar{J}(x) = \frac{1}{|\mathcal{N}|} \sum_{x' \in \mathcal{N}(x)} J(x) \end{array} \right. \quad (3.23)$$

提案した式 (3.21) の意味合いとしては，ガウス過程における式 (3.23) の平均偏差に対応するポアソン過程での偏差を計算していると考えられる．画像がぼけるほど，注目画素値と平均値の差は小さくなり，平均偏差は小さくなる．

### 3.11 むすび

本章では，従来の DfF 法の課題であった輝度変化の大きなエッジの影響，及び，テクスチャ平坦領域に対して頑健な DfF 法を提案した．画像の鮮鋭度の尺度として，注目画素とその周辺輝度値の関係を考慮した RM 値を提案し，複数の窓幅で得られた RM 値を Frommerらの DfF 法を用いて合成する手法を示した．

シミュレーション画像と実際に撮影した顕微鏡画像を用いた実験では，従来法に比べて画像によらず精度の高い奥行き推定ができることを実証した．特に，画像中の暗くテクスチャの平坦な箇所で安定した推定結果が得られた．本実験を通して，提案法では同一パラメーターを用いて奥行き推定を行った．提案法ではいずれの画像においても良好な奥行きマップが得られており，その頑健さが示された．

RM 法の課題としては，処理速度の遅さと，メモリ使用量の多さがあげられる．これらの課題の解決する手法について次章で提案する．

## 第4章

# RM法の効率化：並列化RM法

---

### 4.1 RM法の課題

前章で提案したRM法では、以下に示す二つの課題がある。

**メモリ使用量:** 式 (3.4) で示したボリュームデータを保持する必要がある。このデータ量は、画素数を  $N$ 、窓半径の数を  $R$ 、画像の枚数を  $Z$  とすると、 $NRZ$  となる。1 データは 4byte 単精度浮動小数点であるので、 $R = 10$ 、 $Z = 20$  の場合、画素数の 800 倍のメモリが必要となる。画素数の大きな画像や画像の枚数が多い場合にメモリ不足に陥る可能性がある。

**処理時間:** 式 (3.3) と (3.4) の計算は各画素で  $RZ$  回必要であり、多くの処理時間を要する。しかし、(3.3) で注目画素の周辺平均輝度を用いて合焦評価値を求めた後、(3.4) で更に周辺画素の平均化を行うため、画素ごとの並列計算による高速化は難しい。

### 4.2 課題の解決方法：並列化RM法

前節で述べたRM法の課題を解決する方法について述べる。画像ごとに行っていた処理を、画素ごとの処理に近似し置き換え、並列化することで、課題を解決する (以降、並列化RM法と呼ぶ)。画素ごとに行うことで、処理の並列化が出来、高速化が可能となる。また、画素ごとに合焦評価曲線を求め、その合成を行うことが出来れば、前節で指摘したボリュームデータを保持する必要がない。このことでメモリ量の削減も期待できる。この並列化RM法の処理フローを図 4.1(b) に示し、その詳細を以降で述べる。なお、比較のため、RM法のフローを図 4.1(a) に並べて示す。

### 4.3 並列化RM法の合焦評価計算

前述したRM法では式 (3.2)～(3.4) に二段階の平均化処理が現れる。並列化RM法では、これらの式を以下のように近似する。

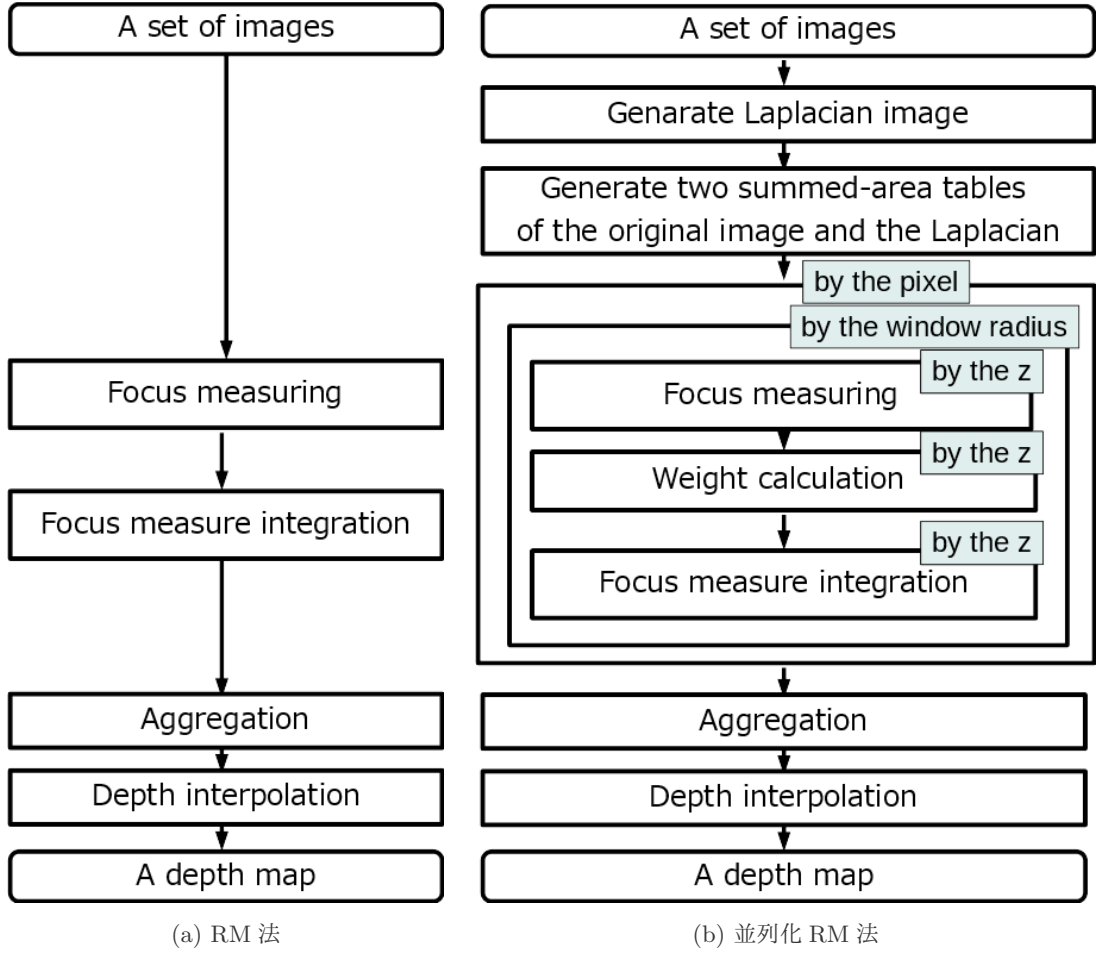


図 4.1: アルゴリズムフローチャート

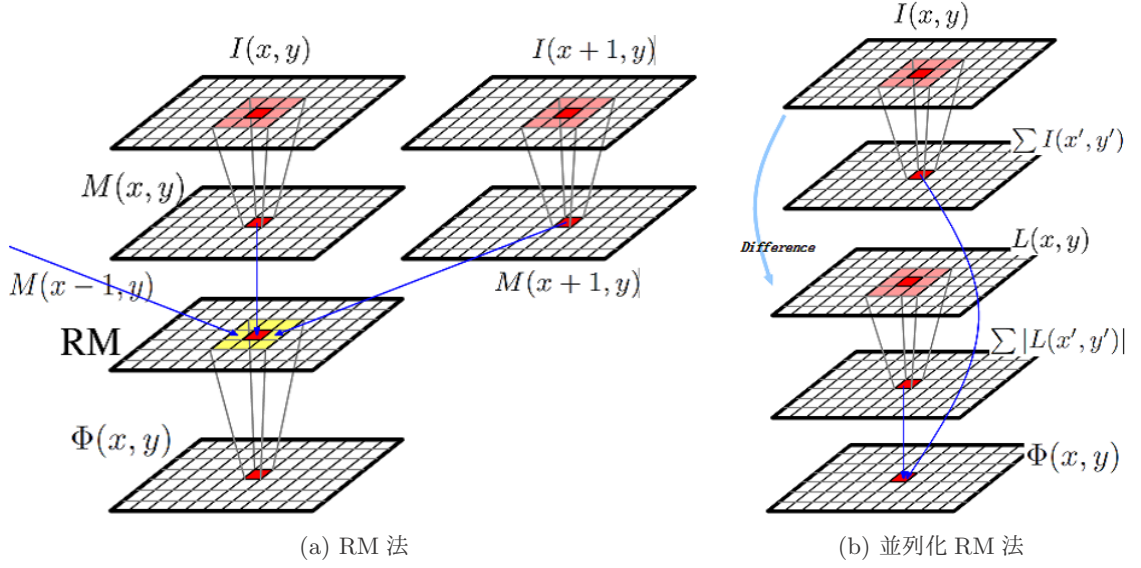
まず、画素値  $I_z(x, y)$  を平均値  $M_z^r(x, y)$  と差分値  $L_z^r(x, y) := I_z(x, y) - M_z^r(x, y)$  の和で表す。すると、式 (3.3) は以下のようになり、分子には差分値のみが残る。

$$\text{RM}_z^r(x, y) = \left| \frac{M_z^r(x, y) + L_z^r(x, y)}{M_z^r(x, y)} - 1 \right| = \left| \frac{L_z^r(x, y)}{M_z^r(x, y)} \right| \quad (4.1)$$

なお、分母のゼロ除算回避用の  $\varepsilon$  は省略する。次に、上式を (3.4) に代入し、周辺範囲  $\{x', y'\} \in \mathcal{N}_r(x, y)$  内での平均輝度値  $M$  はほぼ一定となると仮定し、以下のように近似する。

$$\begin{aligned} \Phi_z^r(x, y) &= \frac{1}{|\mathcal{N}_r|} \sum_{\{x', y'\} \in \mathcal{N}_r(x, y)} \left| \frac{L_z^r(x', y')}{M_z^r(x', y')} \right| \\ &\approx \frac{1}{|\mathcal{N}_r|} \frac{\sum_{\{x', y'\} \in \mathcal{N}_r(x, y)} |L_z^r(x', y')|}{M_z^r(x', y')} = \frac{\sum_{\{x', y'\} \in \mathcal{N}_r(x, y)} |L_z^r(x', y')|}{\sum_{\{x', y'\} \in \mathcal{N}_r(x, y)} I_z(x', y')} \end{aligned} \quad (4.2)$$

これより、分子と分母で用いられる平均化（総和計算）はそれぞれ1回となる。

図 4.2: 合焦評価値を求める処理の模式図. 窓半径  $r = 1$  の場合.

これらの処理を模式図に示すと、図 4.2 となる. (a) は RM 法を (b) は並列化 RM 法を示す. (a)RM 法では、4 ステップ目の合焦評価値  $\Phi_z^r(x, y)$  の計算を行うために、周辺画素の  $RM$  値を求める必要がある.  $RM$  値の計算にもその周辺画素の輝度値から計算される  $M_z^r$  が必要である. このように二段階の平均化処理が必要となり画素ごとの並列化が出来ない. 一方, (b) 並列化 RM 法では、周辺画素の総和計算は二回行われるが、これらは独立しており、画素ごとの並列化が可能である.

この総和計算は範囲総和テーブル (Summed-area table)[41] を用いて効率的に計算できる. 図 4.2 の模式図では、周辺画素の輝度値を用いて総和計算をする図としているが、実際は、範囲総和テーブルから計算する. 範囲総和テーブルは、図 4.3 のようになり、座標  $(x, y)$  の値は、 $(x, y)$  の左上範囲の総和となる. 範囲総和テーブルを用いて窓半径  $r$  の総和計算をする場合、総和範囲の 4 隅の点のみを使用して総和計算が出来る.

$$\sum_{\{x', y'\} \in \mathcal{N}_r(x, y)} I_z(x', y') = I_z(x - r - 1, y - r - 1) + I_z(x + r, y + r) - I_z(x - r - 1, y + r) - I_z(x + r, y - r - 1) \quad (4.3)$$

また、式 (3.6) の評価値の合成も画素ごとに行うことができる. 従って、合焦評価値の計算、及び、評価値の選択と合成の処理は画素ごとに行うことが出来る.

#### 4.4 差分値の表現

上述の式 (4.3) の分子に現れる  $L_z^r(x', y')$ , すなわち、広い画素範囲を考慮したラプラシアンをどのように表すかが問題となる. 代表的なものに Modified Laplacian (ML) 法 [19] があ



1	3	5	2	5	4	2	2	1	4	9	11	16	20	22	24
5	5	3	2	2	1	3	3	6	14	22	26	33	38	43	48
3	4	1	1	5	6	7	4	9	21	30	35	47	58	70	79
2	5	6	7	9	0	3	2	11	28	43	55	76	87	102	113
1	1	4	3	2	3	5	2	12	30	49	64	87	101	121	134
6	6	7	4	3	2	3	4	18	42	68	87	113	129	152	169
3	4	5	4	4	2	1	2	21	49	80	103	133	151	175	194
2	3	5	7	8	4	3	2	23	54	90	120	158	180	207	228

(a) Image
(b) Summed-area table

図 4.3: 範囲総和テーブル. 元となる画像例 (a). 一マスが画素を表し, 値が輝度を示す. (a) の範囲総和テーブルが (b) となる. 黄色の範囲の総和計算には, 赤枠と青枠の4画素の値のみ使用する.

り, DfF 法でも良い性能を示すことが知られているため, この計算法のアプローチを用いる. ML 法では, 水平と垂直方向への二階微分を求める際, 差分計算に用いる画素同士の間隔を  $d$  画素離して用いる.

$$\begin{aligned}\Delta_x &:= |-I(x-d, y) + 2I(x, y) - I(x+d, y)| \\ \Delta_y &:= |-I(x, y-d) + 2I(x, y) - I(x, y+d)|\end{aligned}\tag{4.4}$$

これらを合わせてラプラシアンを表す.

$$\text{ML}(x, y) := \Delta_x(x, y) + \Delta_y(x, y)\tag{4.5}$$

ただし, このように各方向への二階微分を足し合わせると, 雑音に対して過剰に反応したため, 本稿では以下のように絶対値の大きな方の二階微分値を採用した.

$$L_z^r(x, y) := \max(\Delta_x(x, y), \Delta_y(x, y))\tag{4.6}$$

実験では, 差分を計算する画素間隔は経験的に, パラメータ  $r$  と  $z$  に関わらず, 常に  $d = 3$  とした.

## 4.5 シミュレーション画像を用いた評価

実験には, 3.8 章と同じ画像を用いた. アグリゲーションや奥行き推定の方法は変更していないため, アグリゲーションなし, 奥行き推定は最近傍補間で評価を行った.

従来の RM 法と並列化 RM 法で推定した奥行きマップ  $D$  と図 3.5(b), (c), (e) の正解奥行きマップ  $D^*$  との二乗平均平方根誤差 (RMSE) :  $\text{RMSE}(D; D^*) :=$

表 4.1: 図 3.5 の画像を用いたシミュレーションでの正解奥行きマップと推定された奥行きマップの二乗平均平方根誤差の比較

方法		RM 法	並列化 RM 法
Depth 1	中央	11.3	9.3
	全体	10.0	9.3
Depth 1 +Noise	中央	24.8	20.8
	全体	25.6	26.9
Depth 2	中央	16.6	18.7
	全体	12.2	12.0
Depth 3	全体	4.0	2.9

$\sqrt{\frac{1}{\sum_{x,y} 1} \sum_{x,y} (D(x,y) - D^*(x,y))^2}$  を計算した結果を表 4.1 に示す. RMSE が低いほど推定結果が良いことを表す. 加えて, 同表に輝度変化の大きなエッジを含む画像の中央部分  $100 \times 100$  画素の範囲で計算した RMSE を示す. また, 図 4.4 に RM 法と並列化 RM 法で得られた奥行きマップを示す.

表 4.1 の結果のように, 並列化 RM 法は従来 RM 法を比較すると, 画像により若干の優劣があるが大差は無く, ほぼ同程度の結果といえる. 図 4.4 の画像における比較でも大差はなく, 近似式 (4.3) の妥当性が示された.

雑音耐性を示すため, ガウス雑音を付加した画像を用いて得られた奥行きマップを図 4.5 に示す. 参考のため, (b) にはラプラシアン  $L_z^r(x,y)$  に式 (4.5) の ML を用いて計算した結果を示す. (b) と比較すると, 並列化 RM 法 (c) の方が良好な結果が得られており, 式 (4.6) を用いた方が雑音耐性が高いことが示された. RM 法 (a) と並列化 RM 法 (c) の画像比較では, ほぼ同様の画像が得られた. これは, 表 4.1 の結果からも確認でき, 雑音耐性においても, 並列化 RM 法は RM 法と同程度の性能といえる.

## 4.6 実画像を用いた定性的評価

実際にデジタルマイクロスコープで撮影した画像を用いて, 奥行き推定の実験を行った. 用いた画像は, 3.9 節と同じである. シミュレーション画像の評価と同様に, アグリゲーションなし, 最近傍補間で評価を行った. 図 4.6 に奥行き推定結果を示す. RM 法と並列化 RM 法ではほぼ同じ結果となった. ただし, 図 4.6(a-\*) の下側部分については, 並列化 RM 法が若干精度が悪い結果となった. この部分はテクスチャの少ない部分であり, 実画像に存在するノイズの影響を若干受けやすいためと考えられる. シミュレーション画像での結果 (表 4.1 参照) でもノイズを付加した RMSE が全体ではやや悪化しており, わずかながら RM よりもノイズに過敏である可能性がある. ただし, 全体としては, 実際の画像に対しても, RM

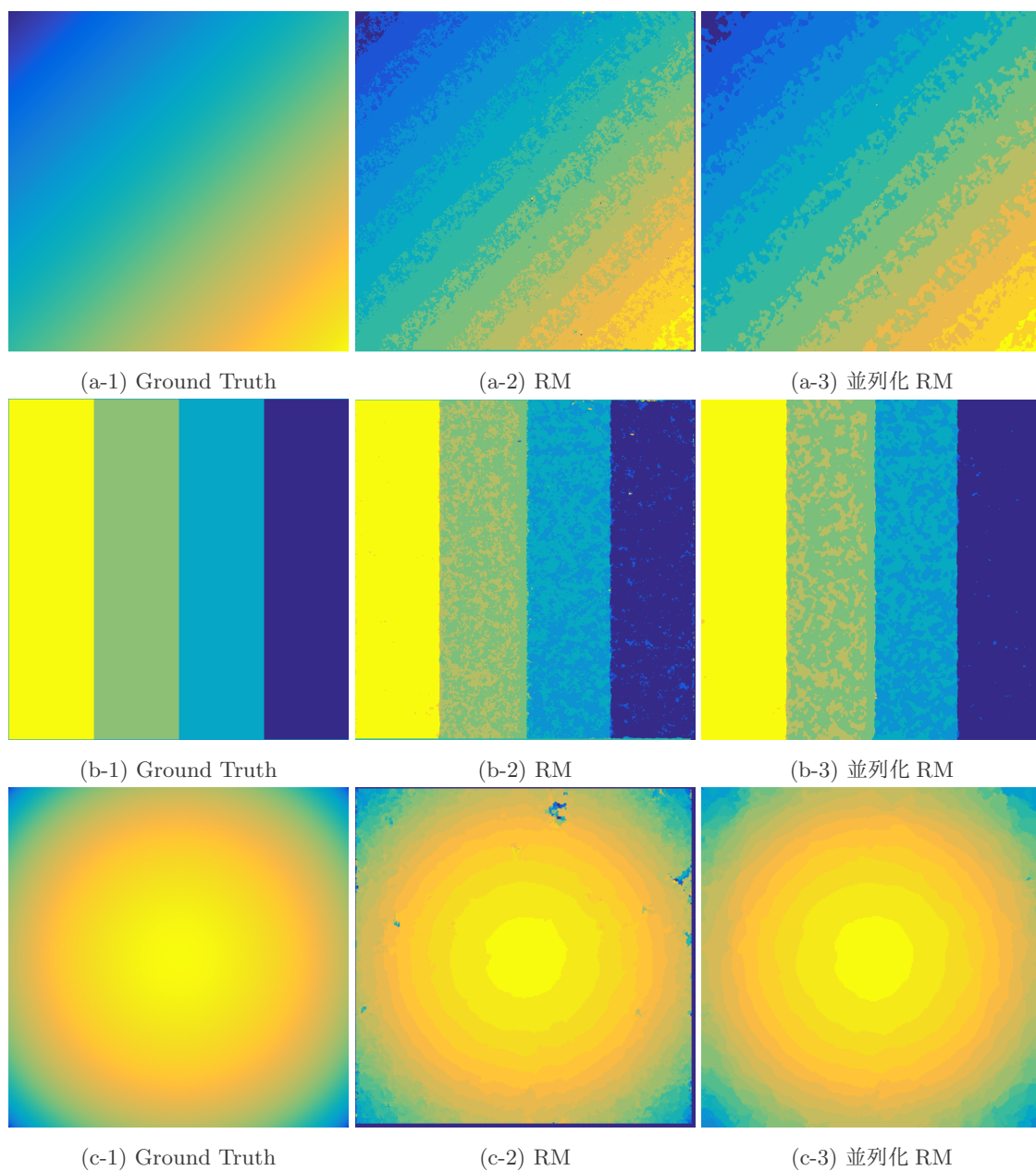


図 4.4: RM 法と並列化 RM 法の比較

法と並列化 RM 法は同等の結果と言える。

## 4.7 並列化処理の実装

画素ごとの並列化の効果を調べるため、CPU および GPU による並列化処理を実装し処理時間を測定した。1 枚の画像サイズ  $N$  は約 0.5M, 1M, 2M, 3M[byte] の 4 種類、 $R = 10$ ,  $Z = 20$  で測定を行った。測定に用いたパソコンは以下の 2 種類とした。

**PC1** : Core i5-2520 (2.5GHz,, 2 コア, 4 スレッド), メモリ : 6G[byte]

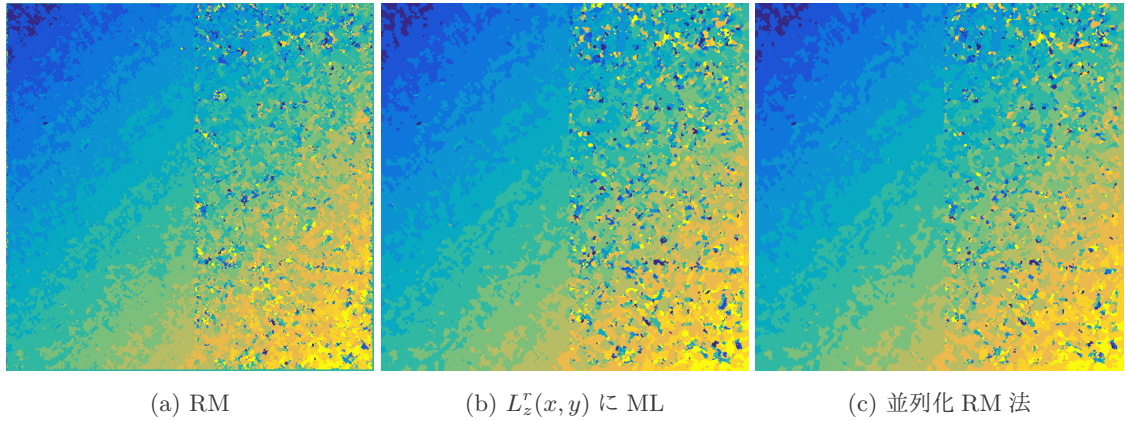


図 4.5: 加法的白色ガウス雑音を加えた画像の比較

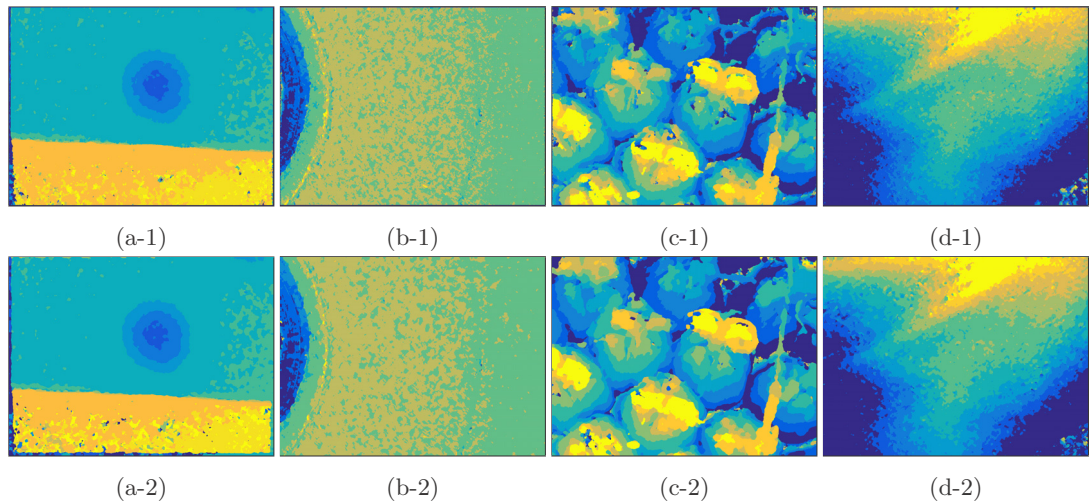


図 4.6: 実画像を用いた奥行き推定. 上段は従来 RM 法, 下段は並列化 RM 法での推定結果. 画像は左から (a-\*) は基板, (b-\*) は金属と樹脂の成形品, (c-\*) はマーガレットの花, (d-\*) は羽アリの羽である

**PC2** : Corei9-7920X(2.9GHz, 12 コア, 24 スレッド), メモリ : 64G[byte], GPU : NVIDIA GeForce 1080

PC1 は標準的なスペックのノートパソコン, PC2 は比較的高性能なデスクトップ PC である.

CPU による並列化では, アグリゲーションは行わず, 奥行き値の補間には最近傍補間を用いた.  $Z = 20$  枚の画像はあらかじめメモリ内に読み込んだ状態から処理時間の測定を行った. CPU による並列化の結果を図 4.7 に示す. PC1 では, 従来の RM 法と並列化 RM 法の処理時間の比較も行った. RM 法と並列化 RM 法をシングルスレッドで比較した場合, 若干 RM 法の方が高速である. RM 法は画像ごとに処理を行うため, メモリアクセスの効率 (キャッシュのヒット効率) が良いためと考えられる.

並列化 RM 法をマルチスレッドで実行した場合, 処理速度が短縮できることが確認出来る.



特に、PC1の場合、4スレッド化により1/2～1/3程度の処理時間となる。一方PC2ではスレッド数の割に処理時間の短縮効果が出ていない。24スレッドで約1/3の処理時間となる。PC2でのスレッド数と処理速度の関係を図4.8に示す。スレッド数を増やしても、徐々に高速化の効果が出にくくなっていく。

タスクマネージャーでのCPU使用率を確認すると、使用しているスレッドの使用率はほぼ100%である。このため、コーディング上の無駄な待ち時間や排他処理による待機時間はほとんどないものと思われる。おそらくは、演算時間よりもメモリアクセスがボトルネックになっており、その為、スレッド数の割には処理時間が短くならないものと思われる。なお、CPUの機能により、使用するスレッド数によってCPUのクロック速度が若干変化することがある。PC2では、8スレッドの場合、1スレッドに比べて10%程度クロックが低速になった。ただし、8スレッド以上にしても、クロックはほぼ変化しない。このため、負荷によってCPUクロックが自動的に変化する機能（Intel Turbo Boost Technology）の影響は無視できると考える。

なお、並列化を行ったのは合焦評価値の計算と合焦評価値の選択と合成の処理である。並列化RM法では、差分画像の作成と、範囲総和テーブルの作成が必要である。これに要する時間は、2M[byte]画像の場合、PC1で約4秒、PC2で約1.7秒であった。また、アグリゲーションは行っておらず、奥行き値の補間に要する時間はほとんど無視できる程度である。

GPUによる並列化の効果はPC2を用いて測定した。GPUでは、並列化処理部分（合焦評価値の計算と合焦評価値の選択と合成の処理）についてのみの処理時間を測定した。結果を図4.9に示す。画像サイズによらず、1/10程度の処理時間となり、処理時間を大幅に短縮できることを確認できた。GPUの処理では、処理の冒頭で範囲総和テーブルをGPUにコピーする。範囲総和テーブルのサイズは、画素あたり4バイトであるので、1テーブルあたり、 $4N$ となる。範囲総和テーブルは画像用と差分画像用の2種類でありそれぞれ、 $Z$ 枚必要である。従って、GPUに転送するデータ量は、 $8NZ$ [byte]となり、GPUで十分処理可能である。なお、GPUの処理では、1画素1スレッドで処理を行い、上記の画像はテクスチャメモリに格納した。ちなみに、グローバルメモリーを使用した場合は若干処理速度が低下する。テクスチャメモリを使用した場合は1/10の処理速度になったが、グローバルメモリーの場合は1/6程度の処理速度となる。

## 4.8 メモリ使用量

従来のRM法では、 $\Phi$ 、 $\alpha$ 、 $\Psi$ の保持にそれぞれ、 $\Phi : NRZ$ ;  $\alpha : NR$ ;  $\Psi : NZ$ のデータ量を要し、合計で $N(RZ + R + Z)$ を要する。一方、並列化RM法では、 $\Phi$ は $Z$ のみ一時的に

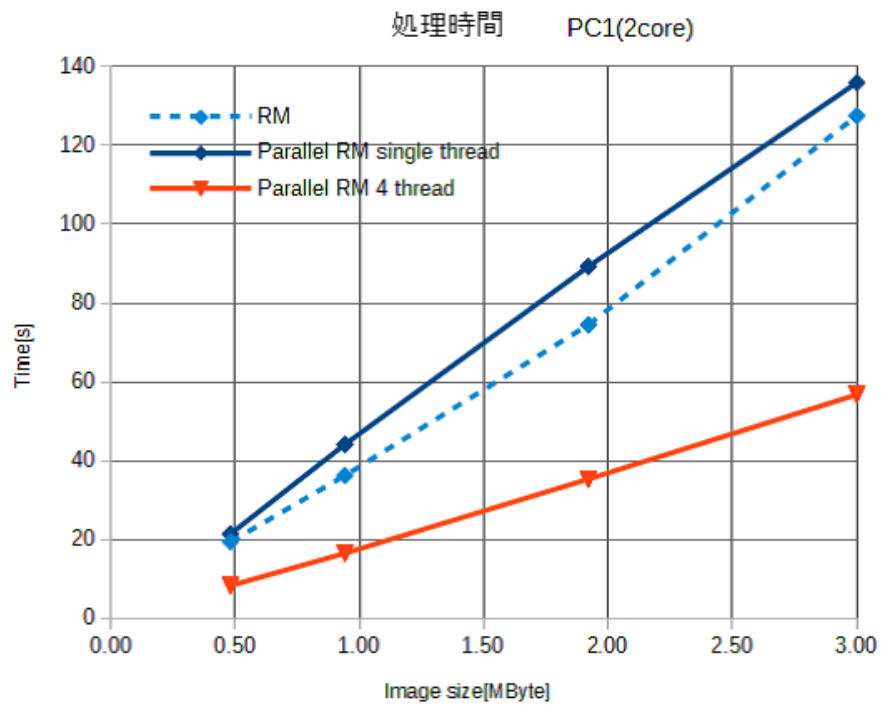
保持し ( $N$  倍は不要),  $\Psi$  と 2 種類の範囲総和テーブルを  $NZ$  枚保持し, 合計で  $Z + 3NZ$  のデータ量を要する.  $N = 2M[\text{byte}]$ ,  $R = 10$ ,  $Z = 20$  で各データを 4byte とした場合は, メモリ使用量は, 従来法で約 1.8GB, 提案法で 0.6GB となり, 約  $1/3$  に低減できる.

実際の画像を用いてメモリ使用量の測定を行った. 処理を開始する前と, 処理中の最大メモリ使用量を, タスクマネージャを用いて計測し算出した. RM 法と並列化 RM 法のシングルスレッドと 4 スレッドについて使用量を比較した. 1 枚の画像サイズは約 0.5M, 1M, 2M, 3MByte の 4 種類について測定を行った. 結果を図 4.10 に示す. RM 法と並列化 RM 法のメモリ使用量を見ると, 先に示した推定値とほぼ一致しており, およそ  $1/3$  に低減できることが示された. なお, 画像サイズ 3MByte における RM の実測値が大きく外れている. このときの最大メモリ使用量は 5.4GByte 程度となりパソコンの搭載メモリ 6GByte に近い. このため, OS 側でメモリスワップが発生したと推定される.

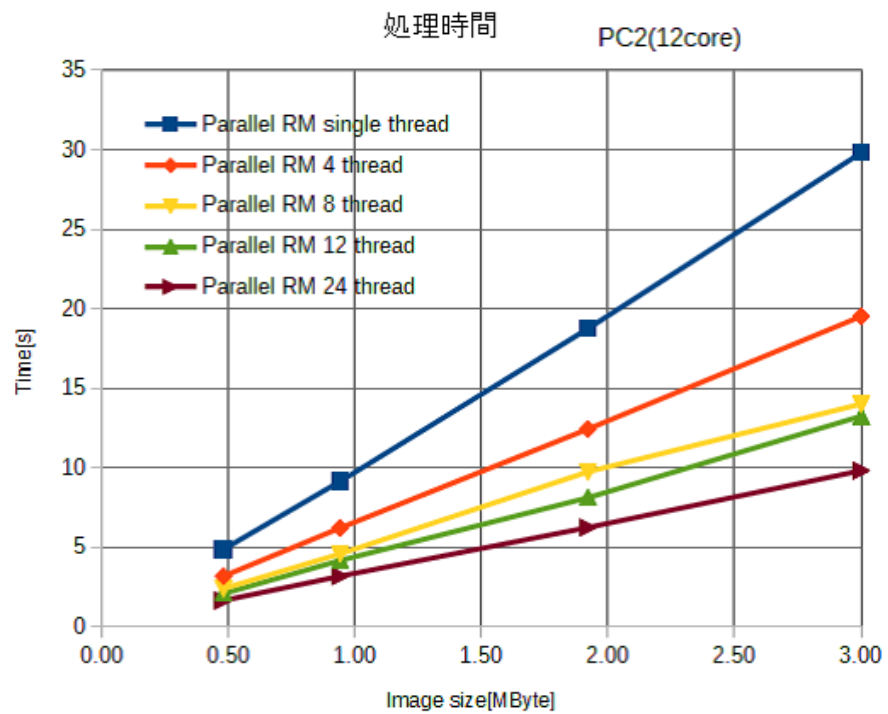
## 4.9 むすび

本章では, 従来の RM 法の課題であったメモリ使用量の多さ, 及び, 処理時間の長さを解決するため, 画素単位で合焦評価値を計算・合成する方法を示した. RM 法では二度行われる平均化処理を一度の総和計算に近似することで, 画素ごとの処理へと置き換えた. 画像を用いた奥行き推定の性能検証では, 従来法と同程度であることを実証した. 画素ごとの処理に置き換えたことで, 画素ごと並列化処理によって, 処理時間の大幅な短縮が実現できた. 更に, メモリ使用量を  $1/3$  程度まで低減することに成功した. メモリ使用量を削減できたため, メモリスワップを発生させることなく, 高画素の画像でも処理できることを示した.

しかし, 若干ではあるが, テクスチャの少ない領域での性能が低下している. 次章では, 奥行き推定性能のさらなる改善を図る.



(a) PC1



(b) PC2

図 4.7: CPU による並列化処理時間



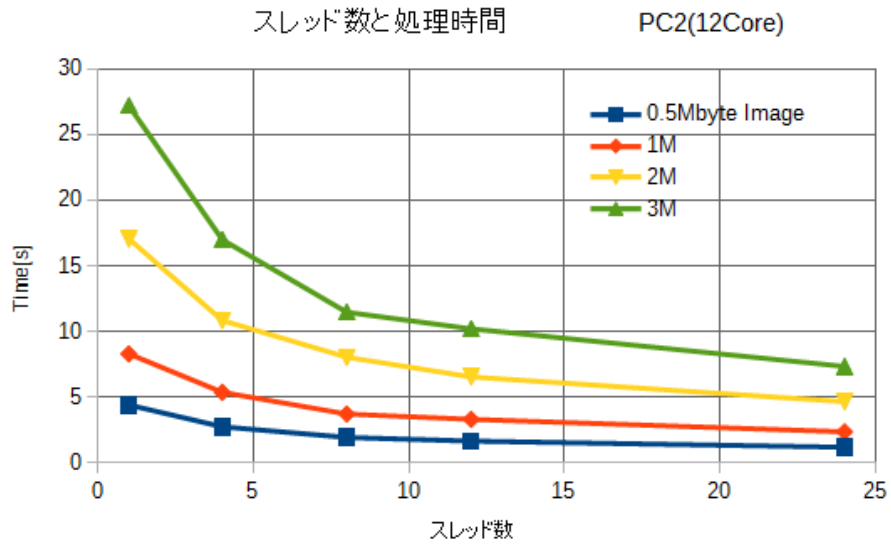


図 4.8: CPU による並列化処理時間. スレッド数による処理時間の推移

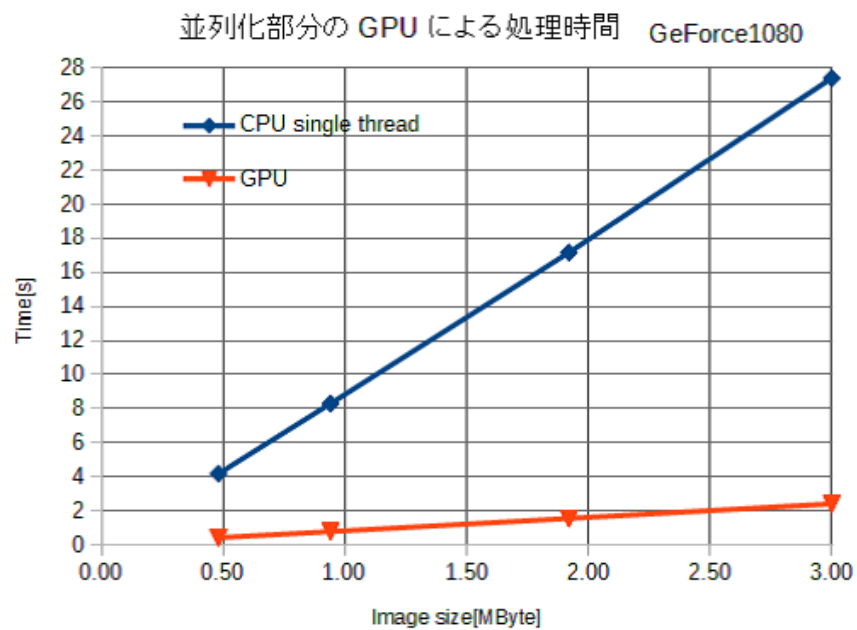


図 4.9: GPU による並列化処理時間

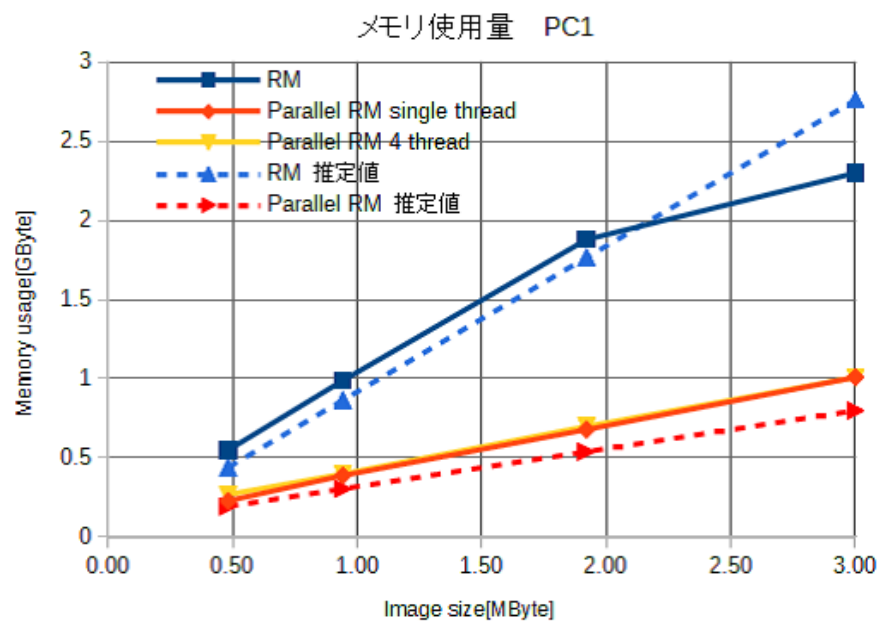


図 4.10: メモリ使用量の比較. 点線で示した推定値と実線で示した実測値とがほぼ一致する.

## 第5章

# 打切り RM 法

---

### 5.1 RM 法・並列化 RM 法の課題と改善

前章で指摘したように、並列化 RM では、テクスチャの少ない領域での奥行き推定性能が若干劣化する傾向がある。この対応方法として、窓半径  $R$  を大きくすることが考えられる。しかし、RM 法、並列化 RM 法では窓半径範囲  $r \in \{1, \dots, R\}$  の全てにおいて処理を行い、合焦評価曲線の鋭さに応じた重みで合成している。このため、 $R$  を大きくすると、大きな窓半径の影響が合焦評価曲線に含まれることになり、輝度変化のあるエッジの推定精度が劣化する可能性がある。図 5.1 は、図 3.5(c)Depth2 の画像に対して、 $R = 10$  と  $R = 20$  における並列化 RM 法での奥行き推定結果である。図 5.1(a) の赤線部分の断面波形を (d) に示す。断面波形の中央エッジに注目すると、 $R = 10$  よりも  $R = 20$  のエッジ位置の方がズレているのが分かる。このように、 $R$  を広げると推定結果が悪化することがある。

また、 $R$  を大きくすると、比例して処理時間が延びるという問題もある。

そこで、画素ごとに窓半径の範囲を変化させること、すなわち、窓半径を走査する処理を途中で打ち切ることを考える。並列化 RM 法では、画素ごとに処理を行うため、画素ごとに窓半径の走査を途中で打ち切ることが容易に出来る。合焦評価値の変化に応じて、窓半径の走査を途中で打ち切ること、エッジ周辺及び、テクスチャの少ない領域での合成精度向上が期待できる。この手法を以降、打切り RM 法と呼ぶ。

### 5.2 打切り RM 法での合焦評価値の選択

打ち切りを行う処理は、図 4.1(b) のフロー中の”by the window radius” で囲った処理である。打ち切り処理での窓半径範囲は  $r \in \{2, \dots, R\}$  とし、 $r = 1$  は除外する。 $r = 1$  での合焦評価曲線がきれいな単峰になることが経験的に少なかったためである。また、 $R$  は従来の値よりも大きな値とする。ここでは、 $R = 20$  とする。打ち切り処理のフローを図 5.2 に示し、以下に、フローの説明をする。

1. 合焦評価曲線  $\Phi_z^r$  の特徴量算出 : まず, 合焦評価曲線の最大値 ( $\text{phiMax}$ ), 最大値位置 ( $\text{phiMaxZ}$ ), 最小値 ( $\text{phiMin}$ ), 平均値 ( $\text{phiAvg}$ ) を算出する. 次に, 曲線が平均値を横切って超えた回数 ( $\text{peakCnt}$ ) をカウントする. また, 平均値を超えた開始点と平均値以下になった終了点の幅 ( $\text{phiWidth}$ ) を計算する.
2. 打切りモードの判定 : 単峰かつ山が十分に高いときに打切りモードを ON とする. 具体的には以下の式で判定する.  $\text{peakCnt} = 1$  かつ  $0.5 < (\text{maxPhi} - \text{minPhi}) / \text{maxPhi}$  が成り立つとき打切りモードを ON とする. また, このときの  $\text{phiMaxZ}$  を  $\text{phiMaxZ0}$  として記憶する. 更に, このときの合焦評価曲線  $\hat{\Phi}_{x,y}^r(z)$  を記憶する ( $\Phi_{\text{best}}$ ).
3. 打切り判定 : 打切りモードが ON の場合, 打切るかどうかの判定を行う. 以下のいずれかの条件を満たした場合に打切りとする.
  - 重みが小さくなった. 式 (3.8) の重み  $\alpha^r$  が,  $\alpha^{r-1}$  よりも小さくなった場合. なお, 重みの値が増加した場合,  $\Phi_{\text{best}}$  をこの窓半径での合焦評価曲線  $\hat{\Phi}_{x,y}^r(z)$  で更新する.
  - ピーク位置が変動した. ピーク位置が山の幅と比較して大きく変動した場合すなわち  $|\text{phiMaxZ} - \text{phiMaxZ}| / \text{phiWidth} > 0.5$  の場合.
  - 前述の 2 つの条件を 5 回連続して満たさない場合.
4. 合焦評価曲線の合成 : 従来の RM 法では, 式 (3.6) で合焦評価曲線を合成している. 本手法では,  $\Psi_{x,y}(z) = \Phi_{\text{best}}$  とする. すなわち, 打切り処理の課程で最大の重み値をとった時の窓半径において, 式 (3.6) の  $\alpha_{x,y}^r$  を 1 とし, それ以外では 0 とした場合と同等となる.

なお, 打切りが行われなかった場合は,  $r = R$  での合焦評価曲線が使用される.

### 5.3 打切り RM 法のシミュレーション画像での評価

3.8 章と同様に, シミュレーション画像を用いて性能を評価する. 画像には, 図 3.5 の画像を用いた. 奥行き推定結果と RMSE の結果を図 5.3 と図 5.4 及び表 5.1 に示す. RMSE で比較すると, 並列化 RM 法と比べ, 打切り RM 法の方が多くの場合で良い結果となっている. 特に, ノイズを付加した画像については, 大幅に改善している. これは図 5.4 から確認出来る. ノイズの影響があると打切りが働かず, 結果として最大の窓半径  $R$  での合焦評価曲線が採用される. すると窓半径が大きいために, ノイズの影響が薄らぐためと考えられる.

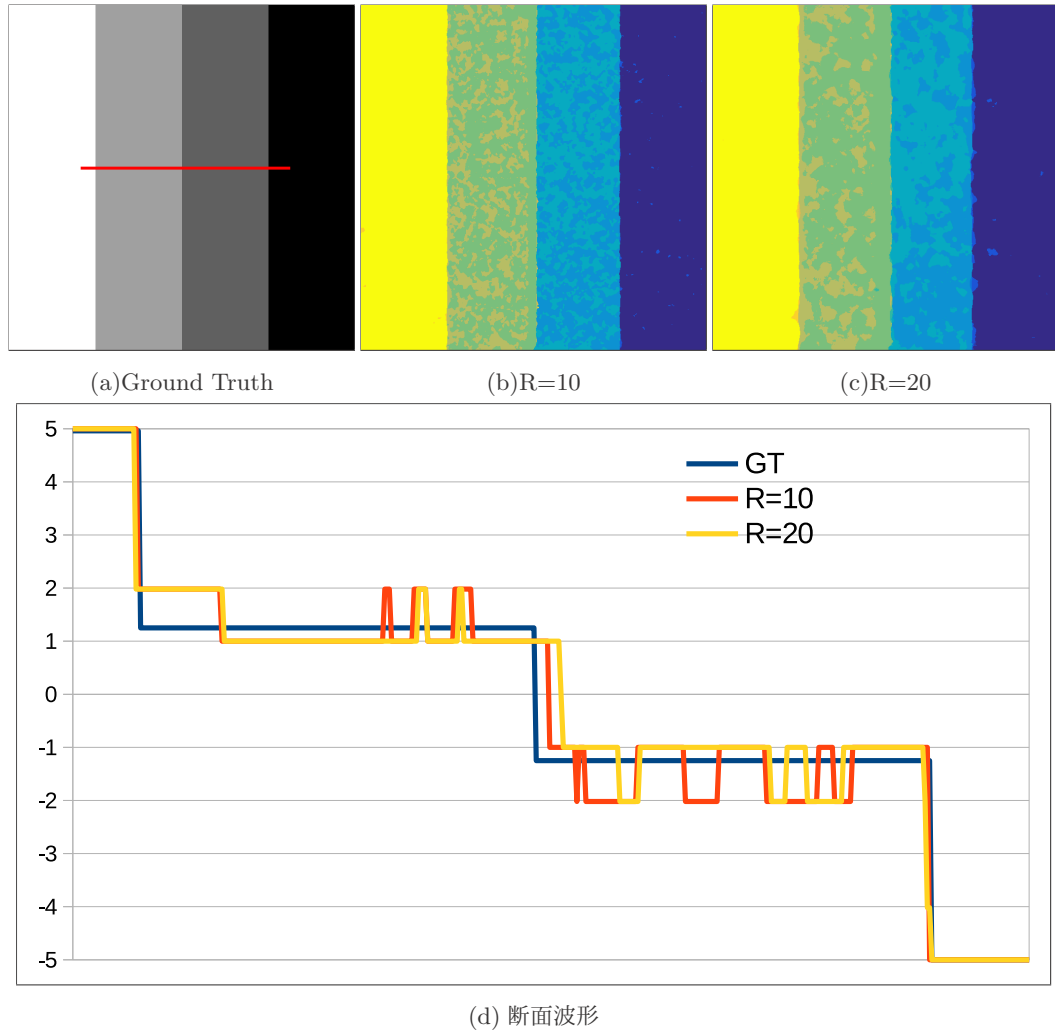


図 5.1: 窓半径の範囲を変更したときの推定結果と断面波形

また、図 5.5 では Depth2 の画像について、図 5.1(d) と同様に断面波形でも確認を行った。中央のエッジを比べると、打切りを行わない  $R = 10$  の並列化 RM 法よりも、打切り RM 法の方が正解に近い結果となっており、打切り処理の効果が確認された。

## 5.4 打切り RM 法の実画像での評価

打切り RM 法について、実画像での評価を行った。用いた画像は、図 3.10(a) の画像である。ここでは、 $800 \times 600 \approx 0.5\text{M}[\text{byte}]$  画素の画像を  $Z = 20$  枚使用した場合と、 $1600 \times 1200 \approx 2\text{M}[\text{byte}]$  画素の画像を  $Z = 20$  枚使用した場合で評価を行った。なお、 $0.5\text{M}[\text{byte}]$  の画像は、 $2\text{M}[\text{byte}]$  の画像をサブサンプリング（単純な間引き）することで作成した。

これらの画像に対して、RM 法、並列化 RM 法、打切り RM 法の 3 種類で比較を行った。図 5.6 に結果を示す。画像下部の暗部はテクスチャが少なく正しく推定できていない箇所が

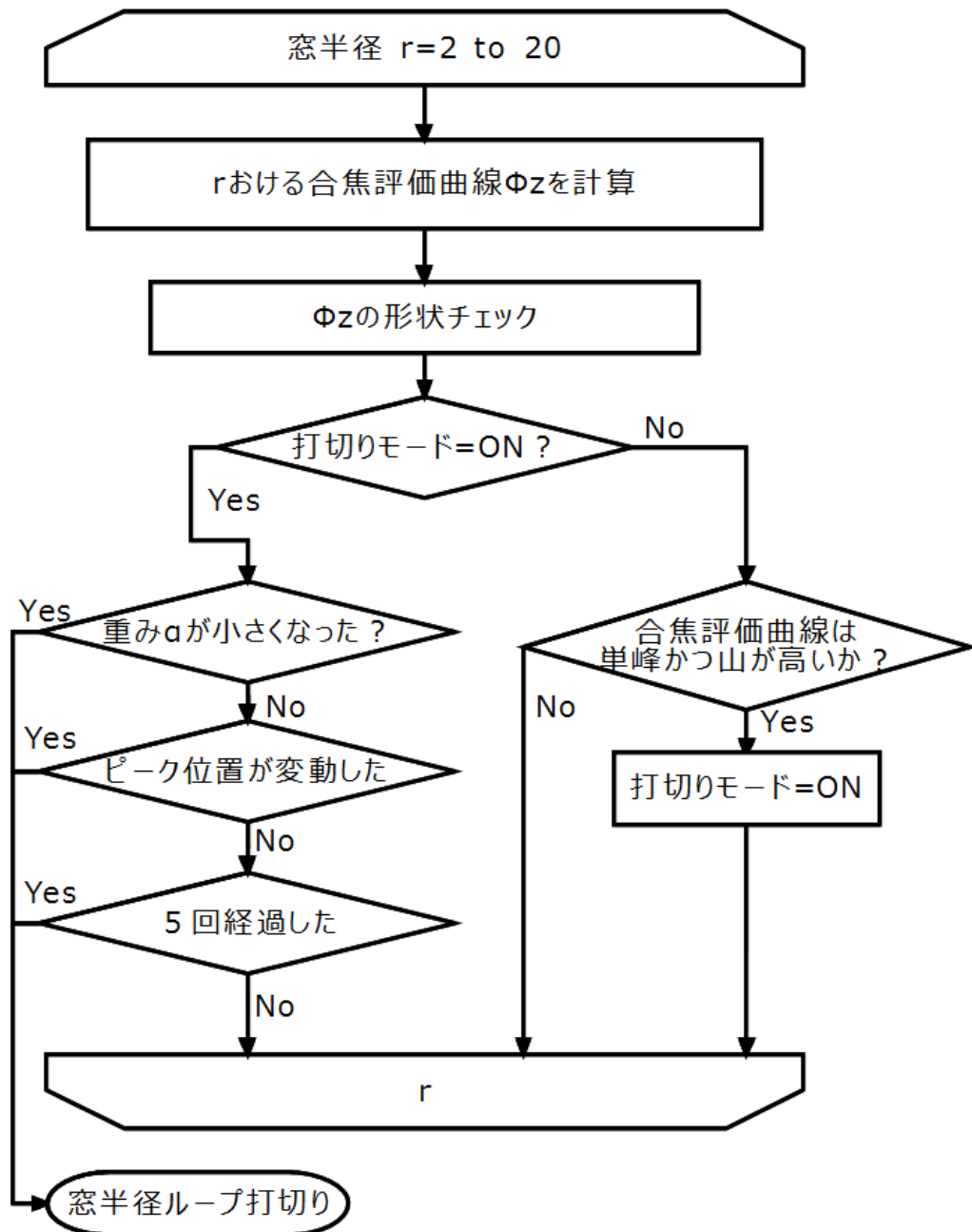


図 5.2: 打切り処理のフロー

多い。特に 2M 画像では、顕著となる。画像下部の暗部はテクスチャが少なく、もともと推定が難しい。その上に、撮影時のカメラの電気ノイズにより、合焦位置を誤っていると考えられる。

推定精度を向上させる方法として、より広い窓範囲で合焦評価値を計算する方法や、式 (4.4) の  $d$  を大きな値にすることが考えられる（現状は常に  $d = 3$  としている）。しかしいずれもエッジ周辺の合成精度を悪化させることが予想される。このことから、各画像に対してメディ

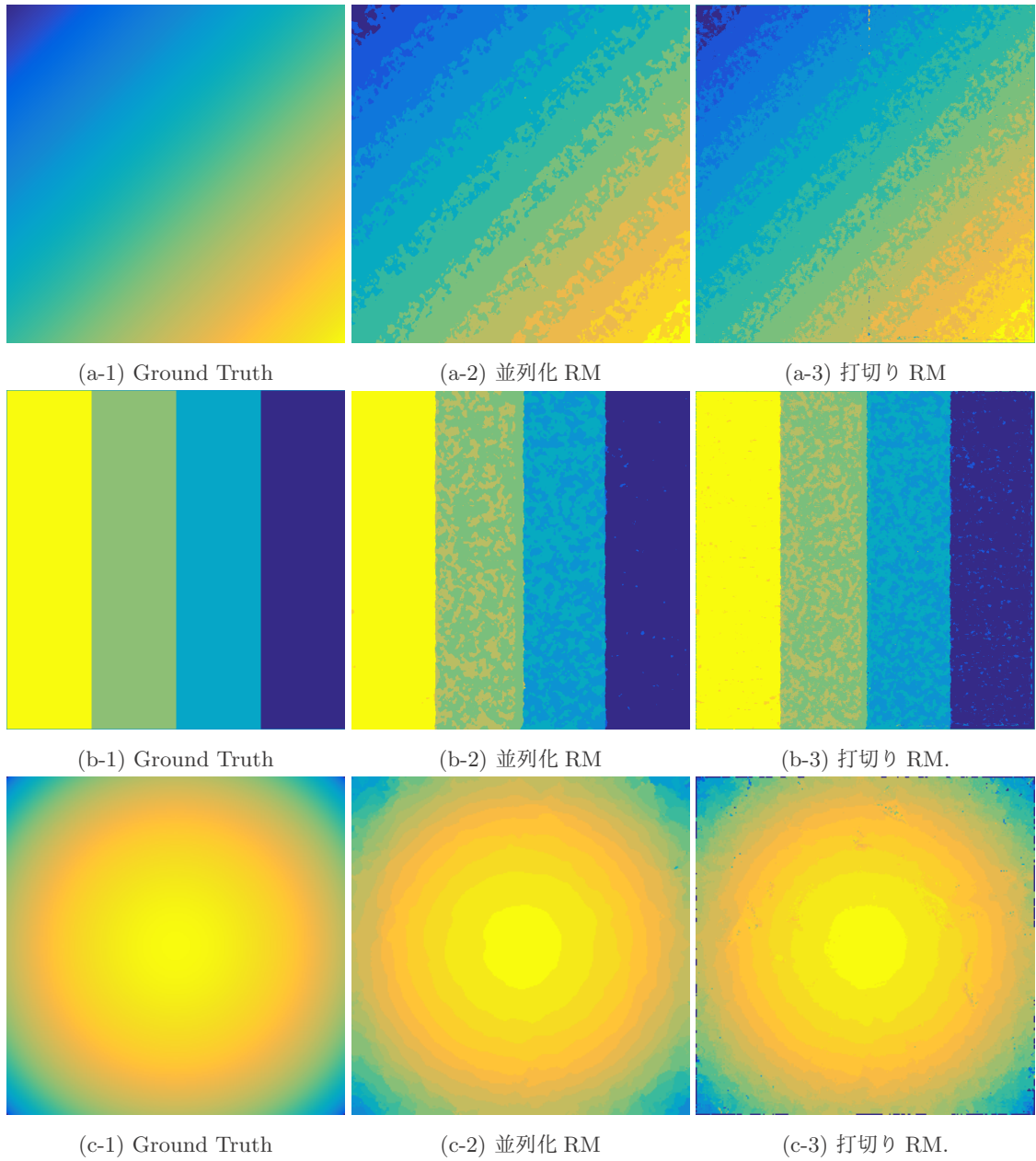


図 5.3: 打切り RM 法での奥行き推定結果

アンフィルタをかけ、その画像に対して奥行き推定を行うこととする。メディアンフィルタのカーネルサイズは $3 \times 3$ とする。メディアンフィルタはエッジを保存しつつ、ノイズを除去する性質がある。しかし、一種の平滑化フィルタであるので、なるべく影響を抑えるためカーネルサイズを小さくする。

メディアンフィルタをかけた画像に対しての奥行き推定結果を図 5.7 に示す。メディアンフィルタをかけることで、大幅に改善されたことが分かる。また、(c) 打切り RM 法が最も良い奥行き推定結果となっている。



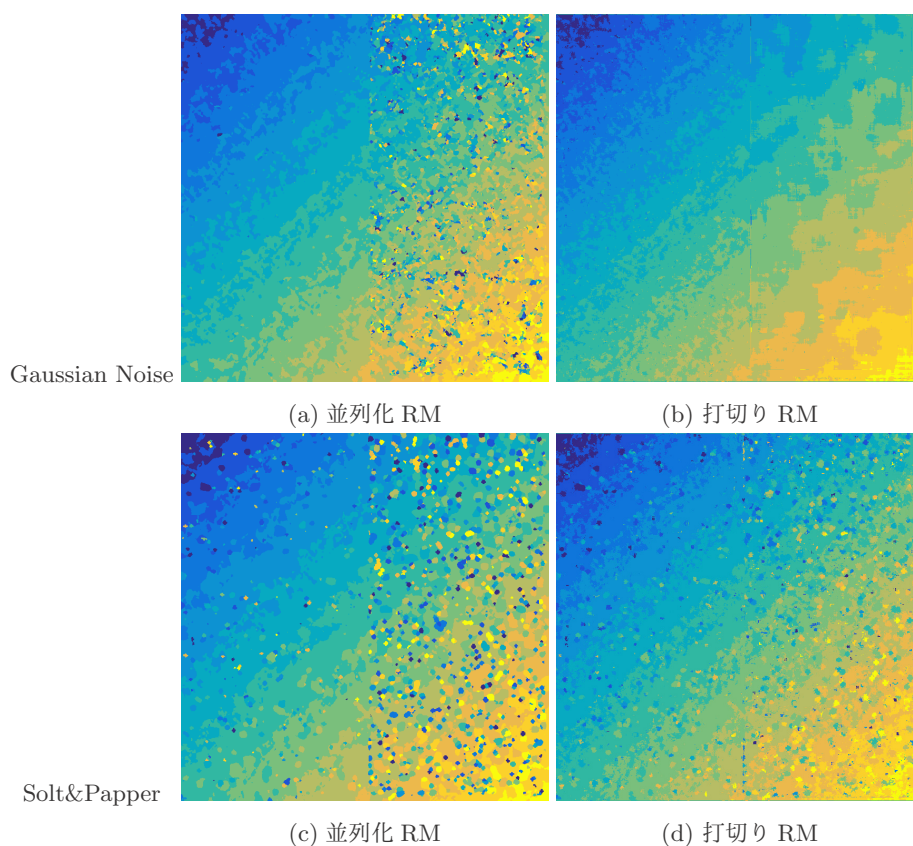


図 5.4: ノイズを付加した画像の打切り RM 法での奥行き推定結果

表 5.1: 打切り RM 法の二乗平均平方根誤差

方法		並列化 RM 法	打切り RM 法
Depth 1	中央	9.3	9.1
	全体	9.3	10.1
Depth 1 +Gaussian Noise	中央	20.8	11.5
	全体	26.9	11.4
Depth 1 +Solt&Papper Noise	中央	28.9	19.6
	全体	32.8	20.9
Depth 2	中央	18.7	16.0
	全体	12.0	11.7
Depth 3	全体	2.9	4.0

また，3.9 節で用いた画像についても評価を行った．こちらの画像に対しては，メディアンフィルタはかけていない．結果を図 5.8 に示す．(a-\*) の金属と樹脂成形品の画像については，打切り RM 方の (a-3) において，赤い矢印で示した箇所にアーティファクトが生じている．この部分は，高さはほぼ平坦であるが，2 種の材質が密着している箇所である．密着境界部が照明により光っている．打切り RM 法では  $r = 3 \sim 5$  程度の比較的小さい窓半径で打ち切られており，撮像時に生じる微妙な位置ズレにより，このようなアーティファクトが生

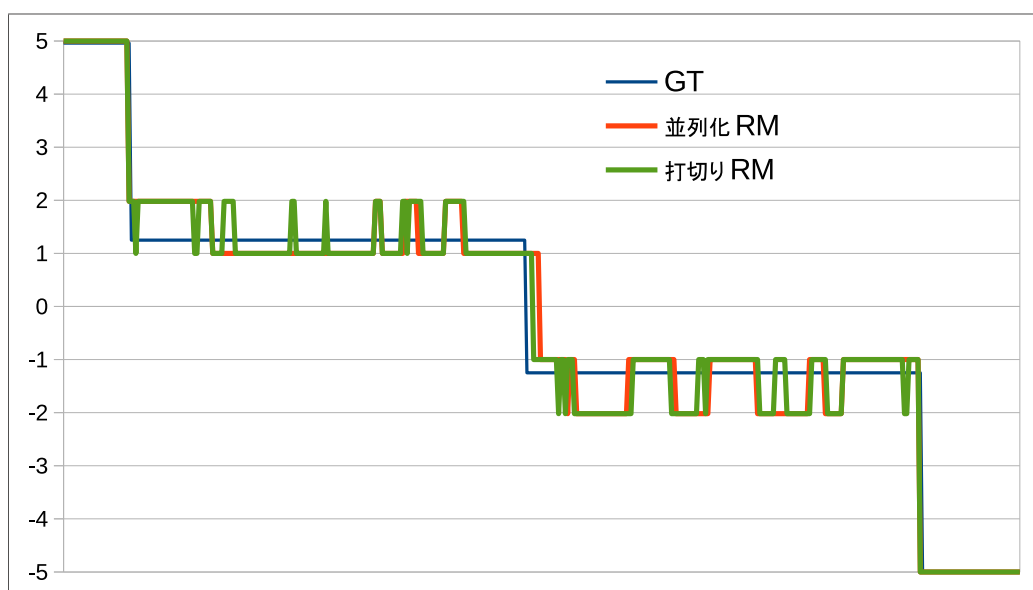


図 5.5: Depth2 画像の断面波形での比較

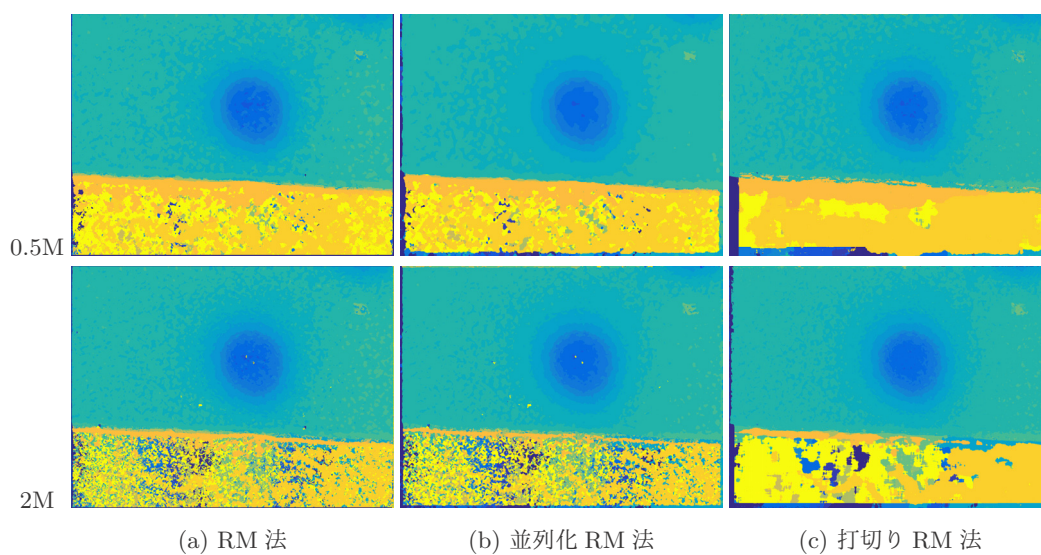


図 5.6: 実画像での奥行き推定の比較

じていると考えられる。並列化 RM 法では、 $r \in \{1, \dots, 10\}$  の合成であるため、微妙な位置ズレの影響が緩和されているものと考えられる。

一方、(b-\*) の花の画像では、打切り RM の方が微細な形状が再現されているように見られ、打切りによる良い効果があらわれている。

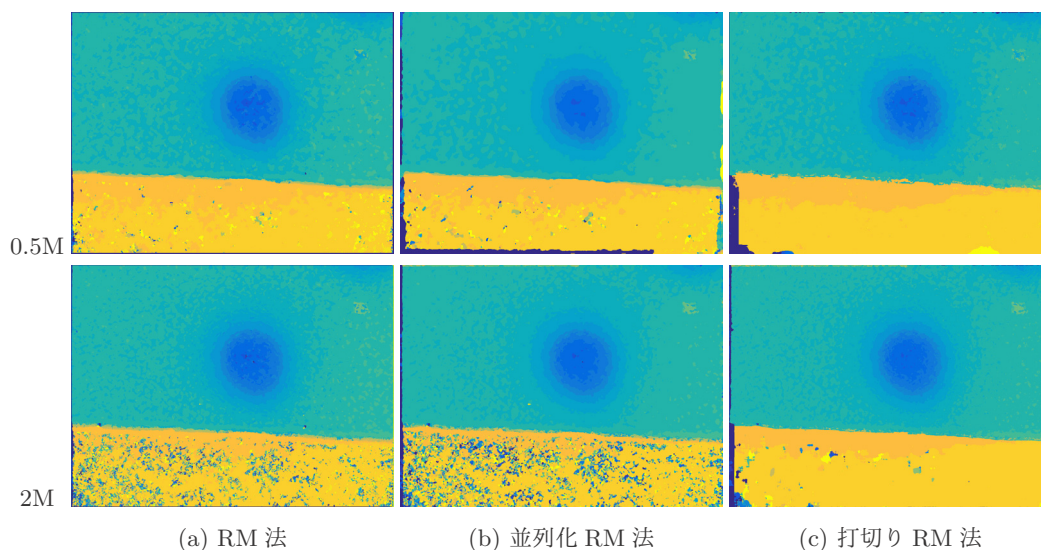


図 5.7: メディアンフィルタをかけた画像に対しての奥行き推定の比較

## 5.5 むすび

本章では，並列化 RM 法で若干劣化したテクスチャの少ない領域での復元性能を向上させつつ，大きな輝度変化のあるエッジ周辺の復元性能も向上させるため，窓半径の走査を途中で打ち切る手法を提案した．シミュレーション画像と実際の画像での実験により，その効果が確認出来た．また，ノイズに対する耐性が著しく向上することも確認出来た．一方，実画像によっては，テクスチャの少ない領域を正確に復元出来ない場合があることが分かった．これは打切り RM 法特有の問題ではなく，RM 法および他の DfF 法でも発生する問題と考える．原因は，電子ノイズの影響と考えられ，各画像に対して，メディアンフィルタの前処理を行うことで，大きく改善できることを示した．

メディアンフィルタの有無以外のパラメータは同一のまま，高画素数の実画像に対しても奥行き推定が出来ることを示した．高解像度の画像では，1.4 節の許容錯乱円が小さくなり，結果として奥行き推定の精度を高まると考えられる．



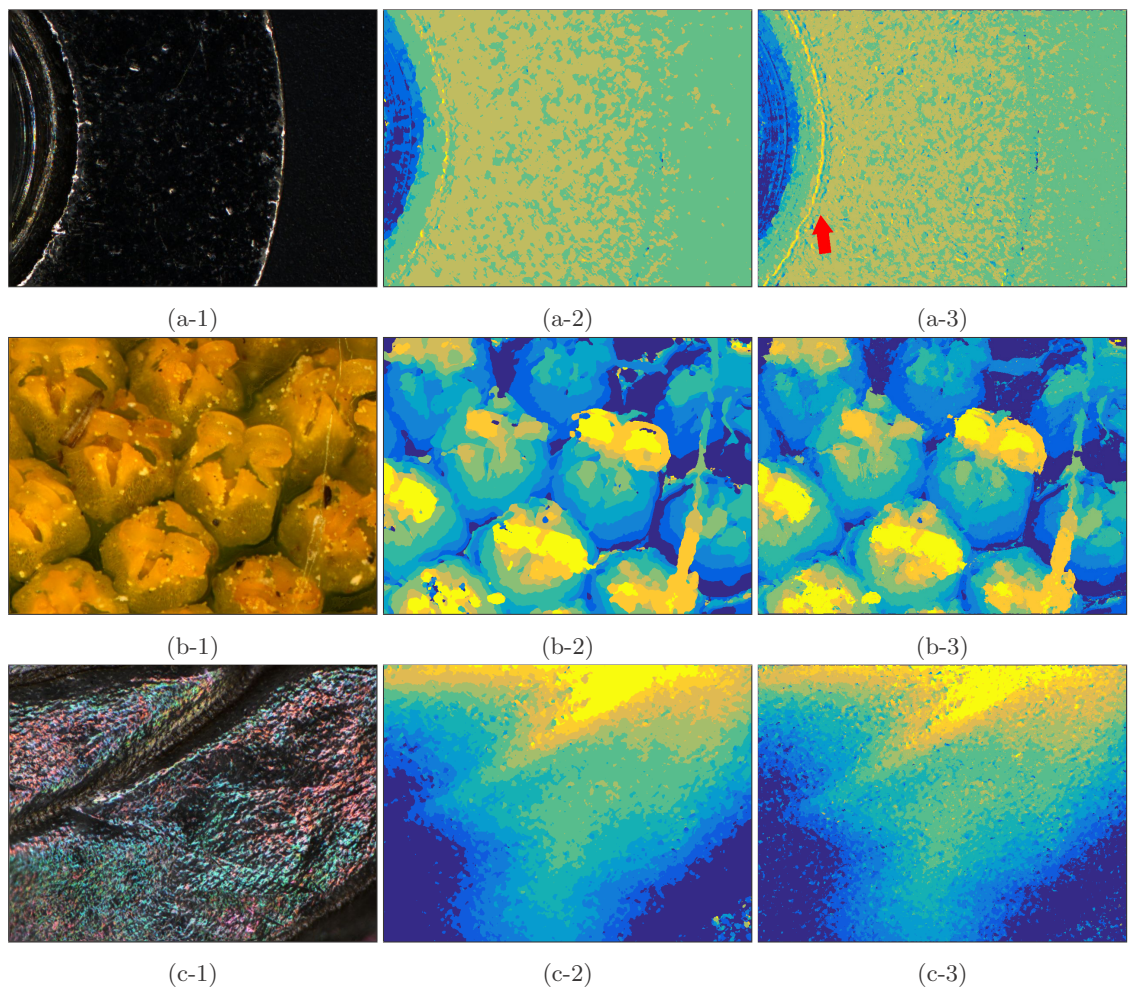


図 5.8: 実画像を用いた奥行き推定. 左から (\*-1) は全焦点画像, (\*-2) は並列化 RM 法, (\*-3) は打切り RM 法. 画像は上段から (a-\*) は金属と樹脂の成形品, (b-\*) はマーガレットの花, (c-\*) は羽アリの羽である

## 第6章

# 結論

---

### 6.1 本論文の成果

本論文では、奥行き推定方法である DfF 法における 2 つの課題

(i) 大きな輝度変化をもつエッジの周辺で合焦評価に失敗する

(ii) テクスチャが少ない平坦領域で奥行き推定精度が低下する

に対して、複数の窓幅で合焦評価値を計算し、それらから得られる合焦評価曲線を曲線標準偏差 (CSTD) に基づく重みで合成する手法を提案した。大きな輝度変化をもつエッジの周辺では、合焦評価曲線が多峰になる場合や鋭いピークにならない傾向があり、そのような曲線は重みを小さく合成することで、(i) の課題を改善した。また、合焦評価値は、注目画素の輝度値と周辺画素の平均輝度値の間にポアソン分布の関係があるに基づいて、注目画素の画素値とその周辺画素の平均値の比を用いて算出する方法を提案した。この手法で、画像の暗部や平坦部分のテクスチャの少ない領域での、奥行き推定精度が向上し、課題 (ii) が改善することを示した。以下では、本論文の主たる成果についてまとめる。

1. 画像の焦点の合い具合を示す指標である合焦評価値を計算する方法として、RM 法を提案した。RM 法では注目画素の画素値とその周辺画素の平均値の比 (RM 値) を用いる。あわせて、注目画素の輝度値と周辺画素の平均輝度値の間にポアソン分布の関係があることも示した。RM 値の計算を複数の窓半径について行い、これらの合成には Frommer らの AHO 法 [37] を用いる。すなわち、合焦評価曲線の鋭さに応じた指標である CSTD を用いて合成する。シミュレーション画像と実画像を用いた実験を通じて、AHO 法を上回る奥行き推定精度が得られることを示し、DfF 法の課題を改善した。

また、AHO 法で示されたアグリゲーション手法を一部改良し、過度な平滑化の抑制による奥行き推定精度の向上と、高速化を実現した。

2. RM 法では、合焦評価曲線を合成するために、画像ごとに複数の窓幅での RM 値を保持する必要がある。このため大量のメモリを使用し、また処理時間も長かった。この問題解決のため、RM 値の計算方法を近似し、画素ごとの計算を可能とした。合焦評価曲線の合成を画素ごとに行うため、メモリ使用量を大幅に削減できることをシミュレーションで示し、実際の動作環境でも、シミュレーション通りのメモリ使用量削減を確認した。

また、画素ごとの計算とすることで、並列化による高速化が可能となった。実際に並列化したコードを記述し、CPU、GPU での処理速度を測定したところ、数分の 1 から 1/10 程度に処理時間を短縮できることを確認した。

奥行き推定の性能は、RM 法とほぼ同等となることを、シミュレーション画像や実画像で示し、近似計算の妥当性を確認した。

3. 並列化 RM 法は、RM 法とほぼ同じ性能ではあるが、テクスチャの少ない領域で若干性能が低下する傾向があった。対処法として、より広い窓半径について処理を行うことで対応できるが、そうすると、エッジ部分が鈍ってしまうという弊害がある。そこで、画素ごとに窓半径の範囲を変える打切り RM 法を提案した。この方法により、テクスチャの少ない部分の性能向上と、あわせてエッジ部分の性能も向上出来ることを示した。

打切り RM 法では、高画素数の画像についても評価を行った。画像によっては、前処理としてのメディアンフィルタが必要であったが、その他のパラメータは変えることなく奥行き推定を行うことが出来ることを示した。同一光学系であれば、高画素にすることで許容錯乱円が小さくなり、被写界深度が小さくなる。従って、奥行き精度が向上することが期待される。

最後に、図 1.2 で示した市販デジタルマイクロスコップで撮像・保存した画像を用い、打切り RM 法での奥行き推定画像を図 6.1 に示す。合焦と判断した画像の輝度から、全焦点画像も作成しあわせて示す。なお、使用したデジタルマイクロスコップでのファイル出力が JPEG のため、デジタルマイクロスコップ内の処理に用いられている画像よりも劣化した画像を使用した結果である。

図 1.2 と図 6.1 を比較すると、打切り RM 法の方が、チップ抵抗正面の暗い部分の境界が、きちんと得られていることが分かる。一方でチップ抵抗左側の、ほとんどテクスチャのない暗いパッド部分は、正確には推定できてはいない。この部分は、周辺から推定するなどしていると思われる市販マイクロスコップでの出力の方がやや自然かもしれない。

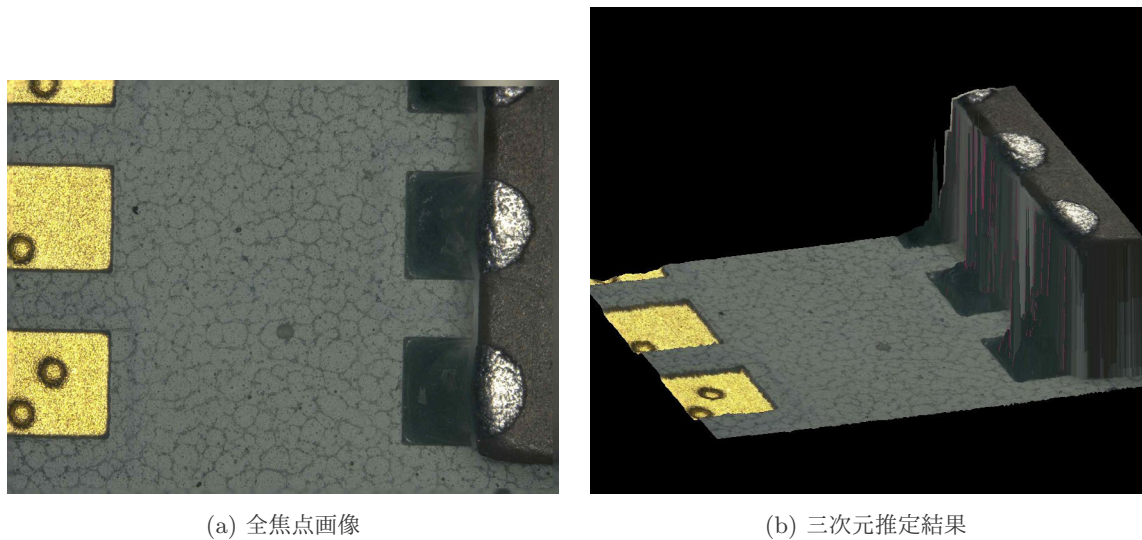


図 6.1: 市販デジタルマイクロスコップで撮像した画像を打ち切り RM 法で奥行き推定した結果

## 6.2 今後の課題と展望

RM 法およびその改良法により、様々な画像に対して、適用的に奥行き推定を行うことが可能となった。奥行き推定に必要なパラメータ調整もほとんど不要であり、実用性は高い。一方で、実用上は必要であるが、研究が不十分だった課題もある。

1. 奥行き値の補間：奥行き値の補間方法については、3.7 節で述べている。シミュレーション画像に対して半値補間が最も良い精度で補間が出来た。しかし、実画像では一部で異常値が出ることもあり、実用上は三点補間が優れている印象であった。しかし、実際の補間精度は測定できていない。実際のアプリケーションとして活用するには、どの程度の精度で奥行きが推定できるかを把握する必要がある。実際の精度を測るには、形状が既知な対象物を測定し、奥行き推定を行って比較することが必要である。このとき、奥行きを撮像する間隔を変えて、補間精度を評価することも重要と思われる。
2. テクスチャのない領域：本論文では、テクスチャの少ない領域での復元性能を高めるため、研究を進めた。しかし、実際には全くテクスチャのない領域も存在する。例えば、顕微鏡下で、ガラスプレート上に測定物を置いた場合、ガラスプレート部分はテクスチャがない。現在の手法だと、テクスチャがない部分も何らかの奥行き値が与えられてしまう。これを回避する方法として、合焦評価曲線の信頼度を評価し、信頼度が低い画素は、奥行き推定から除外する方法が提案されている [33]。同様の手法でテクスチャのない領域を特定する必要があるが、信頼度をある一定の閾値で背景かテクスチャかに切り分ける必要があり、様々な画像に対して閾値を一定に固定できるかどうかは不明であり検討課題である。



3. 位置ズレ補正：顕微鏡下で作動距離を変化させて撮像する場合，平面方向の位置ズレが発生しやすい．また，作動距離が変化すると物体の大きさも変化する．位置ズレや大きさの変化を考慮せずに奥行き推定を行うと，対象物の異なる点同士を比較することになるため，奥行きに誤りが生じる．

位置ズレについては，画像ごとに位置合わせを行うことで概ね対応可能であるが，大きさが変わると位置合わせが出来なくなる．画像の部分ごとに位置合わせを行うことも考えられるが，二次元形状が変化してしまう可能性があり，大きな課題である．現状としては，光学的にこの問題が生じないよう，作動距離に対して視野が変化しにくいレンズ（テレセントリックレンズ）を使用するか，焦点距離を変えられるレンズを使用するかの対応となる．

DfF 法は古くから研究されてきたテーマであるが，撮像デバイスの高性能化で，高速に複数の奥行きを撮像することが可能となってきた．このため，より高速かつ安定した方法で奥行きを求めることが出来れば，今後応用範囲が広がる可能性があると考ええる．

## Appendix

### 並列化 RM 法のソースコード

```
#include<stdio.h>
int ParallelRM(){
    for ( int z = 0 ; z < Z ; z++ ) {カラー画像をグレイ画像に変換
        //
        Color2GrayImg( &m_GrabBmp[z], &grayBmp ) ;メディアンフィルター
        //
        if ( bUseMedian ) {
            filter.Mediun9( &grayBmp, &grayBmp ) ;
        }微分画像作成
        //
        filter.ModifiedLaplacian9( &grayBmp, &lapBmp ) ;範囲総和テーブル作成

        //
        filter.MakeIntegralImage( &grayBmp, &integralBmp[ z ] ) ;
        filter.MakeIntegralImage( &lapBmp, &integralBmp2[ z ] ) ;
    }スレッド起動指定されたスレッド分)

    //(各スレッドごとに、合焦評価値の計算と合成を行う
    //
    CreateThread() ==> ProcessRM;スレッド終了待ち

    //
    WaitThread;アグリゲーション

    //…奥行き値の補間

    //…

}処理部分

//
int ProcessRM(){

    for ( int r = 0 ; r < R ; r++ ) 窓半径分のループ{//
```

```

int step = r ;合焦評価値

// Focus Measure の計算
for ( int z = 0 ; z < Z ; z++ ) 画像枚数分のループ{//Σ
    // I
    Sum_I = filter.SumByIntegralImg( x, y, step, step, &integralBmp[z] )
        ;Σ

    // L
    Sum_L = filter.SumByIntegralImg( x, y, step, step, &integralBmp2[z] )
        ;φ

    //
    phiVal[z] = Sum_L / ( Sum_I + epsilon ) ;

}最大値で正規化
//
int val ;
double maxDer = 0 ;
for ( int z = 0 ; z < Z ; z++ ) {
    if ( maxDer < phiVal[z] ) maxDer = phiVal[z] ; φ最大値を求める //
}
for ( int z = 0 ; z < Z ; z++ ) {
    if ( maxDer != 0 ) phiVal[z] = phiVal[z] / maxDer ; 最大値で正規化 //
}合焦評価値の合成

//////////重み計算

//
centroid = 0 ;    pVaSum = 0 ;    maxVal = 0 ;
for ( int z = 0 ; z < Z ; z++ ) {φ
    //z^r の重心を求める
    pVaSum += phiVal[z] ;
    centroid += phiVal[z] * z ;
    if ( maxVal < phiVal[z] ) {
        maxVal = phiVal[z] ;
    }
}
if ( 0 < pVaSum ) {
    uij = centroid / ( double)pVaSum ;
} else {
    uij = 0 ;
}積分して

//C1 , σxy^r を求める
double C1 = 0 ;
double s = 0 ;
double sxy ;
for ( int z = 0 ; z < Z ; z++ ) {
    C1 += phiVal[z] ;

```

```

        if ( maxVal / 2 <= phiVal[z] ) {  最大値の半値以上のもののみ積分//
            s += ( z - uij )*( z - uij )* phiVal[z] ;
        }
    }
    if( C1 ) {
        sxy = sqrt( s / C1 ) ; //  $\sigma_{xy}^r$ 
    } else {
        sxy = 0 ;
    }  $\alpha$ 

    //xyr を求める
    double axy = 1/( 1 + sxy * sxy / rou / rou ) ;  $\Psi$ 
    //xy(z) に加算していく
    for ( int z = 0 ; z < Z ; z++ ) {
        double psi = m_PsiBmp[z].GetColorF(x,y) ;
        double psi2 = psi + ( axy * phiVal[z] ) ;
        m_PsiBmp[z].SetColorF(x,y,(float)psi2 ) ;  $\Psi$  //xy(z)
    }
}
}

```

## 参考文献

- [1] 橋本学 and 鷺見和彦 and 坂上義和 and 川戸慎二郎, “輪郭点情報を用いた高速テンプレートマッチングアルゴリズム,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol. J74-D2, no. 10, pp. 1419–1427, 1991.
- [2] 佐藤宏介 and 横矢直和, “測定手法の種類と基本原理-能動的手法を中心として-,” 計測と制御, vol. 34, no. 6, pp. 435–439, 1995.
- [3] 林恭平 and 青戸智浩, “白色干渉法を用いた高精度非接触距離計測システムの開発,” 精密工学会学術講演会講演論文集, vol. 2014, pp. 123–124, 2014.
- [4] 北川克一, “産業用光干渉計測技術開発の 20 年を振り返って (キーノートスピーチ),” 精密工学会学術講演会講演論文集, vol. 2014, pp. 119–120, 2014.
- [5] Y. Y. Schechner and N. Kiryati, “Depth from defocus vs. stereo: How different really are they?” *International Journal of Computer Vision*, vol. 39, no. 2, pp. 141–162, 2000.
- [6] J. Pages, J. Salvi, R. Garcia, and C. Matabosch, “Overview of coded light projection techniques for automatic 3d profiling,” in *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*, vol. 1, 2003, pp. 133–138.
- [7] 古瀬達彦, 日浦慎作, and 佐藤宏介, “表面下散乱を抑制した三次元形状計測の高精度化,” no. 36, 2008, pp. 61–68.
- [8] D. Piatti and F. Rinaudo, “Sr-4000 and camcube3.0 time of flight (tof) cameras: Tests and comparison,” *Remote Sensing*, vol. 4, no. 4, pp. 1069–1089, 2012.
- [9] M. Perenzoni and D. Stoppa, “Figures of merit for indirect time-of-flight 3d cameras: Definition and experimental evaluation,” *Remote Sensing*, vol. 3, no. 11, pp. 2461–2472, 2011.

- [10] P. Favaro and S. Soatto, “Learning shape from defocus,” in *Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision-Part II*, 2002, pp. 735–745.
- [11] S. Zhuo and T. Sim, “Defocus map estimation from a single image,” *Pattern Recognition*, vol. 44, no. 9, pp. 1852–1858, 2011.
- [12] A. Levin, R. Fergus, F. Durand, and W. T. Freeman, “Image and depth from a conventional camera with a coded aperture,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 26, p. 70, 2007.
- [13] C. Zhou, S. Lin, and S. Nayar, “Coded aperture pairs for depth from defocus,” in *2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision*, 2009, pp. 325–332.
- [14] 東芝テリー株式会社, “知っておきたい撮影レンズの基礎,” pp. 14–15, 2016.
- [15] B. Bruno, “Liquid lens technology: Principle of electrowetting based lenses and applications to imaging,” 2005, pp. 227–230.
- [16] E. Krotkov, “Focusing,” *Int. J. Comput. Vis. (IJCV)*, vol. 1, no. 3, pp. 223–237, 1988.
- [17] J. L. Pech-Pacheco, G. Cristobal, J. Chamorro-Martinez, and J. Fernandez-Valdivia, “Diatom autofocusing in brightfield microscopy: a comparative study,” in *Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition. ICPR-2000*, vol. 3, 2000, pp. 314–317.
- [18] M. Ahmad and T. Choi, “Application of three dimensional shape from image focus in lcd/tft displays manufacturing,” vol. 53, pp. 1–4, 2007.
- [19] S. Nayar and Y. Nakagawa, “Shape from focus: an effective approach for rough surfaces,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automation (ICRA)*, 1990, pp. 218–225.
- [20] A. Thelen, S. Frey, S. Hirsch, and P. Hering, “Improvements in shape-from-focus for holographic reconstructions with regard to focus operators, neighborhood-size, and height value interpolation,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 18, no. 1, pp. 151–157, 2009.
- [21] Y. An, G. Kang, I. Kim, H. Chung, and J. Park, “Shape from focus through laplacian using 3d window,” in *2008 Second International Conference on Future Generation Communication and Networking*, vol. 2, 2008, pp. 46–50.



- [22] J. Kautsky, J. Flusser, B. Zitová, and S. Šimberová, “A new wavelet-based measure of image focus,” *Pattern Recognit. Letters*, vol. 23, no. 14, pp. 1785–1794, 2002.
- [23] G. Yang and B. Nelson, “Wavelet-based autofocus and unsupervised segmentation of microscopic images,” *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, pp. 2143–2148, 2003.
- [24] H. Xie, W. Rong, and L. Sun, “Wavelet-based focus measure and 3-d surface reconstruction method for microscopy images,” 2006, pp. 229–234.
- [25] A. S. Malik and T.-S. Choi, “Consideration of illumination effects and optimization of window size for accurate calculation of depth map for 3d shape recovery,” *Pattern Recognition*, vol. 40, no. 1, pp. 154–170, 2007.
- [26] L. Firestone, K. Cook, K. Culp, and K. Preston, “Comparison of autofocus methods for automated microscopy,” *Cytometry*, vol. 12, no. 3, pp. 195–206, 1991.
- [27] I.-H. Lee, M. T. Mahmood, and T.-S. Choi, “Robust depth estimation and image fusion based on optimal area selection,” *Sensors*, vol. 13, no. 9, pp. 11 636–11 652, 2013.
- [28] 山口竜宏, 仲野豊, and 吉田俊之, “帯域適応型 shape from focus / defocus 法について,” in *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010.
- [29] F. Helmli and S. Scherer, “Adaptive shape from focus with an error estimation in light microscopy,” *Proceeding of the International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, pp. 188–193, 2001.
- [30] S. Pertuz, D. Puig, and M. A. Garcia, “Analysis of focus measure operators for shape-from-focus,” *Pattern Recognit.*, vol. 46, no. 5, pp. 1415–1432, 2013.
- [31] M. Moeller, M. Benning, C. Schnlieb, and D. Cremers, “Variational depth from focus reconstruction,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 24, no. 12, pp. 5369–5378, 2015.
- [32] T.-S. Choi and J. Yun, “Three-dimensional shape recovery from the focused-image surface,” *Optical Engineering*, vol. 39, p. 1321, 2000.
- [33] S. Pertuz, D. Puig, and M. A. Garcia, “Reliability measure for shape-from-focus,” *Image and Vision Computing*, vol. 31, no. 10, pp. 725–734, 2013.

- [34] S. M. Mannan, H. Mutahira, A. Majid, and T.-S. Choi, “Recovering 3d shape of weak textured surfaces,” *2009 International Conference on Computational Science and Its Applications*, pp. 191–197, 2009.
- [35] C. Hazrba, L. Leal-Taix, and D. Cremers, “Deep depth from focus,” 2017.
- [36] T. Aydin and Y. S. Akgul, “A new adaptive focus measure for shape from focus,” 2008.
- [37] Y. Frommer, R. Ben-Ari, and N. Kiryati, “Shape from focus with adaptive focus measure and high order derivatives,” in *Proc. British Mach. Vis. Conf. (BMVC)*, 2015, pp. 134:1–134:12.
- [38] M. S. Muhammad and T.-S. Choi, “3D shape recovery by image focus using Lorentzian-Cauchy function,” *Proc. of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pp. 4065–4068, 2010.
- [39] S. Pertuz, “Shape from focus,” <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/55103-shape-from-focus>, 2016.
- [40] Y. Blanter and M. Bttiker, “Shot noise in mesoscopic conductors,” *Physics Reports*, vol. 336, no. 1, pp. 1–166, 2000.
- [41] J. Lewis, “Fast template matching,” in *Proc. Vis. Interface*, 1995, pp. 120–123.

## 発表論文

### 学会誌論文

1. 松原洋一, 白井啓一郎, 田中清, “ポアソン分布に基づく輝度偏差を用いた適用的合焦評価による Depth from focus 法”, 画像電子学会誌, vol. 46, no. 2, pp. 273–282, 2017

### 国際会議論文

1. Yoichi Matsubara and Yuya Ito and Keiichiro Shirai and Kiyoshi Tanaka , “A Study on Pixel-wise Parallel Calculation for Depth from Focus Using Gray Level Variance”, International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems(ISPACS2018), pp401–405, Nov. 2018.

### 国内学会発表

1. 松原洋一, 白井啓一郎, 田中清, “適応的に合焦範囲を選択する改良 Depth from Focus 法”, 画像電子学会年次大会, 2016
2. 松原洋一, 白井啓一郎, 田中清, “輝度偏差を用いた Depth from Focus 法の画素ごと並列化の検討”, 映像メディア学会技術報告, vol. 42, no. 26, pp. 9–12, 2018

## 謝辞

本研究を行うにあたり，お忙しい時間を割いて丁寧にご指導頂きました信州大学工学部田中清教授に心より感謝の意を表します．常に先の先を見据えた研究指導をして頂きました．ともすれば行き詰まりそうになった研究が前に進められたのはご指導の賜です．本当にありがとうございました．

本研究を進めるにあたり，特に学術的な側面から多大なるご指導ご協力を頂きました信州大学工学部白井啓一郎准教授に深く感謝申し上げます．画像処理，情報処理における近年の基本知識から論文のまとめ方に至るまで丁寧にご指導頂き心より御礼申し上げます．

本論文の高速化についてご協力頂いた信州大学工学部伊藤勇弥さんに感謝申し上げます．

本学大学院博士課程への入学と研究活動に対し，ご理解とご支援を賜りました，株式会社アイシスウェア様に，心から御礼申し上げます．マイクロスコープでの撮像実験にご協力頂きました，株式会社菊池光学様にも厚く御礼申し上げます．

信州大学工学部田中研究室の皆様には，学会発表，論文作成等に当りお世話になりました．感謝申し上げます．

最後に，日頃さほど文句も言わず研究生活を支えてくれた家族に感謝致します．